

日本惑星科学会 秋季講演会予稿集 2014

2014年9月24日(水) - 26日(金)

東北大学片平キャンパス さくらホール

共催：東北大学理学研究科

●一般講演会

日時：2014年9月23日（火・祝） 14:00～16:45

場所：東北大学片平さくらホール

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目 1-1

講演1： 題目：「はやぶさ2」が拓く宇宙探査

講演者：國中 均（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所・教授）

講演2： 題目：「はやぶさ2」が探る惑星科学

講演者：渡邊 誠一郎（名古屋大学大学院 環境科学研究科・教授）

●秋季講演会

日程：2014年9月24日（水）～9月26日（金）

場所：東北大学片平さくらホール

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目 1-1

口頭発表会場：2階会議室

ポスター発表会場：1階ラウンジ

会場へのアクセスは下記の秋季講演会ホームページをご参照下さい。

https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2014/index.html

講演数：口頭 107件，ポスター84件

（最優秀研究者賞特別講演および最優秀発表賞選考を含む）

●プログラム概要

○ 9月24日(水)

- 08:00 受付
- 09:00 特別セッション 最優秀発表賞選考
- 10:40 口頭発表セッション1 惑星大気
- 11:40 昼食
- 12:40 ポスターセッション1
- 14:00 口頭発表セッション2 系外惑星
- 15:10 口頭発表セッション3 惑星形成 I
- 16:50 口頭発表セッション4 惑星形成 II

○ 9月25日(木)

- 08:30 受付
- 09:00 口頭発表セッション5 惑星形成 III
- 10:10 口頭発表セッション6 表層進化・物質 I
- 11:30 昼食
- 12:30 ポスターセッション2
- 13:30 口頭発表セッション7 はやぶさ2
- 14:50 口頭発表セッション8 物質 II
- 16:30 総会
- 17:40 最優秀研究者賞特別講演
- 19:00 懇親会

○ 9月26日(金)

- 08:30 受付
- 09:00 口頭発表セッション9 月・内部構造
- 10:40 口頭発表セッション10 隕石・実験
- 11:40 昼食
- 12:40 口頭発表セッション11 衝突実験 I
- 14:00 口頭発表セッション12 衝突実験 II・小天体
- 15:30 口頭発表セッション13 ダスト・探査 I
- 16:40 口頭発表セッション14 探査 II

日本惑星科学会 2014 年秋季講演会・会場案内

於：東北大学片平キャンパス さくらホール

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目 1-1

受付：1 階

講演会場：1 階 会議室

ポスターセッション会場、懇親会会場：1 階ラウンジ



仙台駅からのアクセス 仙台市営バス

仙台駅前 11 番のり場もしくは 12 番のり場から乗車し、「東北大正門前」下車となります。

(バス所要時間 10 分程)

(バス停から会場まで徒歩 3 分)

片平キャンパス内マップ



片平キャンパス さくらホール外観



●口頭発表プログラム

口頭発表の講演時間は特別セッション 15 分（3 分間の質疑時間含む）、一般セッション 10 分（2 分間の質疑および交代時間を含む）です。下記では講演開始時刻、講演番号、和文表題、著者名を掲載しています。

9 月 24 日（水）

08:30-08:55 受付

08:55-09:00 開催挨拶、連絡事項

特別セッション（最優秀発表賞選考）座長：小林浩（名古屋大）

09:00 S01 土星氷衛星の地質学的研究に基づくエンセラダスとディオオーネの熱的再活性化の発見

*平田直之，宮本英昭（東大博物館）

09:15 S02 真空下における粉体熱伝導率の空隙率依存性測定実験と微惑星の初期熱進化への応用

*坂谷尚哉（総研大），小川和律（JAXA），本田理恵（高知大），荒川政彦（神戸大），田中智（JAXA）

09:30 S03 三次元観察と室内実験から探る GEMS の起源

*松野淳也，土山明，三宅亮（京大理），中村圭子，メッセンジャー スコット（NASA-JSC），渡辺隆行（九大工）

09:45 S04 衛星形成の舞台となる周惑星円盤の形成・進化について

*藤井悠里，小林浩（名大），奥住聡（東工大），犬塚修一郎（名大）

10:00 S05 レゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールの推定

*山田智哉，安藤滉祐，諸田智克，桂木洋光（名大環境）

10:15 S06 トロヤ群小惑星の L4-L5 間遷移現象の力学的機構

*大島健太，柳尾朋洋（早稲田大理工）

10:30-10:40 休憩

口頭発表セッション 1 惑星大気 座長：竹広真一（京都大）

10:40 O1-01 超高分解能赤外レーザヘテロダイナミクス分光器による惑星大気の連続観測

*中川広務（東北大理），青木翔平（イタリア宇宙航空機構），佐藤英夫（京産大），笠羽康正，村田功（東北大理），ギドーンナベンド（Radiometer Physics GmbH），岡野章一（ハワイ大）

10:50 O1-02 火星極域の大気環境と二酸化炭素降雪：天気予報の可能性

*黒田剛史（東北大理）

11:00 O1-03 火星ダスト巻き上げスキームの大気大循環モデル DCPAM への実装及びダスト巻き上げフラックス診断実験

*荻原弘堯（北大理），高橋芳幸（神戸大理），石渡正樹，小高正嗣（北大理），林祥介（神戸大理）

11:10 O1-04 大気大循環モデルのための放射モデル開発：同期回転惑星大気

*大西将徳（神戸大理），はしもとじょーじ（岡山大自然），倉本圭（北大理），高橋芳幸（神戸大理），石渡正樹，高橋康人（北大理），林祥介（神戸大理）

11:20 O1-05 同期回転惑星大気の数値実験：昼夜間熱輸送に関する検討

*石渡正樹（北大理），阿部豊（東大理），倉本圭（北大理），高橋芳幸（神戸大理），中島健介（九大），林祥介（神戸大理）

11:30 O1-06 初期火星大気中の主成分凝結対流の二次元数値実験 - 雲分布の凝結核数混合比に対する依存性 -

山下達也（国土地理院），小高正嗣（北大理），杉山耕一郎（JAXA），*中島健介（九大），石渡正樹（北大理），西澤誠也（理研 AICS），高橋芳幸，林祥介（神戸大理）

11:40-12:40 昼食

12:40-14:00 ポスターセッション1

口頭発表セッション2 系外惑星 座長：黒川宏之（名古屋大）

14:00 O2-01 すばる望遠鏡戦略観測「SEEDS」による原始惑星系円盤および系外惑星探査

*工藤智幸（国立天文台），田村元秀（国立天文台，東大），神鳥亮，臼田知史（国立天文台），葛原昌幸（東工大），橋本淳（オクラホマ大），松尾太郎（京大），SEEDS/HiCIAO/AO188 team.

14:10 O2-02 A dynamical study on the habitability of the exoplanet 40307 g

*ブラッサー ラモン（東工大），井田茂（東工大 ELSI），小久保英一郎（国立天文台）

14:20 O2-03 地球型水惑星の地表水分布と暴走温室限界

*新田光，阿部豊（東大理），大石龍太，阿部彩子（東大大気海洋）

14:30 O2-04 全球凍結状態にある系外地球型水惑星の存在確率

*門屋辰太郎（東大理），田近英一（東大新領域）

14:40 O2-05 巨大ガス惑星の雲層構造と放射冷却過程

*高橋康人（北大），はしもとじょーじ（岡山大），石渡正樹（北大），高橋芳幸（神戸大），大西将徳（神戸大），倉本圭（北大）

14:50 O2-06 ヘイズを持つ系外惑星の大気透過スペクトルモデル：温度および組成の鉛直分布の影響

*川島由依，生駒大洋（東大理），福井暁彦（国立天文台），成田憲保（国立天文台，総研大）

15:00-15:10 休憩

口頭発表セッション3 惑星形成 I 座長：濱野景子（東京大）

15:10 O3-01 原始太陽系星雲ガス中で集積成長する火星の混成型原始大気とその保温効果

*齊藤大晶，倉本圭（北大理）

15:20 O3-02 形成過程から探る短周期スーパーアースの大気および内部構造

*堀安範, リン ダグラス (UCSC)

15:30 O3-03 原始海洋組成の解明に向けて

*玄田英典, 上野雄一郎 (東工大 ELSI), 臼井寛裕, 上田翔士 (東工大), バオ ヒューミン (レイジアナ州立大), タオ サン (NASA-JSC)

15:40 O3-04 周惑星ガス円盤中で形成する巨大氷衛星の原始大気

*三上峻, 高橋康人, 倉本圭 (北大理)

15:50 O3-05 周惑星ガス円盤中での微惑星軌道進化と原始衛星への衝突確率

*清水俊平, 大槻圭史 (神戸大理)

16:00 O3-06 氷ダストの捕獲を通じた原始惑星の水量の進化

*佐藤貴央, 奥住聡 (東工大), 井田茂 (東工大 ELSI)

16:10 O3-07 光学的に薄い円盤内での Type I 移動に対するダストの影響

*山田耕 (早稲田大政経), 稲葉知士 (早稲田大国際教養)

16:20 O3-08 原始惑星系円盤の散逸における中心星進化の影響

*國友正信, 竹内拓 (東工大), 井田茂 (東工大)

16:30-16:50 休憩

口頭発表セッション4 惑星形成II 座長: 井田茂 (東京工業大)

16:50 O4-01 微惑星サイズと乱流の関係

*小林浩 (名大理), 田中秀和 (北大低温研), 奥住聡 (東工大理工)

17:00 O4-02 ハイブリッドコードによる惑星集積のシミュレーション

*森島龍司 (カリフォルニア大学)

17:10 O4-03 磁気乱流駆動の円盤風によって進化する原始惑星系円盤中での地球型惑星形成

荻原正博 (コートダジュール天文台), *小林浩, 犬塚修一郎, 鈴木健 (名大)

17:20 O4-04 デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成

片山将文, *城野信一 (名大環境)

17:30 O4-05 自己重力不安定な円盤における巨大ガス惑星の軌道進化

*植田高啓 (東工大), 井田茂 (東工大 ELSI), 竹内拓 (東工大)

17:40 O4-06 木星の共鳴による微惑星の軌道進化

*長沢真樹子 (東工大), 田中今日子, 田中秀和 (北大), 中本泰史 (東工大), 三浦均 (名市大), 山本哲生 (神戸大)

17:50 O4-07 マルチインパクトによる月と地球深海底の起源

*種子彰 (SEED SCIENCE Labo.)

9月25日(木)

口頭発表セッション5 惑星形成Ⅲ 座長：奥住聡(東京工業大)

9:00 O5-01 円盤磁気乱流中でのプラズマの電場加熱：磁気乱流強度とダスト成長への影響

*森昇志, 奥住聡(東工大理工)

9:10 O5-02 原始惑星系円盤内の圧力バンプにおけるダスト集積過程のダスト層の厚みによる違い

*瀧哲朗(東工大), 藤本正樹(JAXA), 井田茂(東工大 ELSI)

9:20 O5-03 原始惑星系円盤の化学反応とH₂Oスノーラインの分光観測による検出可能性

*野津翔太(京大理), 野村英子(東工大理工), 石本大貴(京大理)

9:30 O5-04 回転不安定から考える原始惑星系円盤の外側領域の構造

*小野智弘(京大理), 野村英子, 竹内拓(東工大理工)

9:40 O5-05 任意の不連続面に対応可能なSPH法の開発

*山本智子(東工大地惑), 斎藤貴之(東工大 ELSI), 牧野淳一郎(東工大 ELSI, 理研)

9:50 O5-06 天体衝突シミュレーションコードの開発と、その岩石惑星における小天体衝突現象への適用

*上田翔士(東工大地惑), 佐々木貴教(京大), 玄田英典(東工大 ELSI), 細野七月(理研), 井田茂, 斎藤貴之(東工大 ELSI)

10:00-10:10 休憩

口頭発表セッション6 表層進化・物質I 座長：木村淳(東京工業大)

10:10 O6-01 星雲遭遇による白亜紀末の強い寒冷化

*二村徳宏(岡山天文博物館), 戒崎 俊一(理研), 丸山茂徳(東工大 ELSI)

10:20 O6-02 隕石重爆撃による原始金星の乾燥

*黒澤耕介(千葉工大)

10:30 O6-03 隕石重爆撃期における大気散逸による火星大気と表層水の進化

*黒川宏之(名大理), 黒澤耕介(千葉工大), 白井寛裕(東工大理工)

10:40 O6-04 後期重爆撃による冥王代大陸の消失可能性

*芝池論人(東工大理工), 佐々木貴教(京大理), 井田茂(東工大 ELSI)

10:50 O6-05 衝撃波によるギ酸およびアンモニアからのアミノ酸生成

*古川善博, 鈴木千月香(東北大理), 小林敬道(NIMS), 関根利守(広島大地惑), 中沢弘基, 掛川武(東北大理)

11:00 O6-06 氷衛星および小惑星における有機化合物の生成と衝撃変成に関する実験的研究

*兒玉賢哉, 関根康人(東大), 高野淑織, 小川奈々子, 大河内直彦(JAMSTEC), 小林敬道(NIMS), 関根利守(広島大)

11:10 O6-07 地球外天体によるアミノ酸およびペプチドの供給の可能性

*菅原春菜(JAMSTEC), 三村耕一(名大)

11:20 O6-08 生命の起源に関連する星間化学進化におけるロバスト分子

*小林憲正 (横浜国立大, NINS), 時村隼人, 金子竹男, 大林由美子, 癸生川陽子 (横浜国立大),
吉田聡 (NIRS), 三田肇 (福岡工大)

11:30-12:30 昼食

12:30-13:30 ポスターセッション 2

口頭発表セッション 7 はやぶさ 2 座長: 小林直樹 (JAXA)

13:30 O7-01 はやぶさ 2 が拓く惑星科学

*渡邊誠一郎 (名大環境, JAXA), はやぶさ 2 総合サイエンスチーム

13:40 O7-02 はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR の科学観測計画

*岡田達明 (JAXA), 福原哲哉 (北大), 田中智 (JAXA), 田口真 (立教大), 荒井武彦, 今村剛 (JAXA),
千秋博紀 (千葉工大), 出村裕英, 小川佳子, 北里宏平 (会津大), 関口朋彦 (北教大), 長谷川直 (JAXA),
中村良介, 神山徹 (産総研), 松永恒雄 (国立環境研), 和田武彦 (JAXA), 滝田隼 (東大, JAXA),
坂谷尚哉, 堀川大和 (総研大, JAXA), 桑名翔平 (会津大), Joern Helbert (DLR), Thomas Mueller
(MPE), Axel Hagedorn (オープン大)

13:50 O7-03 はやぶさ 2 近赤外分光計による含水および脱水炭素質隕石の反射スペクトル測定

*中村智樹 (東北大), 岩田隆浩 (JAXA), 北里宏平 (会津大), 安部正真 (JAXA), 大澤崇人 (原研),
松岡萌 (東北大), 仲内悠祐, 荒井武彦 (JAXA), 小松睦美 (総研大), 廣井孝弘 (ブラウン大),
今榮直也, 山口亮, 小島秀康 (極地研)

14:00 O7-04 はやぶさ 2 分離カメラ (DCAM3-D) の開発状況とサイエンス

*荒川政彦 (神戸大), 和田浩二 (千葉工大), 小川和律, 澤田弘崇 (JAXA), 石橋高 (千葉工大),
白井慶 (JAXA), 本田理恵 (高知大), 坂谷尚哉 (総研大), 早川基 (JAXA), 門野敏彦 (産業医科大),
小林正規 (千葉工大), 木村宏 (神戸大), 中澤暁 (JAXA)

14:10 O7-05 TIR による SCI クレータ検出方法の検討~クレータの熱進化モデル~

*千秋博紀 (千葉工大), 荒井武彦 (JAXA), 黒沢耕介, 和田浩二 (千葉工大), 中村昭子 (神戸大理),
チーム TDSS (はやぶさ 2 プロジェクト)

14:20 O7-06 はやぶさ 2 搭載レーザー高度計による小惑星 1999JU3 のアルベド観測精度評価

*山田竜平 (国立天文台), 千秋博紀 (千葉工大), 阿部新助 (日大), 並木則行, 野田寛大,
吉田二美 (国立天文台), 石原吉明 (JAXA), 平田直之 (東大), 平田成 (会津大)

14:30 O7-07 はやぶさ 2 探査対象小惑星 1999JU3 の YORP 効果

*北里宏平 (会津大), 安部正真 (JAXA)

14:40-14:50 休憩

口頭発表セッション8 物質II 座長：中村智樹（東北大）

14:50 O8-01 はやぶさサンプルキャッチャーから回収された粒子の特徴

*矢田達, 安部正真, 上相真之, 唐牛護, 熊谷和也 (JAXA), 佐竹渉 (日本科学未来館), 中藤亜衣子 (JAXA), 石橋之宏 (九大理), 岡田達明 (JAXA)

15:00 O8-02 はやぶさ帰還試料コンソーシアム研究—最大粒子の3次元組織と形成過程

*上相真之 (JAXA), 土山明 (京大), 矢田達, 中藤亜衣子, 唐牛護, 熊谷和也 (JAXA), 上杉健太郎, 竹内晃久, 鈴木芳生 (JASRI/SPring-8)

15:10 O8-03 かんらん岩および玄武岩高速衝突破片の3次元形状分布：はやぶさ粒子との比較

*土山明 (京大理), 島田玲 (阪大理), 道上達広 (近畿大工), 荒川政彦 (神戸大理), 長谷川直 (JAXA), 中野司 (産総研)

15:20 O8-04 放射光X線を用いたイトカワ微粒子の鉱物学的研究

*三河内岳 (東大理), 萩谷健治 (兵庫県大生命理), 大隅一政 (JASRI/SPring-8), マイク ゴレンスキー (NASA-JSC), 小松睦美 (総研大), 佐竹渉, 吉田彩里 (東大理), 唐牛護 (JAXA)

15:30 O8-05 炭素質隕石へのパルスレーザー照射によるC型小惑星における宇宙風化作用再現実験

*松岡萌, 中村智樹 (東北大理), 木村勇氣 (北大低温研), 廣井孝弘 (ブラウン大), 中村良介 (産総研), 奥村聡 (東北大理), 佐々木晶 (阪大理)

15:40 O8-06 太陽風による宇宙風化を模擬した照射実験試料の表面・内部構造の観察：小惑星イトカワ・月のレゴリス粒子との比較

*松本徹, 土山明 (京大理), 渡部直樹, 香内晃 (北大低温研), 三宅亮 (京大理), 大竹真紀子 (JAXA)

15:50 O8-07 層状珪酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響：反射スペクトル形状の年代変化

*仲内悠祐 (総研大), 安部正真 (JAXA), 土山明 (京大理), 北里宏平 (会津大), 安田啓介 (若狭湾エネルギー研究センター)

16:00 O8-08 ナノ秒パルスレーザー照射模擬実験による宇宙風化作用における硫化鉄の効果の検証

*岡崎瑞祈, 佐々木晶 (阪大理), 廣井孝弘 (ブラウン大), 土山明, 三宅亮, 松本徹, 平田岳史 (京大理)

16:10-16:30 休憩

16:30-17:30 総会

17:30-17:40 休憩

17:40-18:30 最優秀研究者賞特別講演

奥住聡 (東工大)

18:30-19:00 休憩

19:00-21:00 懇親会

会場：さくらホールラウンジ

9月26日(金)

口頭発表セッション9 月・内部構造 座長：鈴木昭夫(東北大)

9:00 O9-01 月高地地殻の化学組成を用いたマグマオーシャンの固化過程への制約

*大竹真紀子(JAXA), 小林進悟(NIRS), 武田弘(千葉工大), 諸田智克(名大), 石原吉明(JAXA), 松永恒雄, 横田康弘(国立環境研), 春山純一(JAXA), 山本聡(国立環境研), 小川佳子(会津大), 唐牛護(JAXA), 佐伯和人(阪大), 酒井理沙(JAXA)

9:10 O9-02 月SPA盆地によって形成されたインパクトメルトプールの同定

*上本季更(JAXA, 東大), 大竹真紀子, 春山純一(JAXA), 中村良介(産総研), 松永恒雄, 山本聡(国立環境研), 岩田隆浩(JAXA)

9:20 O9-03 観測衛星による分光画像および数値地形モデルを用いた衝突クレーター自動判別手法の開発

*山本聡, 松永恒雄(国立環境研), 中村良介(産総研), 関根康人(東大), 平田成(会津大), 山口靖(名大)

9:30 O9-04 かぐや/スペクトルプロファイラデータを閲覧・表示するためのWeb-GIS「月光」のユーザ拡大に向けて

*小川佳子(会津大), 林洋平, 平田成(会津大), 寺菌淳也(会津大), 出村裕英(会津大), 松永恒雄(国立環境研), 山本聡(国立環境研), 横田康弘(国立環境研), 大竹真紀子(JAXA), 大嶽久志(JAXA)

9:40 O9-05 水星のマントル進化

*小河正基(東大)

9:50 O9-06 形成期の水星におけるコア-マントル間の硫黄の分配

*笹森映里, 倉本圭(北大理)

10:00 O9-07 5GPaでのFe-O-S系の融解と月核への応用

*赤松明香, 大谷栄治, 鈴木昭夫(東北大理)

10:10 O9-08 高温高压実験から探るガニメデ核の構造・組成モデル

*柴崎裕樹, 大谷栄治(東北大理), 寺崎英紀(阪大理), フェイ イングウェイ(カーネギー研究所), 肥後祐司(JASRI/SPring-8)

10:20 O9-09 Brillouin 散乱法を用いた地球核マントル境界圧力条件までの δ -AlOOH相の音速測定と地球・火星内部への適用

*増野いづみ, 村上元彦, 大谷栄治(東北大理)

10:30-10:40 休憩

口頭発表セッション10 隕石・実験 座長：中藤亜衣子(JAXA)

10:40 O10-01 ダスト模擬物質形成過程の赤外スペクトル“その場”測定実験：星周シリケートの結晶化

*石塚紳之介(東北大理, 北大低温研), 木村勇氣(北大低温研)

10:50 O10-02 非晶質フォルステライトと水蒸気の反応による含水鉱物形成実験

*山本大貴, 橘省吾(北大理)

11:00 O10-03 タギシュレイク隕石中に見られるフランボイダルマグネタイトの形成過程

*木村勇氣 (北大低温研), 佐藤岳志 (日立ハイテクノロジー), 中村智樹, 中村教博 (東北大理), 野澤純 (東北大金属材料), 塚本勝男 (東北大理, 阪大), 山本和生 (ファインセラミックスセンター)

11:10 O10-04 アエンデ隕石を用いた高温高压下における金属鉄-ケイ酸塩メルト間の炭素分配実験

*朝原友紀, 大谷栄治 (東北大理)

11:20 O10-05 CV コンドライト隕石の水質変成と熱変成

*小松睦美 (総研大), 荒井朋子 (千葉工大), 山本彩 (RESTEC), 三河内岳 (東大), 中村智樹 (東北大理), 廣井孝弘 (ブラウン大), 北里宏平 (会津大)

11:30 O10-06 CV3 炭素質コンドライト隕石母天体の集積時期と形成進化過程

*城後香里, 中村智樹 (東北大理), 伊藤元雄 (JAMSTEC), 脇田茂 (国立天文台), Zolotov Mikhail (アリゾナ州立大), Messenger Scott (NASA-JSC)

11:40-12:40 昼食

口頭発表セッション 11 衝突実験 I 座長: 和田浩二 (千葉工業大)

12:40 O11-01 C型小惑星を模擬した焼結ガラスビーズ試料へのクレータ形成実験

*岡本千里 (神戸大), 池崎克俊 (阪大), 今栄直也 (極地研), 矢野創 (JAXA), 橘省吾 (北大), 土山明 (京大), 澤田弘崇, 長谷川直 (JAXA), 中村昭子 (神戸大), 富山隆将 (JAMSTEC)

12:50 O11-02 模擬低重力下における砂標的への低速度衝突クレーター形成実験

*木内真人, 中村昭子 (神戸大理)

13:00 O11-03 高空隙率標的に形成される衝突キャビティに関するスケーリング則: 彗星表面への応用

*岡本尚也, 中村昭子 (神戸大理), 長谷川直 (JAXA)

13:10 O11-04 氷地殻を模擬した氷・砂混合物に対する高速度クレーター形成実験

*高野翔太, 荒井政彦 (神戸大理), 保井みなみ (神戸大自然)

13:20 O11-05 粉流体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 II

*松榮一真, 荒川政彦 (神戸大理), 保井みなみ (神戸大自然), 松本恵里, 辻堂さやか, 高野翔太 (神戸大理), 小林直樹, 長谷川直 (JAXA)

13:30 O11-06 粒子径分布と形状がレゴリス層の空隙率に及ぼす影響についての実験的研究

*大村知美, 木内真人 (神戸大理), ギュトラー カーステン (マックスプランク研究所), 中村昭子 (神戸大理)

13:40 O11-07 低密度天体への脆性衝突体の挙動に関する実験的研究

*原田竣也, 中村昭子, 岡本尚也 (神戸大理), 鈴木絢子, 長谷川直 (JAXA)

13:50-14:00 休憩

口頭発表セッション 12 衝突実験Ⅱ・小天体 座長：保井みなみ（神戸大）

14:00 O12-01 イジェクタ構成粒子の空間密度分布および光散乱特性がイジェクタカーテンの輝度分布に与える影響

プティヤベティル シャリマ（インド天体物理学研究所），*和田浩二（千葉工大），木村宏（神戸大惑星）

14:10 O12-02 高速度域におけるクレーターエジェクタ速度のスケール則に関する実験的研究

*辻堂さやか（神戸大理），保井みなみ（神戸大自然），荒川政彦，松榮一真，高野翔太（神戸大理），長谷川直（JAXA）

14:20 O12-03 衝突破片形状の実験的研究と小惑星イトカワの岩塊の形状

*道上達広，吉田明史，門川隆進（近畿大工），島田玲，土山明（京大理），長谷川直（JAXA）

14:30 O12-04 ラブルパイル小衛星の衝突破壊による土星Fリングの形成

*兵頭龍樹，大槻圭史（神戸大理）

14:40 O12-05 あかり衛星によるケンタウルス天体とTNOsの低温熱放射観測

*関口朋彦（北教大），大坪貴文（東大），長谷川直（JAXA），白井文彦（東大），ミュラートーマス（マックスプランク研究所）

14:50 O12-06 小惑星（704）Interamniaの立体形状

*佐藤勲

15:00 O12-07 チェリャビンスク火球からの光放射

*柳澤正久（電通大情報理工）

15:10 O12-08 大気中形成の炭素含有粒子の特徴：大気中ダスト，ロシア落下隕石と月隕石

*三浦保範（山口大）

15:20-15:30 休憩

口頭発表セッション 13 ダスト・探査Ⅰ 座長：大坪貴文（東京大）

15:30 O13-01 IKAROS-ALADDINが発見した地球周太陽ダストリング中の大型宇宙塵の粗密分布

*平井隆之，矢野創（JAXA）

15:40 O13-02 大型レーダ流星ヘッドエコー観測による太陽系ダストの観測

*阿部新助（日大理工），Kero Johan（スウェーデン宇宙物理研究所），中村卓司，藤原康徳（極地研），渡部潤一（国立天文台）

15:50 O13-03 流星観測衛星S-CUBEのミッション紹介と開発進捗報告

*石丸亮（千葉工大），坂本祐二（千葉工大，東北大），小林正規（千葉工大），郷内稔也，藤田伸哉（東北大），千秋博紀，和田浩二，石橋高，黒澤耕介，山田学（千葉工大），阿部新助（日大理工），吉田和哉（東北大），佐藤光輝，高橋幸弘（北大），松井孝典（千葉工大）

16:00 O13-04 BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション：MMO プロジェクト最新状況報告

*早川基，前島宏則，ベピコロombo プロジェクトチーム（JAXA）

16:10 O13-05 JUICE 木星系探査が拓く科学

*佐々木晶 (阪大理), 斎藤義文, 藤本正樹 (JAXA), 木村淳 (東工大 ELSI), JUICE JAPAN (JAXA)

16:20 O13-06 木星圏探査機 (JUICE) 搭載サブミリ波分光計の開発と科学目標

*笠井康子 (NICT, 東工大), 佐川英夫 (京産大), 関根康人 (東大), 黒田剛史 (東北大),
碓井英雄 (NICT), 菊池健一 (国立天文台), 西堀俊幸 (JAXA), 真鍋武嗣 (大阪府立大),
ポール ハートフ (マックスプランク研究所), JUICE-SWI チーム

16:30-16:40 休憩

口頭発表セッション 14 探査II 座長: 菊池冬彦 (国立天文台)

16:40 O14-01 深宇宙探査技術実証機 DESTINY

*川勝康弘, 船木一幸, 西山和孝, 岩田隆浩 (JAXA)

16:50 O14-02 深宇宙探査技術実験機 DESTINY による太陽系探査

*岩田隆浩, 川勝康弘 (JAXA), 江副祐一郎 (首都大), 亀田真吾 (立教大), 桂華邦裕 (名大),
荒井朋子 (千葉工大), 松浦周二, 佐伯孝尚, 今村剛, 安藤紘基 (JAXA), 小郷原一智 (滋賀県立大),
大山聖 (JAXA)

17:00 O14-03 火星着陸探査技術実証ミッション

*藤田和央, 佐藤毅彦 (JAXA), 火星着陸探査技術実証 WG

17:10 O14-04 火星表面での生命探査: LDM 生命探査顕微鏡開発の現状報告

*山岸明彦, 宮川厚夫 (東薬大生命), 佐藤毅彦, 塩谷圭吾 (JAXA), 吉村義隆 (玉川大農), 本多元,
今井栄一 (長岡技大), 佐々木聰 (東京工科大), 石上玄也 (慶応大), 出村裕英 (会津大)

17:20 O14-05 火星ローバのナビカメラによる地質探査

*佐藤毅彦 (JAXA), 宮本英昭, 新原隆史 (東大博物館), 石上玄也 (慶応大工), 火星着陸探査技術
実証 WG

17:30 O14-06 音波を利用した火山湖探査

*佐伯和人 (阪大理), 金子克哉 (京大人間環境), 大場武 (東海大理)

17:40 O14-07 熱流量プローブを用いた月惑星表層レゴリスの熱伝導率に対する精度評価

*堀川大和 (総研大), 田中智 (JAXA), 坂谷尚哉 (総研大), 滝田隼 (東大)

17:50 O14-08 月の縦孔・地下空洞探査-UZUME 計画-のミッションとシステムの構想

*春山純一, 西堀俊幸, 山本幸生, 岩田隆浩, 永松愛子, 石原吉明, 山本圭香, 河野功, 大槻真嗣,
加藤裕基 (JAXA), 諸田智克, 西野真木 (名大), 清水久芳, 宮本英昭 (東大), 白尾元理 (惑星地質
研), 橋爪光, 佐伯和人 (阪大), 小林憲正 (横浜国大), 横堀伸一 (東薬大), 押上祥子 (国立天文台),
長谷部信行 (早大), 長谷中利昭 (熊本大), 道上達広 (近畿大), 横田康弘, 山本聡 (国立環境研),
小松吾郎 (ダヌンツィオ大), 小林敬生 (韓国地質資源研究院), 有隅仁 (産総研)

●ポスター発表プログラム

ポスターは1日目朝からポスターセッション2(2日目のポスターセッション)終了時まで掲示できます。下記では発表番号, 和文表題, 著者名をコアタイム毎に掲載しています。ポスターは2日目の口頭発表セッション7開始前までに撤収して下さい。

ポスターセッション1: 1日目(9月24日)

12:40~14:00

- S01 土星氷衛星の地質学的研究に基づくエンセラダスとディオオーネの熱的再活性化の発見
*平田直之, 宮本英昭(東大博物館)
- S02 真空下における粉体熱伝導率の空隙率依存性測定実験と微惑星の初期熱進化への応用
*坂谷尚哉(総研大), 小川和律(JAXA), 本田理恵(高知大), 荒川政彦(神戸大), 田中智(JAXA)
- S03 三次元観察と室内実験から探る GEMS の起源
*松野淳也, 土山明, 三宅亮(京大理), 中村圭子, メッセンジャー スコット(NASA-JSC), 渡辺隆行(九大工)
- S04 衛星形成の舞台となる周惑星円盤の形成・進化について
*藤井悠里, 小林浩(名大), 奥住聡(東工大), 犬塚修一郎(名大)
- S05 レゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールの推定
*山田智哉, 安藤滉祐, 諸田知克, 桂木洋光(名大環境)
- S06 トロヤ群小惑星の L4-L5 間遷移現象の力学的機構
*大島健太, 柳尾朋洋(早稲田大理工)
- P1-01 木星型惑星を想定した雲対流の数値計算
*杉山耕一朗(JAXA), 中島健介(九大理), 小高正嗣, 倉本圭(北大理), 林祥介(神戸大理)
- P1-02 ASTE 望遠鏡を用いた, 木星成層圏微量分子のサブミリ波帯分光観測の初期成果
*飯野孝浩(東京農工大博物館), 大山博史, 秀森丈寛, 加藤智隼, 水野亮(名大 STEL), 塚越崇(茨城大), 平原靖大(名大環境)
- P1-03 Venus GCM への金星硫酸雲生成・消失と大気化学過程の導入(1)
*伊藤一成, 黒田剛史, 笠羽康正(東北大理), 高橋正明(東大海洋研)
- P1-04 ビリカ望遠鏡および VMC/VEX を用いた紫外撮像による金星スーパーローテーション周期とその時間発展の観測
*今井正堯, 高橋幸弘, 渡部重十, 渡邊誠(北大理)
- P1-05 短周期地球型惑星の大気構造と放射スペクトル
*伊藤祐一, 生駒大洋, 河原創, 永原裕子, 川島由依(東大理), 中本泰史(東工大理工)
- P1-06 マグマオーシャンに覆われた惑星の光度進化曲線とその検出可能性
*濱野景子, 河原創, 阿部豊(東大理), 大西将徳(神戸大理), はしもと じょーじ(岡山大自然)

- P1-07 地球型惑星が持つ水量と表層環境：海惑星における炭素循環
*中山陽史, 阿部豊 (東大理)
- P1-08 ホットネプチューンの水素ヘリウム大気量推定における内部組成分布の影響
*黒崎健二, 生駒大洋 (東大理)
- P1-09 【講演キャンセル】
- P1-10 巨大ガス惑星の熱進化：重元素分布の不均質性と二重拡散対流の影響について
*黒川宏之, 犬塚修一郎 (名大理)
- P1-11 巨大惑星による原始惑星系円盤ギャップの形成：ギャップ構造と密度波の減衰
*金川和弘, 田中秀和 (北大低温研), 武藤恭之 (工学院大), 谷川享行 (産業医大), 竹内拓 (東工大)
- P1-12 内縁進化を考慮した原始惑星系円盤の粘性進化
*今枝佑輔 (東工大, 理研), 戒崎俊一 (理研)
- P1-13 ずれ境界条件を導入した高次精度 MHD シミュレーションコードの開発と磁気回転不安定性の非線形発展に関する計算機実験
*平井研一郎, 加藤雄人, 寺田直樹 (東北大理)
- P1-14 原始惑星系円盤における有機物粒子の時空間変化
*沼田実穂, 永原裕子 (東大理)
- P1-15 原始惑星系円盤における水氷の吸収帯に表れる光脱離反応の効果
*高附翔馬, 中本泰史 (東工大理工), 井上昭雄 (大産大), 本田充彦 (神奈川大)
- P1-16 モノマーサイズ分布のあるダストアグリゲイトの衝突とイジェクタ量
*和田浩二 (千葉工大), 田中秀和 (北大低温研), 小林浩 (名大理), 奥住聡 (東工大理工), 木村宏 (神戸大/CPS)
- P1-17 層流円盤におけるダストの沈殿成長過程で生じるレイリー・テイラー不安定性
*石津尚喜 (国立天文台)
- P1-18 周惑星粒子円盤の進化と衛星系の多様性
*兵頭龍樹, 大槻圭史 (神戸大理), 武田隆顕 (ヴェイサエンターテイメント株式会社)
- P1-19 捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布
*末次竜 (神戸大), 大槻圭史 (神戸大理)
- P1-20 分子雲に埋もれた星団および散開星団における惑星の生存率
*堀安範 (UCSC), 藤井通子 (国立天文台)
- P1-21 巨大衝突での衝突に伴う原始惑星の離心率減衰
*松本侑士 (国立天文台), 長沢真樹子 (東工大), 井田茂 (東工大 ELSI)
- P1-22 木星摂動による SERRA 潮汐分裂仮説とマントル分裂片地球衝突による月形成のメカニズム
*種子彰 (SEED SCIENCE Labo.)
- P1-23 空間量子赤方偏移仮説と新定常宇宙論
*種子彰 (SEED SCIENCE Labo.)

- P1-24 粒子線照射による種々の組成の模擬星間物質からのアミノ酸前駆体生成
*松田知之, 江藤碧, 榎本真悟, 癸生川陽子, 金子竹男, 大林由美子(横浜国大), 吉田聡(NIRS), 福田一志, 小栗慶之(東工大原子炉工), 小林憲正(横浜国大, NINS)
- P1-25 星間有機物の亜臨界・超臨界水中における水質変成過程
*松原康浩, 中野英之(京教大)
- P1-26 氷衛星における生命構成物質の重合反応
*木村淳, 北台紀夫(東工大 ELSI)
- P1-27 はやぶさ2 搭載近赤外分光計 NIRS3 のフライトモデル性能
*岩田隆浩(JAXA), 北里宏平(会津大), 安部正真, 松浦周二, 荒井武彦(JAXA), 仲内悠祐(JAXA, 総研大), 中村智樹(東北大理), 大澤崇人(原子力機構), 廣井孝弘(ブラウン大), 松岡萌(東北大理), 尾崎正伸(JAXA)
- P1-28 はやぶさ2 搭載中間赤外カメラによる隕石の測定
*荒井武彦(JAXA), 中村智樹(東北大理), 田中智, 岡田達明(JAXA), 出村裕英, 小川佳子(会津大), 坂谷尚哉, 堀川大和(総研大), TIR チーム
- P1-29 はやぶさ2 搭載小型ランダMASCO Tの観測計画
*岡田達明(JAXA), ヨーマン ラルフ(DLR), ビブリン ジャン=ピエール(IAS), グロット マティアス(DLR), グラスマイア カール=ハインツ(ブラウンシュバイク工大), ウラメック ステファン, ビール イェンス, クラウゼ クリスチャン, テルムタナソンバット ナワラト, ジアック クリスチャン, グリム クリスチャン, ホー トラミ(DLR)
- P1-30 はやぶさ2 レーザ高度計による小惑星周辺ダスト検出の試み
*押上祥子(国立天文台), 千秋博紀, 小林正規(千葉工大), 山田竜平, 竝木則行(国立天文台), 水野貴秀(JAXA)
- P1-31 はやぶさ2 における Structure-from-Motion 法による小惑星形状推定手法の適用性の検討
*平田成, 森洋平(会津大), はやぶさ2 形状モデル検討グループ(はやぶさ2 プロジェクト)
- P1-32 1999 JU3 の衝突確率とクレーター年代学関数の構築
*安藤滉祐, 諸田智克(名大環境), 杉田精司(東大新領域), 本田理恵(高知大理), 亀田真吾(立教大理), 山田学(千葉工大), 本田親寿(会津大), 鈴木秀彦(明大), 渡邊誠一郎(名大環境)
- P1-33 アグリゲート型イトカワ粒子の三次元構造解析
*矢田達, 上梶真之(JAXA), 上杉健太朗(JASRI/Spring-8), 唐牛謙(JAXA), 鈴木芳生, 竹内晃久(JASRI/Spring-8), 土山明(京大理), 安部正真, 岡田達明(JAXA), 葛巻徹(東海大工)
- P1-34 火星隕石 Tissint に含まれる硫化鉄中の鉛同位体不均質
*森脇涼太, 臼井寛裕(東工大理工), Justin Simon(NASA-JSC), Axel Schmitt, Kevin McKeegan(UCLA), 横山哲也(東工大理工)

- P1-35 加熱実験生成物の鉱物学的・酸素同位体的変化に基づく加熱脱水炭素質隕石形成過程への示唆
*中藤亜衣子 (JAXA), アン インサー (KOPRI), 中村智樹 (東北大), チャン クウィーニー,
ゾレンスキー マイク (NASA-JSC), リー ジョンイク (KOPRI)
- P1-36 CM 炭素質コンドライトの岩石学的特徴に基づいた C 型小惑星の水質変成による物質進化過程
*仲田愛里, 中村智樹 (東北大理), 木村勇氣 (北大低温研), 武藤潤 (東北大理)
- P1-37 コンドリュールの強度とコンドライトの圧縮過程に関する実験的研究
*紫垣沙央, 中村昭子 (神戸大理)
- P1-38 浮遊法による全溶融した放射状輝石コンドリュールの再現実験
*野村逸郎, 中村智樹 (東北大理), 木村勇氣 (北大低温研), 塚本勝男 (阪大)
- P1-39 アエンデ隕石中コンドリュールの 3 次元外形と内部組織の分析
*中本泰史, 高橋栄一, 津田彩花 (東工大), 西田圭佑 (東大), 奥井航, 横山哲也 (東工大),
柳田泰宏, 奥村聡, 中村美千彦, 佐々木理 (東北大)

ポスターセッション2: 2日目 (9月25日)

12:30~13:30

P2-01 「かぐや」等最新データを基にした新しい月地質図作成プロジェクト

*大竹真紀子 (JAXA), 本田親寿 (会津大), 諸田智克 (名大), 長勇一郎 (立教大), 晴山慎 (聖マリアンナ医大), 平田成 (会津大), 石原吉明 (JAXA), 鎌田俊一 (北大), 唐牛譲 (JAXA), 木村淳 (東工大), 小林直樹 (JAXA), 長岡央 (早大), 出村裕英 (会津大), 佐伯和人 (阪大), 中村良介 (産総研), 小川佳子 (会津大), 嵩由美子 (京大)

P2-02 月表層誘電率の全球分布

*熊本篤志, 石山謙 (東北大), 押上祥子 (国立天文台), 春山純一 (JAXA)

P2-03 かぐやレーダーサウンダー観測データに基づいた雨の海の地下構造の研究

*石山謙, 熊本篤志, 中村教博 (東北大)

P2-04 ポシドニウスクレータの構造と地質解釈

*石原吉明 (JAXA), 千葉達朗 (アジア航測), 春山純一, 大嶽久志, 大竹真紀子 (JAXA)

P2-05 月面 swirl 地域における主要鉱物分布と風化過程への制約 ~Mare Ingenii 地域を中心に~

*小川佳子 (会津大), 春山純一 (JAXA), 松永恒雄 (国立環境研), 大竹真紀子 (JAXA), 中村良介 (産総研), 廣井孝弘 (ブラウン大), 林洋平, 横田康弘 (国立環境研), 山本聡 (国立環境研), 佐々木晶 (阪大)

P2-06 かぐやMI データを用いた光学関数の再考

*小林直樹, 大竹真紀子 (JAXA), 横田康弘 (国立環境研)

P2-07 月の初期における膨張過程と火成活動

*澤田なつ季, 諸田智克, 加藤伸祐 (名大環境), 石原吉明 (JAXA), 平松良浩 (金沢大)

P2-08 20億年前に発生したスーパーブルームに伴う月面地形の変形

*加藤伸祐, 諸田智克, 山口靖, 渡邊誠一郎 (名大環境), 大嶽久志, 大竹真紀子 (JAXA)

P2-09 月の衝突盆地の放出物厚モデルにもとづくメガレゴリス厚分布

*諸田智克 (名大環境), 春山純一, 大竹真紀子 (JAXA), 松永恒雄, 山本聡, 横田康弘 (国立環境研), 本田親寿 (会津大), 石原吉明 (JAXA), 小林進悟 (NIRS), 古本宗充 (名大環境), 武田弘 (東大)

P2-10 GRAIL 衛星重力データを用いた月の地殻形成過程についての考察

*山本圭香, 春山純一, 大竹真紀子, 岩田隆浩, 石原吉明 (JAXA), 福田洋一 (京大理)

P2-11 高圧での月の高Ti玄武岩の熔融関係

*五十嵐愛子, 大谷栄治, 坂巻竜也, 朝原友紀, 鈴木昭夫 (東北大理)

P2-12 高圧下における月マグマの粘度

*鈴木昭夫 (東北大理)

P2-13 アポロ月震計による走時データと最新の測月データから推定される月深部構造

*松本晃治, 山田竜平, 菊池冬彦 (国立天文台), 鎌田俊一 (UCSC), 石原吉明 (JAXA), 岩田隆浩 (JAXA), 花田英夫 (国立天文台), 佐々木晶 (阪大)

- P2-14 月面クレータから見た過去 10 億年の天体衝突史
*加藤麻美, 諸田智克 (名大環境)
- P2-15 月と水星のクレータ空間分布の定量的解析
*伊東里保, 本田親寿, 平田成 (会津大), 諸田智克 (名大環境)
- P2-16 衝突実験に基づいたクレータ周辺のバルク密度と誘電率の測定
*石山謙, 熊本篤志 (東北大), 高木靖彦 (愛知東邦大), 中村教博 (東北大)
- P2-17 石膏の衝突破壊強度に対する複数回衝突の影響
*保井みなみ (神戸大)
- P2-18 チェリアビンスク隕石大気突入の数値シミュレーション
*高田淑子 (宮教大教)
- P2-19 C型小惑星表面物質を模擬した有機物混合試料の光散乱測定
*藤原彩香, 北里宏平 (会津大)
- P2-20 小惑星のラフ表面モデルと温度場に対する影響の評価
*滝田隼 (東大理, JAXA), 田中智 (JAXA), 千秋博紀 (千葉工大)
- P2-21 小惑星ベスタの熱進化の数値シミュレーション
*野上竜彦, 城野信一 (名大環境)
- P2-22 Sub-km サイズ地球近傍小惑星 2011 XA₃ の高速自転 II
*浦川聖太郎 (美星スペースガードセンター), 大塚勝仁 (東京流星観測網), 阿部新助 (日大), 伊藤孝士 (国立天文台), 中村智樹 (東北大)
- P2-23 すばる望遠鏡によるメインベルト小惑星のライトカーブ観測
*吉田二美 (国立天文台), スオウミ ダミヤ (ナミュール大), ブキヨン セバスチャン (パリ天文台), 中村士 (帝京平成大), デルマワン ブディ (バンドン工大), 八木雅文 (国立天文台), スーシェ ジャン (パリ天文台)
- P2-24 木星トロヤ群小惑星の軌道安定性について
*岡山博明, 大槻圭史 (神戸大理)
- P2-25 オールト雲起源新彗星の力学進化
*伊藤孝士 (国立天文台), 樋口有理可 (東工大)
- P2-26 オールト雲の構造の進化と寿命
*樋口有理可 (東工大), 小久保英一郎 (国立天文台)
- P2-27 土星リング中での小粒子の重力集積による小衛星形成
*安井佑貴, 大槻圭史 (神戸大), 台坂博 (一橋大)
- P2-28 土星 A リングの太陽春分における不完全冷却とそこから推察されるリング粒子の内部構造
*森島龍司 (カリフォルニア大, JPL), スピルカー リンダ (JPL)
- P2-29 「あかり」遠赤外線拡散光全天マップに見られる黄道光微細構造
*大坪貴文, 土井靖生 (東大), 服部誠 (東北大), 瀧田怜, 有松亘, 川田光伸, 松浦周二, 中川貴雄 (JAXA), 白井文彦 (東大)

- P2-30 JUICE-JAPAN WG 木星氷衛星探査計画 - JUICE-GALA レーザ高度計 -
*並木則行 (国立天文台), 小林正規 (千葉工大), 木村淳 (東工大 ELSI), 野田寛大, 荒木博志, 鹿島伸悟 (国立天文台), 宇都宮真 (JAXA), フスマーシ ハウケ, リンゲンバウアー カイ, オバースト ユルゲン (DLR)
- P2-31 JUICE 搭載多バンド分光カメラ「JANUS」ミッション
*春山純一 (JAXA), 高橋幸弘, 佐藤光輝 (北大)
- P2-32 将来の惑星探査に向けた小型放射線分光装置の提案
*長岡央, 長谷部信行, 草野広樹, 内藤雅之, 柴村英道, 天野嘉春, 太田亨, フェイガン ティモシー (早大), Waseda AXS team
- P2-33 イオンビームによる月面反射鏡の精密加工に関する研究
*相原寛樹, 青木悠登, 水野裕一郎, 瀧野日出雄 (千葉工大), 谷口淳 (東京理科大), 荒木博志, 鹿島伸悟 (国立天文台), 宇都宮真 (JAXA), 野田寛大, 花田英夫 (国立天文台)
- P2-34 月面コーナーキューブミラーの製造及び高精度角度測定方法の検討
*鹿島伸悟, 荒木博志, 野田寛大, 花田英夫 (国立天文台), 宇都宮真, 安田進 (JAXA)
- P2-35 地上局用広帯域・広域受信機システムの開発
*菊池冬彦, 河野裕介, 浅利一善, 松本晃治, 花田英夫 (国立天文台), 佐々木晶 (阪大)
- P2-36 イプシロンロケットを用いた月探査の課題
*村上英記 (高知大理), 小林直樹, 白石浩章, 田中智, 早川雅彦, 後藤健, 石原吉明 (JAXA), 山田竜平 (国立天文台), 川村太一 (IPGP), 月内部構造探査 WG
- P2-37 火星探査における K-Ar 年代測定対象試料の検討
*三浦弥生 (東大), 長勇一郎 (立教大), 杉田精司 (東大), 亀田真吾 (立教大)
- P2-38 K-Ar 年代その場計測法の開発: アイソクロンデータの詳細解析
*長勇一郎, 亀田真吾 (立教大), 三浦弥生, 杉田精司 (東大)
- P2-39 K-Ar 年代測定のための, 真空紫外 LI BS を用いた Ar イオン輝線検出実験
*芝崎和夫, 奥村裕, 長勇一郎, 亀田真吾 (立教大), 三部賢治, 三浦弥生, 杉田精司 (東大)
- P2-40 固体天体の内部構造探査に向けた岩石の比誘電率の計測
*小熊みどり, 新原隆史, 宮本英昭 (東大総合研究博物館)

土星氷衛星の地質学的研究に基づく エンセラダスとディオオーネの熱的再活性化の発見

○平田直之¹ 宮本英昭¹ ¹東京大学総合研究博物館

土星の衛星エンセラダスは火山活動を有する。この活動の継続期間は明らかにされていない。土星系の環-衛星系に生じる活発な相互作用 [1]に着目し、エンセラダス放出物の行方を調査した。その結果、近傍の複数の小型衛星上にて厚いエンセラダス由来堆積物を発見した[2]。これらの堆積物のクレーター年代は、いずれの衛星でも、約数千万年であった。この年代はエンセラダスの火山活動が短期間に限られることを示唆するものだった [2]。

さて、この火山活動の熱源は潮汐加熱とされている[3]。そしてこの加熱は、(やや外側の軌道をもつ)ディオオーネとの軌道共鳴によって維持されている。エンセラダスが急速に活性化したのなら、ディオオーネにも何らかの変化が起きていてもおかしくはない。

そこでディオオーネにも熱的活動があるのではないかと私たちは考えた。ディオオーネには、Wispy 構造と呼ばれる亀裂が存在する(図1)。画像解析を行い、ディオオーネの Cross-Cutting Relation を調べた。その結果、Wispy 構造は数千万年以下の年代に制約されることがわかった。氷衛星上の亀裂は、過去における衛星の体積膨張の痕跡とされている[4]。それゆえ上述の結果は、数千万年以内にディオオーネの体積が急激に膨張したことを示唆する。

衛星に加熱が生じると、氷地殻に熱膨張が発生することが知られている[4]。つまり、ディオオーネの体積の膨張はその熱的活性化を示唆する。さらに2つの年代の近さは、エンセラダスの活性化とも関連しているのかもしれない。これらの概要について報告する。

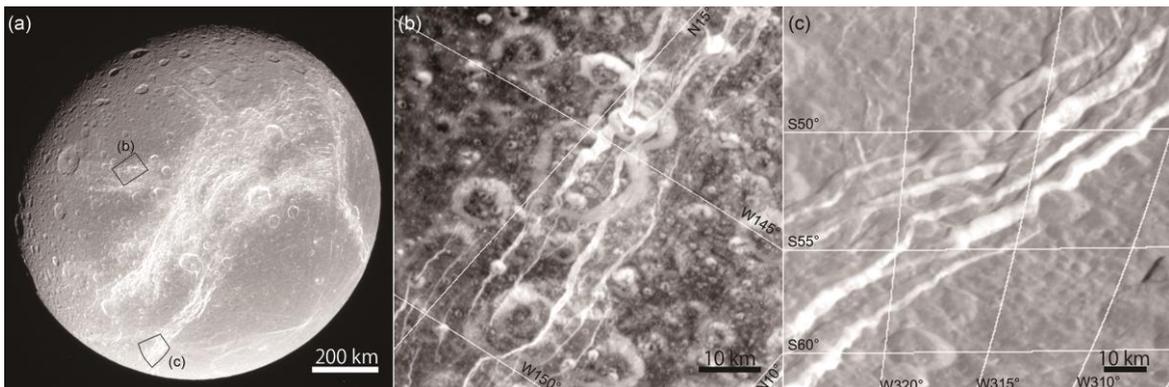


図1 (a) 土星の衛星ディオオーネの後行半球。半球全体にわたって白い筋状の構造(Wispy 構造)が認められる。(b), (c)は拡大図(使用画像:N1532404843, N1507748228, N1569826794)。

引用文献 [1] N. Hirata and H. Miyamoto (2012), *Icarus* 220, 106-113. [2] N. Hirata, H. Miyamoto, and A. P. Showman (2014), *GRL*, in Press. [3] J. H. Roberts, and F. Nimmo (2008), *Icarus*, 194, 675-689. [4] F. Nimmo (2004), *JGR: Planets*, 109(E12), E12001.

真空下における粉体熱伝導率の空隙率依存性測定実験と 微惑星の初期熱進化への応用

○坂谷 尚哉¹, 小川 和律², 本田 理恵³, 荒川 政彦⁴, 田中 智²

¹総合研究大学院大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³高知大学, ⁴神戸大学

現在の惑星形成論においては、原始太陽系星雲中のダストが集積して微惑星と呼ばれる高空隙率天体が形成し、それらが衝突合体・破壊過程を経て現在の太陽系天体へと進化したと考えられている。微惑星はダストの集合体である粉体と考えられているが、その熱伝導率は空隙のない岩石に比べて 2-3 桁低い値を持つことが知られており、微惑星が粉体であることがその熱進化に大きな影響を与えたと考えられる。更に微惑星は、熱進化の過程で高温に達し、ダストの焼結によって高い機械的強度を獲得し、衝突による結果（反発、合体、破壊）はその前後で異なることが予想される。焼結が起こるタイミングをコントロールする主要な物性は粉体微惑星の熱伝導率である。しかし、粉体物質の熱伝導率に関してはこれまで系統的な実験が乏しかったため、粉体内の熱輸送メカニズム自体の理解が浅く、信頼性のある熱伝導率モデルは存在しない。そこで、本研究は個々の依存パラメータをコントロールした状況において真空下で粉体の熱伝導率測定実験を系統的に行うことによって、粉体の熱輸送メカニズムの総合的な理解、および熱伝導率モデルの構築を目指している。

我々はこれまでに真空中 (0.01 Pa 以下) での粉体熱伝導率の粒径・温度・圧縮応力依存性についての実験を続けてきた。これまでの実験では空隙率 40% 程度のサンプルを用いたが、最近の理論的研究では微惑星の空隙率は 90% 以上であった可能性が指摘されている。そこで今回新たに空隙率依存性を調べる実験を行った。サンプルは微惑星の条件に近い平均粒径 5 μm のガラスビーズを用い、ふるいを通した自由落下、タッピング、および圧縮により空隙率を約 50%~86% に調整した。各サンプルの真空下での熱伝導率測定実験の結果、常温における熱伝導率と空隙率の関係は Krause et al. (2009) と調和的であった。我々は更に各サンプルに対して熱伝導率の温度依存性を合わせて測定することにより、固体伝導と輻射伝導の寄与を実験的に決定した。特に輻射伝導率は温度に強く依存するため、各寄与率を決定することによって広い温度範囲に対して実験結果を適用することが可能である。本実験によって決定した固体伝導率と輻射伝導率の空隙率依存性の結果を下図に示す。この結果、調査した空隙率の範囲において固体伝導率は 1 桁以上変化し、輻射伝導率は空隙率約 0.7 以上で直線的な増加を示した。また、微惑星のような高空隙率粉体の場合、実効的な熱伝導率の約 50%、もしくはそれ以上は輻射による寄与が占めていることが明らかとなった。

更に、上記実験を含む一連の実験で明らかにした空隙率・粒径・温度・圧縮応力の依存性を総合して、熱輸送メカニズムの考察を行い、粉体熱伝導率モデルを構築した。これを用いて岩石または氷からなる高空隙率微惑星の熱進化計算を行って、焼結が起こる条件およびタイミングを制約し、それが惑星形成過程に与える影響を考察した。

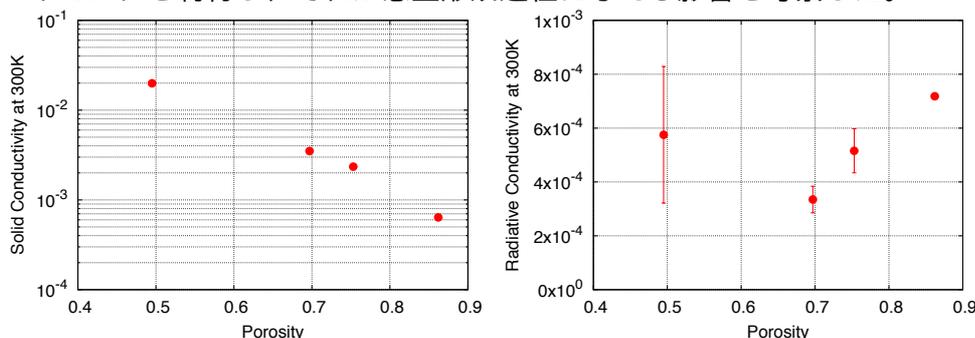


図: 本研究の実験によって決定した温度 300 K における固体伝導率 (左) と輻射伝導率 (右) の空隙率依存性。

三次元観察と室内実験から探る GEMS の起源

○松野淳也¹、土山明¹、三宅亮¹、中村圭子²、Scott Messenger²、渡辺隆行³

¹京都大学大学院理学研究科、²NASA-JSC、³九州大学大学院工学研究院

彗星起源と考えられる惑星間塵中に一般的に含まれる構成粒子として GEMS (glass with embedded metal and sulfides) と呼ばれる微粒子 (100–500 nm) があり、非晶質珪酸塩中に Fe, FeS の包有物 (10–50 nm) を含む物質である。GEMS は太陽系の主要な固体物質のなかで最も始原的なもののうちのひとつであると考えられている。その形成過程・起源については論争がおきており、太陽系内の凝縮物 (e. g. Keller and Messenger, 2013)、あるいは原始惑星系円盤内での様々な変成プロセスを逃れた星間塵 (e. g. Bradley, 2013)、と考えられている。このように提案されている GEMS 形成シナリオは、主に透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた超薄切片 (~70 nm) の 2 次元観察をもとに提案されてきた。しかし切片に対して十分に大きいわけではない GEMS の組織 (包有物の空間分布、形状など) を記載するには 2 次元観察では不十分であるため、3 次元観察によりこれらを評価するべきである。本研究では TEM による電子線トモグラフィーを行い GEMS の 3 次元観察を行なった。またこの手法ではスライス厚がうすく従来の薄片観察に比べて空間分解能が上がるという利点もある。

従来の電子線トモグラフィーでは TEM グリッドやホルダーの影により傾斜角度が ±70 度程度に制限されていたが、本研究では樹脂に埋めたクラスター無水惑星間塵を集束イオンビーム装置 (FIB) を用いて針状に加工し、さらに TEM ホルダーの先端形状を改良することにより ±90 度の回転角度からの電子線トモグラフィーを得る事が出来た。このようにして 180 度の完全トモグラフィーが可能になったことで、得られた電子線トモグラフィーの結果から GEMS の粒子外形、金属鉄粒子、硫化鉄粒子それぞれについて楕円球近似を行い形状やその分布を 3 次元で確認することができた。またそれらの粒径・形状比較すると、金属鉄は硫化鉄に比べて (1) 個数が多い (2) 粒径が小さい (3) GEMS 粒子の内部に分布している (硫化鉄は表面付近に分布) (4) 真球形状に近い、ということがわかった。

GEMS の再現を目指した凝縮実験 (Matsuno et al., 2014) では、普通コンドライト粉末を出発物質にした硫黄を含む系での凝縮実験では金属鉄を含む非晶質珪酸塩粒子が合成され、その珪酸塩粒子表面には硫化鉄粒子が付着していた。この特徴は 3 次的に観察した GEMS の組織と良く似ていることから、高温ガスの凝縮過程により GEMS が生成した可能性が高いと考えられる。また 9 割以上の GEMS 粒子は酸素同位体異常をもたない (Keller and Messenger 2011) という分析結果を考慮すると、多くの GEMS は太陽系内での凝縮物であり、一部は進化末期の星周で凝縮したものが星間空間を経て初期太陽系星雲に取り込まれたものと考えて矛盾ない。

衛星形成の舞台となる周惑星円盤の形成・進化について

○藤井悠里¹、小林浩¹、奥住聡²、犬塚修一郎¹

¹名古屋大学、²東京工業大学

ガス惑星がガスを捕獲する際には、角運動量の保存からその周りに周惑星円盤と呼ばれるガス円盤が形成されることが知られている。この周惑星円盤はガス惑星への質量供給を特徴づけるばかりでなく、衛星系の形成現場であると考えられており、非常に重要な天体である。衛星形成の詳細な理解を目指し、我々はこれまでにその土台となる周惑星円盤の形成および進化の研究を行ってきた。周惑星円盤形成初期には原始惑星系円盤から質量流入が続いている。一般的に、円盤は角運動量輸送によりガス降着して進化する。周惑星円盤では、磁気回転不安定性 (Magnetorotational Instability: MRI) が角運動量輸送を促し、その円盤面密度が決まっていると考えられていた。しかし、Fujii et al. (2014) により周惑星円盤では、公転周期が短く磁気拡散の時間スケールが小さいため、MRIは起こらないことが明らかになった。MRIによるガス降着が期待できないため周惑星円盤の面密度は質量流入に応じて増大する。円盤が重力的に不安定になると、円盤中に形成されるスパイラル形状の構造による密度波が立つ。それによって角運動量輸送が起こり、ガス降着が可能となる。その結果形成される周惑星円盤の面密度は非常に大きく、ガス降着による加熱は極めて大きい。そのため、周惑星円盤の温度は2000-3000Kにも達する。約1500Kを越えるとシリケートのような固体成分が昇華してしまうため、質量流入が活発だった時期には周惑星円盤には固体成分が存在しなかった可能性が高い。したがって、ガリレオ衛星のような規則衛星は質量流入が止まった後に円盤が冷えていくと同時に凝縮した固体成分によって形成されたと考えられる。この示唆は、これまでの衛星形成論とは全く異なる新しいものである。本講演では、高温の周惑星円盤が衛星形成に与える影響について議論する。

レゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールの推定

○山田智哉, 安藤滉祐, 諸田智克, 桂木洋光
名古屋大学大学院環境学研究科

『はやぶさ』による高精度探査データの解析により, 小惑星イトカワの表面は天体衝突起源の地震動で常に更新され続けてきた可能性が指摘されている. 例えば, 表面のレゴリス層では流動化・分級した跡が観測され[1], 持ち帰られた微粒子の宇宙線照射年代はおよそ1~3 Myrと比較的若いことが知られている[2]. 一方, 地上の室内実験ではレゴリスのような粉体に振動を加えると粉体対流が容易に生じることが知られている (e.g. [3]). しかし, イトカワをはじめとする小惑星のような微小重力環境下において粉体対流による表面更新がどのようなタイムスケールで起こるのかという点に関しては, 定量的議論がこれまで十分になされて来なかった.

この問題を解決するために, 我々は定常な鉛直振動を加えたガラスビーズ層の粉体対流速度のスケーリング則を実験的に求めた. その結果, 粉体対流の速度はほぼ重力加速度に比例することが分かった[4]. この実験結果より, 粉体対流は微小重力環境下においても(その速度は小さくなるが)発生し得るということが示唆された.

本研究では, 実験で求められた粉体対流速度のスケーリング則に加えて, メインベルト小惑星(MBA)もしくは地球近傍小惑星(NEA)における天体衝突頻度モデル[5]と小惑星の衝突励起地震モデル[6]を組み合わせ, 小惑星上で起こる粉体対流による表面更新のタイムスケール T [Myr]を小惑星直径の関数として求めた.

求めた T の表式をイトカワに適用し(先行研究[1,2]で推定されたエネルギーの変換効率: $\eta = 10^{-4}$, 衝突励起地震の Q 値: $Q = 2000$ 等を用い), NEAの衝突頻度を仮定すると $T = 17$ Myrとなり, MBAの衝突頻度を仮定すると $T = 11$ Myrとなることが分かった. このタイムスケールはイトカワの衝突寿命より短い. すなわち, 本研究により, イトカワのような小天体表面においても対流による小惑星の表面更新がその寿命内に十分に可能であることが明らかになったと言える.

[1] H. Miyamoto *et al.*, *Science* **316**, 1011 (2007).

[2] M. M. M. Meier *et al.*, LPSC abstract #1247 (2014).

[3] A. Garcimartín *et al.*, *Physical Review E* **65**, 031303 (2002).

[4] T. M. Yamada and H. Katsuragi, *Planetary and Space Science*, in press, Vol.100, Page 79-86 (2014).

[5] D. P. O'Brien and R. Greenberg, *Icarus* **178**, 179-212 (2005).

[6] J. E. Richardson Jr. *et al.*, *Icarus* **179**, 325-349 (2005).

トロヤ群小惑星の L_4 - L_5 間遷移現象の力学的機構

○大島健太, 柳尾朋洋

早稲田大学 基幹理工学研究科 機械科学専攻

近年, 太陽-木星系 (Tsiganis et al. (2000)) と太陽-地球系 (Connors et al. (2011)) において, トロヤ群小惑星が安定なラグランジュ点 L_4 および L_5 の近傍間を遷移する現象 (jumping Trojan 現象) が数値計算によって確認されたが, その力学的機構は未だ完全には解明されていない. 本発表では, 制限三体問題および制限四体問題の枠組みに基づき, 不安定なラグランジュ点 L_3 に付随する不変多様体が織り成す lobe ダイナミクスの観点から, jumping Trojan 現象の力学的機構を明らかにする.

具体的には, まず太陽-木星系のラグランジュ点 L_3 近傍から伸びる不変多様体は, 図 1(a) のように, 配位空間において多数のループを描く. そこで各ループの転向点を極座標平面に射影する loop map と呼ぶ手法を導入し, 不変多様体を射影した結果, 図 1(b) のように安定多様体と不安定多様体で囲まれる一連の lobe 構造を得た. さらに, jumping Trojan 現象を引き起こす小惑星の軌道は, これらの一連の lobe 構造の交差領域を順番に乗り移りながら最終的に L_4 と L_5 の近傍間を遷移することが分かった.

一方, 太陽-地球系の制限三体問題においては, L_3 に付随する不変多様体は lobe 構造を形成せず, jumping Trojan 現象は確認されなかった. そこで, 太陽-地球系に金星の摂動を加味した円制限四体問題 (bicircular model) を導入し loop map を適用したところ, 図 2 に示す lobe 構造を得た. ここで, bicircular model は時間に陽に依存するモデルであるため, Du Toit et al. (2009) の手法を応用して, L_3 に付随する不変多様体に対応するセパトリクスを可視化している. 図 2 において, 二つの lobe の交差領域内の点から時間前方・後方に数値積分することで, 太陽-地球系においても jumping Trojan 現象の軌道を確認できた.

本発表では, 以上の jumping Trojan 現象の力学的機構に加えて, 地球-月系の L_4 および L_5 の近傍を探索する宇宙機の軌道設計への応用についても議論する.

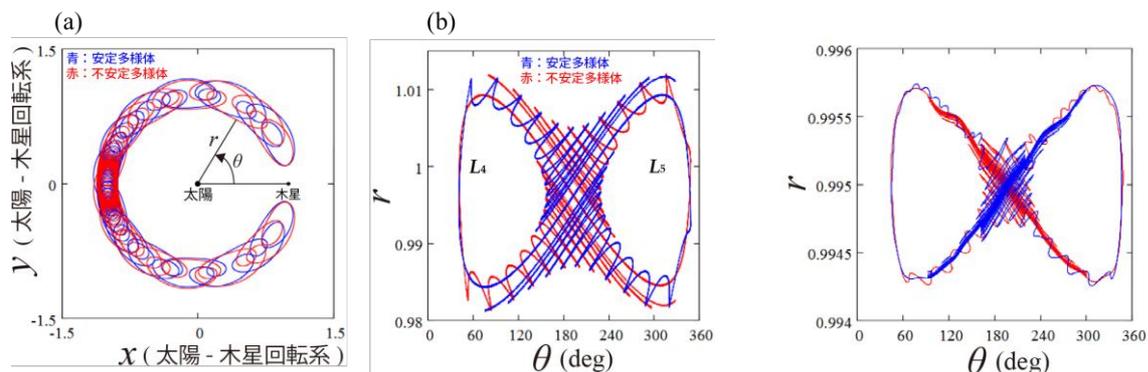


図 1. (a) 太陽-木星系の L_3 に付随する不変多様体.
(b) Loop map を用いて極座標平面に射影した不変多様体と lobe 構造.

図 2. 太陽-地球系に金星の摂動を加えた結果得られた, L_3 に付随する lobe 構造.

超高分解能赤外レーザヘテロダイン分光器による 惑星大気の連続観測

○中川広務¹, 青木翔平², 佐川英夫³, 笠羽康正¹, 村田功¹, Guido Sonnabend⁴, 岡野章一⁵
¹東北大学理学研究科, ²イタリア宇宙航空機構, ³京都産業大学, ⁴Radiometer Physics GmbH, ⁵
ハワイ大学

赤外レーザヘテロダイン分光法は、様々な分子種の回転振動遷移が存在する中間赤外域において 100 万を越える圧倒的な波長分解能を有することで、既存装置では捉えることのできない惑星大気の様々な物理量を得ることができる。特に、地球大気の吸収で検出が困難な微量大気の観測や、10m/s という高精度のドップラー検出、単一吸収線から物質・温度の鉛直分布を導出することなどに長けている。

我々は新たに開発を進めてきた赤外レーザヘテロダイン分光器を、今年 8 月にハワイ・ハレアカラ山頂に移設が完了した専用望遠鏡 T60 に搭載することで、これまで不可能だった惑星大気の連続観測を実現する。波長可変な量子カスケードレーザを複数搭載することで観測可能な分子種を拡張し、またデジタル分光器を赤外ヘテロダイン分光に初めて用いたことで、よりコンパクトで安定なシステムの構築に成功した。システム雑音レベルは波長 10 ミクロンにおいて 3,000K に抑えられ、量子雑音限界(10 ミクロンで 1,400K)のたった倍程度である。最小検出輝度温度は、積分時間 10 分において 50mK に達し(波長分解能 1.5MHz 時)、これはフラックスで $0.4 \text{ ergs}/(\text{s cm}^2 \text{ cm}^{-1} \text{ Sr})$ に相当する。

9 月より試験観測が開始され、主に火星と金星大気の 7.7 ミクロン、9.6 ミクロン、10.3 ミクロン帯の分光観測を実施する。大気の上下間結合に重要な中間圏の風速場・温度場計測、水蒸気中の同位体計測、中間赤外に多く存在する CH_4 など有機物質に絡む重要なトレースガス検出に向けた観測が実施される。加えて、専用望遠鏡という強みをつかい、惑星大気中のダイナミクスや光化学反応、気象現象などを連続的にモニタし、現象の解明に挑む。これまでにドームの建設、および望遠鏡の移設が 8 月中旬に予定通り完了した。本装置の搭載を 8 月下旬から 9 月上旬に予定している。本発表では、装置の性能や観測対象、9 月に得られるファーストライト・初期結果について報告する。

火星極域の大気環境と二酸化炭素降雪： 天気予報の可能性

○黒田剛史¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

火星大気はその 95%が二酸化炭素で構成されており，冬極では凝結してドライアイスの季節極冠が生成される．その約半分は大気中で二酸化炭素が凝結してドライアイスの雲粒となり，それが地表面に降り注いで生成されると考えられている．

火星の冬極域の温度場は，その鉛直分布が地表面から高度約 30km までほぼ二酸化炭素の凝結曲線に沿っていることが Mars Global Surveyor 搭載の Thermal Emission Spectrometer (MGS-TES)および電波掩蔽(MGS-RO)，また Mars Reconnaissance Orbiter 搭載の Mars Climate Sounder (MRO-MCS)による観測により示されている [Colaprete et al., 2008; Hu et al., 2012]．このことは火星の極夜の温度場が二酸化炭素の飽和状態になっていることを示しており，さらに MGS 搭載の Mars Orbiter Laser Altimeter (MGS-MOLA)や MRO-MCS による観測では，この領域にドライアイスの降雪があることを示唆している [Ivanov and Muhleman, 2001; Colaprete et al., 2003; Hayne et al., 2012, 2014]．火星の極夜に存在する雲粒は，粒径は最大で 50~200 μm 程度，北極では平均して南極の約 2 倍の粒径になると考えられている [Hu et al., 2012]．

また火星大気大循環モデル(MGCM)を用いた研究では，北極域での雲生成は傾圧不安定派に代表される大気波動の影響を大きく受けていることが示唆されている [Kuroda et al., 2013]．火星大気における傾圧不安定波の特徴は地球に比べコヒーレントで規則性が高く，そのため火星の降雪については長期に渡る正確な予報も地球より容易ではないかと推測できる．

本講演ではこのように観測とシミュレーションから明らかになってきている，ドライアイス降雪に代表される火星極域の大気環境について議論する．

(参考文献)

Colaprete et al., *J. Geophys. Res.* 108, doi:10.1029/2003JE002053, 2003.

Colaprete et al., *Planet. Spa. Sci.* 56, 150–180, 2008.

Hayne et al., *J. Geophys. Res.* 117, doi:10.1029/2011JE004040, 2012.

Hayne et al., *Icarus* 231, 122-130, 2014.

Ivanov and Muhleman, *Icarus* 154, 190-206, 2001.

Hu et al., *J. Geophys. Res.* 117, doi:10.1029/2012JE004087, 2012.

Kuroda et al., *Geophys. Res. Lett.* 40, 1484-1488, 2013.

火星ダスト巻き上げスキームの大気大循環モデル DCPAM へ の実装及びダスト巻き上げフラックス診断実験

○ 荻原弘堯¹, 高橋芳幸², 石渡正樹³, 小高正嗣³, 林祥介²

¹ 北海道大学大学院理学院, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 北海道大学大学院理学研究院

はじめに

火星では大気中のダストが放射を介して大気熱構造に影響している。従って、ダスト分布を決めるダスト循環(ダスト巻き上げ, 乱流混合, 移流, 重力沈降)が重要な過程となっている (Leovey, 2001)。その様な観点から、各国の研究グループでダスト循環過程スキームを組み込んだ大気大循環モデルによる計算が行われている (Kahre et al., 2006; Newman et al., 2002)。これに対して、我々が開発を進めてきた大気大循環モデル DCPAM (高橋, 2013) には、ダスト循環過程スキームを組み込んでいなかった。本研究では、DCPAM にダスト循環過程スキームの中の一つであるダスト巻き上げスキームを実装し、放射不活性なダストの巻き上げ診断実験を行い、その結果を先行研究と比較する。本研究で実装したダスト巻き上げスキームはダスト循環過程スキームの一つであり、今後は、ダスト循環過程の残りの過程を取り入れた計算を行う予定である。

モデルと実験設定

地球流体電脳倶楽部で開発されている大気大循環モデル DCPAM を用いる。DCPAM では 3 次元球面プリミティブ方程式を用いている。放射過程では、 CO_2 と大気ダストを考慮した放射スキームを用いる (Takahashi et al., 2003; 2006)。放射スキームに与えるダスト分布は一定のものを用いる。乱流過程は Mellor and Yamada (1982) レベル 2.5 に従って決めた鉛直拡散係数を用いて評価する。地表面過程は Beljaars and Holtslag (1991) の方法で評価する。地表面特性(地表面熱慣性, 地表面アルベド, 地形高度)にはマーズグローバルサーベイヤーの観測結果を用いる。数値解法としては水平方向にはスペクトル法(三角形切断, 全波数 21), 鉛直方向には差分法(鉛直層数 36)を用いる。ダスト循環過程には、ダストの巻き上げ, 乱流拡散, 移流, 重力沈降がある。本研究では、ダストの巻き上げスキームのみを実装する。具体的には、モデルで解像される風応力によるダスト巻き上げとして KMH スキーム (Kahre et al., 2006), モデルで解像できない塵旋風によるダスト巻き上げとして DDA スキーム (Newman et al., 2002) を DCPAM へ実装した。

結果

上記のモデルを用いてダスト巻き上げフラックス診断実験を行った。その結果、風応力によるダストフラックスは極冠の縁と $L_s = 180^\circ - 270^\circ$ での南緯 30 度付近で大きくなった。この緯度分布の季節変化は Kahre et al. (2006) の結果と整合的である。しかしフラックスの大きさは、DCPAM の方が大きくなっている。この差は鉛直層数の違いや乱流混合の評価の仕方に関係すると思われる。また、塵旋風によるダストフラックスは $L_s = 270^\circ - 300^\circ$ の南緯 30 度付近で大きくなっている。この結果は Newman et al. (2002) の結果と整合的である。

地表面特性は大気場に影響を及ぼし、その結果、ダストフラックスにも影響する可能性がある。よって、今後地表面特性を変えたダストフラックスの感度実験を行い、地表面特性によってダストフラックスがどの程度変動するかを調べる予定である。更に乱流拡散, 移流, 重力沈降を取り入れた実験を行う予定である。

大気大循環モデルのための放射モデル開発： 同期回転惑星大気

○大西 将徳¹, はしもとじょーじ², 倉本 圭³, 高橋 芳幸¹,
石渡 正樹³, 高橋 康人³, 林祥介¹

1 神戸大学大学院理学研究科, 2 岡山大学大学院自然科学研究科, 3 北海道大学理学院

1. はじめに

系外惑星の大気環境を推定するためには大気大循環モデル(GCM)が有用であり, 我々は地球型惑星の大気を持った系外惑星を想定し, GCM で用いるための放射モデル開発を進めている。GCM で使用される放射モデルには, k-分布法などにより決定された吸収係数が用いられるが, 様々な温度圧力環境が想定される系外惑星においてはその条件で適用可能な吸収係数を使う必要がある。そこで我々は, 対象となる惑星大気の光学特性(光学的厚さ, 放射フラックス)を line-by-line 放射モデルによって計算し, その光学特性をもとに GCM 用の放射コードを作成する設計で開発を進めている。

本発表では, 本放射モデルの概要を報告するとともに, 同期回転惑星への適用可能な放射モデルについて line-by-line モデルによる 1 次元計算も踏まえて議論する。

2. モデル概要

モデルは 3 つの部分からなる。大気分子の吸収断面積などの光学パラメタを line-by-line 法により計算する line-by-line モデル, 光学パラメタをもとに, 大気の放射計算を行う放射伝達モデル, line-by-line モデルにより計算された光学パラメタをもとに大循環モデル用の光学パラメタを計算する k-分布モデルである。

line-by-line モデルは, HITRAN (Rothman et al., 2013), HITEMP (Rothman et al., 2010) の吸収線データをもとに大気分子の吸収断面積を計算する。吸収線の形は voigt 線型, 吸収線の中心から 25 [cm⁻¹]に cut off をもうけている。水蒸気などの連続吸収は MT_CKD 連続吸収モデル (Mlawer et al., 2012) を使って計算する。

放射伝達モデルは, 大気散乱を含んだ 2 流近似 (Toon et al., 1989) により放射伝達を解いている。

k-分布モデルでは, line-by-line モデルによるフラックスのプロファイルをよく再現するように GCM 用の吸収係数を計算する。計算対象に合わせ, 波数バンド(サブバンド)の数を選べるようなモデルにすることで, 計算精度とコストを対象に合わせて最適化できるモデル目指して開発を進めている。

同期回転惑星大気の数値実験: 昼夜間熱輸送に関する検討

○石渡 正樹¹, 阿部 豊², 倉本 圭¹, 高橋 芳幸³ 中島 健介⁴, 林 祥介³

¹ 北大・理, ² 東大・理, ³ 神戸大・理, ⁴ 九州大・理

はじめに

系外惑星の気候多様性を探ることを目的として, 我々はこれまでに, 水蒸気を含む地球的な大気を持つ同期回転惑星の気候に関する GCM 実験をおこなってきた. 昨年の講演 (石渡他, 2013 年度講演会) では, 地球大気用放射スキームと簡単な雲スキームを導入した場合における大気循環と昼夜間熱輸送の結果を示した. ここでは, それらに対して雲の存在が与える効果について調べるため, 雲が無い場合についての実験を実施し, 雲有りの場合と雲無しの場合との比較を行った.

モデルおよび実験設定

用いたモデルは惑星大気大循環モデル DCPAM (高橋他, 2013) である. その力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成り, 水平方向には球面調和函数変換によるスペクトル法, 鉛直方向には σ 座標系での差分法を用いている. 放射過程では, 水蒸気, CO_2 , 雲による放射の吸収と散乱を考慮する (Chou and Lee, 1996; Chou et al., 2001). 積雲対流については, Relaxed Arakawa-Schubert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992) を用いた. 雲水量の時間発展は, 積雲対流スキームの結果から計算される生成項, モデルに与える消滅時間に基づく消滅項, 移流を考慮した時間発展方程式を用いて求める. 雲消滅時間を 0 とすることにより, 雲無しの場合についての実験を行った. 全球の地表面に対して沼条件を仮定した. 入射放射分布として, 赤道上的点を恒星直下点とする固定した分布を与える. 地球の値で規格化した自転角速度 Ω^* には, 0 から 1 までの 7 通りの値を与えた. 太陽定数, 惑星半径, 表面気圧などは地球の値を用いた. モデルの解像度は T42L22 とした.

結果

雲有りと雲無しの場合で昼夜間熱輸送量の比較を行った. 定常状態を仮定すると, 夜半球 OLR (図中の ○) は昼夜間熱輸送量に等しくなる. 雲有り/無しによらず, 昼夜間熱輸送量は Ω^* にほとんど依存していない. この理由として, 昼半球 OLR は射出限界により制限され, 昼夜間熱輸送量は入射放射量と射出限界の差で決定されるためであると我々は考えている. 雲有り/雲無しの違いは, 熱輸送量の内訳に現れる. 雲有りの場合は, Ω^* によらず, 潜熱輸送量 (図中の ★) が顕熱輸送量 (図中の ▼) に比べて小さい.

これに対して, 雲無しの場合, $\Omega^* = 0.75$ において潜熱輸送量が顕熱輸送量程度まで増加する. $\Omega^* = 0.75$ における潜熱輸送は主に昼半球から夜半球に移動する擾乱によって起きており (図は示さない), 雲有りの場合には擾乱の活動度が低下することがわかった.

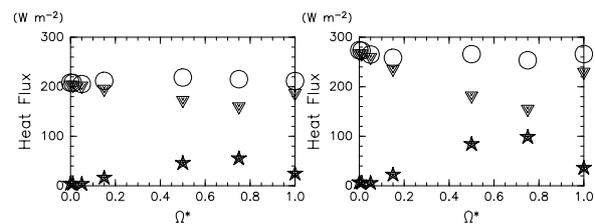


図1: 夜半球大気熱収支. 左図が雲有りの場合, 右図が雲無しの場合. ○は OLR, ▼は昼半球からの顕熱輸送量を半球面積で割ったもの, ★は昼半球からの潜熱輸送量を半球面積で割ったもの.

初期火星大気中の主成分凝結対流の二次元数値実験 — 雲分布の凝結核数混合比に対する依存性 —

山下達也¹, 小高正嗣², 杉山耕一朗³, ○中島健介⁴, 石渡正樹²,
西澤誠也⁵, 高橋芳幸⁶, 林祥介⁶

¹ 国土地理院, ² 北大・理, ³ ISAS/JAXA, ⁴ 九大・理, ⁵ 理研 AICS, ⁶ 神戸大・理

1. はじめに

初期の火星においては大気主成分である CO₂ の凝結が広範に起こっていたと考えられ, その際に生じる CO₂ 氷雲の散乱温室効果は温暖な気候をもたらした要因として研究されている (Forget *et al.*, 2013). 散乱温室効果は雲の分布に強く依存し, 大気主成分である CO₂ の凝結をとまなう対流は雲の分布を決める要因の一つとして重要な役割を果たすと考えられる. Colaprete *et al.* (2003) は主成分凝結を伴う対流を考察し, その性質は凝結に必要な臨界飽和比に強く依存するであろうことを主張した. しかし対流にとまなう雲の分布についての情報はほとんど得られていない. この問題に対し, 我々は主成分の凝結を考慮した 2 次元雲解像モデルを開発し, これを長時間積分することにより主成分凝結を伴う対流の統計的平衡状態における流れ場と雲の分布を調べてきた. 本発表では臨界飽和比, および雲の生成と重力沈降に影響を与えるパラメータである凝結核数混合比に対する依存性を中心に, これまで行ってきた数値実験結果を報告する.

2. モデルと計算設定

支配方程式は準圧縮系に主成分凝結過程を取り込んだものである. 基本場の大気量は 2.0×10^5 Pa とする. 初期温度は高度 20 km より下で乾燥断熱減率, 高度 20 km から 50 km まで飽和蒸気圧曲線, 高度 50 km より上で等温とする. 地表温度は最下層の初期温度 (273 K) に固定する. 放射過程は陽に解かず, 高度 0 km から 50 km に冷却率 -0.1 K/day の水平一様冷却 (Kasting, 1991), 高度 50 km より上でニュートン冷却を与える. 臨界飽和比は 1.0 と 1.35 (Glandorf *et al.*, 2002), 凝結核数混合比 N^* は 5.0×10^8 , 5.0×10^6 , 5.0×10^4 kg⁻¹ とし (Forget *et al.*, 2013), 計 6 通りの数値実験を行なう. 計算領域は水平 100 km, 鉛直 80 km, 格子間隔は水平 500 m, 鉛直 400 m である.

3. 計算結果

臨界飽和比が 1.0 の場合, 凝結核数混合比によらず準定常的な流れ場と雲分布が実現する. 凝結高度 (高度約 20 km) よりも下ではベナール対流と似た構造の乾燥対流が生じ, 凝結高度より上では重力波が卓越する. 雲は重力波の上昇流域で生じ, N^* が大きいほど平均的な雲密度は大きくなる. 臨界飽和比が 1.35 の場合は, 流れ場と雲の分布は凝結核数混合比に依存する. $N^* = 5.0 \times 10^8$ kg⁻¹ の場合の凝結の様子は臨界飽和比が 1.0 の場合と同様であったのに対し, $N^* = 5.0 \times 10^6$ kg⁻¹ および 5.0×10^4 kg⁻¹ の場合には, 凝結高度より上空で過冷却状態が維持され凝結が生じない時期と, 凝結が短時間のイベントとして生じる時期が交互に現れるようになる. 凝結イベント時の雲の発達する様子も N^* によって変化することがわかった. 得られた雲粒のサイズと分布から大まかに見積もられた雲の光学的厚さは, 温暖な初期火星を維持するために必要な散乱温室効果 (Forget *et al.*, 2013; 光田, 2007) に好適なものではなかった. ただし, 本研究では N^* を各計算で固定しているため, この点をさらに追求するには N^* を予報するモデルを用いた検討が必要である.

すばる望遠鏡戦略枠観測「SEEDS」による 原始惑星系円盤および系外惑星探査

○ 工藤智幸¹, 田村元秀^{1,2}, 神鳥亮¹, 白田知史¹, 葛原昌幸³,
橋本淳⁴, 松尾太郎⁵, SEEDS/HiCIAO/AO188 team.

¹ 国立天文台, ² 東京大学, ³ 東京工業大学, ⁴ オクラホマ大学, ⁵ 京都大学

「すばる望遠鏡戦略枠」とは他の追従を許さないユニークな観測装置(またはその組み合わせ)を用い、個人または個別グループの研究課題を超えて、長期に渡るまとまった観測を行おうというものである。2008年7月、系外惑星・円盤探査の大規模サーベイ「SEEDS(Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru)」が初めてのすばる望遠鏡戦略枠として採択され、2009年10月に観測が開始された。

本観測は主に HiCIAO と呼ばれる高コントラスト近赤外線撮像装置と補償光学系 AO188 との組み合わせで行っている。HiCIAO は常温のコロナグラフ機構と差分光学系を備え、AO188 と組合せることで、すばる望遠鏡の回折限界の空間分解能と、明るい中心星から 0.1~1 秒角の範囲で 4~6 桁の高コントラスト達成している。

SEEDS では、5 年間で約 500 個の太陽質量程度の若い天体(年齢 10 億年以下)の撮像サーベイを行う。本プロジェクトは天体の種類によっていくつかのカテゴリーに分かれており、原始惑星系円盤の形態を 0.06" 程度の解像度で中心星のごく近傍(約 0.1 秒角)まで解明し、さらに若い星近傍における木星質量程度の系外惑星を直接検出することを目標としている。

2014 年 7 月 14 日現在、計 115 夜で約 420 天体の観測を遂行し、円盤の付随を示唆する数多くの新しい結果や、未知の伴星候補天体の検出にいくつも成功している。本講演では、これまでの 4 年間に渡る SEEDS 戦略枠全体の進捗状況と観測結果の紹介、そして最終年度に向けた展望について報告する。

A dynamical study on the habitability of the exoplanet 40307 g

Ramon Brassler¹, Shigeru Ida¹, Eiichiro Kokubo²

¹Earth-Life Science Institute, ² National Astronomical Observatory of Japan

Recent observational results from the HARPS survey and the *Kepler* satellite indicate that about half of all solar-type stars are host to a number of planets with periods shorter than 100 days and masses lower than 30 Earth masses. These planetary systems are usually compact with the planets residing on dynamically cold orbits. Their compactness makes it challenging to keep them dynamically stable. We investigate the stability of the compact system surrounding the K dwarf star HD 40307. It could host up to six planets smaller than Neptune, five of which are within 0.25 AU with a sixth (planet g) out at 0.6 AU in the middle of the habitable zone. We analyse the system's dynamical stability using numerical simulations and frequency analysis from initial conditions that lie within the observational uncertainties. We report the most stable solution deviates about 3.1σ from the published values. The system is stable if planets e and f are apsidally aligned, and planets b and c should also be aligned. These alignments require two eccentricity modes to be damped, posing constraints on the formation, and the past tidal evolution of the system. We study how the dynamics of the system affects the habitability of planet g by calculating the yearly-averaged insolation and black-body temperature at the pole. Both the insolation and black-body temperature undergo strong variations because of its high eccentricity (0.22). The insolation variations are precession dominated, with periodicities of 40 kyr for precession and 102 kyr for obliquity if the rotation period is 3 d. A rotation period of about 1.5 d causes extreme obliquity variations because of capture in a Cassini state unless the obliquity is at the fixed point. For even shorter rotation periods (roughly 12 h) the precession periodicity converges to about 10 kyr and the obliquity to 20 kyr. We conclude that the insolation variations are much more intense than on Earth.

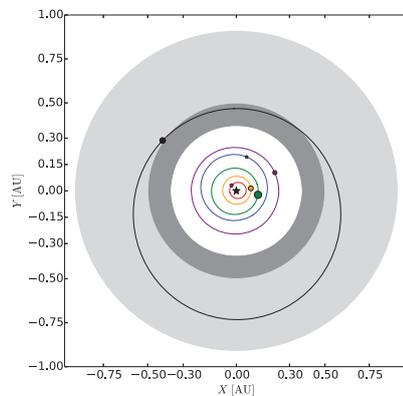


Figure 1: The HD 40307 planetary system.

地球型水惑星の地表水分布と暴走温室限界

○新田光¹、阿部豊¹、大石龍太²、阿部彩子²¹東大・理 ²東大・大気海洋研

液体の水は惑星気候に大きく影響を与えることに加えて、生命の生存可能性を議論する上でも重要な物質である[e.g. Kasting et al., 1993]。この液体の水を地表にもつ惑星が、ある閾値をこえる中心星放射を受け取った時、水が全て蒸発してしまうことが知られている。これは強い温室効果気体である水の正のフィードバックが原因で、このような状態を暴走温室状態と呼ぶ。暴走状態に達する閾値(=暴走温室限界)については現在に至るまで数多く議論がなされている[e.g. Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013]。<引用の根拠がよくわからない>

この暴走温室限界の値が、液体水自身の地表分布によって大きく変化することが、近年明らかになってきている[Abe et al., 2011]。

惑星スケールの地表水分布は、大気循環と惑星の持つ水の量、地形によって決まる。地球のような、水の量が多い惑星では、地表に十分な量の水が行きわたり、赤道域から極域まで広く水が分布する。

一方で、大気循環は、地表の水を赤道域から極域方向に運ぶ[Abe et al., 2005]。水の量が少ない惑星では、地形によって地面の水の流れが阻まれ、大気循環により両極域まわりに水が局在化する。水が高緯度側に局在化されているとき、低緯度側はよく乾燥するので水の温室効果が弱く、強い惑星放射が可能になる。Nitta et al. [2014, 連合大会]では、この効果に着目し、GCMによる数値実験から、地球型惑星において、水の局在化の程度によって、暴走温室限界が最大で 430W/m^2 (全球

平均値)となり、 170W/m^2 程度変化することが示された。

但し、上記の研究においては、緯度方向の水の局在化が暴走温室限界に最も大きく寄与することを仮定している。地球を見ても分かるように、地表水分布を決める要素の1つである地形の効果のため、経度方向にも水分布は一樣ではない。この経度方向の水分布が気候に与える影響は、未だよく分かっていない。

そこで我々は、地球型惑星の地表水分布について、経度方向の分布にも着目することで、暴走温室限界に与える影響を系統的に知ることを目的とし、GCMを用いた数値実験を行った。

今回我々は、Nitta et al. [2014, 連合大会]と同様、CCSR/NIES AGCM 5.4g [Numaguchi, 1999]を用い、1気圧の空気を持った地球型惑星に対して、大気中の水蒸気輸送を計算した。地表面の水の流れはGCMでは計算できないため、それらの効果として緯度方向に一樣、経度方向に非一樣な地表水分布を境界条件として与えた。これに対し、太陽放射強度を増大させていき、定常状態が維持できなくなる暴走温室限界を求め、地表水分布と暴走温室限界の関係を調べた。

上記手法による実験の結果、経度方向の水分布によって海面積が等しい場合においても、暴走温室限界に最大で 40W/m^2 程度の差が現れた。本発表では、この差が緯度方向の水分布の不均一のみ考慮していた従来の結果にどう影響を与えるかについて、議論する予定である。

全球凍結状態にある系外地球型系外惑星の存在確率

○門屋 辰太郎¹, 田近 英一²¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻² 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

地球では、炭素循環による負のフィードバックによって、温室効果を担う大気 CO₂ 濃度が自己調節され、温暖な環境が維持されてきた (Walker et al., 1981). 炭素循環は海を持つ地球型惑星の表層環境を温暖に保つ重要なメカニズムであると考えられている. しかし、たとえ炭素循環が機能していても、惑星内部からの CO₂ の供給率 (脱ガス率) が小さければ、地球型惑星は全球凍結状態になることが予想される (Tajika, 2003). 一方、全球凍結中は地表面に液体の水が存在せず、ケイ酸塩の化学風化反応が停止するため、火成活動によって大気中に CO₂ が蓄積し、いずれは全球凍結状態から脱出するものと考えられる (e.g., Kirschvink, 1992). このことは、CO₂ 脱ガス率が小さい条件では、全球凍結状態と非全球凍結状態が繰り返されるという特徴的な挙動が生じることを意味する. 全球凍結地球型惑星 (スノーボールプラネット) は、地表面に H₂O が存在する地球型惑星が取りうる存在状態のひとつとして、重要な観測対象であると考えられる. そこで、本研究では、地球と類似の系外惑星 (海を持ち炭素循環が働く地球型惑星) が全球凍結状態として観測される確率の推定を行った.

炭素循環モデルを結合した南北 1 次元エネルギーバランスモデルを用い、日射量と CO₂ 脱ガス率に関してパラメータスタディを行うことで、全球凍結に陥る条件とその継続時間を推定した. その結果、ハビタブルゾーンの広い領域で地球型惑星は周期的に全球凍結状態と非全球凍結状態を繰り返す (全球凍結モード) ことが明らかになった. たとえば、火成活動に伴う CO₂ 脱ガス率が現在の地球と同じであっても、日射量が現在の太陽定数の約 0.9 倍を下回ると (軌道長半径に換算して 1.05 AU 以遠だと) 全球凍結状態になってしまう. ハビタブルゾーン全域で全球凍結状態にならないことを保証するためには、現在の地球の数倍の CO₂ 脱ガス率が必要である. また、全球凍結モードでは、全球凍結期間は非全球凍結期間の少なくとも数倍以上であることも明らかになった. 惑星の進化にともない、CO₂ 脱ガス率は低下すると考えられる (e.g., Tajika & Matsui, 1992). このことから、年齢の古い系外惑星系におけるハビタブルゾーンに存在している地球に類似の地球型惑星の大部分は、全球凍結状態として観測される可能性が高いことが予想される.

巨大ガス惑星の雲層構造と放射冷却過程

○高橋康人¹, はしもとじょーじ², 石渡正樹¹, 高橋芳幸³, 大西将徳³, 倉本圭¹

¹北海道大学, ²岡山大学, ³神戸大学

本研究は、巨大ガス惑星を代表し最もよく観測がおこなわれている木星において、雲の存在が大気中の放射伝達過程および熱収支にどう影響するのかを、放射伝達モデルを用いた数値実験によって明らかにすることを目的とする。

木星では複数の分子種が凝結して雲を形成することが理論的に予想されており、観測からもそれを支持するデータが得られている。しかし雲頂以下の大気構造について観測から得られる情報は限定的なため、雲形成の起きている高度範囲の詳細な大気構造についてはわかっていない。雲構造の形成に関しては、対流圏における鉛直対流運動が大きな役割を果たすと考えられる。対流運動は大気の放射冷却によって引き起こされる対流不安定によって駆動され、これにより雲が生じる。雲は光学的な寄与が大きいため、大気中の放射伝達過程に影響し、それが放射冷却の様相を変化させる。すなわち放射伝達と対流運動は相互依存の関係にあり、両者の橋渡しをする放射冷却過程を明らかにすることが、雲構造を推定する上で必要不可欠である。しかしながら従来の研究では、放射冷却過程についての系統的な研究はなされていない。

本モデルは、木星を想定した平行平板大気の1次元放射伝達モデルである。気体吸収として H_2 , He の衝突誘起吸収および H_2O , CH_4 , NH_3 , H_2S , PH_3 の線吸収を考慮し、気体によるレイリー散乱、ならびに雲粒による消散も導入している。また、放射伝達計算は二流近似 (Toon et al., 1989) を用いている。実験では、平衡雲凝結モデル (ECCM, Atreya et al., 1999) による雲水量分布を基準として、雲の粒径や雲水量を様々に変えた計算を行い、これらが惑星の熱放射スペクトルおよび放射冷却率にどう影響するかを調べた。

これまでの実験から、観測された木星の熱放射スペクトルの二つのピーク (200 cm^{-1} 付近の熱放射の主ピークおよび 2000 cm^{-1} 付近の大気の窓領域のピーク) を再現するには、雲水量が ECCM の千~十万分の1程度である必要があることがわかった。この推定は木星多成分雲対流の流体力学計算 (Sugiyama et al., 2014) から得られた雲水量分布と同程度ないしより小さい。熱放射の主ピークのスペクトル強度の観測値は、雲無しの場合の計算値にほぼ一致している。この場合、放射冷却率分布は 0.7 bar 付近にピークを持つが、これは NH_3 雲による雲頂レベル ($\sim 0.5\text{ bar}$) よりも深部にある。そのため、ECCM と同程度の雲水量を与えると雲による放射の遮蔽の影響を強く受け、熱放射の主ピーク強度が観測値よりも著しく減少してしまう。一方、今回推定された雲水量を与えた場合には、雲は主ピーク帯の放射伝達にさほど影響せず、対流層の放射冷却率分布は雲無しの場合からほとんど変化しない。ただし窓領域の観測スペクトル強度は、雲無しの場合よりも明らかに小さく、こちらは雲層による部分的な消散を考慮することで説明できる。

ヘイズを持つ系外惑星の大気透過スペクトルモデル： 温度および組成の鉛直分布の影響

○川島由依¹、生駒大洋¹、福井暁彦²、成田憲保^{2,3}

¹東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、²国立天文台、³総合研究大学院大学

1995年に最初の系外惑星が発見されて以来、現在までに1000個以上の系外惑星の発見が報告されている。最近では、ひとつの惑星に対して多波長でトランジット観測が行われるようになった。惑星のトランジット時に起きる恒星光度の見かけの減少から、その惑星の半径が分かる。また、測定された半径の波長依存性（これを大気透過スペクトルという）には、惑星大気中の分子やヘイズによる吸収・散乱の情報が含まれる。従って、観測データと理論的な大気透過スペクトルモデルとを比較することにより、惑星大気の組成を制約できる。大気組成は、惑星の内部組成や構造、熱進化、形成過程などを考える上で重要である。

これまでに我々の観測グループは、低温度星を回る3つの系外惑星（WASP-80b と GJ 3470b、GJ 1214b）に対して多波長でのトランジット観測を行った（Fukui et al. 2013, 2014; Narita et al. 2013ab）。この3つの惑星とも、理論的にはヘイズが存在しうる惑星である。しかし、ヘイズの存在を考慮した大気透過スペクトルに関する先行研究では、ヘイズの存在を仮定しているにも関わらず、温度・組成分布にヘイズの影響を考慮していなかった。また、ヘイズの生成高度は大気組成（CH₄やCOの存在度など）に強く依存する。一方、大気組成は温度構造と密接に関係している。したがって、温度構造とヘイズの生成高度は独立に扱えない。特に、我々が対象としてきた500-1000Kの惑星大気では重要である。そこで本研究では、ヘイズの存在と矛盾しない温度構造を計算し、大気透過スペクトルモデルを作成した。そして、そのモデルをいくつかの系外惑星に適用し、その大気組成について議論する。

本研究では、大気透過スペクトルモデルの作成において、惑星大気分子およびヘイズによる主星光の吸収・散乱と、化学平衡と放射平衡を満たす鉛直組成分布を考慮した。吸収線パラメータのデータベースには、HITRAN2012（Rothman et al. 2013）とKurucz(1992)を用いた。ヘイズについては、ソリンと呼ばれる炭化水素化合物を想定し、その複素屈折率の値はKhare et al. (1984)を用いた。放射平衡を満たす温度構造の計算にはGuillot(2010)の解析解を用いた。大気組成は、太陽組成、太陽組成からその重元素量やC/O比を変えたもの、水蒸気に富んだ大気などを考え、大気組成によるスペクトルの違いを調べた。また、ヘイズの高度や数密度に対するスペクトルの依存性も調べた。実際のトランジット半径の観測値と大気透過スペクトルモデルとを比較し惑星の大気組成について議論する際、カイ2乗検定を行い、各大気モデルの妥当性を定量的に評価した。

原始太陽系星雲ガス中で集積成長する 火星の混成型原始大気とその保温効果

○齊藤大晶¹, 倉本圭¹

¹ 北大理

隕石年代学を加味した最新の惑星形成論によると、火星は寡占成長により形成した原始惑星の唯一の生き残りであると考えられている。特に、火星隕石の年代学からは、火星の金属核の形成が寡占成長中に進行したことが示唆されている (Dauphas et al., 2011)。金属核の分化には一定の規模の融解が必要である。微惑星の衝突は、原始火星が現サイズの 1/2 以上になると十分高速度になり、微惑星から H₂O をはじめとする揮発性成分が脱ガスする。一方、寡占成長は原始太陽系星雲ガス中で進行するため、集積中の原始火星は星雲ガスおよび脱ガス成分の双方からなる、いわゆる混成型原始大気を獲得していたと予想される。混成型原始大気は、集積エネルギーの宇宙空間への散逸を妨げ、原始惑星の大規模な融解を引き起こした可能性がある。しかしながらこのような大気の構造や性質に関しては、これまでほとんど調べられていない。

そこで、本研究では星雲ガスおよび脱ガス成分からなる混成型原始大気を想定した 1 次元放射対流平衡モデルを構築し、その熱的構造について調べた。ここでは、上層が星雲ガス由来成分で構成され、下層が微惑星脱ガス成分で構成される二重大気層を仮定した。微惑星脱ガス成分は、H₂, H₂O, CH₄, CO からなるとする。これら分子種の混合比には、金属相-シリケート相-気相間の熱化学平衡を理論的に求めた結果 (Kuramoto, 1997) を適用する。また、輻射輸送には、H₂, He, H₂O, CO, CH₄ による吸収を考慮する。大気組成の鉛直分布と断熱減率には H₂O の凝結を考慮した。火星軌道上の星雲ガスの温度と圧力は Kusaka et al. (1970) に従った。放射対流平衡構造は、集積加熱率および、脱ガス成分大気質量の関数として得られる。集積時間は、年代学的制約と矛盾のない 1-6 Myr とし、質量集積率は時間的に一定とした。

星雲ガス由来成分のみで構成される大気の場合、集積時間に依らず地表面温度は 700 K を超えない。一方、本モデルの場合、脱ガス成分の大気量が火星質量の 1% 以上で、なおかつ集積時間が 5 Myr 以内であるならば、集積最終段階の火星の地表面温度は、岩石の融点の目安である 1500 K を超えることがわかった。また、原始火星が現在の半分の質量であっても、集積時間が 3 Myr 以内で、大気質量がこの段階での惑星質量の 0.5% 以上ならば、地表面が熔融する。すなわち、火星の材料となった微惑星が H₂O をはじめとする揮発性成分を十分に含有し、かつ急速な集積が実現した場合、原始大気の保温効果によって、成長中の火星にマグマオーシャンが持続的に形成される可能性があることがわかった。このような全球的マグマオーシャンは、年代学が示す急速なコアの形成を促した可能性がある。

マグマには特に H₂O を溶解させる性質があることから、一度脱ガスした H₂O の一部はマントルに再分配される可能性が高い。地質学的証拠から、約 40 億年前の火星は温暖湿潤で、水が豊富に存在する表層環境を有していたと推定されている。原始太陽系星雲ガスの散逸や初期太陽の強い EUV 放射などによって、集積中に形成された原始大気の大部分が失われる一方、火成活動による脱ガスによって、表層に H₂O が供給されたのかもしれない。

Interior Structures and Atmospheres of Short-Period Super-Earths

○Yasunori Hori and Douglas N.C. Lin

Department of Astronomy & Astrophysics, University of California, Santa Cruz

In the vicinity of a central star, low-mass planets with masses from the Earth to Neptune (hereafter, super-Earths) are common, rather than close-in gas giants such as well-known hot Jupiters. The mass-radius relation of super-Earths (SEs) found that high-density SEs such as CoRoT-7b and Kepler-10b are likely composed of rocky or iron material similar to the Earth and Mercury, whereas short-period SEs with densities lower than water, e.g., Kepler-11e, exist. Atmospheric spectroscopy of SEs around M/K-type dwarfs also revealed that such close-in SEs show flat and featureless patterns of absorption spectra, which invoke two possible atmospheric models, either atmospheres enriched with “icy” components such as water and carbon dioxide or hazy/cloudy atmospheres. It is, however, not clear that how low-density SEs formed and why they failed to become gas giants as well. In this study, we focus on two scenarios for the origin of low-density SEs: (1) planets that formed beyond the snow line migrate inward and (2) they grow up to the present-day SEs via giant impacts. Following these pictures, we discuss effects of formation processes on figures of close-in SEs, that is, interior structures and atmospheres of close-in SEs.

形成過程から探る短周期スーパーアースの大気と内部構造

○堀 安範, Douglas N.C. Lin (カリフォルニア大学サンタクルーズ校)

中心星近傍の領域では hot Jupiterのような短周期巨大ガス惑星よりも、地球から海王星サイズの惑星（以下、Super-Earth）が普遍的かつ豊富に存在する。短周期Super-Earthのなかには、CoRoT-7bやKepler-10bに代表される岩石／鉄主体の惑星以外に、低密度なSuper-Earthの存在が知られている。さらに、大気の透過分光観測から、それらの惑星は、水蒸気や二酸化炭素といった「氷」成分に富んだ大気、または雲やもやに覆われた水素・ヘリウムに富む大気を保持している可能性が示唆されている。しかし、これらの短周期Super-Earthがどのように形成されたのか、そしてガス惑星にならず、適度な大気量を獲得出来たのかは良く分かっていない。そこで、本講演では、これらの低密度なSuper-Earthについて、(1) 遠方領域で形成された後、惑星移動して来た、(2) 巨大衝突によって形成された、の2つの起源に基づいて考察する。併せて、形成過程の違いが短周期Super-Earthの内部構造にどのような影響を及ぼすのかについても議論する。

原始海洋組成の解明に向けて

Splashed Hadean Seawater Hypothesis

玄田英典 (ELSI/東工大)、上野雄一郎 (ELSI/東工大)、臼井寛裕 (東工大)、
上田翔士 (東工大)、Bao Huiming (Louisiana State Univ.), Tao Sun (JSC/NASA)

地球最古の生命の痕跡は約 38 億年前の地層に記録されており、生命が誕生した冥王代の環境がいかなるものであったのかを知る事は生命の起源を解明することにとって極めて重要である。しかし地球上には 40 億年前よりも古い地層は残されておらず、生命誕生のプロセスがどのような環境下で進行したのかを直接調べることは困難である。

そこで我々は、40 億年前までは地球への隕石衝突が盛んであったことに着目し、衝突により宇宙空間に飛び出した地球海水と、そこに溶けていた化学成分（塩）が月の表面に付着し、その記録が現在も月に残されているはずであるという仮説を提唱する。我々の予察的な見積では、地球海水の 10% が等方的に飛散した場合、月表面には 2cm 厚ほどの塩類が堆積すると試算されている。

大量の原始海洋が地球を飛び出し、月表面に記録されれば、月表面のサンプルを詳細に分析することによって、冥王代の原始海洋の化学組成を明らかにできるかもしれない。そこで、この過程が実際にどの程度の規模で起こるのかを定量的に検証するため、衝突シミュレーションを行い、宇宙空間に吹き飛ばされる原始海洋の水量を定量的に求めた。本発表では、それらの計算結果を示し、また、本仮説を実際に検証するためには何をすべきか、また何を計画しているのかについても議論をする予定である。

周惑星ガス円盤中で形成する巨大氷衛星の原始大気

○三上峻¹, 高橋康人¹, 倉本圭¹

¹北海道大学 理学院 宇宙理学専攻

巨大氷衛星ガニメデ、カリスト、タイタンはサイズと平均密度が似るにも関わらず、その表層環境に顕著な差異が存在する。タイタンは太陽系の衛星として唯一厚い大気を持ち、その主成分である N_2 は、近年の探査機カッシーニのデータによれば、 NH_3 のような他の窒素分子種に由来する可能性が高い。しかし、大気の形成がいつどのように進化したのか、またなぜタイタンだけが大気を持つのかは未解決の問題であり、これは、集積期の巨大氷衛星の物理状態について不明な点が多いことに起因する。

近年有力視される衛星形成理論によると、巨大氷衛星をはじめとする規則衛星は低温・低圧な周惑星円盤において比較的長い時間をかけて集積成長する。そのような形成条件では、集積期の巨大氷衛星では氷成分の大規模な融解は生じなかったとする主張があるが、そこでは原始大気の保温効果が無視されている。実際には、低温の円盤環境下では巨大氷衛星は大量の円盤ガスを捕獲し、蒸発した氷成分とともに厚い原始大気を形成する可能性がある。

そこで本研究では、このような混合型大気の放射対流平衡構造とその保温効果について数値的に検討した。原始大気は衛星ヒル半径において周惑星円盤と静力学的に接続し、大気成分には円盤ガス成分の H_2 , He と材料物質中の氷に含まれる H_2O と NH_3 を考慮する。大気は成層圏と対流圏で構成され、氷蒸発成分は成層圏では混合比一定、対流圏では蒸気圧に従う。また、それぞれの衛星形成場の円盤条件は Canup and Ward (2002) をもとに、ガニメデ、カリスト、タイタン軌道でそれぞれ 150 K, 120 K, 50 K, 円盤圧力は 0.1-10 Pa とし、地表面温度の関数として大気上端の熱放射フラックスを算出した。

いずれの円盤条件においても、地表面温度が 200 K 以上の場合には、 H_2O と NH_3 の寄与により大気が光学的に厚くなり、大気上端からの熱放射フラックスは大気無しの場合より顕著に小さい。一方、地表面温度が低い場合、ガニメデ・カリスト条件下では熱放射フラックスは黒体放射に漸近する。これは背景温度が比較的高いために大気のスケールハイトが大きく、低圧で光学的に薄い大気となるからである。一方、タイタン条件下では、同じ地表面温度に対し、熱放射フラックスが黒体放射に近い解に加え、これよりも著しく小さな解も出現する。後者の解は、背景温度が低いために重力的に強く束縛された光学的に厚い大気を獲得することに対応する。

この結果から、ガニメデやカリストの場合、集積完了後に原始大気は冷却し、 H_2O と NH_3 は凝結により大気から取り除かる。一方、 H_2 と He の重力的な束縛が弱い場合、これらは円盤ガスの散逸に追従して失われる。これとは対照的に、タイタンの場合、集積エネルギーの解放が完了したのちも、太陽や原始土星からわずかな放射エネルギーを受け取ることにより、比較的高温 (~ 200 K) の原始大気が保持されると考えられる。重力的束縛が強いため、円盤散逸後も原始大気は残存し、氷成分から揮発した NH_3 が高分圧で維持される可能性がある。現在のタイタン大気の N_2 はこの NH_3 が光化学反応プロセスを経ることで生成されたのかもしれない。

周惑星ガス円盤中での微惑星軌道進化と 原始衛星への衝突確率

○清水俊平 大槻圭史

神戸大学大学院理学研究科

質量の十分大きな巨大惑星は、形成過程の後期で原始惑星系円盤から重力によりガスと固体を捕獲し、周惑星円盤を形成する。木星のような巨大ガス惑星の周りに存在する規則衛星は、公転軌道がほぼ円軌道で惑星の赤道面に沿っていることから、この周惑星円盤内で固体が集積し、形成されたと考えられている。規則衛星は全衛星質量の大部分を占めているため、衛星系の形成を理解する上で、この規則衛星の形成過程を明らかにすることは重要である。

近年、高解像度の数値流体計算によって、周惑星円盤の形成過程、構造が詳細に調べられている (例えば Tanigawa et al. 2012)。これらの研究により、惑星へのガス降着は中心面から流入するのではなく、原始惑星系円盤の比較的上空から、惑星近傍の周惑星円盤へ落下するという具体的な描像も明らかになってきている。一方、Canup & Ward (2002, 2006) は、巨大ガス惑星の主要な規則衛星の形成モデルとして、“gas-starved disk モデル”を考案した。これを用いて、原始惑星系円盤からガス・ダストが定常的に供給される周惑星円盤内で、衛星は成長と惑星への落下を繰り返し、ガスの供給が止まったときに残っていた最後の世代の衛星が現在の衛星系であると示している。周惑星円盤の降着率やガス/ダスト比を現実的な範囲で小さくすることで、氷が存在できる程度に低温で軽い円盤を実現し、その状況下においても衛星形成が可能であることが分かった。

周惑星円盤中での衛星形成を考える上で、その材料となる微惑星の軌道進化は重要である。そこで本研究では、ガス抵抗を考慮した周惑星円盤内における微惑星の軌道進化を解析的、数値的に調べた。また、円盤内に衛星サイズの比較的大きい天体 (原始衛星) が存在する場合、それが微惑星の軌道にどのように寄与し、原始衛星への衝突はどの程度あるのかを調べた。その結果、原始衛星との会合周期の関係から原始衛星に衝突する微惑星のサイズには支配的な領域が存在することが分かった。

氷ダストの捕獲を通じた原始惑星の水量の進化

○佐藤貴央¹, 奥住聡¹, 井田茂^{1,2}

1, 東京工業大学, 2, 地球生命研究所(ELSI)

最近の理論研究によると、原始惑星系円盤の進化の比較的後期の段階において、スノーラインが地球軌道より内側へと移動したことが示唆されている(Oka et al., 2011)。水量の乏しい地球が形成されるためには、地球のもととなった原始惑星がスノーラインの移動より前の段階で形成されることが必要となる。しかし、原始惑星がスノーライン移動後に氷ダストを捕獲して多量の水を獲得してしまう可能性は残っている。特に、ダスト成長・移動の理論モデルによると、遠方 (>10AU) に存在する大量の氷ダストが成長後にスノーラインへ向かって落下してくることが示されている(e.g., Okuzumi et al., 2012)。

本研究では、このような過程で供給される氷ダストの捕獲を通じて、原始惑星の水量がどの程度増加するかを定量的に調べた。具体的には、地球軌道付近に原始惑星の存在を仮定し、この原始惑星が地球軌道へと流入してくる氷ダストを捕獲する事によって獲得する水量の変化を計算した。地球軌道へと流入してくる氷ダストのサイズや固体面密度に関しては、Okuzumi et al. (2012)のダスト成長・移動計算を簡略化したモデルを用いた。原始惑星による氷ダストの捕獲に関しては、Guillot et al. (submitted)のモデルを用いた。原始惑星のサイズ、氷ダスト捕獲の開始時刻（スノーラインが地球軌道に到達する時刻）、および円盤の外縁半径はフリーパラメータとした。

結果は以下のとおりである。外縁半径が 150AU である円盤を仮定した場合、100km サイズ以上の原始惑星は、氷ダスト捕獲の開始時刻が円盤形成後 400 万年であっても、原始惑星質量の 1%程度の氷ダストを捕獲する。この捕獲量は、外縁半径のより大きい円盤においてはさらに大きな値になる。これらの結果より、遠方からの氷ダストの落下が起こる限り、原始惑星は現在の地球よりも多量の水を獲得してしまう可能性が高い。水量の乏しい地球が形成されるためには、遠方からのダストの落下を防ぐ機構（ガス惑星によるギャップの形成など）がはたらくことが必要と考えられる。

Effect of dust grains on Type I migration in an optically thin disk

光学的に薄い円盤内での Type I 移動に対するダストの影響

○山田耕¹, 稲葉知士²

¹早稲田大学政治学研究科, ²早稲田大学国際教養学部

系外惑星系で観測されている軌道の多様性は、惑星の軌道進化の結果として生み出されたものと考えられている。軌道進化の要因の一つとしてガス円盤との重力相互作用がある。この軌道進化は、惑星の質量に依って移動のメカニズムが異なることが知られているが、ここでは地球質量程度の惑星の軌道進化(それをType I 移動と言う)に注目する。Type I 移動のキーポイントは、円盤と惑星の間でどの程度の角運動量(トルク)がやり取りされるかであり、惑星の軌道要素の変化率を決める重要な量である。このやり取りは惑星によって円盤内にたてられた密度波を通じて生じたり、馬蹄軌道内のガスと会合する時に行われたりする。現在有力な円盤モデル(いわゆる林モデル)を仮定してType I 移動による軌道進化を見積もると、移動方向は中心星向きであり、数十万年で数AU動くというものである。しかし、これらのトルク量は、円盤の熱的/力学的な状況にかなり左右されることが近年の研究から明らかになってきている。本研究の目的は、Type I 移動に対するダストの影響を解明することにある。

円盤内にあるダスト粒子はガス抵抗を受けて中心星へ落下する。円盤のダスト進化に関する研究から、遠方領域からの大量のダスト落下は長期間にわたって円盤の内領域へダストを供給するかもしれないことが報告されている。このことは、内領域で形成された惑星とダストリッチな領域がセットで存在する可能性のあることを意味する。惑星がダストリッチな領域に入れば、ガスだけでなくダストからもトルクを受ける。さらに、ダストリッチな領域のガス流れはダストの影響で単純なケプラー回転をしない。異なる流れ場は、ガス-惑星間の場合にやり取りされていたトルク量を変えるだろうと考えられる。そこで、ダスト-ガス-惑星間の3者間相互作用に着目して、ダストが惑星移動にどのような影響を与えるのかを調べていく。我々のこれまでの数値計算は、光学的に非常に厚い断熱円盤を仮定して行ってきた。その結果、ダスト自身が惑星にかけるトルクは常に正であり、ガスダスト比やダストサイズと共に大きくなることが示された。これにより、ガスから惑星にかかるトルク量が(中心星向きの移動を生み出す)負であっても絶対値が小さくなる、または、正になって反転する可能性があることがわかった。しかし、惑星形成の後期では円盤のガスが薄くなり、光学的に厚い状態にない可能性もある。今回、我々は光学的に薄いガス円盤を仮定して、ダストとType I 移動の関係を数値計算したので、その結果を報告する。

原始惑星系円盤の散逸における中心星進化の影響

○國友正信¹, 竹内拓¹, 井田茂¹

¹東京工業大学

原始惑星系円盤は惑星が形成される場所であるため、惑星形成過程の理解において原始惑星系円盤の進化、散逸を明らかにすることは重要である。現在、原始惑星系円盤は粘性降着と光蒸発により散逸すると考えられている。光蒸発とは、X線、紫外線の加熱によりガスが円盤から散逸する過程である。そのため、中心星のX線、紫外線の光度が円盤の散逸において重要であるが、これまで中心星進化に伴うX線、紫外線の光度の時間進化の影響は考慮されてこなかった。そこで本研究では、中心星の質量の違いやX線、紫外線光度の時間変化が原始惑星系円盤の進化に及ぼす影響について調べた。そのために、光蒸発率の経験式および恒星進化の数値計算結果を用いて、光蒸発率の時間進化を計算した。そして、円盤の進化を数値計算し、円盤の寿命を求めた。その結果、低質量星周りの円盤進化においてはX線による散逸が支配的である一方で、進化の速い中質量星では円盤が散逸する前にX線光度が急激に弱くなることがわかった。ただし、中質量星は進化が進むと高温になるため、光球面からの紫外線光度が時間とともに大きくなり、円盤散逸において支配的になることがわかった。つまり中質量星周りの円盤進化においては、中心星進化の影響が重要であることがわかった。計算により得られた円盤寿命を観測結果と比較する。

微惑星サイズと乱流の関係

○ 小林 浩¹、田中秀和²、奥住聡³

¹ 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙科学専攻

² 北海道大学低温科学研究所

³ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

星形成の副産物としてできる原始惑星系円盤の中で惑星は形成される。惑星形成は、固体微粒子が集まって1-100km程度の大きさの微惑星が形成され、その微惑星が重力的に引き合い暴走成長を起し1000km以上の大きさの原始惑星を形成という過程が考えられている。小惑星帯やカイパー帯の天体のサイズ分布はベキ分布になっているがそのベキ値が100km程度で変わっており、このベキが変わるサイズが原始惑星系円盤の中でできた微惑星と関係している可能性が高い。本研究では、原始惑星系円盤中での天体の衝突進化を調べ、以下のことを得た。原始惑星系円盤の乱流によりランダム速度が上げられているうちは暴走成長が起きずに大きな天体が質量を持つようなサイズ分布をしているが、天体の成長に自己重力による重力フォーカシングが効きだすと暴走成長が起きて小さな天体が質量を持つようなサイズ分布のベキになる。暴走成長が起るサイズが100km程度になると小惑星やカイパー帯の天体のサイズ分布を説明できる。また、この条件は木星形成のための固体核を作るのに都合がいい。100km程度まで自己重力が効かないためには天体のランダム速度が十分大きくなくてはいけないが、磁気乱流不安定により作られる密度ムラからうける摂動によりこのようなランダム速度が実現できることが分かった。一方、乱流が強すぎると、100kmに達する前に天体は衝突により破壊されてしまう。そのため、100km程度まで成長でき、そこで自己重力が効くような条件を見つけ出した。本講演では、上記の効果を考慮し、太陽系が形成された原始惑星系円盤の環境について議論する。

ハイブリッドコードによる 惑星集積のシミュレーション

○森島龍司¹

¹カリフォルニア大学

惑星集積過程を調べる上で、N体計算と統計的計算の相補的な二通りの手法がこれまで用いられてきた。N体計算は直接天体の軌道を計算するのであまり多い粒子数は取り扱えないが、厳密である。例えば、共鳴捕獲、惑星の重力散乱による微惑星の非一様分布やその結果生じる惑星移動など統計的計算で取り扱うには難しい現象を取り扱うことができる。一方、統計的計算では、軌道の位相平均をとっているために、共鳴などは取り扱えないが、衝突破片などを含む非常に多くの粒子数を取り扱うことができる。本研究では、これら二通りの計算の長所を取り入れた新たな惑星集積コードの開発を行ったので報告する。

コードの基本的なコンセプトは Levison et al. (2012) で提案されたものであり、複数の微惑星の集合体であるトレーサーの軌道を直接積分するというものである。ただし、本コードは質量と空間メッシュを必要としない、よりラグランジアン的なものである。原始惑星同士あるいは原始惑星とトレーサーの衝突や重力散乱は直接的な N 体計算で行う。それに対し、トレーサー同士の相互作用は、統計的計算と同様に三体計算からもとまった衝突率 (Ida et al. 1989) と重力散乱による軌道要素変化率 (Tanaka & Ida 1996) を用いて計算する。この際、微惑星面数密度は近傍にいる他のトレーサーをカウントすることによりもとめる。衝突合体により微惑星が成長するとトレーサーに含まれる微惑星の数は減少し、その数が一つになった場合、そのトレーサーは原始惑星にクラスチェンジする。このとき原始惑星と周囲のトレーサー質量はほぼ同じであり、それらの相互作用を N 体計算で行うと、原始惑星に人工的に強い摂動がかかってしまうことになる。そこで、原始惑星質量がトレーサー質量に比べて十分大きくなる (100 倍程度) まではそれらの相互作用は統計的手法で取り扱うことにした。

いくつかのテスト計算を行い、新コードの性能評価を行った。まず、微惑星が 2000 体の場合の直接 N 体シミュレーションの結果とトレーサー 200 体のハイブリッドシミュレーションの結果を比較し、微惑星速度進化、惑星の成長率、最終的に形成される惑星の大きさや配置などすべての物理量で非常に良く一致することを確認した。また、初期微惑星サイズが 10 km 程度でガス抵抗も入れたシミュレーションを行い、その結果、木星領域では微惑星散乱による惑星移動が頻繁に起こることが分かった。現在のコードは、完全合体とヒットエンドランの場合を取り扱え、今後衝突破壊の効果を取り入れていく予定である。

磁気乱流駆動の円盤風によって進化する 原始惑星系円盤中での地球型惑星形成

荻原正博¹ ○小林浩² 犬塚修一郎² 鈴木建²

1) コートダジュール天文台 2) 名古屋大学

およそ0.1地球質量以上の惑星は原始惑星系円盤に密度波を立て、その密度波から逆に負のリンダブラッドトルクを受けることで、中心星方向へ移動し得ることが知られている（タイプI移動）。特に惑星近傍での円盤ガスが局所的に等温であると仮定すると、地球質量の惑星は 10^5 年程度の時間で移動する。一般的にリンダブラッドトルクが負の値であるのに対して、共回転領域の円盤ガスから受ける共回転トルクは正の値を取り得ることが指摘されており、円盤の密度分布・温度分布、更に粘性拡散率・熱拡散率に依存して惑星移動は中心星から外向きにも移動する。

近年、共回転トルクによって惑星移動が外向きになる可能性に注目し、円盤の温度分布進化を考慮した惑星形成過程の研究が積極的に行われている。これに対し、本研究では円盤の密度分布に着目する。磁気回転不安定起源の乱流状態にある原始惑星系円盤の進化を追った磁気流体シミュレーションによって、ガスは円盤の上下面から吹き出すことが発見され（円盤風）、これは原始惑星系円盤の散逸に寄与することが指摘された（Suzuki & Inutsuka 2009）。また、円盤風は中心星近傍領域ほど効率が高い為、円盤は中心星近傍から外側に向かって散逸することも示され、地球型惑星形成領域では円盤の面密度勾配がこれまで仮定されてきた値（-0.5から-1.5）よりも大きくなると考えられる（Suzuki et al. 2010）。

本研究では円盤風の効果を考慮した円盤中での地球型惑星形成を調べる。円盤風による質量流出を組み込んだ1次元拡散方程式を解くことで円盤面密度進化を求め、これを原始惑星の軌道進化・合体を追うN体シミュレーションに導入する。本研究では特に円盤風の効果が重要になる惑星形成後期段階に注目し、原始惑星から惑星の形成までを1億年程度追う。タイプI移動の表式としては、共回転トルクの飽和や質量・離心率依存性を考慮したものを使用し、トルクを惑星の運動方程式に直接導入する。このようなシミュレーションによりどのような地球型惑星が形成されるのかを調べ、その結果を本講演において議論する。

デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成

片山将文, ○城野信一¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

原始惑星系円盤の内部には、「デッドゾーン」と呼ばれる乱流が弱い領域があると考えられている。デッドゾーンの縁辺において、乱流による粘性が大きく変化することになる。この粘性の大きな変化が渦を発生させ、ダストアグリゲイトが渦に捕獲されることにより効率的に原始惑星を形成するメカニズムが Lyla *et al.* (2009, A&A **497**, 869) によって提案されている。このシナリオにそって原始惑星が特定の領域で形成されたらその後の進化はどうなるか？というモチベーションで, Sándor *et al.* (2011, ApJ **728**, L9) によって N 体シミュレーションが行われた。このシミュレーションにおいては、デッドゾーンの外側縁辺において原始惑星が形成されるとしている。また、デッドゾーンの内側外側縁辺それぞれにガス面密度分布のピークが存在し、その二カ所が惑星移動の平衡半径となっている。つまり、ガス円盤からのトルクによって原始惑星はこの二カ所のどちらかに移動する。シミュレーションの結果、数十万年という短いタイムスケールで 10 地球質量程度の天体がデッドゾーンの外側縁辺に形成されることが示された。

しかしこのシミュレーションにおいてはガス円盤から受けるトルクを算出する式に間違いがあり、トルクが大きく算出されてしまっていた。そこで我々は、適切な式を用いて N 体シミュレーションを行い、結果がどう変わるかを調べた。トルクの算出式以外はほぼ同一の条件でシミュレーションを行った。その結果、10 地球質量まで成長するには 100 万年程度かかること、最大質量の天体は外側ではなく内側の平衡半径に形成されること (図 1 参照) が分かった。ガス円盤から受けるトルクが小さくなったため、乱された軌道が円軌道まで緩和するのに時間がかかり、衝突頻度が低下したために形成時間が長くなったと考えられる。内側縁辺に原始惑星が散乱され、内側縁辺におけるトルクが外側縁辺におけるトルクよりも大きいことから、Sándor *et al.* (2011) の結果とは異なり内側縁辺に最大質量の天体が形成された。

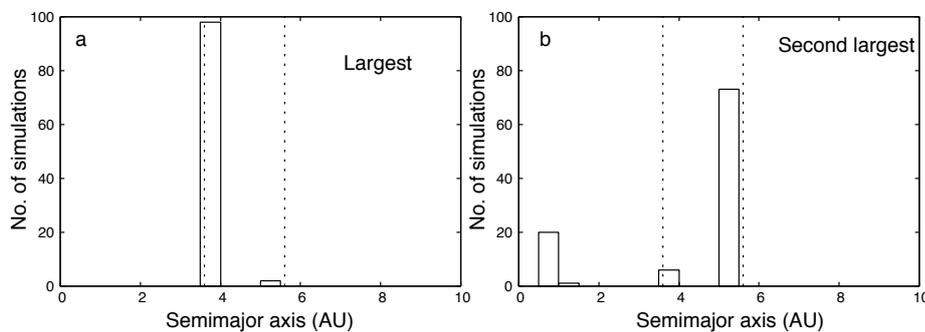


図 1: a: 最大質量の天体の形成された場所。b: 二番目に大きな質量を持つ天体が形成された場所。破線は内側、外側の平衡半径を示す。Sándor *et al.* (2011) においては、最大質量の天体は外側の平衡半径において形成された。

自己重力不安定な円盤における巨大ガス惑星の軌道進化

○ 植田 高啓¹, 井田 茂², 竹内 拓¹

¹ 東京工業大学, ² 地球生命研究所

近年、離心率が小さく軌道長半径が大きい惑星が発見されてきている。例えば、HR8799 の周りには、軌道長半径がそれぞれおよそ 15AU, 27AU, 43AU, 68AU である 4 つの惑星が直接撮像によって確認されている (e.g. Marois et al.2010)。これらの惑星の質量はいずれも 5~10 木星質量程度で、離心率は、その軌道周期が長いので正確には測定できていないものの、0 に近いと推定されている。このような長周期の円軌道巨大ガス惑星を形成するモデルとして円盤自己重力不安定モデルが存在する。このモデルでは、質量の大きい円盤が自身の重力によって分裂し、クランプ (ダストを含むガスの塊) をつくり、それらがガス惑星を形成する。自己重力不安定は円盤外側ほど起こりやすいため、上記のような長周期円軌道巨大ガス惑星が形成される可能性がある。本研究では、自己重力不安定で形成されるような巨大ガス惑星が重い円盤の中でどのように軌道進化していくかを、円盤との重力相互作用と乱流から受ける力を考慮して調べた。自己重力不安定を起こす円盤は、乱流状態にあると考えられるため、乱流トルクによって離心率が上昇し、楕円軌道になると考えられる。そこで、楕円軌道を描く巨大ガス惑星が円盤ガスとの重力相互作用である力学的摩擦と乱流トルクを受けて軌道進化するとき、軌道長半径や離心率といった軌道要素がどのように変化するかを調べた。計算の結果、初期の軌道長半径によらずに、 10^4 年程度のうちに $a = 10$ AU 程度まで軌道長半径が減少しうることがわかった。また、低質量惑星ほど乱流によって円盤の外に散乱してしまう確率が高いことがわかった。

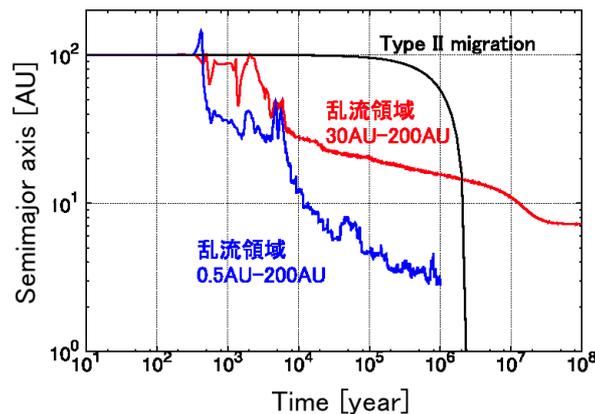


図 1: 軌道長半径の時間進化。青と赤の実線はそれぞれ乱流領域が 0.5AU から 200AU, 30AU から 200AU の場合。

木星の共鳴による微惑星の軌道進化

○長沢 真樹子¹, 田中 今日子², 田中 秀和², 中本 泰史¹, 三浦 均³, 山本 哲生⁴

1 東京工業大学, 2 北海道大学, 3 名古屋市立大学, 4 神戸大学

コンドリュールの起源を説明する有力なメカニズムとして、衝撃波加熱がある。この衝撃波を起こす源としては、木星の平均運動共鳴によって楕円軌道化された微惑星が挙げられている。(Weidenschilling et al. 1998 など)。衝撃波加熱に関する研究からは、適切なコンドリュール形成のためには、微惑星と周囲のガス円盤との相対速度は少なくとも 7km/s 以上必要であるとされている(Iida et al. 2001; Ciesla & Hood 2002; Miura et al. 2002; Desch & Connolly 2002; Miura & Nakamoto 2005, 2006 など)。特に、最小質量円盤を考えた場合、大量のコンドリュールの存在を説明するためには、小惑星帯では、10km/s の相対速度以上ついていることが望ましい。一方で、微惑星の運動を解いた過去の研究からは、平均運動共鳴によって与えられるガスとの相対速度は、最大でも 8km/s 程度であり、多くの場合は、6km/s 程度以下にとどまることがわかっている(Marzari & Weidenschilling 2002)。

この問題に関する微惑星 (100km-1000km) の軌道進化の研究では、従来、ガス抵抗と木星重力の二つが考慮されてきた。しかしながら、もう一つ重要な効果として、木星による永年共鳴が考えられる。離心率に関する木星の永年共鳴は、ガス円盤の自己重力によって木星が摂動を受けることで生じる。そしてガス抵抗が働くような状況では、永年共鳴は、2-4AU の小惑星帯に必然的に現れる。そこで、ガス抵抗と木星重力に加え、ガス円盤の自己重力を考慮に入れて、微惑星の運動を数値計算した。その結果、これまでの研究では、2:1 共鳴 (~ 3.2AU) 付近で最大の相対速度 (8km/s) となっていたのに対し、ガス円盤の自己重力を考慮すると、100 km 以上の微惑星であれば、最大速度は 3:1 共鳴 (~2.5AU) 付近で 12 km/s 程度の値まで達することが判明した。これは、コンドリュール形成に対し、十分な相対速度となっている。

また、計算した半数程度の場合において、共鳴で離心率が上昇した際に、木星と軌道交差することによって、微惑星が外側の領域に飛ばされる現象が見られた。彗星の中には、結晶質シリケートが存在する場合がある。こうした結晶質シリケートの起源は良くわかっていないが、今回の計算のような進化をたどる場合、衝撃波加熱によって結晶化したシリケートダストを取り込んだ微惑星が遠方領域に散乱されて、遠方の氷微惑星と混じることも考えられる。遠方に散乱されない微惑星の場合、高温を経験するのは、1.5AU-3.5AU の狭い領域に限られる。微惑星の最大速度やガス円盤の面密度は軌道長半径に依存するため、最高温度も軌道長半径ごとに異なることになる。こうした観点から、今後、小惑星のスペクトルタイプとの関連なども考える必要があるだろう。

マルチインパクトによる月と地球深海底の起源^[1]

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2014-9.

世界で初めての「月と地球の統一的な起源」を解明するオリジナルな衝突仮説です。

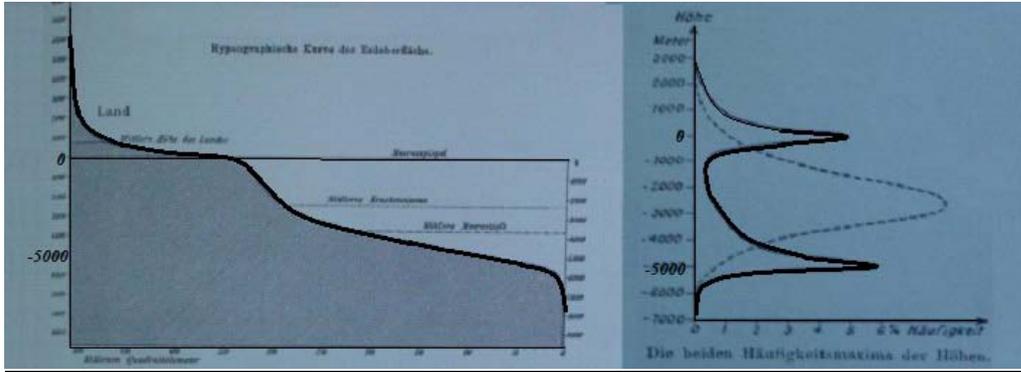


図 1b に、ウエゲナー氏が指摘した地球表面の二山頻度^[2]を示す。普通は一山頻度破線。地球が凝集して全地球が溶融すれば一山頻度となるが、地球表面は海が 70%で平均深度 5km となっている。地球半径約 6400km に比較するとリンゴの皮より薄く、ブルドーザーで工事を行なうとしてもピラミッド建設より困難である。その起源は解明されていなかった。

アブダクション(仮説的推論) <<ジャイアントインパクト説も、実は勝手な仮説です。>> 本仮説は、分化した原始惑星セラ(ボーデ法則のセレス位置)が木星摂動により木星近点側に長軸一定(エネルギー保存)のまま楕円軌道が偏平し、木星衝突の手前で潮汐力で破壊し、そのマントル破片の衝突メカニズムにより、衝突時の位置や方向(後方)と速度(12.3km/s)と衝突角度(約 30°)が必然として、地球マントルはニュートンの揺り籠の様に、月軌道(60*R_E)まで射出されて月が形成された。逆に巨大惑星衝突仮説では、月軌道(3*R_E)までしか届かない。火星サイズ原始惑星衝突仮説は、方向や速度とフィーディングゾーンの全てが仮定である。

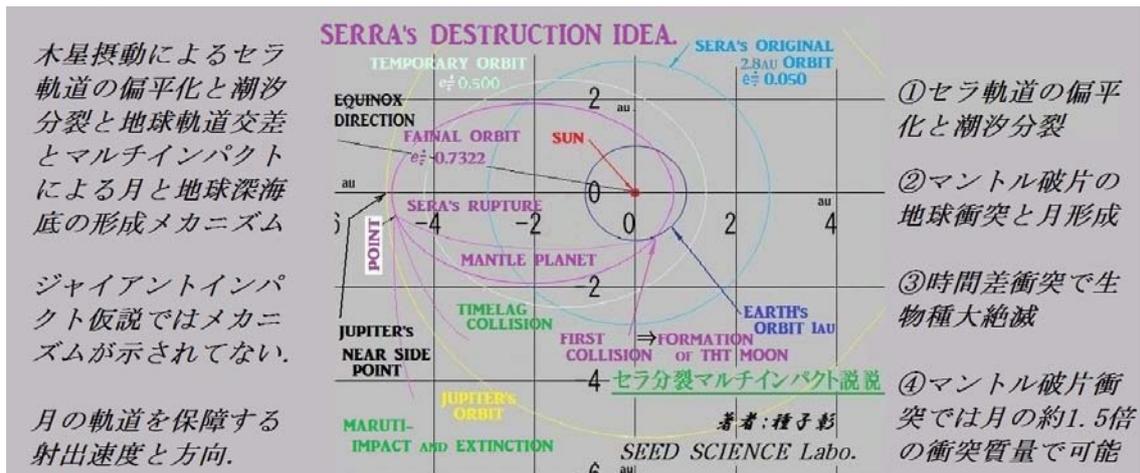


図2,木星摂動による SERRA 軌道変遷と潮汐分裂,地球軌道と交差でマルチインパクト仮説,

<<結論>> 本仮説で、月形成と地球深海底と種々の地球現象の起源が解明できた。

[1]種子彰マルチインパクトによる月と地球の起源(2014), [2]A, Wegener 大陸移動説(1927)

円盤磁気乱流中でのプラズマの電場加熱： 磁気乱流強度とダスト成長への影響

○ 森 昇志¹, 奥住 聡¹

¹ 東京工業大学 理工学研究科 地球惑星科学専攻

原始惑星円盤内の乱流はその角運動量を外側へ輸送する一方で、サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星までその成長に影響を及ぼす。円盤で乱流を起こす機構の1つとして磁気回転不安定性が考えられている。この不安定性は電離度に依存しており、低電離度では不安定は発達しない。円盤内ではダストが荷電粒子を吸着し、低電離度になるために乱流が起きない場所があり、デッドゾーンと呼ばれる (Gammie 1996; Sano et al. 2000)。

これまでデッドゾーンの外側では激しい乱流が起きていると考えられていた。しかし、その発達した磁気乱流によって作られる強い電場が電子を加熱し (電場加熱)、加熱された電子がダストに効率よく吸着され、電離度が減少し、磁気乱流が弱まる可能性が指摘されている (Okuzumi & Inutsuka, submitted)。我々はこれまでの研究において、電場加熱が原始惑星系円盤中のどの領域で起こりうるかを調べてきた。その結果、デッドゾーンの外側の広い領域で電場加熱が起きうることを明らかにしている (Mori & Okuzumi, in prep)。

本研究では、電場加熱が起きる領域で乱流強度がどの程度まで弱くなるかを見積もった。その結果、従来の理解に対し、磁気乱流は著しく弱まることが示唆された (図1)。さらに、負に帯電したダストが静電反発力によってダスト同士が衝突しにくくなる影響についても評価した。その結果、電場加熱が起きる領域では、(1) ダストが大きく負に帯電することによる静電反発と (2) 乱流が弱くなってダスト同士の衝突速度が減少する2つの効果によって、ダストは合体成長しにくくなることが示唆された (図2)。

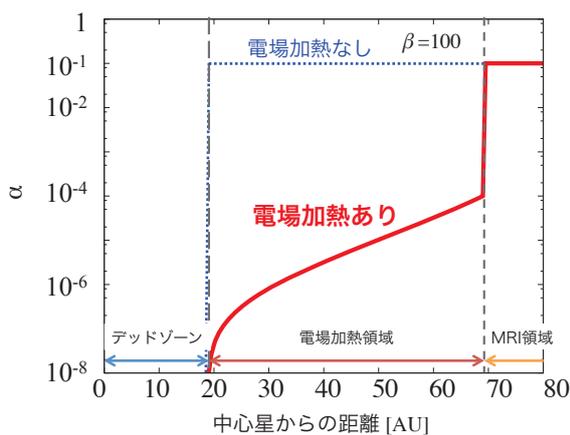


図1 電場加熱が起きている領域で乱流が弱まっていることを表す図。20AU から 70AU が電場加熱が起きている領域に対応する。

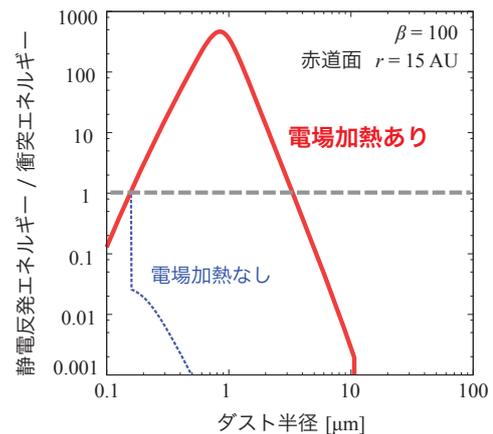


図2 ダストの帯電による静電反発がダスト同士の合体成長を妨げることを表す図。静電反発エネルギーと衝突エネルギーの比を縦軸にとり、これが1以上になるとダストは互いに衝突しにくくなることを意味する。

原始惑星系円盤内の圧力バンプにおける ダスト集積過程のダスト層の厚みによる違い

○ 瀧哲朗¹, 藤本正樹^{2,3}, 井田茂³

¹ 東工大, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 東工大 地球生命研究所

微惑星の形成過程は惑星系形成論における重要な未解決問題のひとつであり、現在まで様々なアプローチから研究が続けられてきた。微惑星の形成を困難にしている要因は大まかに2つある。1つは円盤内のガスとダスト(固体成分)の間での角運動量交換に起因する、ダストの中心星方向への移動問題で、「中心星落下の壁」と呼ばれている。もう1つはダスト同士の相対速度が大きすぎることによる合体成長の障害で、こちらは「衝突破壊の壁」と呼ばれている。

この中心星落下の壁を回避可能なメカニズムのひとつとして「圧力バンプによるダスト捕獲」が注目されてきた。原始惑星系円盤ガス中に局所的な密度の非一様構造(圧力バンプ)が存在する場合、そのような領域では角運動量の授受が逆転するため、落下するダストを堰き止めることが可能である(Wipple, 1972)。しかし一方で、圧力バンプは集まってくるダストとの角運動量交換によって破壊され、圧力バンプが作るダスト濃集領域の平均的なダスト密度は、ダスト-ガス比 ~ 1 を超えては上昇しないことも分かっている(Taki et al., in prep.)。

従ってダストの集積過程を考える場合、ダストの運動に伴うガス密度構造の進化を考慮することが必須である。従来の研究では主に動径方向の密度進化しか考えておらず、鉛直方向には一様な系を取り扱うことが多かった。しかし実際の円盤では、ある程度成長したダストはガスと分離して中心星重力によって円盤中央平面に沈殿していくと考えられており、鉛直方向にダスト密度の非一様が生じる。本研究ではこのダストと円盤ガスとのスケールハイトの違いに注目し、ダストが存在しないガス層が上下に存在する場合の、圧力バンプにおけるダストとガスの密度進化の様子を調べた。

まず中央平面近傍においては従来の理解と同様に、圧力バンプ内部のガスは集まってきたダストと角運動量を交換することでバンプ外側に流出し、バンプ構造は破壊されてしまう。この圧力バンプの破壊過程において、ダストによる角運動量の供給を受けない上層部と中央平面との間に圧力差が生じるが、系はこの圧力差を埋めて鉛直方向に一様な構造を作ろうとするために圧力バンプ付近において下降流を生じさせることが分かった。このようなガスの速度場は圧力バンプ付近のダスト濃集領域を鉛直方向に圧縮し部分的にダスト密度を上昇させる。今回の発表では圧力バンプでの下降流によるダストの密度・速度分布の進化を明らかにし、圧力バンプにおける微惑星形成可能性に与える影響について議論する。

原始惑星系円盤の化学反応と H₂O スノーラインの 分光観測による検出可能性

○野津翔太¹, 野村英子², 石本大貴¹

¹ 京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 ² 東京工業大学 理工学研究科 地球惑星科学専攻

原始惑星系円盤内部において、誕生直後の中心星の近くは星からの光で高温となり、H₂O はダスト表面から脱離し気体となる。一方星から遠い所では光が弱く低温となり、H₂O はダスト表面に凍結する。この境界が H₂O スノーラインであり、ダストの合体成長で惑星を作る際、H₂O スノーラインの内側では地球のような岩石惑星が形成される。一方外側ではダストの総量が増加する。そのためダストの合体成長で巨大な岩石コアが形成され、重力で周りのガスを大量に集める事が可能となり、木星や土星のようなガス惑星が形成される。すなわち、H₂O スノーラインは、地球型惑星と巨大ガス惑星の形成領域の境界と考えられている。

円盤赤道面における H₂O スノーラインの位置は、太陽質量程度の前主系列星 (T タウリ型星) 周りの円盤の場合、中心星から数 AU 付近と考えられている。しかし中心星からの放射強度、円盤中のダストサイズやその分布など、円盤の物理構造を変える事でその位置は変化する。そのため、太陽系外の原始惑星系円盤の観測から H₂O スノーラインの位置を決める事で、逆に円盤の物理構造、ひいては惑星形成理論に制限をかける事が出来ると考えられる。しかし系外惑星系の場合空間分解能が足りず、撮像観測による円盤赤道面の H₂O スノーラインの検出は困難であった。

一方最近 Spitzer(近-中間赤外線) や Herschel(遠赤外線) などの宇宙望遠鏡で、円盤から放射される H₂O 輝線を検出できるようになった。温度依存性や波長の異なる様々な H₂O 輝線の強度比を用いて、H₂O スノーラインの位置を見積もる研究 (e.g., Zhang et al. 2013) もなされつつあるが、円盤の温度分布のモデルに依存するものであった。しかし今後波長分解能の高い分光観測が可能になれば、輝線スペクトルの速度プロファイルを解析する事で、モデルに依存せず H₂O スノーラインを同定できると考えられる。

そこで本研究では、このような観測で H₂O スノーラインを同定する方法を提案する。具体的にはまず原始惑星系円盤の物理構造モデルを仮定した上で、H₂O スノーラインの位置を仮定するのではなく、与えられた物理構造の元で円盤の化学反応計算を行い、円盤中の H₂O の分布や H₂O スノーラインの位置を求めた。すると H₂O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤上層部の高温領域でも H₂O ガスの存在量が多いと分かった。またその結果を用いて、円盤から放出される H₂O 輝線の輻射輸送計算を行い、近赤外線からサブミリ波までの複数の輝線のプロファイルの特徴を調べた。すると放射係数が小さく励起状態のエネルギーが高い複数の輝線のプロファイルを分光観測で調べる事で、H₂O スノーラインの情報を得る事ができると分かった。この解析結果、及び将来の分光観測との関係についても議論する。

回転不安定から考える原始惑星系円盤の外側領域 の構造

○ 小野智弘¹, 野村英子², 竹内拓²

¹ 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻宇宙物理学教室,

² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

ケプラー回転円盤を仮定した粘性降着円盤の気体面密度分布の解析解として、相似解がある (Lynden-Bell & Pringle 1974)。相似解は内側領域では冪的に減少し、外側領域では指数関数的に減少する性質を持っている。最近の高感度電波観測によって原始惑星系円盤の測定が成されており、観測は原始惑星系円盤の気体面密度分布が相似解であることを示唆している。また、この気体面密度分布が相似解であることを仮定することで、原始惑星系円盤の大きさや質量などを観測結果から得ている。つまり、相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として利用されている。

我々は回転円盤外側領域において、中心星重力に比べ圧力勾配力が無視できなくなる点に着目した。相似解は常に圧力勾配力が中心星重力に比べ無視できるほど小さいことを前提に求められている。しかし、相似解は円盤外側領域で指数関数的に変化し、圧力勾配力が無視できなくなる。つまり、相似解の前提が円盤外側領域で破綻している。また、回転円盤内の圧力勾配力が無視できない領域では、回転不安定がおこることが理論的に知られている (Chandrasekhar 1961)。回転不安定性には軸対称モードと非軸対称モードがあり、我々は相似解の軸対称モードにおける回転不安定性を解析的に調べた。

その結果、中心星の質量が小さく、かつ円盤が高温の時に相似解が円盤外側領域で軸対称モードの回転不安定の為に破綻しうることを発見した (Ono et al. 2014)。この結果は、相似解が観測領域で不安定となる時、相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として使えないことを示唆する。相似解の回転不安定において、内側の冪領域と外側の指数関数領域を分ける半径 (R_0) と R_0 での円盤スケールハイト (H_0) の比 (H_0/R_0) が重要なパラメータである。 $H_0/R_0 \sim 0.1$ の時、相似解が回転不安定になるのは非常に低密度な領域であり、非相似解的な気体面密度分布を観測することは困難である。一方で、 $H_0/R_0 \sim 0.2 - 0.3$ の時、相似解が回転不安定となるのは、観測が不可能な程低密度領域ではないと考えられる。典型的な T タウリ星周りの円盤において $H_0/R_0 = 0.1 - 0.18$ となり、近傍に大質量星を持ち大質量星からの照射を受けている円盤は $H_0/R_0 \sim 0.3$ まで至り得る。このことから、 H_0/R_0 が高い値を持つ T タウリ星周りの円盤や、大質量星を近傍に持つ円盤において、ALMA 等の高感度観測により近い将来、詳細な円盤外側の面密度分布や回転速度分布を明らかにできると考えられる。これらの観測を本研究の結果と比較することで、回転不安定性の観測的検証が期待される。

任意の不連続面に対応可能な SPH 法の開発

○山本智子¹ 斎藤貴之² 牧野淳一郎^{2,3}¹ 東京工業大学 地球惑星科学科² 東京工業大学 地球生命研究所³ 理化学研究所 計算科学研究機構

惑星科学の研究において、流体シミュレーションは大きな役割を果たしている。このため、高精度な流体数値計算手法の開発は研究分野の発展に大きく貢献する。計算手法には様々あるが、構造変化が大きい場合には、ラグランジュ的流体計算手法である Smoothed Particle Hydrodynamics (Lucy(1977); Gingold & Monaghan(1977), 以下 SPH 法) を用いる事が有利である。

しかし従来の SPH 法である SSPH 法は自由表面や接触不連続面の存在する系の計算において、適切な計算ができないという弱点が知られている。これは、SSPH 法において、体積要素を密度と質量を用いて表現している為である。この体積要素を用いて、流体の基礎方程式の定式化を行なうと、密度の微分可能性と正值性を仮定しなくてはならない。そのため、密度が微分不可能となる接触不連続面や、0 となる自由表面においてこの仮定に矛盾が生じ、適切な計算ができなくなってしまう。

そこで、Saitoh & Makino (2013) では、体積要素を、密度の代わりに、圧力とエネルギーを用いて表現した SPH 法である DISP 法が開発された。このため、圧力の微分可能性と正值性を仮定して、基礎方程式の定式化を行なうことになり、接触不連続面を適切に扱うことができるようになる。しかし、圧力が 0 となる自由表面では、圧力の正值性の仮定と矛盾が生じ、適切な計算が出来ない。そのため、接触不連続面と自由表面で適切な計算をするには、これらの面で、微分可能かつ正值である量の導入が必要である。しかしながら、そのような物理量は存在しない。

そこで、本研究では、新たに、オイラー方程式に現れない擬密度 y と擬質量 Z を導入し、これらを用いて体積要素を表現する。また、我々は、この y に人工的な拡散を施す事で、 y がいたるところで、微分可能かつ正であることを保証する。このため、 y の微分可能性と正值性を仮定して、基礎方程式の定式化を行なうことになる。更に、 Z は、 y の人工的拡散が、体積要素の決定に影響しないように、 y と共に変化する量である。

現段階では、SPSPH 法を用いて、接触不連続面において、DISP 法と同様に適切な計算ができることが示された。また、自由表面に関しては、自由表面上に仮想的な流体粒子を置く事によって、適切な計算を出来る可能性をもつ。この仮想粒子は、非常に薄い大気の極限であるが、擬密度 y は常に微分可能性と正值性を保つように定義する。

天体衝突シミュレーションコードの開発と、 その岩石惑星における小天体衝突現象への適用

○上田翔士¹、佐々木貴教²、玄田英典³、細野七月⁴、井田茂³、斎藤貴之³

¹東京工業大学 地球惑星科学専攻、²京都大学、

³東京工業大学 地球生命研究所、⁴理化学研究所

小天体衝突は地球の表層環境（大気、海の量・組成）に大きな変化をもたらす。また、地球形成初期には大量の小天体衝突イベントがあったと考えられており、小天体衝突現象は地球の進化において非常に重要な物理現象であると言える。Shuvalov (2009)と Shuvalov et al. (2013)は、小天体衝突の3次元シミュレーションを行い、衝突によって惑星外へ放出される物質の質量を、様々な衝突パラメータをふって見積もった。但し、彼らは衝突ターゲットとして岩石のみを考えており、海の影響を考慮していなかった。また、オイラー的な流体計算法（メッシュ法）を用いていた。

本研究では、衝突ターゲットとして海をも考慮した、より現実的な3次元小天体衝突シミュレーションコードの開発を行った。岩石、大気、水といった様々な物質が非常に動的に混ざり合う現象を得意とするラグランジュ的流体計算法である Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics (DISPH; Hosono et al. 2013) を流体計算コードとして用いた。本研究で扱う衝突では、大気と海／陸といった密度差の大きい境界が存在する。本研究では密度差を表現する際に、SPH法で一般的であった“等質量粒子を用いて粒子の数密度を変える”という方法ではなく、DISPH法で原理的に可能であると思われる“等しい粒子の数密度を用いて粒子の質量を変える”という方法を試みた。

静水圧平衡テストの結果から、2000倍もの密度差を持つ境界を等間隔の粒子配置で粒子質量を変えて表現をすることが可能であると分かった。このことから、大気と海／陸といった密度差の大きい境界を表現することが可能となった。また、粒子の質量を変えることで密度成層した岩石-(水)-大気の系を再現し、様々な衝突パラメータで衝突シミュレーションが可能な計算コードを開発した。Shuvalov (2009)や Shuvalov et al. (2013)で行われたメッシュ法での計算と、SPH法での計算の比較は非常に意義のあることである。本研究では衝突によって惑星外へ放出される各物質の質量の見積りについても示したい。

星雲遭遇による白亜紀末の強い寒冷化

○二村徳宏¹, 戎崎俊一², 丸山茂徳³

¹岡山天文博物館, ²理化学研究所, ³東京工業大学 地球生命研究所

北大西洋の深海底掘削コア試料から、白亜紀末の堆積物中に巨大隕石衝突によるイリジウムピークの他に 5 m 以上のイリジウムの幅広(長期間)の分布を発見した。この分布を理解するために、コア試料、地球表面物質(海洋有機物・海洋地殻・海洋粘土層・マンガンノジュール)及び CI コンドライトのイリジウム及びコバルトの濃度を比較した解析の結果、この物質は、地球表層物質の混合物のみで説明することが難しく、CI コンドライト的な物質の寄与がないと説明することができないことを明らかにした。さらに、火山物質のイリジウム及びコバルト濃度の比較を行った結果、火山噴火によるものではないことも明らかにした。つまり、デカントラップによるものでもない。また、拡散作用及び生物擾乱による物質の移動は、それぞれ 10 cm (Colodner *et al.*, 1992)及び 9.8 ± 4.5 cm (Boudreau, 1998)であること、さらに試料中の生物擾乱の痕が非常に小さいことから、イリジウムピークがこの 2 つの原因により拡散したものと説明することも難しい。そして、この分布は星雲遭遇によるものであると結論付けた。

推定した星雲の遭遇期間は、約 73 Ma から約 65 Ma の約 8 Myr の間である。地球と星雲の相対速度を 10 km s^{-1} と仮定すると、Kataoka *et al.*, (2013)より、星雲密度は $1500 \text{ protons / cc}$ 以上となり、典型的な暗黒星雲のコア密度に相当する。また、宇宙塵粒子サイズを典型的な $0.2 \mu\text{m}$ と仮定すると、放射強制力は $-9.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下となり、非常に強い寒冷化に相当する。実際に星雲遭遇期間に全球的な酸素同位体比の上昇があり、これは全球的に寒冷化が起こったことを示している。同時にストロンチウム同位体比の上昇も見ることができ、これは寒冷化により、氷河・氷床が発達した結果、大陸棚が露出し、大陸地殻の削剥率が増加したことで説明することができる。また、白亜紀末には、海水面が 100 ka 以内に約 70 - 100 m 低下しており(Keller and Stinnesbeck, 1996)、これは氷河・氷床の発達により説明することができる(Miller *et al.*, 2005)。また、約 73Ma から星雲遭遇が始まったことは、同時期から恐竜の生存率が減少する傾向とも整合的である(Sloan *et al.*, 1986; Cowen, 1996; Brusatte *et al.*, 2012)。

白亜紀末の大量絶滅については、隕石衝突説があるが(Alvarez *et al.*, 1980; Schulte *et al.*, 2010)、これによる日射遮蔽・寒冷化は 7 年以内に終わるため(*e.g.*, Pierazzo 2001)、この期間で生物の個体数はかなり減少しはするが、数パーセントの個体が生き残りさえすれば、数年後に地球環境が元に戻った際、数百年で元の個体数に戻り、地質学的な時間スケールにおいては軽微な変化しか残らないはずである。また、過去の Chicxulub crater と同規模の巨大隕石衝突 (Woodleigh, Popigai 及び Manicougan) の際は大量絶滅が起こっていない。これらは巨大隕石衝突が大量絶滅を引き起こしたという説と大きく矛盾している。また、前述のように恐竜の絶滅率は巨大隕石衝突の約 10 Myr 前から減少しており、アンモナイト及び有孔虫も巨大隕石衝突の前から変化があると報告されている(House, 1989; 1993; Thomas, 1990)。以上から白亜紀末の大量絶滅を巨大隕石衝突説で説明することは難しい。しかしながら、星雲が太陽系に近づくと小惑星の軌道が乱れ、一部が地球に衝突した可能性があり、この 1 つが白亜紀末の隕石衝突であったかもしれない。

隕石重爆撃による原始金星の乾燥

黒澤 耕介

千葉工業大学 惑星探査研究センター

金星は地球の兄弟星と呼ばれているが、その表層環境は全く異なる。今回は金星表層が非常に乾燥していることに注目する。現在の金星表層には 10^{-5} 地球海洋質量(以下 TO) 程度の水しか存在しないが、形成時には地球と同程度の水が供給されていたはずである。金星の表層水の行方は比較惑星学の未解決問題の一つである。星は太陽に近いために、原始海洋が安定に存在できず、数 100 気圧の水蒸気大気を形成していた可能性が高い。水蒸気大気は光化学不安定であるため、水素と酸素に解離する。水素は原始太陽からの紫外線を受けて、十分短い時間で流体力学的に散逸する。従って金星の水の行方は残った酸素の行方という問題に帰着すると考えられている。金星サイズの惑星から数 100 気圧相当の酸素を消失させる過程として、(1)流体力学散逸する水素に引きずられて散逸、(2)太陽風との相互作用による非熱的散逸、(3)地表面の酸化の三過程が提案されているが、どの過程にも困難が指摘されている。本発表では(3)の地表面の酸化に注目する。この過程では金星表面の地下深くまで酸化を進行させる駆動力が未解明であることが致命的問題点として指摘されてきた。今回は惑星形成最終期に必然的に起こる隕石重爆撃(いわゆる Accretion tail)が地面を掘削し、地表面を更新し金星の乾燥を促したのではないかと仮説を立てた。天体衝突で破砕され上空まで放出された細粒岩石は還元材として振る舞い、効率よく酸素を取り除くであろう。モンテカルロ法を用いて金星への確率論的重爆撃モデルを組み立て、重爆撃で掘り返される金星の地殻/マントル厚を計算した。個々の衝突による掘削岩石質量は π スケーリング則と衝突天体の貫入も考慮した Maxwell の Z モデル(Z-EDOZ モデル)を組み合わせて計算した。衝突天体の総質量は金星も地球と同程度の重爆撃を経験しただろうという仮定をおき、地球マントル中の親鉄性元素量から推定されている値を使用した。“衝突誘起対流”の考え方をを用いて、未酸化の新鮮な岩石の総掘削量を求めたところ、(1)惑星質量の~1 wt%に及ぶ細粒岩石が一度は上空に放り出されること、(2)化学量論的な限界まで岩石の酸化反応が進行すると仮定した場合には 1 地球海洋質量相当の酸素が大気から除去される可能性があることがわかった。今回の結果は惑星形成末期に必然的に起こると考えられる高速衝突が、形成直後の惑星の大気と固体表面を効率よく混合することを示している。細粒岩石と惑星大気の不均質化学反応を理解することが、金星の表層水問題のみでなく系外惑星系の大気進化を考える上でも重要であると考えられる。

隕石重爆撃期における大気散逸による 火星大気と表層水の進化

○ 黒川宏之¹, 黒澤耕介², 白井寛裕³

¹ 名大理, ² 千葉工大惑星探査研, ³ 東工大理工

現在の火星は、6 mbar 程度の薄い CO₂ 大気と、極域に少量の水氷が存在するだけの、寒冷で乾燥した惑星である (Jakosky and Phillips, 2001; Christensen, 2006)。しかし、火星表層の地形学から、火星はかつて温暖な気候であり、液体の水が存在したことが示唆されている (Carr and Head, 2003; Head et al., 1999 など)。また、湖成・河成堆積物や含水鉱物・蒸発残留岩の存在は、火星表層で地球のような水成活動があった可能性を示している。このような温暖な気候を実現するメカニズムとして、数 bar 以上の厚い大気による温室効果 (Ramirez et al., 2014)、もしくは、天体衝突による一時的な温暖化 (Segura et al., 2012) が提案されているが、いまだ結論は得られていない。さらに、火星大気が現在のような薄い大気に進化した原因として、天体衝突による大気剥ぎ取り、熱的・非熱的大気散逸、地表面の酸化といった過程が提案されているが、火星大気がどのように進化してきたかはよくわかっていない。

熱的・非熱的大気散逸を経験すると大気中に重たい同位体が濃集するため、大気散逸の歴史は、火星探査や火星隕石の同位体比分析によって得られる揮発性元素同位体比として記録されている。特に、41 億年前の結晶化年代を持つ ALH 84001 隕石 (Lapen et al., 2010) は、隕石重爆撃期終了直後の火星大気の情報を持している。ALH 84001 中の同位体比データの特徴は、同位体分別をしていない窒素・希ガス (Mathew and Marti, 2001) と、分別している水素 (Boctor et al., 2003; Greenwood et al., 2008) である。これは言い換えると、大気をリザーバーとする成分は分別しておらず、水・氷をリザーバーとする成分は分別していると解釈できる。

本研究では、隕石重爆撃期における火星大気と表層水の進化を明らかにするために、レーザー衝撃実験結果に基づく天体衝突による大気剥ぎ取りと、熱的・非熱的大気散逸を組み込んだ、大気進化計算を行った。

結果、水・氷をリザーバーとする水素は主に熱的・非熱的大気散逸によって失われるのに対し、大気をリザーバーとする窒素・希ガスは主に天体衝突剥ぎ取りによって失われたことが明らかとなった。また、天体衝突によって、大気全圧は数十 bar から数 mbar まで進化する可能性があることがわかった。この厚い初期大気によって、大気をリザーバーとする窒素・希ガスは分別しにくくなる。一方で、水・氷をリザーバーとする水素は大気全圧の進化と無関係に分別する。このように、厚い初期大気存在によって、火星隕石 ALH84001 中の揮発性元素同位体データは説明可能であることがわかった。

41 億年前以降の天体衝突による大気の剥ぎ取りの効果は小さく、41 億年前以降の非熱的大気散逸の先行研究からも、0.1 bar 程度の全圧変化しか期待できない (Luhmann et al., 1992)。従って本研究の結果は、初期の火星が厚い大気の温室効果により温暖だったとしても、そのような時代は 41 億年前の時点で終了していたことを示唆している。その場合、41 億年前以降の火星は間欠的な温暖気候しか持ち得なかった可能性がある。

後期重爆撃による冥王代大陸の消失可能性

Possibility for disappearance of Hadean continents by Late Heavy Bombardment

○芝池諭人¹ 佐々木貴教² 井田茂³

1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

2. 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 3. 東京工業大学地球生命研究所

現在の地球上には、冥王代の岩体は発見されていないが、花崗岩の存在を示すジルコン($ZrSiO_4$)が発見されている。そのため、冥王代には既にいくらかの大陸地殻があり、その後消失したと考えられている。冥王代末期の天体衝突の集中「後期重爆撃」による大陸の破壊や溶融は、冥王代大陸が消失した原因としてよく挙げられる。本研究では、冥王代における天体衝突の影響を解析的に計算する式を導出し、後期重爆撃による冥王代大陸の消失が困難であると明らかにした。具体的には、天体の衝突フラックスを三つのモデルで表し、天体のサイズ分布 $dN/dm = Am^{-\alpha}$ を変化させ、大陸地殻の破壊量および溶融量を推定した (図 1,2)。

一方先日、冥王代に衝突する天体は地球表層環境に甚大な影響を与え、地球表面は大半が溶融領域で覆われると推定した研究が報告された(Marchi et al., 2014)。直径 100km 以上の天体が衝突した際に、地表付近が従来よりもはるかに広範囲に渡って溶けると考えたことが、推定結果を大きく変えた。また、この研究では天体衝突によって冥王代のジルコン生成年代分布を説明できると主張している。今回は、この最新の研究と我々の研究結果との関係についても議論する。

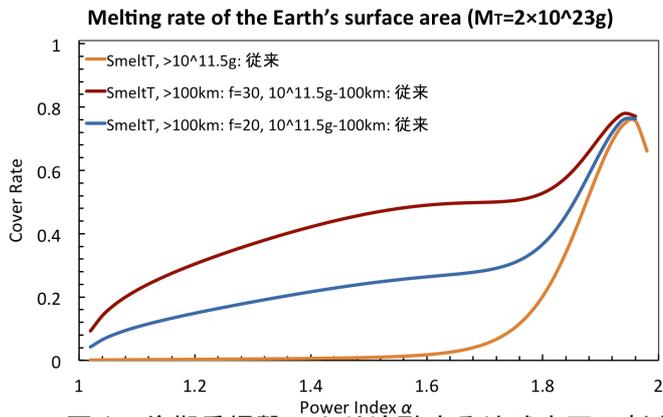


図 1. 後期重爆撃により溶融する地球表面の割合

私達の推定では、後期重爆撃による溶融領域によって地球表面は覆われない (橙色実線) が、Marchi et al. (2014) を考慮すると、溶融領域が大きく増える (赤/青色実線)。

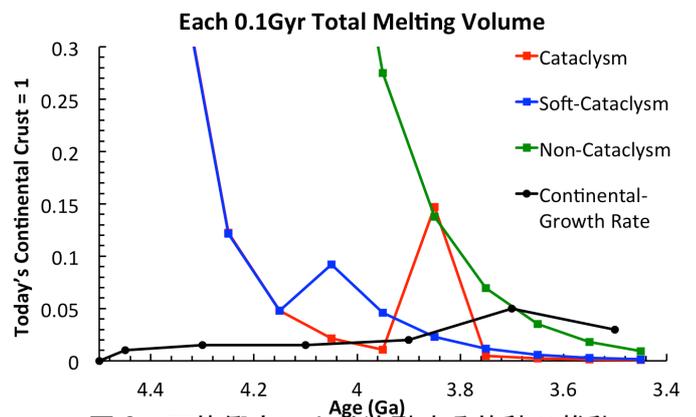


図 2. 天体衝突により溶融する体積の推移

後期重爆撃を三つの典型的なモデル (赤/青/緑色) に分け、一億年毎に溶融する体積と新たに生成する大陸地殻 (黒) の体積を比較した。冥王代末期まで常に、溶融量が生成量を上回っている。

✓ Reference

S. Marchi, W. F. Bottke, L. T. Elkins-Tanton, M. Bierhaus, K. Wuennemann, A. Morbidelli & D. A. Kring, 2014. Nature 511, 578-582.

衝撃波によるギ酸およびアンモニアからのアミノ酸生成

○古川善博¹, 鈴木千月香¹, 小林敬道², 関根利守³, 中沢弘基¹, 掛川武¹

¹東北大学大地学専攻

²物質・材料研究機構

³広島大学地球惑星システム学専攻

アミノ酸はタンパク質を構成する有機分子であり、生命誕生前の地球におけるアミノ酸の出現は生命誕生への重要なステップと考えられている。当時の地球では現在よりも遥かに多くの隕石が飛来していたことが明らかになっており、このような隕石の衝突のうち超高速で海洋に衝突する場合は、海中を伝播する衝撃波が海水に急激な加熱加圧とそこからの急激な解放をもたらす。本研究では衝撃波がもたらす急激な加熱加圧による化学反応に着目し、これにより海水中の溶存分子からアミノ酸などの生命を構成する有機分子が生成するかどうかを検証する。実験ではアミノ酸の生成が期待される海水溶存成分として、ギ酸とアンモニアを用いた。ギ酸は最も単純なカルボン酸であり、カルボン酸、アミン、アンモニアは隕石の海洋衝突を模擬した先行研究において生成が確認されている(Nakazawa *et al.*, 2005; Furukawa *et al.*, 2009)。

隕石衝突を模擬した衝突回収実験では金属容器に封入した¹³C-ギ酸-アンモニア混合水溶液に一段式火薬銃を用いて0.54–0.92 km/sで金属板を衝突させ、試料溶液に5–11 GPa, 120–340°Cの衝撃波を約1μ秒間与えた。回収した試料中の¹³Cでラベル化されたアミノ酸およびアミンの生成を超高速液体クロマトグラフィー・タンデム質量分析により分析した。

この結果、2種類のタンパク質構成アミノ酸（グリシン、アラニン）および2種類の非タンパク質構成アミノ酸（β-アラニン、サルコシン）、炭素数1–4のアミンの生成を確認した。メチルアミンとグリシンは衝突速度に応じて収率が上昇する傾向が見られた。

本実験の温度-圧力を隕石の衝突に適用すると、地球外物質が約1.3–2.5 km/sの速度で海洋に衝突した際に適用できる。このような環境では、海洋に溶存するギ酸とアンモニアが衝撃波の通過により反応して、タンパク質構成アミノ酸を含む数種類の有機物が合成されることが明らかになった。このことは、生命誕生前の地球に頻繁に起こったと考えられる隕石海洋衝突が海水に溶存する有機物の多様性を増大し、生命誕生に重要な有機物の一部を生成したことを示唆している。

氷衛星および小惑星における有機化合物の生成と 衝撃変成に関する実験的研究

○兒玉賢哉¹ 関根康人¹ 高野淑識² 小川奈々子² 大河内直彦² 小林敬道³ 関根利守⁴

¹東京大学 ²海洋研究開発機構 ³物質・材料研究機構 ⁴広島大学

氷衛星や C 型小惑星に存在する有機物の化学・同位体組成や構造の理解は、宇宙における化学進化過程の理解のみならず、これら有機物の形成条件から天体の形成・進化を制約する鍵となるため重要である。しかし、これまでの研究では、主に隕石中の有機物の化学・同位体組成の微小・微量分析に焦点が当てられ、室内実験によって出発物質や条件の違いが有機物の組成や構造に与える影響を明らかにする研究はまだ十分ではない。また、天体表面付近の有機物は、他の小天体の高速衝突による衝撃変成といった二次的な変成を受けていることが考えられるが、このような変成による有機物の組成・構造への影響も実験的に明らかにされていない。特に、衝撃変成の影響を明らかにすることは、将来のサンプルリターン探査において、サンプリング時の衝撃変成がリターンサンプル中の有機物組成や構造に及ぼす影響を評価する上でも重要な基礎データとなる。

本研究では、出発物質の違いや衝撃変成による有機物の組成・構造への影響を評価することを目的とし、有機物合成実験、高速衝突実験、および有機化合物の化学分析を行った。過去の研究では、アルデヒドやアンモニアを出発物質とした密封加熱実験で、炭素質隕石中の有機物に似た模擬隕石有機物を合成している [1]。本研究では、先行研究[1]の条件に加え、氷衛星内部を模擬したアンモニアに富む条件でも有機物生成を行い、生成した有機物中への窒素固定率や化学構造への影響を調べた。特に、赤外分光分析を行った結果、出発物質としてアンモニアを多く含む模擬氷衛星有機物では、有機物中に含まれる C=O 結合が減少し、C=N 結合が多く含まれるなど、 1600cm^{-1} 付近に特徴的な違いをもたらすことが明らかになった。また、中間生成物の化学分析から、それぞれの有機物の生成過程を考察した。

さらに本研究では、上記の模擬隕石有機物と模擬氷衛星有機物に対して、1 段式火薬銃を用いた衝突回収実験を行い、最大衝撃波圧力に対する有機物中の全炭素量・窒素量の変化や化学構造への影響を調べた。これらの結果に基づき、将来の探査計画における有機物回収方法や、炭素質小惑星表面スペクトルへの示唆を与える。

[1] Kebukawa, Y. et al. (2013) The Astrophysical Journal, 771, 1, 12 pp.

地球外天体によるアミノ酸およびペプチドの供給の可能性

○菅原春菜¹, 三村耕一²

¹海洋研究開発機構, ²名古屋大学

彗星や隕石などの地球外物質には様々な有機物が含まれ、これらの有機物が地球上での生命誕生に寄与した可能性が提案されている (e.g., Chyba and Sagan, 1992)。地球外物質に含まれる有機物の中でも本研究が着目するのは生命の誕生に必須と考えられるアミノ酸である。アミノ酸はタンパク質の構成要素であり、かつアミノ酸が重合したペプチドは他の有機物を生成する際に触媒として働くことがわかっている (e.g., Barbier *et al.*, 1993)。炭素質コンドライトの中にはこれまで 80 種以上のアミノ酸が見つかっており (e.g., Burton *et al.*, 2012)、その濃度は最高で 250 ppm のものが見つかる (Martins *et al.*, 2007)。また、彗星の塵の分析からもアミノ酸が検出されている (Elsila *et al.*, 2009)。これらの地球外天体による初期地球へのアミノ酸の供給について検証するためには、地球外天体が地球に衝突する際に発生する衝撃波の影響を評価する必要がある。一般に、衝撃波が物質中を伝播した場合、その物質は温度と圧力の急激な上昇を経験する。そこで本研究では、小惑星や彗星の衝突を模擬してアミノ酸に衝撃波を作用させる実験を行い、衝撃圧力とアミノ酸の残存率、およびペプチドの生成率との関係を調べた。

衝撃実験に用いたアミノ酸はグリシンとアラニンの 2 種である。これらのアミノ酸は単純な構造をしており、炭素質コンドライトにも多く含まれている。さらに、グリシンは彗星の塵から見つかっている (Elsila *et al.*, 2009)。小惑星の衝突を模擬した実験では、これらのアミノ酸を 1 種類ずつカンラン岩粉末に混合したものを試料とし、彗星の衝突を模擬した実験ではさらに水を混合して凍結したものを試料とした。これらの試料に対して一段式火薬銃を用いて衝撃波を作用させ、回収した試料の化学分析 (アミノ酸およびペプチド) を行った。彗星の衝突を模擬した実験では極低温に保持したまま衝撃を与えるため、液体窒素 (77 K) に試料容器を浸した状態で弾丸を衝突させた。

小惑星の衝突を模擬した実験ではアミノ酸の残存率は衝撃圧力の上昇に伴って低下し、約 20 GPa で急激に低下した。彗星の衝突を模擬した実験ではアミノ酸の残存率には急激な低下は見られず、衝撃圧力の上昇に伴って緩やかに低下した。また、ペプチドの生成に関しては、両者の実験において 3 量体までのペプチドの生成が認められ、その生成率はアミノ酸の残存率と連動していることがわかった。本発表ではこれらの結果をもとに、地球外天体によって初期地球に供給されたアミノ酸およびペプチドの量について議論を行う。

生命の起源に関連する星間化学進化における

ロバスト分子

Robust Organic Molecules in Interstellar Chemical Evolution and Their Relevance to Origins of Life

○小林憲正^{1,2}, 時村隼人¹, 金子竹男¹, 大林由美子¹, 癸生川陽子¹, 吉田聡³, 三田肇⁴,
¹横浜国立大学大学院, ²自然科学研究機構, ³放射線医学総合研究所, ⁴福岡工業大学,

地球外（星間空間・隕石・彗星など）に多様な有機物が存在することが知られている。それらと地球（および他の天体）上での生命の誕生との関連を考える場合、それらが分解されずに地球に届けられることと、生化学的な機能の萌芽を有することが必要である。炭素質コンドライトからの抽出物中に多種類のアミノ酸や核酸塩基が検出されており、その起源として太陽系形成前の分子雲中の星間塵アイスマントル中で宇宙線などによる生成が考えられる。本講演では、模擬星間分子から粒子線照射により生じる生体関連有機物を分析し、その宇宙環境での安定性を評価することにより、それらの地球での生命起源への寄与をロバストネスの観点から評価した。

[実験] 模擬星間物質として、種々の混合比の一酸化炭素、メタン、メタノール、アンモニア、水などの混合物にタンデム加速器（東工大）からの2.5 MeV陽子線、HIMAC（放医研）からの290 MeV/u炭素線などを照射した。生成物は、そのまま、あるいは酸加水分解後、HPLC、GC/MS、LC/MSによりアミノ酸、核酸塩基等の分析を行った。また、照射生成物やアミノ酸・核酸関連分子にHIMACからの炭素線を照射し、その安定性を評価した。

[結果と考察] 粒子線照射生成物を加水分解後に分析すると、多種類のアミノ酸が検出された。特にCO-NH₃-H₂Oの混合物への陽子線照射生成物(CAW)の場合、グリシンのG値（エネルギー収率）は0.4という高い値を示した。また、CAWをGC/MSもしくはLC/MSにより分析することにより、5種類の核酸塩基のすべてが、非核酸型塩基とともに同定された。これらの結果は、星間塵環境下でアミノ酸前駆体および核酸塩基類が生成可能であることを示唆する。また、生成したアミノ酸前駆体は高分子量の複雑な構造を有するものを含むことがわかったが、核酸塩基は遊離体として生成していることが示唆された。

アミノ酸（グリシン・イソバリン）、アミノ酸前駆体（ヒダントイン類・CAW）、核酸塩基（アデニンなど）の水溶液に、重粒子線（炭素線など）を照射した場合、遊離アミノ酸に比較して、アミノ酸前駆体や核酸塩基は高い回収率を示した。これまで、アミノ酸前駆体類が遊離アミノ酸よりも紫外線、軟X線、熱などに対して高い安定性を示すことがわかっており、宇宙環境下ではアミノ酸前駆体や核酸塩基がロバスト生命素材分子といえる。星間ロバスト分子が原始太陽系中での変成、地球への供給、原始海洋中での変成により、その生化学的機能が進化したというシナリオの検証実験を行っている。

はやぶさ 2 が拓く惑星科学

○渡邊誠一郎^{1,2}、はやぶさ 2 統合サイエンスチーム³

¹名大環境、²JAXA/ISAS、³はやぶさ 2 プロジェクト

小惑星探査機「はやぶさ 2」は 2014 年末の打上げを目前に控えている。探査対象天体は C 型の地球接近小惑星 1999 JU₃ であり、母天体における水質変成を記憶する含水鉱物の存在や有機物の存在などが、C 型小惑星が起源とされる炭素質コンドライト隕石の分析から推定されている。しかし、C 型小惑星は、1997 年の探査機 NEAR による 253 Mathilde の近接フライバイ観測があるだけで、その実体や起源についてはほとんどわかっていない。惑星の主要材料物質である、岩石、炭素質物質、氷がどのように集まり、混合され、物理的／化学的变化を遂げたのか、それと小惑星のスペクトル型（広義の D 型、C 型、S 型）の関係はどうなっているのか、地球への材料物質供給はどのように進行したのかなどという根本的な問題に対して、探査による実証のメスを初めて入れるのがはやぶさの成果を踏まえたはやぶさ 2 ミッションなのである。つまり、私たちは「小惑星からの惑星科学」を標榜している。

現地でのリモートセンシング観測（可視フィルタ分光カメラ、中間赤外カメラ、近赤外分光計、レーダ高度計）、ランダによるその場観察（ドイツ宇宙機関による MASCOT、日本の MINERVA II）、衝突装置 SCI によるクレータ形成実験（分離カメラによる撮像）、そして最大 3 地点からのサンプルリターンが主な科学メニューである。これらによって実現される科学目標を、「JU₃での観測・分析目標→惑星科学的ゴール」の形で掲げると、

- (1) さまざまな特質をもつ物質の表面分布→原始太陽系での物質混合・輸送過程の構築
- (2) 多様な有機物と共存する鉱物の関係把握→微惑星上での鉱物-水-有機物反応の解明
- (3) 放射年代とクレータ年代／天体力学の総合による天体史の読み出し→物質進化を考慮した惑星形成／破壊過程および背後にある「惑星大動乱」の究明
- (4) 微小重力天体の衝突特性と衝突史の実態解明→微惑星が経験した動力学過程の特定となる。

表面の多様性を、可視／近赤外波長帯でのスペクトル勾配や吸収（深さ、形状）から構築した水質変性度や不溶性有機物存在量などのプロキシ（代替指標）の分布から調べ、混合・輸送過程に迫る。リモセン観測と特徴地点の物証としての帰還試料、そして両者をつなぐランダによるその場観測の組み合わせが重要だ。鉱物-水-有機物反応については、帰還試料の戦略的分析がカギとなる。たった 1 つの小惑星であっても、それが経験した時代の動乱（普遍性）を伝えてくれる——総合的年代学は本ミッションのコアである。微惑星のアナログ天体として JU₃ を見ることも大切である。SCI 衝突画像は、サンプリングのための弾丸衝突の画像とあわせ、微小重力天体のスケーリング則を確立する貴重なデータとなるだろう。

はやぶさ2搭載中間赤外カメラ TIR の科学観測計画

○岡田達明¹, 福原哲哉², 田中智¹, 田口真³, 荒井武彦¹, 今村剛¹, 千秋博紀⁴, 出村裕英⁵, 小川佳子⁵, 北里宏平⁵, 関口朋彦⁶, 長谷川直¹, 中村良介⁷, 神山徹⁷, 松永恒雄⁸, 和田武彦¹, 滝田隼^{9,1}, 坂谷尚哉^{10,1}, 堀川大和^{10,1}, 桑名翔平⁵, Joern Helbert¹¹, Thomas Mueller¹², Axel Hagermann¹³, はやぶさ2・TIR チーム

¹JAXA, ²北海道大, ³立教大, ⁴千葉工大, ⁵会津大, ⁶北海道教育大, ⁷産業総合研,

⁸国立環境研, ⁹東京大, ¹⁰総合研究大学院大, ¹¹DLR, ¹²MPE, ¹³オープン大

小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載する中間赤外カメラ TIR は、波長 8~12 μm の中間赤外帯で熱放射を2次元撮像し、C 型小惑星 1999JU3 の表層温度や熱慣性の分布を決定する。TIR の地上較正試験や探査機総合試験での結果を紹介し、期待される科学成果について議論する。

TIR は非冷却2次元ボロメータを用いた熱撮像カメラ(サーモグラフ)である。TIR の温度較正は、 $-40\sim+150^{\circ}\text{C}$ ($233\sim423\text{K}$) の範囲で実施した。低温から常温は真空槽中の黒体面、常温から高温はオイルバス中の黒体面や、大型平面黒体炉を用いた。較正装置の相互の温度較正も実施した。データ積算処理後の相対温度精度(NETD)は 0.3K 以内である。TIR は同じ設定パラメータで広い温度範囲をカバーするため、小惑星の昼側全域を同時撮像できる。さらに探査機全体の熱真空試験で、NETD は 2K 程度に劣化するものの低温側は -100°C 程度まで測定できることを確認した。また、TIR の幾何較正により、点像分布関数は画素(IFOV)の 1/5 以下と良好である。このような熱撮像性能をもつ TIR によって小惑星表層の熱物性を決定し、砂、砂利、高空隙な岩石、稠密な岩石など物理状態を地質構造別に識別・分類し、地質構造との関係を議論する。

TIR は小惑星に距離 2000km 以内から到着までに、熱赤外ライトカーブ観測や衛星・ダスト探索を行う。小惑星到着後は、高度約 20km のホームポジション(HP)や高位相角(XO)から小惑星全体を IFOV=0.05° (画素解像度 18m@20km)で撮像する。毎週1回以上、数分ごとに小惑星の1自転分を撮像することにより、地域別の温度履歴を調べ、温度や熱慣性など熱物性を決定する。小惑星の熱物性的な全体像を調べ、地質構造や堆積物等との関連を考察し、小惑星の形成・進化過程を考察する。小惑星表面における砂、砂利、岩盤などの物理状態の違いを HP から識別し、試料採取に最適なミリメートル大の粒度の地域を選別や、岩塊の多い危険地域の回避に役立つ。また、探査機の降下にとって安全な熱環境かどうかの判定情報とする。その後、低高度からの局所高解像度観測(0.9m@1km)や、タッチダウン降下時の高解像度観測(4.5cm@50m)を行い、表層熱物性と表層状態の関係をより高解像度で小規模な地形の熱物性的特徴の原因について議論する。小惑星表層を掘削する小型衝突機(SCI)によって形成されたクレータも、TIR の視野角や解像度、温度範囲と精度を活用して搜索する。小惑星のその場で観測した熱物性は、地上・軌道上の望遠鏡による太陽系天体の観測で用いられる小惑星熱モデルの検証になる。それらは軌道・自転変化から決定される Yarkovsky 効果、YORP 効果とあわせ、小惑星質量や密度分布など物理特性の推定に役立つ。

はやぶさ2 近赤外分光計による含水および脱水 炭素質隕石の反射スペクトル測定

○中村智樹（東北大）、岩田隆浩（JAXA）、北里宏平（会津大）、安部正真（JAXA）、大澤崇人（原研）、松岡萌（東北大）、仲内悠祐（JAXA）、荒井武彦（JAXA）、小松睦美（総研大）、廣井孝弘（ブラウン大）、今栄直也（極地研）、山口亮（極地研）、小島秀康（極地研）

C型小惑星JU3の表面物質の物質科学的特性を推定するには、近赤外分光計（NIRS3）は最も有効な装置の一つである。本研究では「はやぶさ2」に搭載する近赤外分光計を用いて、含水、脱水、無水炭素質隕石（CM, CI, CVタイプ）9サンプルの反射スペクトル測定を行い、それぞれの隕石の物質科学的特徴をどの程度判別することができるかを検討した。その結果、炭素質隕石の含水量や加熱脱水の程度はかなり正確に判別できそうであることがわかった。隕石の粒度の違いもある程度スペクトルに反映されることがわかった。一方、スペクトルには光検出素子ごとの感度差に起因するピクセル間ばらつきが全波長域に観察され、スペクトルの詳細構造をさらに理解するには、このばらつきを補正する必要がある。

1辺21cmのデシケータの内部を0.1気圧の真空にし、隕石サンプルを設置し、黒体炉を光源としてデシケータ外部からCaF₂窓を通して2枚の金ミラーを介して、入射角30度、出射角0度の条件でサンプルに光を照射した。光の径は25ミリ（サンプル上では約30ミリ）であり、サンプルからの反射光は真空冷却された近赤外分光計に導入し、1.8~3.2 μ mの波長域のスペクトルを測定した。標準はインフラゴールドを使用した。隕石サンプルは板状、粉状（粒径77-3350 μ m）を用意した。含水炭素質隕石CM, CIタイプは、小惑星上での加熱脱水の程度が異なる8試料（加熱なし2試料、弱い加熱脱水4試料、強い加熱脱水2試料）であり、無水炭素質隕石CVタイプは1試料である。

測定の結果、炭素質隕石の3ミクロンバンドの水に関する吸収帯の深さは、加熱脱水の程度に比例し、加熱なし、弱い加熱脱水、強い加熱脱水、無水の順に浅くなっていることが確認された。また、構造水（2.7 μ m）と分子水（~3 μ m）の区別も可能であることがわかった。また、同一炭素質隕石を異なる粒度（<77 μ m, <155 μ m, <512 μ m, <3350 μ m）にして測定した結果、粒度が小さい方が明るく、かつ右上がりのスペクトルを示すことがわかった。一方、サンプルを約30、50、80°Cに加熱した測定では、それぞれの温度での輻射が加わったスペクトルを得ることができ、3つの温度は十分に区別可能であることがわかった。スペクトルの詳細構造が判明すると更なる議論が可能であると思われ、そのために必要な光検出素子ごとの感度差に起因するピクセル間ばらつきを補正し軽減するプロトコルを開発していく予定である。

はやぶさ 2 分離カメラ (DCAM3-D) の開発状況とサイエンス

○荒川 政彦¹、和田 浩二²、小川 和律³、澤田弘崇³、石橋 高²、白井 慶³、本田 理恵⁴、
坂谷 尚哉⁵、早川 基³、門野 敏彦⁶、小林 正規²、木村 宏¹、中澤 暁³
¹ 神戸大学大学、² 千葉工業大学、³ 宇宙航空研究開発機構、⁴ 高知大学、
⁵ 総合研究大学院大学、⁶ 産業医科大学

我々は、はやぶさ 2 で予定されている小型搭載型衝突装置 (SCI) による人工クレーター形成実験をその場観察するために分離カメラ・デジタル部 (DCAM3-D) の開発を行っている。この分離カメラは理学研究用のデジタル系カメラと工学検証用のアナログ系カメラが装備されているが、ここではデジタル系カメラの報告を行う。デジタル系カメラでは、SCI 爆破点の特定と衝突地点の特定及び放出イジェクタ形状や個々のダストの観測を行う予定である。そのため 4 つの撮影モードを準備し、SCI 撮影モード、イジェクタ撮影モード、小惑星撮影モード、ダスト撮影モードと命名されている。これらのモードは、撮影素子である CMOS のゲインと露光時間を調節することにより、観測対象に対して撮影条件を最適化している。この最適化は SCI や小惑星、さらにはイジェクタカーテンの明るさに関する理論的な見積もりとこれまで予備的に行った積分球試験により決定したものである。そこで完成したフライトモデル (FM) が予想した性能通りに撮影できているかを確認し、さらに最終的な光学系の校正を行うため、FM を用いた積分球試験他を実施したので以下に報告する。

積分球試験他は 2014 年 8 月 12-15 日に JAXA 筑波宇宙センターで行った。試験は、まず、開口径 $\Phi 360\text{mm}$ の硫酸バリウム積分球を用いて、FM の光量飽和量確認試験 (フルウェル)、入射光量・出力応答試験 (リニアリティ)、画像校正データ取得、周辺減光率及び感度むら解析を行った。その結果、CMOS の積分時間やゲインを変化させた試験によりフルウェル値及び光学系の感度を正確に決定することができた。また、各撮影モードでの校正用の画像を取得しホワイトピクセルや感度むらが理学観測には支障のないことを確認した。さらに周辺減光率は要求仕様を満たしていることも確認した。次に、太陽光シミュレーターを用いて、SCI 視認性試験、隕石撮影試験を行った。その結果、SCI 撮影モードでは、十分な輝度で SCI を撮影することが可能で、その位置を画像内で特定できることを確認した。炭素質コンドライト隕石を撮影した試験では、1999JU3 表面が炭素質コンドライト隕石と同じ光学特性を持つと仮定すれば、小惑星撮影モードで輝度が飽和することなく十分な明るさで撮影できることがわかった。最後に、はやぶさ 2 ONC-T 及び ONC-W1 とのクロスキャリブレーションを目的として、フラットパネル光源を用いた撮影試験を行った。その結果、ONC-W1、ONC-T と DCAM3-D との推定輝度値は $\sim 10\%$ 程度の範囲で一致し、DCAM3-D の設定には問題ないことがわかった。

【謝辞】 ONC とのクロスキャリブレーションでお世話になった杉田精司氏と亀田信吾氏には謝意を表します。

TIRによるSCI クレータ検出方法の検討 ～クレータの熱進化モデル～

○千秋博紀¹, 荒井武彦², 黒沢耕介¹, 和田浩二¹, 中村昭子³, チーム TDSS

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²宇宙航空研究開発機構,

³神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

今年の冬に打ち上げが予定されている日本の小惑星探査機はやぶさ2は、ターゲット天体である1999JU3の表面に重さ2kgの衝突体（銅のライナ）を2km/sの速度で打ち込むことを計画している。弾丸打ち込みの主目的は、地下にある、宇宙風化を受けていない新鮮な物質を暴露させることにある。しかし科学的価値はそれに留まらない。例えば、打ち込み直後に分離カメラで観測される放出物の軌跡から衝突地点の物性や強度に関する情報が得られる。また放出物のうち微細な粒子は太陽風で流されるが、それを探査機から継続的に計測することができれば、放出物のサイズ分布が求められる。サイズ分布は衝突地点の物性に依存しており、惑星間空間のダストの観測と比較ができる。打ち込みの数週間後には探査機がホームポジションに復帰し、人工クレータを詳細に観測する。クレータのサイズや形状から、ターゲット天体の表層がどのような力学的特徴を持っているのかがわかる。また放出物の再堆積の分布から、表層物質の特徴的サイズや衝突地点の深さ方向の構造に関する情報が得られる。ただし、クレータの詳細観測を行うためには、クレータがターゲット天体表面のどの場所に作られたのかを知っていなければならない。つまり、探査機がホームポジションに復帰した際に、クレータ探しを行わなければならない。

ターゲット天体表面に形成される人工クレータのサイズは、表層物質の物性に強く依存する。大きなクレータ（ $\geq 1\text{m}$ ）が形成された場合には、カメラで識別ができる。しかし一方で、1m以下の小さな人工クレータが作られた場合には、クレータを探し出すのが大変困難である。小さなクレータが作られるのは衝突地点が空隙率の大きな物質からなる場合で、このような場合には放出物もあまり作られない。高空隙率ターゲットに作られるクレータは円柱状で、内部に陽が射す時間は限られているため周囲にくらべて低温となる。そこで、中間赤外カメラ（TIR）を利用すれば、クレータサイズが1ピクセルよりも小さい場合でも、特定の地域を含むピクセルの見え目温度の異常としてクレータの存在を捉えることが可能となるだろう。

本講演では、想定されるうちでもっとも小さなクレータが形成された場合についてクレータ内部温度構造のシミュレーションを行う。続いてこの結果をもとに、TIRの模擬視野を数値的に求め、どのような条件（太陽位相角、緯度など）であればクレータの位置が判別可能であるかについて検討を行う。

はやぶさ 2 搭載レーザー高度計による小惑星 1999JU3 のアルベド観測精度評価

○山田竜平¹, 千秋博紀², 阿部新助³, 並木則行¹, 野田寛大¹, 吉田二美¹, 石原吉明⁴,
平田直之⁵, 平田成⁶

¹国立天文台, ²千葉工業大学, ³日本大学, ⁴宇宙航空研究開発機構, ⁵東京大学,
⁶会津大学

2014 年末打上げ予定の小惑星探査機「はやぶさ 2」では、近地球型の C 型小惑星「1999JU3」の探査を行う。C 型小惑星の探査は過去に一度フライバイでの観測を行ったのみで、その物質的特徴についての詳細な探査は行われていない。我々はこの C 型小惑星 1999JU3 に対して、はやぶさ 2 搭載のレーザー高度計(LIDAR)を使用してジオメトリックアルベドの分布を観測する事を計画している。この観測から、宇宙風化や外来物質の付着等による表層の変成の状態、その地形との相関に関する情報、また鉱物組成や水質変成度を推定する上で参照となる情報を得る事が期待できる。

はやぶさ 2 搭載用の LIDAR では探査機-小惑星間の距離を測る測距機能に加えて、レーザーパルスの送信光強度と受信光強度を測定する機能が付いており、この強度データから小惑星表面のジオメトリックアルベドを推定する事が可能である。本研究では、このアルベド推定に必要な LIDAR の機器特性である送光部・受光部応答、エネルギー利用率について FM 品を用いて調査した。また、LIDAR が受け取るレーザーの反射受光パルスは小惑星の表面状態(傾斜、ラフネス)に依存して変化する。本研究では、小惑星の表面状態が LIDAR の観測値に与える影響についてもモデル計算から評価を行った。

これらの調査・評価結果に基づき、LIDAR の機器の状態や、周辺温度、小惑星の表面状態により観測値から決められるジオメトリックアルベドの観測精度について評価を行っている。本発表ではその評価したアルベド観測精度について報告を行う。

はやぶさ2探査対象小惑星 1999JU3 の YORP 効果

○ 北里宏平¹, 安部正真²¹会津大学, ²宇宙航空研究開発機構

YORP 効果は天体表面の熱輻射から生じる反動力によって天体の自転状態が変化する事象を指す。天体にかかる力そのものは非常に微弱であるが、永年的に影響し続けるため、特にサイズの小さい小惑星においては無視することができない。km サイズの小惑星の場合、数万～数 100 万年の時間スケールで表層物質の移動や剥落を起こすくらい高速な自転状態に進化することが理論的に示されている[1,2]。そのため、小惑星探査において探査機搭載機器の近接観測データから小惑星の表層進化の情報を読み解くには、小惑星の過去の自転変動の履歴を理解することが重要である。本研究では、今年度打上げを予定している「はやぶさ2」の探査対象小惑星である 1999JU3 について、これまでの地上観測から得られている物理情報をもとにして、YORP 効果による自転変動の影響を数値的に調べた。

1999JU3 は C 型の地球近傍小惑星であり、これまでの可視域と熱赤外の測光観測からその形状は球形に近く、自転周期と有効直径はそれぞれ 7.63 時間、0.87km と推定されている[3]。しかし、自転軸方向や表面の起伏まで復元した立体形状については、ライトカーブの振幅が小さいことやレーダー観測の好機がなかったため、不確定性が大きいと考えられている。そこでわれわれは、小惑星の自転軸方向と立体形状をランダムに仮定し、YORP 効果の統計的な解析を行なった。本発表ではその解析結果をもとに、YORP 効果によって高速自転を経験した確率とはやぶさ2の近接観測による YORP 効果の検出可能性について議論する。

参考文献:

[1] Rubincam, 2000, Icarus 148, 2. [2] Walsh et al., 2008, Nature 454, 188. [3] Mueller et al., 2011, A&A 525, 145.

はやぶさサンプルキャッチャーから回収された粒子の特徴

○矢田達¹、安部正真^{1,2}、上相真之¹、唐牛譲¹、熊谷和也¹、佐竹渉¹、中藤亜衣子¹、
石橋之宏³、岡田達明^{1,2}、

¹宇宙航空研究開発機構(JAXA)/宇宙科学研究所(ISAS)、

²宇宙航空研究開発機構(JAXA)/月惑星探査グループ(JSPEC)

³九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

2010年、小惑星探査機「はやぶさ」は近地球型のS型小惑星イトカワ表層の試料を収めた再突入カプセルを地球に帰還させた[1]。これ以降、JAXA キュレーションチームでは帰還した再突入カプセルから取り出したサンプルキャッチャー(以後キャッチャーと呼称)から粒子を回収し、その初期記載を進めている[2]。

「はやぶさ」のキャッチャーは直径約5cm、高さ約7cmのアルミニウム合金製の円筒形の容器で、中心部の回転筒を挟んで上にA室、下にB室と分かれている。A室には2005年11月に行われた2回目のタッチダウン時の回収試料が、B室には1回目のタッチダウン回収試料が収められている。構造上、B室の蓋は単体で分離可能だが、A室蓋はキャッチャーを外部環境と遮断していた2重Oリングを備えたラッチ部内蓋と一体構造になっている。故にB室蓋は単体での観察が容易だが、A室蓋の観察はハンドリング性の悪さから困難を伴う。

当初、キャッチャーの開口部に合成石英ガラス円盤を設置し、振動によりキャッチャー内の粒子を落下させ、回収したガラス円盤の表面から1個ずつ静電制御マニピュレーターで粒子を拾い出して初期記載を進めた。この方法で400個強の粒子の初期記載を行った。しかし、拾い出しの作業が制約となって初期記載に時間がかかっていたことから、昨年度、キャッチャー開口部の円盤をそのまま観察できる密閉型電子顕微鏡用試料ホルダーを開発した。昨年度後半からこの試料ホルダーを用いてキャッチャーB室フタ上の粒子の直接記載を始めた。前述の通り、B室蓋の上面はサンプルを収めたキャッチャーの内側の一部であり、その表面の全粒子を記載することにより、キャッチャー内の汚染粒子も含めて比較的偏りのない粒子の全容を把握できることが期待される。

現在の所、このB室蓋の1/3の領域の全粒子記載が終了したところである。B室蓋上で記載された粒子数は1100個強に達した。その内、イトカワ起源と考えられるケイ酸塩鉱物からなる粒子は32%で、残りの68%が人工物もしくは炭素質物質からなる粒子だった。イトカワ粒子の67%が主にかんらん石からなる粒子で、18%がCaに乏しい輝石、5%がCaに富む輝石、7%が斜長石、残りの2%がFeS、FeNiなどの付随的な鉱物からなる粒子だった。この鉱物の比率は平衡LLコンドライト隕石の鉱物モード比と似通っており、これまでのイトカワ粒子の分析結果[3-8]と調和的である。人工物・炭素質粒子の内、最も多かったのが53%を占めたAl粒子で、次いでステンレス粒子(12%)、炭素質粒子(11%)、チタン粒子(8%)、残りの16%がその他の人工物粒子(亜鉛、石英ガラス等)だった。炭素質物質については詳細分析の結果、現在の所地球起源の汚染物質だと考えられている[9]。

前述の通り、「はやぶさ」ではイトカワ粒子より多くの地球物質が混入していたことが分かった。これを受けて「はやぶさ2」では、最も多かったAl粒子の混入の防止策として、「はやぶさ」で行っていたキャッチャー内面のAl蒸着処理をやめ、アルミニウム合金の鏡面研磨加工に留めた。また、炭素質粒子の汚染を低減させる為に、脱脂洗浄の過程でジクロロメタン-メタノール混合溶液による超音波洗浄の工程を加えた。現在、「はやぶさ2」の帰還試料の受け入れに向けて、クリーンルーム環境の一層の清浄化、新設するクリーンチェンバーの仕様検討を進めている。

参考文献：[1] Abe M. et al., (2011) Lunar Planet. Sci. 42, #1638. [2] Yada T. et al. (2013) Meteoritics Planet. Sci. 49, 135. [3] Nakamura T. et al. (2011) Science 333, 1113. [4] Yurimoto H. et al. (2011) Science 333, 1116. [5] Ebihara M. et al. (2011) Science 333, 1119. [6] Noguchi T. et al. (2011) Science 333, 1121. [7] Tsuchiyama A. et al. (2011) Science 333, 1125. [8] Nagao K. et al. (2011) Science 333, 1128. [9] Uesugi M. et al. (2014) Earth Planets Space, submitted.

はやぶさ帰還試料コンソーシアム研究 最大粒子の3次元組織と形成過程

○、上相真之¹、土山明²、矢田達¹、中藤亜衣子¹、唐牛讓¹、熊谷和也¹、上杉健太郎³、
竹内晃久³、鈴木芳生³

¹宇宙航空研究開発機構、¹京都大学、¹高輝度光科学研究センター

これまでにこのはやぶさ帰還試料の初期分析・国際公募分析を通して、小惑星の形成過程、進化過程およびレゴリス粒子の進化過程、表層の物理過程などが明らかになっている [e. g. 1-7]。この中で、地球外試料キュレーションチーム (Extraterrestrial Sample Curation Team, ESCuTe) はきわめて科学的に重要な特徴を持ちながら、きわめて数が少ないためにこれまで分析に提供されてこなかった試料に対する分析を行うためにコンソーシアムを立ち上げ、共同で研究計画の立案を開始した。本発表ではコンソーシアム研究の一つである、最大粒子に対する分析計画とその進行を報告する。

RA-QD02-0136-01 は、はやぶさ帰還試料のなかで最大の珪酸塩粒子で、長径で 310 μ m 程度である。この試料に対して、(a) 試料の3次元鉱物組織観察、(b) 試料表面の微細構造観察、(c) 試料中の格子欠陥密度の不均質性の観察、(d) 試料表面の宇宙風化層の観察、(e) Ar-Ar 年代法による形成・変成年代測定、(f) 宇宙線生成核種の分析によるイトカワ表面のレゴリス層進化過程の研究、が提案された。

これまでに、樹脂を用いない簡易大気遮断環境での放射光 CT 観察が行われ、その組織観察が行われ、無数の穴が粒子内部に見つかった。これは3次元的には殆どが接続し、粒子全域に広がり、その外部にまでつながっている。空隙率は16%にのぼり、これまでに調べられたイトカワ試料の空隙率は1.4-11%であることから [5]、今回得られた値はもっとも大きい。また、この空隙は以下のような特徴がある。(i) 空隙が粒子全体に分布し、その形状はきわめて不定形である。(ii) 穴の短径が1.5 μ mと粒子に対して小さい。(iii) 鉱物組織を横断している。これらのことから、この空隙は気泡ではなく、割れ目である可能性が高く、以下のような粒子の進化過程が考えられる。(1) イトカワあるいはその母天体上で粒子の前駆体が形成される。(2) 衝撃などにより、粒子に亀裂が入る。(3) 弱い加熱で亀裂が不完全に修復し、新たな粒子を形成する。このようにイトカワ母天体上で、粒子の破壊、再形成などが繰り返されている可能性があることがわかった。

References : [1] Nakamura et al. 2011. *Science* 333:1113-1116. [2] Yurimoto et al. 2011. *Science* 333:1116-1119. [3] Ebihara et al. 2011. *Science* 333:1119-1221. [4] Noguchi et al. 2011. *Science* 333:1221-1225. [5] Tsuchiyama et al. 2011. *Science* 333:1225-1228. [6] Nagao et al. 2011. *Science* 333:1228-1231. [7] Nakashima et al. 2013. *EPSL* 379:127-136.

かんらん岩および玄武岩高速衝突破片の3次元形状分布： はやぶさ粒子との比較

○土山明¹、島田玲²、道上達広³、荒川政彦⁴、長谷川直⁵、中野司⁶

¹京都大学理学研究科、²大阪大学理学研究科、³近畿大学工学部、

⁴神戸大学理学研究科、⁵JAXA、⁶産業総合研究所

「はやぶさ」探査機により採取された小惑星イトカワのレゴリス粒子の初期分析により3次元粒子形状が明らかにされ、高速衝突実験[3]破片の3軸比分布との類似性から、採取された粒子はイトカワ表面での微小天体の衝突起源であると考えられた[1,2]。しかしながら、この実験におけるターゲットの材質（アルミナセメント）や測定された破片粒子サイズ(>15 μm)がイトカワ粒子とは異なっているだけでなく、3軸長測定法も統一的ではなかった。また、実験はカタストロフィック破壊の条件でおこなわれたが、イトカワのレゴリス粒子の生成条件は異なる可能性もあり、より詳細な検討が必要である。

島田ら[4]は、かんらん岩をターゲットとしてカタストロフィック破壊およびクレータ形成条件での高速衝突実験をおこない、統一した3軸比測定法によりイトカワ粒子サイズ(~100 μm)破片の3次元形状との比較をおこなった。今回新たに玄武岩をターゲットとしたクレータリング条件での高速衝突実験をおこない、ターゲットの違いを評価するとともに、道上ら[5]の高速衝突実験による比較的大きなサイズの破片粒子(>4 mm)の3軸比との比較もおこなった。実験生成粒子の3軸比に関する結果は、イトカワ粒子の最新データ[6]だけでなく、月レゴリス粒子のデータ[6]とも比較した。

JAXA宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を用いて玄武岩（モンゴル産: 10 x 10 x 10 cm³）ターゲットに直径1 mmのTi球の弾丸を4.97 km/sで打ち込んだ。試料回収用の発泡スチロール表面に付着した粒子破片（50-200 μmおよび350-850 μm）について、SPring-8のマイクロCTにより3次元形状を得た。

平均3軸比やK-S検定を用いた形状分布の比較により、以下のことがわかった。(1) ターゲットによる違いを見出すことはできない。(2) 同一実験でも破片サイズが異なると分布が異なる。(3) 衝突条件が異なると同一サイズでも分布が異なる。(4) はやぶさ粒子の形状分布[6]はクレータ形成実験の50-200 μm破片との違いを見出せず、ボルダーへの衝突でクレータリングにより放出された低速度成分の破片であった可能性が示唆される。(5) 月のレゴリス粒子は衝突実験破片より3軸比がより1に近く、月表面での長時間の滞在により、破片形状から球（あるいは等粒）状へと変化したと考えられる。

[1] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333: 1125.

[2] Tsuchiyama et al., (2004) MAPS, 49: 172.

[3] Capaccioni, F., et al. (1984) Nature 308, 832-834.

[4] 島田ら (2013) 日本惑星科学会秋季講演会, abstract.

[5] 道上ら (2014) 日本惑星科学会秋季講演会, abstract.

[6] 土山ら (2014) 日本地球惑星科学連合大会, abstract.

放射光 X 線を用いたイトカワ微粒子の鉱物学的研究

○三河内 岳¹・萩谷 健治²・大隅 一政³・Michael Zolensky⁴・小松 睦美⁵・
佐竹 渉¹・吉田 彩里¹・唐牛 譲⁶

¹東大・理、²兵県大・生命理、³JASRI/SPring-8、⁴NASA-JSC、⁵総研大、⁶宇宙研

はやぶさ小惑星探査機によりサンプルリターンされたイトカワ微粒子は、隕石と小惑星の関係や小惑星の進化史を探る上で重要な試料である。我々は、イトカワの形成過程をより詳しく理解するために、第 1 回ははやぶさ試料国際研究公募により配分を受けた 7 個のイトカワ微粒子の鉱物学的・結晶学的研究を行った。これらの微粒子はほとんど 50 μm 以下のサイズで、主に 10-20 μm 程度のカンラン石と斜長石からなっているために、微小領域の分析が可能である放射光 X 線を利用した 2 種類の実験を実施した。

SPring-8 (BL37XU) でのエネルギースキャン微小領域 X 線回折 (SR-XRD) 実験の結果 (エネルギー範囲: 25-30 keV、ビーム経路 1 μm)、カンラン石については、4 粒子からシャープな X 線回折像を得ることができた。光学顕微鏡の観察結果と合わせ、分析を行ったイトカワ微粒子は弱い衝撃しか受けていないことが言える。構造精密化の結果、 $a=4.708\text{-}4.779$ 、 $b=10.271\text{-}10.289$ 、 $c=6.017\text{-}6.024$ (Å) の格子定数が得られた。これらの格子サイズはカンラン石の Fo 組成が約 70 に相当しており、EPMA により得られていた分析結果と調和的であった。斜長石についても同様の SR-XRD 実験を行い、2 粒子から X 線回折像が得られ、構造精密化による格子定数は $a=8.180\text{-}8.194$ 、 $b=12.53\text{-}12.893$ 、 $c=7.125\text{-}7.23$ (Å)、 $\alpha=92.60\text{-}93.00$ 、 $\beta=116.36\text{-}116.75$ 、 $\gamma=90.03\text{-}90.17$ ($^\circ$) であった。斜長石の反射の $\Delta 131$ 角度は平衡温度と相関があることが知られており、今回得られたイトカワ微粒子中の斜長石平衡温度は 800 ± 10 $^\circ\text{C}$ であった。この温度は先行研究で得られている温度とよく一致し、母天体での熱変成を記録しているものと考えられる。

また、斜長石については高エネ研 (BL-4A) で Fe 放射光 XANES 実験も行った (ビームサイズ: 約 5 μm)。各種地球外試料中に含まれる斜長石の Fe 価数は酸化還元状態により $\text{Fe}^{2+} \sim \text{Fe}^{3+}$ に非常に広い幅を持つが、分析を行ったイトカワ微粒子中の斜長石には Fe^{3+} と Fe^{2+} がほぼ等量ずつ含まれていた。このような比較的高い $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比はイトカワ微粒子が酸化環境で形成されたことを示唆している。比較のために Chelyabinsk (LL5) と Monahans (H5) 隕石中の斜長石に対して同様の実験を行ったが、Chelyabinsk ではイトカワ微粒子と同様に Fe^{3+} が含まれていたものの Monahans では Fe^{2+} しか見られなかった。

以上の結果から、今回分析を行ったイトカワ微粒子は弱い衝撃を受けた平衡 LL コンドライトと類似することを示しており、初期分析結果を支持している。

炭素質隕石へのパルスレーザー照射による C型小惑星における宇宙風化作用再現実験

○松岡萌¹ 中村智樹¹ 木村勇氣² 廣井孝弘³ 中村良介⁴ 奥村聡¹ 佐々木晶⁵

¹東北大地学専攻、²北大低温研、³ブラウン大、⁴産総研、⁵阪大宇宙地球科学専攻

宇宙風化作用を受けた期間が長いC型小惑星は、反射スペクトルの傾きが減少すること（青化）が報告されている[1]。本実験ではCM2コンドライトを用いてペレット試料を作成し、C型小惑星における宇宙風化作用を実験室で再現することを目指した。ペレットに0.7, 1, 2, 5, 10, 15 mJのレーザー照射を行い、微小隕石の衝突効果を模擬した。照射域・未照射域の反射スペクトルを、窒素パージ・加熱条件下で取得した。測定波長域は0.25-14 μm とした。測定した反射スペクトルは、レーザー照射強度の増加と共に青化・暗化を示した。さらに、含水鉱物の存在を示す0.7 μm 吸収帯や構造水の存在を示す3 μm 吸収帯は、いずれも弱化を示した。また10, 15 mJのレーザー照射域においてTEM観察を行ったところ、部分的に脱水・アモルファス化したserpentineや、レーザー照射により生じた硫黄に富むケイ酸塩飛沫微粒子（直径20-1000 nm）が観察された。

スペクトルの変化に関して考察する。serpentineの長時間加熱実験ではアモルファス化に伴う反射率の低下（暗化）が報告されている[2]。本実験においてもserpentineのアモルファス化によってスペクトルの反射率が低下したと考えられる。また、硫黄に富む粒子が試料表面を覆うように分布し、反射率の低下が起こったと考えられる。一方asphaltiteを用いたイオン照射実験では、傾きの平滑化と紫外域反射率の上昇が報告されている[3]。本実験においても、Murchisonに含まれる有機物がレーザー照射で炭化し、紫外域反射率の上昇が生じたと考えられる。以上の結果、スペクトルの反射率の低下と青化が生じたと考えられる。

スペクトルの吸収帯の弱化に関して考察する。レーザー照射の結果、serpentineのアモルファス化による0.7 μm 帯吸収深さの減少と、serpentineやtochiliniteの脱水による3 μm 帯吸収深さの減少が起こったと考えられる。さらに、脱水やアモルファス化を免れたserpentineやtochiliniteが飛沫粒子に覆われることによって、0.7 μm ・3 μm 吸収帯は弱化したと考えられる。本実験と同様の過程はC型小惑星の表面において進行すると考えられる。従って宇宙風化作用の進行に伴い、C型小惑星の反射スペクトルが青化することが、物質科学的に予想される。

参考文献 [1] Nesvorný (2005) *Icarus* 173:132-152. [2] Hiroi et al. (1996) *Meteoritics & Planetary Science* 31:321-327. [3] Moroz et al. (2004b) *Icarus* 170:214-228.

太陽風による宇宙風化を模擬した照射実験試料の表面・内部構造の観察：小惑星イトカワ・月のレゴリス粒子との比較

○松本徹¹，土山明¹，渡部直樹²，香内晃²，三宅亮¹，大竹真紀子³，

¹京大・理・地球惑星科学，²北海道大学低温科学研究所，³宇宙航空研究開発機構(JAXA)

大気のない天体表面は、反射スペクトルが時間的に変化する宇宙風化と呼ばれるプロセスが存在する。天体表層の光学特性の変化・物質進化を探る上で宇宙風化過程を理解する事は重要である。月やS型小惑星の宇宙風化は、主に微隕石衝突や太陽風照射による鉱物表面にナノ Fe 微粒子を含むリムの形成が原因と考えられてきた[1]。探査機はやぶさが回収したS型小惑星イトカワ表面のレゴリス粒子表面に、ナノ Fe を含む厚さ数十 nm のリム(宇宙風化リム)が観察されている[2]。リムの厚さが太陽風 He の貫入深さと一致することから、イトカワ粒子の宇宙風化リムの形成は主に太陽風照射(主に 1keV H と 4keV He)が重要な役割を果たすと推測された[2]。宇宙風化リムの一部は、空隙を持ち、空隙は粒子表面を押しあげ、ブリストア(水ぶくれ状)構造を形成する場合がある。ブリストアを伴う宇宙風化リムは非破壊の表面観察が可能であり、イトカワ粒子上では不均一な表面分布を示したことから、小惑星イトカワ表面でのレゴリス粒子の移動・かき混ぜの証拠が示された[3]。イトカワ粒子の宇宙風化リムは、レゴリス粒子の振舞や小惑星の宇宙風化過程を探る上で鍵を握ると考えられるが、太陽風照射による宇宙風化リムの表面・内部構造の形成過程や形成のタイムスケールの詳細は明らかでない。特にブリストアを伴うリムは 10^3 - 10^4 年の太陽風照射期間で形成されたことが Solar flare track 密度によって間接的に見積もられているのみである。そこで、これまで太陽風の照射を模擬したカンラン石粒子へのイオン照射実験を行ってきた[4]。これまでカンラン石粒子への 4-50 keV の $^4\text{He}^+$ イオン照射実験により、太陽風の照射に換算すると 500-5000 年のイオン照射量でブリストアを伴う非晶質化したリムが形成されることが観察された[4]。一方で照射実験試料はイトカワ粒子の宇宙風化リムに比べて非晶質化が進んでおり、イトカワ粒子の宇宙風化リムと同一の構造ではない。この違いは、照射実験と太陽風照射のイオンのフラックス(単位時間に照射されるイオン量)の差に起因すると推測し、照射イオンフラックスの違いがリム形成に及ぼす影響について考察することは重要であると考えた。そこで、本研究では、異なるイオンフラックスの He イオン(4keV)ビームをカンラン石試料に照射し、照射試料の評価を行った。照射前後で、走査型電子顕微鏡(FE-SEM)によって表面構造の変化を評価し、照射後の試料の一部は走査透過型電子顕微鏡(TEM/STEM)を用いて試料断面の構造を観察した。観察の結果、太陽風年代に換算して、1500 年程度の He イオン量を照射しても、フラックスが小さい場合、ブリストアが形成されないことが分かった。本発表では、異なるイオンフラックス条件での照射試料の組織の差異を比較するとともに、照射実験試料とイトカワ粒子、月レゴリス粒子の宇宙風化リムの構造との比較についても議論する。

[1] Hapke, B. 2001. *Journal of Geophysical Research*, 106, E5, 10039-10007. [2] Noguchi T. et al. 2013. *Meteoritics & Planetary Science*. 27, 1-27. [3] Matsumoto T. et al. 2014. *77th Annual Meteoritical Society Meeting*. Abstract#5130 [4] Matsumoto T. et al. 2013. *Goldschmidt 2013 Conf*. Abstract pp.1711

層状ケイ酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響： 反射スペクトル形状の年代変化

○ 仲内悠祐¹、安部正真^{1,2}、北里宏平³、土山明⁴、安田啓介⁵

¹総合研究大学院大学、² ISAS/JAXA、³会津大学、⁴京都大学、

⁵若狭湾エネルギー研究センター

宇宙空間に暴露されている大気のない小天体表層は、マイクロインパクトや太陽風等の照射による風化作用を受けている。この風化作用は、リモートセンシング機器による表層物質決定等において大きな影響を与える。そのため、小惑星観測や探査のデータを正しく理解するためには宇宙風化の影響を取り除く事が重要である。さらに、宇宙風化作用に伴う表層状態の変化は太陽風等の照射年代に関係していると考えられるため、天体表層年代を理解する上でも重要な指標と成り得る。

近年の太陽系探査や地上実験により、小天体表層鉱物と太陽風プロトンの相互作用によってOH基やH₂Oが生成する事が示唆された(e.g. Peters et al. 2009, A. S. Ichimura et al. 2012)。さらにこれまでの我々の実験から、小天体に多く存在すると考えられているケイ酸塩鉱物において太陽風プロトンはSi-Oの結合と選択的に結合し、OH基やH₂Oの存在状態に由来する特定の波長の反射率が他の波長に比べて急激に変化する事が示唆された(Y. Nakauchi, LPSC, 2014)。このことから太陽風プロトンによる風化は、はやぶさ2プロジェクトにおける近赤外分光計(NIRS3)を用いた小惑星表層物質決定に大きな影響を与えられられる。

本発表ではC型小惑星に多く存在すると考えられている含水ケイ酸塩鉱物に対し、太陽風を模擬したプロトンを段階的に照射し、照射量に対する反射スペクトルの変化について議論する。

ナノ秒パルスレーザー照射模擬実験による 宇宙風化作用における硫化鉄の効果の検証

○岡崎瑞祈¹、佐々木晶¹、廣井孝弘²、土山明³、三宅亮³、松本徹³、平田岳史³

¹大阪大学大学院理学研究科、²ブラウン大学、³京都大学大学院理学研究科

【はじめに】

大気のない天体表面が宇宙空間にさらされることで見た目の色や明るさが変化していく現象を宇宙風化作用というが、そのメカニズムは太陽風や微小隕石の衝突などによりナノ鉄微粒子が形成され、スペクトル変化が起こるとされている (Hapke, 2001)。ナノ鉄微粒子は月のソイルでも見られているが、ナノ秒パルスレーザーを鉱物表面に照射するとナノ鉄微粒子を実験的に生成することができ、宇宙風化作用のスペクトル変化を模擬出来る。

また、はやぶさが小惑星イトカワから持ち帰った微粒子の宇宙風化された表面の電子顕微鏡観察・元素分析から硫化鉄のナノ微粒子を含む層が発見されるなど、硫化鉄に関して興味深い事実が明らかになっている。ここから、硫黄は揮発性に富むため天体表面で起こる宇宙風化作用に関係があるのではと推測し、実験を行った。

【実験と結果】

粒子サイズ 45~75 μm のカンラン石に同サイズの硫化鉄を 10%、20%混ぜた試料を作成しナノ秒パルスレーザーを照射してスペクトル変化を引き起こした。また対照実験として同サイズの鉄を 10%混ぜたものや、粒子サイズ 45 μm 以下の硫化鉄を混ぜたものでも同様の実験を行った。

その結果から、硫化鉄が含まれる場合は、スペクトルが赤化も強く、また近赤外領域も暗化していることが確認された。鉄のみが含まれる場合は赤化は見られるものの暗化は見られないのに対し、硫化鉄が含まれる場合では赤化に加え、レーザー照射前に比べ全体的な暗化もはっきりと見られた。またレーザー照射部を FE-SEM や実体顕微鏡で観察したところ、表面が加熱され溶けたようになっており、硫化鉄は光沢が出て周囲を暗く汚していた。レーザー照射部のカンラン石表面を TEM 観察すると、表面に厚さおよそ 200nm のアモルファス層があり、アモルファス層の下部と最表面に微粒子が確認できた。アモルファス層下部の微粒子はディフラクションからナノ鉄微粒子と判断できたが、最表面の微粒子に関しては純鉄ではなく、それでも EDS の結果では鉄は含まれることがわかった。また硫黄はわずかに検出されたものの、ほぼ見られなかった。以上のことから、硫化鉄微粒子の形成が反射スペクトルの変化を大きくしている可能性が示唆されたが、硫化鉄微粒子の存在は確認中である。

月高地地殻の化学組成を用いた マグマオーシャンの固化過程への制約

○大竹真紀子¹, 小林進悟², 武田弘³, 諸田智克⁴, 石原吉明¹, 松永恒雄⁶,
横田康弘⁶, 春山純一¹, 山本聡⁶, 小川佳子⁷, 唐牛譲¹, 佐伯和人⁸, 酒井理紗¹

¹JAXA ²放射線医学研究所 ³千葉工大 ⁴名古屋大

⁵AIST ⁶NIES ⁷会津大 ⁸大阪大

研究背景：月高地地殻の Mg/[Mg+Fe] モル%比 (Mg 値) は月の表側より裏側で高く、裏側を構成する岩石の方が表側よりも未分化なマグマから結晶化した事が報告されている [1]。一方、Th は液相濃集元素でマグマの冷却過程で液相に濃集するため先に結晶化した岩石では Th 濃度が低く、Th 濃度もマグマの分化過程の指標として重要である。実際の月面観測データからも月裏側の高地地殻は表側に比べて Th 濃度が低い事が知られている [2]。我々はこれまでに観測データにおける Mg 値と Th 濃度の相関を調べ、実際に月面がマグマの分化理論から想定される相関 (Mg 値の低下とともに Th 濃度が上昇する) を持つ事を明らかにして来た。本研究では、観測された相関から地殻形成時のマグマオーシャンの組成にどの程度制約を与えられるのかを調べた。

研究手法：かぐやの γ 線データと反射スペクトルデータを用いて、同じ空間分解能の Th 濃度と Mg 値マップデータを作成する。一方、マグマの分化過程シミュレーションプログラム (メルツ) [3] を用い、マグマオーシャンの初期組成を仮定した場合に想定される Mg 値と Th 濃度の変化を計算により求め、これと実測の比較を行う。マグマオーシャンの初期組成として Bulk Silicate Earth (BSE) やこれまでに推定されて来た月マグマオーシャンの初期組成に加え、それら代表的な初期組成に対して Al/Ca/Mg/Fe 量を増減させた組成についても計算を行い、観測データと最も整合する初期組成を求めた。

結果：マグマの分化過程シミュレーションによるマグマの分化トレンドと実測値を比較すると、実データに見られる 2 本の Mg 値と Th 濃度の相関トレンド (より Mg 値が高い裏側高地中央部とやや Mg 値が低いその周辺部に対応) のうち、やや Mg 値が低い側のトレンドと BSE 組成から開始した場合のトレンドが類似した。また BSE に対して Al/Ca を増減させた初期組成がより実データに近い結果となった。一方で推定されて来た月マグマオーシャンの初期組成は 2 つのトレンドとは大きく異なっており、これら結果から実際の月マグマオーシャンの初期組成に対して制約を与える事ができる。

[1] Ohtake, M. et al. (2012) *Nature GeoSci.* 5, 384-388. [2] Kobayashi, S. et al. (2012) *Earth Planet. Sci. Lett.* 337, 10-16. [3] Ghiorso and Sack (1995) *Contrib. Mineral. Petrol.* 119, 197-212.

月 SPA 盆地によって形成された インパクトメルトプールの同定

○上本季更^{1,4}、大竹真紀子¹、春山純一¹、中村良介²、松永恒雄³、山本聡³、岩田隆浩¹
¹宇宙航空研究開発機構、²産業総合研究所、³国立環境研究所、⁴東京大学

月裏側に存在する South Pole-Aitken (SPA) 盆地は、巨大衝突により月表面の地殻が掘削され、中心部にはマントル物質が露出していると考えられてきた[Spudis et al.,1994]。先行研究では、盆地中央に High-Ca 輝石に富む層（以下 HCP 層）が広く分布した窪地があり、その窪地には地下マントル物質が溶融したインパクトメルトが貯留していると推測されている[Ohtake et al.,2014]。ただし、この地域周辺には High-Ca 輝石に富む古い mare の存在も示唆されている[Pieters et al.,2001]ため、SPA 盆地の地下マントルの組成を推測するためには、この HCP 層がインパクトメルトであることを確認する必要がある。そこで本研究では、月周回衛星かぐやデータを基に作成した鉱物・地形情報から、盆地中央の窪地とその周辺地域の岩石分布と産状、鉱物の化学組成を詳細に調査し、各岩石層の層序と由来を推定した。

まず、鉱物吸収スペクトルの吸収中心波長の情報を使い、異なる岩石層に分けた。次にクレータの壁面や底面、中央丘から、各層の層序を推定した。その結果、最上部に Low-Ca 輝石に富む層（以下 LCP 層）と HCP 層より長い中心波長の層(以下 veryHCP 層)があり、その下に HCP 層、HCP 層の下に再び LCP 層が存在するという層序であるとわかった。

各層の由来について、岩石の産状や鉄濃度から、上部の LCP 層は Ohtake et al.,[2014]のエジェクタとしてのマントル物質と同一のものと考えられ、veryHCP 層は、新しい mare であると推定した。また、HCP 層について、月面に広く分布する主な mare は総厚 2km 以下[DeHon.,1979]、鉄濃度 14wt%以上[Jolliff et al.,2000]という過去の研究と、この窪地周辺の mare が鉄濃度 16wt%以上ということを、今回導きだした HCP 層の層厚が約 7-9km、鉄濃度が 12-13wt%であることと比較すると、HCP 層は mare とは考えにくい。一方、下部の LCP 層が、インパクトメルトが分化し、HCP 層と LCP 層に分かれたものであるとすると、SPA 盆地の分化したインパクトメルトの上層の層厚が約 12km 付近である[Vaughan et al.,2014]とする先行研究とよく合致する。以上から、HCP 層はインパクトメルトであると推定した。

よって、この HCP 層の鉱物、化学組成を調査することにより、インパクトメルトとして溶融した SPA 盆地の地下マントルの組成を推測し、月マントルの一定の深さまでの組成を解明することができる。

観測衛星による分光画像および数値地形モデルを用いた衝突クレーター自動判別手法の開発

○山本 聡¹, 松永 恒雄¹, 中村 良介², 関根 康人³, 平田 成⁴, 山口 靖⁵

¹国環研, ²産総研, ³東大, ⁴会津大, ⁵名古屋大

クレーター年代学は、衛星画像上の衝突クレーターを数え上げることによって、解析対象地域の年代を推定するものである。一方、最近のリモートセンシング技術の向上により、惑星・衛星探査による大量の画像データの取得が可能となりつつある。これらの大量データを使って、様々な天体かつ広範囲の地域に対して効率よくクレーター年代学研究を展開する上では、衛星データから衝突クレーターを自動的に抽出する手法（衝突クレーター自動判別手法）の活用が重要となる。これまで、衝突クレーター自動判別手法に関する様々なアルゴリズムが提案されてきた[e.g.1,2]。一方で、従来の衝突クレーター自動判別手法では、処理を行う前に人為作業による様々な前処理を必要とするといった問題や、処理速度に膨大な時間がかかるといった問題がある場合が多い。実際、これまで得られてきたクレーター年代学を使った月科学研究の多くは、これまで提案されてきた衝突クレーター自動判別手法によるものではなく、手動カウンティングによる研究が主である[3]。

我々は最近、従来の衝突クレーター自動判別手法とは異なる、新しい解析手法による円構造抽出アルゴリズム(RPSW; ピクセルスワッピング法)の開発を行った[4]。この方法では、円構造を抽出するにあたって、画像の回転対称性に着目する。そのため、画像上の各点におけるスカラー情報だけでなく、様々なベクトル情報(例えばスペクトル情報、地形情報など)に対して適用することができるという意味で、従来のクレーター抽出手法(ハフ変換やパターンマッチングなどを利用した方法)と大きく異なる。そこで本研究では、このRPSWを月周回衛星「かぐや」搭載の地形カメラ(TC; Terrain Camera)[5]で取得された、デジタル地形モデル(DTM; Digital Terrain Model)へ応用し、DTMデータを使った前処理を必要としない衝突クレーター自動判別手法の開発を行った(RPSD法と呼ぶ)(図1に適用の一例を示す)。この手法では、様々な大きさのクレーターが複雑に重なっている場合であっても、個別の構造を独立にかつ同時に検出できるという特徴を持つ。またノイズ除去などの前処理が一切不要であることから、従来の衝突クレーター自動判別手法と比べて、桁違いでの高速処理を行えるという特徴を持つ。本発表では、RPSWの基本概念および、DTMへ応用したRPSD法の紹介を行い、また実際の月面上の海・高地領域に対して応用して得られたモデル年代の結果について議論を行う。

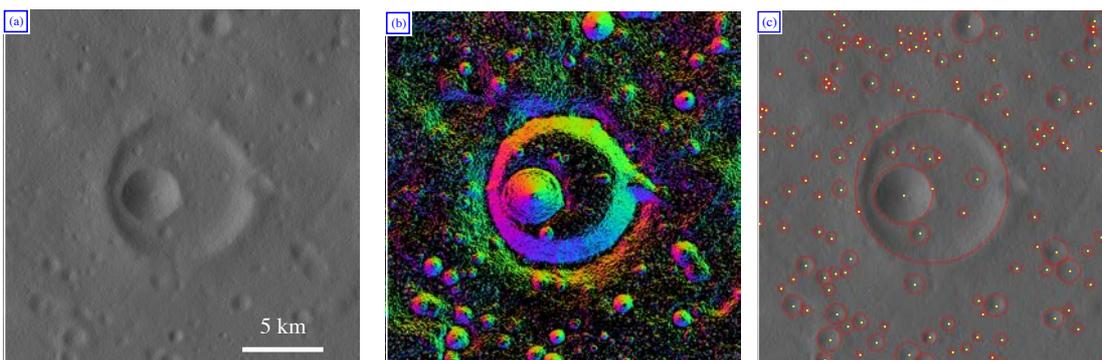


図1: (a) DTMデータを基にした形状イメージ。月面上の熱の入江の高地領域。(b) DTMデータを使って、クレーター内壁の傾斜角度および法線の方位角について色分けを行ったもの。RPSD法では、これらの傾斜角度および方位角の「回転対称性」を調べることで衝突クレーターがどこにあるかを検出するものである。(c) RPSDによる抽出例。黄色が検知されたクレーターの中心点、赤線が自動的に決定されたクレーターリム。

[1] 沢辺頼子ら 2004, 遊星人, 13, 87. [2] 原田直人ら 2008, 遊星人, 17, 69. [3] Morota, T. et al. 2011, EPSL, 302, 255. [4] Yamamoto, S. et al. 2014, IEEE TGRS, 53, 2, 710. [5] Haruyama, J. et al. 2008, EPS, 60, 243.

かぐや/スペクトルプロファイラデータを閲覧・表示するためのWeb-GIS「月光」のユーザ拡大に向けて

○小川佳子¹, 林洋平, 平田成¹, 寺菌淳也¹, 出村裕英¹, 松永恒雄², 山本聡², 横田康弘²,
大竹真紀子³, 大嶽久志³

¹会津大学 ²国立環境研究所 ³JAXA

「月光」(URL: http://fructus.u-aizu.ac.jp/gekko_info/)は、月面周回衛星「かぐや」に搭載された可視-近赤外分光計スペクトルプロファイラ(SP)のデータを閲覧・ダウンロードすることができるウェブGISであり、2014年8月よりサービス運用を開始した(下図)。「月光」の主だった機能としては、月面ベースマップ上の任意の領域に対して観測された全SP観測点を、高精度の同時観測画像を重ねあわせた上で表示することができ、その中の観測点をクリックして選択することにより、そこで観測されたSP反射率値スペクトルを瞬時に表示・確認することができる。また、複数の観測点間でスペクトルデータを比較する機能や、詳細解析のためのダウンロード機能も備えている。スペクトルの包絡線(continuum)除去や各補正の適用など基礎解析はウェブ上で行うことができる。なお、ベースマップである月面画像レイヤは複数種類用意しており、切り替え可能である。インターネットの環境さえあれば、ブラウザを通して、 10^7 点におよぶSP全観測点のデータから自在に関心領域のデータを選び出すことが可能となっている。「月光」の詳しい機能紹介やシステム実装の詳細については、林ら[2014年, 宇宙科学情報解析論文誌投稿中]をぜひ参照していただきたい。

「月光」の利用にあたっては、利用規約への同意の上、ユーザ登録申込書を管理者グループML宛に送付していただくことをお願いしている。申込書を受付後、個別アカウントを発行し、IDとパスワードを御連絡する流れとなっている。

本講演では、Web-GIS「月光」を利用するまでの流れを説明し、その主だった機能を紹介し、さらに「月光」を用いた簡単な分析例に言及する。今後の「月光」ユーザ拡大にぜひつなげたい。

月光

ホーム 動作環境 レファレンス ご利用規約 Q&A お問い合わせ

「月光」のあらまし

「月光」は、月面周回衛星「かぐや」に搭載された可視-近赤外分光計スペクトルプロファイラ (SP) のデータを閲覧・ダウンロードすることができるウェブGISです。

月面画像レイヤに表示された全SP観測点から任意の地点を選択すれば、観測されたSP反射率値スペクトルを瞬時に表示・確認することができます。また、複数の観測点間でスペクトルデータを比較する機能や、詳細解析のためのダウンロード機能も備えています。

詳細は、林ら, 2014 ([宇宙科学情報解析シンポジウム : 発表資料\(PDF\)](#)) をご覧ください。

「月光」の御利用について

「月光」の御利用はユーザ登録制です。はじめて御利用を希望される方は下記の「ユーザ登録申込」を御覧の上お手続きください。なお、御利用にあたっては、ご利用規約の遵守をお願いしています。

ユーザ登録申込

1ユーザにつき1アカウントを発行いたします。ユーザ登録を希望される方は、

「ご利用規約同意書およびユーザ登録申込書」([こちら](#)からダウンロードできます。)

に御記入のうえ、メールに添付しお送りください。

ログイン

ユーザ登録済の方はログイン画面にお進みください

お知らせ

2014.8.5
「月光フロントページ」(本ページ)を公開しました。

2014.8.5
「月光」(GIS)のユーザ登録を開始しました。

[過去のお知らせ](#)

[ウェブサイトの更新履歴](#)

水星のマントル進化

○小河正基¹

¹ 東京大学大学院総合文化研究科

水星のマントル進化を理解することを目的として、大きな熱容量を持つコアの上に置かれたマントルにおける対流と火成活動の数値シミュレーションを行った。マントル対流は粘性率が温度に依存する流体の対流として、火成活動はマントル湧昇域で生じる玄武岩マグマの浸透流による移動としてモデル化した。水星のコアの熱容量はマントルのおよそ2.5倍であるが、内核が形成される際には潜熱が解放されるため、この効果も含めた実効熱容量はそれより大きくなる。本研究では、コアの熱容量/マントルの熱容量の比 r を2, 4, 6倍の三通りで、また、マントルのレイリー数 Ra を 6×10^4 から 6×10^6 の範囲で変化させ、マントルの進化や火成活動の歴史がどのように変化するかを調べた。すべてのケースでマントルに存在する放射性元素は、進化史の最初の1億年程度で火成活動により地殻に濃集してしまい、マントルの加熱は事実上コアからの熱に限られた。

(1) $Ra = 6 \times 10^4$ のとき、コアの熱容量によらず対流も火成活動も最初の5億年以内に終息し、マントルは玄武岩マグマが抜けた後の残渣物質から成る浅部の低密度層とより玄武岩成分にそれほど欠乏していない（しかし放射性元素は含まない）深部の高密度層に成層した。

(2) $Ra = 6 \times 10^5$ のときも、すべての r の値でマントルは組成的に成層した。ただし、 $r=4, 6$ ではマントル深部の高密度層に弱い対流が発生した。

(3) $Ra \geq 2 \times 10^6$ のときは、最初期にマントルは組成的に成層するが、マントル対流が45億年を通じて継続して起こるため、この成層構造は攪拌されやがて消滅する。火成活動は最初の5億年程起こった後一旦停止するが、 $r=4, 6$ では、その後10-20億年ほどでコアからの加熱により一時的に再開する。

また、45億年（現在）におけるコア・マントル境界での熱流量は、 Ra と r が小さいときの 7 mW/m^2 程度から Ra と r が大きいときの 16 mW/m^2 程度まで変化した。水星では比較的最近まで一部に火成活動が起こっていた事が知られており、また、現在も磁場がある事を考えると、

(3) のモデルに見られるように、いったんマントルが組成的に成層し火成活動が停止した後、コアからの加熱により、この成層構造が壊され火成活動も再開したのではないかと推定される。今後さらに、このマントル進化モデルが月など他の惑星のモデルと整合的かどうかを検討する。

形成期の水星におけるコア-マントル間の 硫黄の分配

○笹森 映里¹, 倉本 圭¹

¹北海道大学理学院宇宙理学専攻

水星は高密度の天体であり、大きな金属核を持つと考えられている。最近 MESSENGER 探査機の X 線スペクトル観測によって、水星表面の組成は FeO に乏しく、予想外に硫化物に富むことがわかってきた。そのため、水星は還元的で金属と硫化物を多く含む E コンドライトのような材料物質から形成されたと考えられている。また、MESSENGER による重力測定から、水星のコア-マントル境界にはケイ酸塩岩よりも高密度の固体層の存在が示唆されており、その構成物質として FeS が有力視されている。しかし、どのようにしてこのような固体層が得られたのかは未解明である。

水星は分化天体であるので、表層に見出されている、あるいはマントル下部に示唆されている硫化物は、コア形成時にケイ酸塩相に分配された硫黄に由来する可能性が考えられる。還元的な環境下でケイ酸塩メルトに硫黄が溶け込む場合、常圧付近では主に熱力学的に安定な CaS の形で溶け込むことが知られている。ただし CaS はモル体積が大きいので、高圧下ではよりモル体積の小さい FeS が安定になっていく可能性もある。そうなった場合、コア形成時に高圧下でケイ酸塩メルトに溶け込んだ FeS が後に固体層を形成するかもしれない。

そこで本研究では形成期の水星におけるコア-マントル間の硫黄の分配を、工業化学分野で経験的に知られているケイ酸塩メルトへの硫化物溶解度モデルを拡張し、推定することを試みた。ケイ酸塩メルト相と熔融金属鉄相間での化学平衡を考えることによって、任意に与えた水星材料物質組成に対して、硫黄分配を支配する重要な熱力学量の一つである酸素フガシティー fO_2 を得、そして硫化物溶解度モデルからケイ酸塩メルト中の S 濃度が得られる。また圧力の効果については fO_2 と fS_2 の緩衝反応の体積変化を基に定式化した。最新の観測データに基づいた内部構造モデルでは、水星のコア-マントル境界の圧力は 4-8 GPa であると推定されている。今回は、平均的な E コンドライトの組成 (Javoy et al., 2010) を与えて、2000 K, 1 atm, 4 GPa, 8 GPa の温度圧力下で分配の推算を行った。

その結果、1 atm 下ではケイ酸塩メルトに溶け込む硫黄は 0.2-0.5 wt% で、これは固体 FeS 層を説明するには少量である。圧力を上げるとより多くの硫黄が分配され、8 GPa では 4-8 wt% に達する。ただしこれは出発物質のケイ酸塩メルトに含まれる FeO 濃度に強く依存する。また、ケイ酸塩メルト中の硫化物と酸化物の交換反応の体積変化の効果はここでは考慮しておらず、現在解析を進めている。硫黄はケイ酸塩メルトの結晶分化作用で液相に濃集しやすい元素である。したがってコア形成時にケイ酸塩メルト相に分配された硫黄の一部は、マントルの固化とその後の火成活動を通じて地殻に集まると考えられる。これは水星表面に硫黄が豊富であることを説明する。

5 GPa での Fe-O-S 系の融解と月核への応用

○赤松明香¹, 大谷栄治¹, 鈴木昭夫¹¹東北大学大学院理学研究科地学専攻

月は、慣性モーメントの値より半径 220-450 km の小さな鉄核の存在が示されている (1) が、その大きさや構造、組成といった特性については、現在も議論が盛んに行われている。月表面に見られる鉱物で最も多量に存在するのはケイ酸塩鉱物であるが、次いで多いのが酸化鉱物である。また、FeO のマントル存在量は地球が 8 wt. % なのに対し月は 11.4 wt. % と考えられており (1)、月の組成は地球よりも酸化的であるため、地球核中に軽元素として含まれると考えられる酸素が月核中にも存在する可能性がある。そこで今回は、核の軽元素として硫黄と酸素を考慮した Fe-O-S 系金属試料を月内部の温度圧力条件下に置き、その融解関係から核構造の議論を行った。

高圧実験は、東北大学理学部に設置されている 3000 ton 川井型マルチアンビル高温高圧発生装置を用いて、5 GPa、1400-1600 °C の条件で行った。試薬には鉄 (Fe)、酸化鉄 (FeO)、硫化鉄 (FeS) の粉末を使用し、試料容器はアルミナ (Al₂O₃)、ヒーターはグラファイト、圧媒体上下はジルコニア (ZrO₂)、圧媒体中心部はマグネシア (MgO) で作成した。試料分析には走査型電子顕微鏡を用いて、反射電子組成像により組織観察を行った。また、エネルギー分散型 X 線分析装置及び波長分散型 X 線分析装置を用いて、組成分析を行った。

5 GPa、1400 °C の条件において、O 量が 1-5 wt. %、S 量が 21-25 wt. % のとき全熔融であり、S 量が 20 wt. % 以下になると FeO が固体として存在する部分熔融が見られた。1600 °C の条件では、O 量が 4-5 wt. %、S 量が 16-23 wt. % のとき全熔融であり、S 量が 10 wt. % のときに FeO に富む相と Fe-FeS 相による液相不混和が見られた。以上の実験から、月核が限られた化学組成を持てば、液相不混和が存在する可能性がある。

月核が Fe-O-S 系の組成と考える時、液相不混和が存在する。このことは、核中の O、S 量によっては液体核が 2 層に分離する可能性を示唆している。すなわち月には FeO に富んだ上部外核と Fe-FeS の下部外核が存在すると考えられる。さらに上部の FeO 層は下部マントルのオリビンと反応し、最下部マントルにマグネシオウスタイトを生成する。このマグネシオウスタイトを含む FeO に富んだ最下部マントルが、潮汐による発熱で部分熔融しているとすると、これが月深部の低粘性層の原因となっている可能性がある。

(1) Konopliv, A. S., Binder, A. B., Hood, L. L., Kucinskis, A. B., Sjogren W. L., William, J. G., Science 281, 1476-1480, 1998.

(2) Taylor, S. R., A new Perspective. Cambridge University Press, New York, 307, 1992.

高温高压実験から探るガニメデ核の構造・組成モデル Structural and compositional model of Ganymede's core based on the high-pressure and high-temperature experiments

○柴崎裕樹^{1,2}、大谷栄治²、寺崎英紀³、Yingwei Fei⁴、肥後祐司⁵

¹東北大学学際科学フロンティア研究所、²東北大学大学院理学研究科地学専攻、³大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、⁴カーネギー研究所、⁵高輝度光科学センター

木星の衛星である氷天体ガニメデは内部が分化し、表層から氷層(一部液体の可能性)、鉍物層、そして中心に金属核があると考えられている。ガニメデ核の組成モデルとして鉄-硫黄系がよく挙げられるが、衛星内部のような高温高压下では、鉄は H_2O や含水鉍物と反応して容易に鉄水素化物(FeH_x)を形成することが知られ、このことを考えると、水素もまた核に存在する可能性がある。そこで、核の構成元素として鉄、硫黄、水素を仮定した場合のガニメデ核の構造や、取りうる組成を明らかにするため、Fe-S-H 系の高温高压下での相平衡関係を X 線回折実験によって明らかにした。

高温高压 X 線回折実験は、放射光施設 SPring-8 の BL04B1 で行った。このビームラインには川井型マルチアンビルプレスが設置されており、高温高压下での X 線回折実験が可能である。実験試料には Fe と FeS の混合粉末を用い、これに LiAlH_4 の熱分解反応によって発生する水素を供給することで、Fe-S-H 系試料とした。実験条件は、ガニメデの中心条件である、約 10GPa, 1700K まで行った。

実験は、目的圧力まで加圧後、昇温して目的温度まで加熱する手順で行った。低温条件では、固体の Fe と FeS が水素化した FeH_x と FeSH_x が共存する様子が観察され、温度を上げ続けると部分溶融が観察された。また、さらに昇温すると試料は全溶融した。興味深いことに、全溶融温度(リキダス)は水素の無い Fe-FeS 系のリキダスより低下していた一方で、部分溶融温度(ソリダス)は、Fe-FeS 系の共融点温度とほぼ一致していた。本実験によって得られた Fe-S-H 系の融点と、報告されている温度構造モデルやガニメデが固有磁場を持つことなどを考慮すると、ガニメデ核が鉄と硫黄、水素で構成されていた場合、固体 FeSH_x と液体 Fe-S-H という構造をし、固体成分の方が硫黄に富むような組成に成りうるということが分かった。

Brillouin 散乱法を用いた地球核マントル境界圧力条件までの δ -AlOOH 相の音速測定と地球・火星内部への適用

○増野いづみ¹、村上元彦¹、大谷栄治¹

¹東北大学大学院理学研究科地学専攻

地球内部の水は主に含水鉱物として存在し、沈み込むプレート（スラブ）によってもたらされる。沈み込むスラブは堆積岩層、玄武岩層、かんらん岩層から成り立つ。スラブはマントル遷移層で一旦滞留し、その後核マントル境界にまで達すると考えられているが、ほとんどの含水鉱物は上部マントルより浅いところで脱水分解を起こす。しかし近年の高温高压実験によって、スラブの堆積岩層に含まれる δ -AlOOH 相などの鉱物がマントル遷移層以深まで安定に存在することが明らかになった。加えて、 δ -AlOOH 相と地球・火星の下部マントルの主要構成鉱物である MgSiO_3 -ペロブスカイトが地球の最下部マントルの温度圧力条件で安定に共存することが確認された。以上のことから、 δ -AlOOH 相が惑星内部の大規模な水輸送に寄与していると提唱されており、この δ -AlOOH 相の弾性波速度を測定することで、水を含んだ沈み込むスラブ物質がマントル深部で地震波速度の異常に関与しているのかを推定することができる。

本実験ではブリルアン散乱法を用い、地球の核マントル境界圧力条件までの δ -AlOOH 相の音速測定を行った。高压発生にはダイヤモンドアンビルセルを用いた。その結果水素結合対称化により δ -AlOOH 相の音速が 6 GPa から 15 GPa にかけて急激に増加し、マントル遷移層の鉱物の中でも最も硬い鉱物のひとつであるということが分かった。このことから δ -AlOOH 相が地球のマントル遷移層で正の地震波不連続へ寄与している可能性が示唆された。また火星の下部マントル圧力条件において、 δ -AlOOH 相の音速は下部マントル主要構成鉱物である MgSiO_3 -ペロブスカイトの音速と同程度であるということが分かった。

ダスト模擬物質形成過程の赤外スペクトル“その場” 測定実験：星周シリケートの結晶化

○石塚 紳之介^{1,2}、木村 勇気²

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻、² 北海道大学低温科学研究所

宇宙空間における鉱物微粒子（ダスト）の生成は、気相からの核生成に始まる。気相からの均一核生成には大きな駆動力が必要なため、微粒子形成のカイネティクスは、バルクの平衡とはかけ離れていると考えられる。しかし、ダストと同様なナノメートルサイズの微粒子の凝縮プロセスは明らかになっておらず、現在のダスト凝縮モデルではバルクを基に議論されている。そこで我々は、ガス中蒸発法とフーリエ変換型赤外分光光度計を組み合わせ、ナノ粒子の均一核生成と、冷却過程における成長を赤外スペクトルで“その場”測定する手法（Free-flying In-situ infrared measurement of Nucleating nanoparticles Experimental system : FINE 法）を開発した^[1]。

本研究では、結晶質ケイ酸塩 ($\text{Mg}_{2-x}\text{Fe}_x\text{SiO}_4$) の凝縮プロセスを、FINE 法によって“その場”測定し、星周環境におけるケイ酸塩の形成メカニズムについて考察した。Mg、SiO 粉末を、酸素雰囲気下で 2300 K まで急激に加熱、蒸発させ、対流によって冷やされたガスから、ケイ酸塩ナノ粒子が生成した。FINE 法で測定した結果、核生成直後は結晶構造を持たない準安定構造をとり、冷却過程で結晶化が進行したことが分かった。また、その時の雰囲気ガス温度は、500 K かそれ以下であることが示唆された。これは、非晶質ケイ酸塩の結晶化温度である 1000 K^{[2],[3]} と比べ 500 K もの低温である。

星周環境におけるケイ酸塩の大半は非晶質であり、結晶質は 300 K 以下の色温度を持つダストシェルで急に観測される傾向がある^[4]。そのため、1000 K 以上の高温過程を伴う直接凝縮^[5] や、非晶質ケイ酸塩の結晶化^{[2],[3]} では説明できない。本研究において測定されたケイ酸塩の低温領域における結晶化は、星周環境での結晶質ケイ酸塩ダストの成因として、新たな可能性を示す。

本研究において明らかになった低温領域での結晶化現象は、(1) 液滴として核生成したことによる、結晶化の活性化エネルギー低下、(2) ナノ粒子特有の原子拡散係数の増大、(3) 低温領域における酸化反応に伴う潜熱の放出と、潜熱によるアニーリングという 3 つのシナリオによって説明されうる。発表では、実験物質、雰囲気ガス組成を変えた際の結果と合わせ、ケイ酸塩の核生成と結晶化の素過程について議論し、本研究で見られた低温結晶化が星周ケイ酸塩の形成において果たす役割を示す。

参考文献: [1] Ishizuka, S., et al., 2014, ApJ, submitted, [2] Hallenbeck, S. L., et al. 2000, ApJ, 535, 247, [3] Koike, C., et al. 2010, ApJ, 709, 983, [4] Waters, L. B. F. M., et al. 1996, A&A, 315, L361, [5] Tsuchiyama, A. 1998, Mineralogy journal, 20, 59

非晶質フォルステライトと水蒸気の反応による含水鉱物形成実験

○山本大貴¹、橘省吾¹¹北海道大学大学院理学院

原始太陽系円盤における水蒸気とケイ酸塩ダストとの気相固相反応によって形成されうる含水鉱物は地球などの内惑星領域への水の供給源であると考えられることができる。原始太陽系円盤で含水鉱物が安定となる温度条件(~225K)における結晶質フォルステライトやエンスタタイトと水蒸気との反応に注目したこれまでの速度論的考察によれば [1][2]、含水鉱物形成反応は非常に進行しにくい反応であり、円盤が存在する時間スケールで反応の十分な進行は期待されないとされてきた。しかしながら、これまで、円盤中に主に存在する非晶質ケイ酸塩からの含水鉱物形成に関しての研究は行われていない。さらに熱力学的計算から非晶質ケイ酸塩が結晶質ケイ酸塩より高温で準安定相として含水鉱物を形成する可能性がある[3]。

そのため、本研究では、非晶質フォルステライトと水蒸気との反応に着目して、含水鉱物が準安定または最安定相として形成されると考えられる温度・水蒸気圧条件で反応実験を行ってきた。分析は FT-IR、XRD、ラマン分光測定で存在相の同定を行った。その結果、円盤条件より高圧($P_{H_2O}=5\sim 50$ bar) ではあるが、結晶質フォルステライトと含水鉱物の相境界(含水鉱物最安定領域)より高温(~723K)で、非晶質フォルステライトと水蒸気との反応で含水鉱物が準安定相として形成されることが実験的に確かめられた。XRD, ラマン分光測定より含水鉱物相はサーペンティン、ブルーサイトであり、比較的短い時間スケール(623K で 48 時間程度)で最安定相の結晶質フォルステライトに変化していく様子が観察された。さらに、非晶質フォルステライトからの含水鉱物形成速度が結晶質フォルステライトと比較し、極めて速い可能性があることが確認された。これらの結果は原始太陽系円盤での非晶質フォルステライトからの含水鉱物形成の可能性を示唆するものである。

本講演ではこれらの実験結果を報告する他、現在進行中のより低水蒸気圧条件下での結果も合わせて、原始太陽系円盤での非晶質フォルステライトからの含水鉱物形成の可能性に関して議論を行う。

References

- [1] B. Fegley and R. G. Prinn (1989) in *The Formation and Evolution of Planetary Systems* (eds. H. Weaver and L. Danly) Cambridge Univ. Press, pp. 171-211. [2] N. Imae et al. (1999) *Proc. Japan Acad.*, 75, Ser.B, 229-234. [3] H. Nagahara and K. Ozawa (2011) *Lunar and Planet. Sci.* XXXXII, #2838.

タギシュレイク隕石中に見られるフランボイダル マグネタイトの形成過程

○木村勇氣¹、佐藤岳志²、中村智樹³、中村教博³、野澤純⁴、塚本勝男^{3,5}、山本和生⁶

¹北海道大学低温科学研究所、²日立ハイテクノロジーズ、³東北大学地学専攻、⁴東北大学金属材料研究所、⁵大阪大学、⁶ファインセラミックスセンター

Orgueil や Tagish Lake などの炭素質コンドライト中には、水質変成によって生成したと考えられるサブミクロンからマイクロメートルサイズのマグネタイトの多面体粒子が 10^3 - 10^4 個も凝集したフランボイドが見られる。その中でも、Tagish Lake 隕石中のフランボイドは特徴的で、直径 110-680 nm のマグネタイト粒子が三次元的に規則正しく並んだ、コロイド結晶と呼ばれる形態を取っているものがある[1]。それぞれのコロイド結晶を構成するマグネタイト粒子のサイズの一様性と形態の均一性は、それらの粒子が高過飽和な水溶液から一度の均質核生成イベントで作られたことを示している。また、フランボイダルマグネタイトごとの構成粒子は異なるサイズと形態を持っていることから、その高過飽和水溶液はそれぞれ独立に存在していたと考えられる。そこで、このマグネタイト粒子はどのようなメカニズムで凝集し、規則正しく並んだのかを明らかにすることを目的に、電子線ホログラフィーという手法を用いて個々の粒子の磁場構造をナノメートルの分解能で分析した結果を報告する。

マグネタイトは強い磁石としての性質を持っていることから、一見この磁石の引き付け合う力が粒子の凝集によるフランボイドの形成の原因であると考えてしまう。しかし、コロイド結晶は表面電荷による反発力で形成することが知られており、引力相互作用ではコロイド結晶を作ることはできない。例えばマグネタイトの場合には枝状に集まってしまふことが知られている[2]。そこで、このマグネタイト粒子を取り出し、ファインセラミックスセンターにある電子線ホログラフィー専用の透過電子顕微鏡を用いて磁場構造の可視化を試みた。その結果、マグネタイト粒子個々の残留磁化を 6 nm の分解能で調べることに成功し、マグネタイト粒子は渦状の磁力線をもち、磁場が粒子の外に漏れ出していないことを見出した[3]。コロイド結晶は反発力で並ぶため、その生成には閉じた空間が必要である。この渦状の磁区構造が磁石の引き付ける力を内部に閉じ込めると、水の蒸発とともに行き場を失った粒子が集まる際に、表面電荷によって作られるデバイ遮蔽領域により反発力を受けて規則正しく並んだと結論付けられる。下地があると、均質核生成よりも小さな過飽和環境下で、下地上に不均質核生成を引き起こすことから、マグネタイト粒子が生成した水溶液は微小重力環境にある小惑星内部の隙間に浮かんでいたと言える。また、コロイド結晶が形成する条件から、pH 7-12 と言われているこの時の水溶液が蒸発してなくなる直前には、 Ca^{2+} と Mg^{2+} が 10^{-14} - 10^{-15} mol m⁻² 水溶液中に含まれていたと考えられる。

[1] Nozawa, J. *et al.* Magnetite 3-D Colloidal Crystals Formed in the Early Solar System 4.6 Billion Years Ago, *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 8782-8785(2011).

[2] Philipse, A. P. & Maas, D. Magnetic colloids from magnetotactic bacteria: chain formation and colloidal stability. *Langmuir* **18**, 9977-9984 (2002).

[3] Kimura, Y. *et al.* Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid, *Nature Communications*, **4** (2013) 2649 doi: 10.1038/ncomms3649.

アエンデ隕石を用いた高温高压下における金属鉄—ケイ酸塩メルト間の炭素分配実験

○朝原友紀¹、大谷栄治¹

¹東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

炭素は地球、惑星、および小天体の重要な揮発性元素であり、また、地球核の軽元素候補のひとつである。核・マントルの炭素の存在度と元素循環を明らかにする上で、高压下における金属鉄メルトとケイ酸塩メルトの炭素の分配挙動を明らかにすることは非常に重要である。金属鉄メルト—ケイ酸塩メルト間の炭素分配研究は、DasGupta et al. 2013、Chi et al. 2014 などによって、5GPa・2373Kの温度圧力範囲まで調べられている。しかし、4GPa以上の圧力では、ケイ酸塩メルトがガラスとして急冷できずに、細かい急冷結晶の集まりとなる事で、炭素の分析が困難になる問題が指摘されている。本研究では、回収試料の全炭素量を質量分析計で測定することで、樹脂や研磨材によるコンタミネーションの問題を取り除くことを試みた。

2. 実験方法

出発物質として、炭素質コンドライト（Allende 隕石・CV3）を用い、高压下における炭素の分配実験を行った。高压発生には東北大学の3000ton マルチアンビル高压発生装置を用いた。6GPa、2073Kの圧力温度条件で、10、60、180minと保持時間を変化させて急冷回収実験を行った。試料カプセルにはグラファイトを用いた。実験回収試料を鏡面研磨し、SEM/EPMAによる化学分析と像解析を行った。金属メルトの炭素濃度はWDS—EPMAを用いて行った。ケイ酸塩メルト中の炭素濃度推定のため、6GPa、2073K、60minの実験を3set行った。実験終了後、カプセルから取り出した回収試料の表面をダイヤモンドやすりで削り、表面のグラファイトを取り除いた。ケイ酸塩メルト中にも急冷結晶としてグラファイトが晶出する可能性があるため、それ以上の前処理は行わなかった。そうして得た回収試料の全炭素量を、元素分析計を用いて測定した。

3. 結果と考察

回収試料中の全炭素濃度（約0.7wt.%）、急冷金属メルト中の炭素濃度（約0.3wt%）を用いて、マスバランスによって求めたケイ酸塩メルト中の炭素量は約0.4wt%となった。炭素分配係数は、ほぼ1となった。ただし、今回の方法によって求めたケイ酸塩中の炭素濃度は、DasGupta et al. 2013 などによって報告されている急冷ガラスの分析値よりかなり高い値を示しており、グラファイトカプセルからのコンタミネーションの影響などにより、シリケートメルト中の炭素量を過剰に評価している可能性がある。

CV コンドライト隕石の水質変成と熱変成

○小松睦美¹, 荒井朋子², 山本彩³, 三河内岳⁴, 中村智樹⁵, 廣井孝弘⁶, 北里宏平⁷

¹総研大, ²千葉工大, ³RESTEC, ⁴東大, ⁵東北大, ⁶ブラウン大, ⁷会津大

CV コンドライト隕石は、全岩の酸素同位体組成に幅広い特徴を持ち、母天体において様々な程度の2次変成が生じていたことが示唆されている。しかしながら、Allende 隕石が多く研究されているのみで、それ以外の CV コンドライト隕石の特徴は不明な点が多い。本研究では、Allende を含めた、複数の南極産 CV コンドライト隕石の鉱物学的特徴から水質変成及び熱変成の度合いを比較した。

Efremovka(CVred;還元的タイプ), Y-86009(CV), Y-86751(CV), A-881317(CV), A-880835(CV), Kaba(CvoxB;酸化了的 Bali タイプ), Allende (CVoxA; 酸化了的 Allende タイプ)、NWA1152(CV/CR)の比較を行った。これらの隕石の岩石学的・化学的特徴から、Efremovka, A-881317, A-880835 は水質変成・熱変成とも低い程度で、Y-86009, Y-86751, Kaba は主に水質変成を受けていることが分かる。Allende は、他の CV 隕石に比べて熱変成の度合いが高く、高温での熱変成(と脱水)を受けていることが分かる。Efremovka、Allende は大きなコンドリュール・CAI が多く存在するのに対し、主に水質変成を受けた隕石である Y-86009、Kaba はコンドリュールのサイズが相対的に小さく、matrix 量が多い。Y-86751 は、薄片が部分的に褐色に変化しており、地球風化の影響を受けている可能性が高い。

さらに、それぞれの隕石について拡散反射スペクトル分析を行った。紫外・可視・近赤外領域での拡散反射スペクトルは、Allende と、他の CV 隕石間に大きな差は見られない。A-881317 と Y-86751 には 1200-1700nm にかけて弱い吸収がみられ、地球風化の影響を受けていると考えられる。

IR 領域の反射スペクトルでは、水質変成を受けた隕石である Y-86009 に、Allende と同程度の 3 μ m 付近の弱い吸収が見られる。Y-86751 では、同じく 3 μ m 付近に大きな吸収が見られるが、岩石学的特徴と紫外・可視・近赤外の反射スペクトルを加味すると、地球風化によってできた含水鉱物等の影響が大きいと考えられる。

本研究で、南極産 CV コンドライト隕石の反射スペクトルは、地球風化に大きく影響されることが確認された。今後は、地球風化鉱物の影響を除去した分析を行うことで、CV コンドライト母天体での水質変成の度合いと反射スペクトルの関連性についてより詳細な議論を行う予定である。

CV3 炭素質コンドライト隕石母天体の集積時期と形成進化過程

○城後香里¹、中村智樹¹、伊藤元雄²、脇田茂³、Mikhail Zolotov⁴、Scott Messenger⁵

¹東北大学、²JAMSTEC 高知コア研究所、³国立天文台、⁴アリゾナ州立大学、⁵NASA ジョンソンスペースセンター

始原始的な CV3 炭素質コンドライト隕石（以下、CV3 隕石）は、隕石母天体内における水質変成で形成された二次鉱物を少量含む。水質変成とは母天体形成後、その天体内部で起こる最初の化学反応である。従って、二次鉱物は、始原天体の初期進化過程を知る上で重要な手掛かりとなる。二次鉱物の中でもファヤライト（鉄に富むオリビン）は、Mn-Cr 年代測定法に適しており、その鉄含有量（Fa#）は、ファヤライト形成温度・圧力条件を反映するという特徴を持つ（e.g., Hutcheon et al., 1998; Zolotov et al., 2006）。本研究では、ファヤライトに着目することで、CV3 隕石母天体の集積時期と初期進化過程に制約を与えた。

CV3 隕石厚片（Y86009、A881317、MET01074、MET00430）の鉱物・組織観察を行った結果、Y86009、A881317 は角礫岩であり、host matrix に多数の岩塊（直径 0.5-1mm 程度。コンドリュールとその周りを覆う細粒な物質で構成）を含むことが分かった。ファヤライトは、host matrix や岩塊に含まれており、コンドリュール内部や表面、マトリックス中に存在する。形状は粒状（5-50 μm ）や脈状（ $\sim 10 \times 50 \mu\text{m}$ ）で、主にマグネタイトやトロイライトと共存する。個々の岩塊ごとにファヤライトの Fa# は異なり（Fa# = 60-100）、それぞれ異なる形成温度・圧力条件で形成されたことが示唆された。二次イオン質量分析計を用いて、これらのファヤライトの Mn-Cr 年代測定を行った結果、現在から約 45.65-45.62 億年前に形成されたことが分かった。以上から、個々の岩塊中のファヤライトは、現在の CV3 隕石に取り込まれる前に、天体内の異なる場所で、異なる温度・圧力条件の水質変成により、約 45.65-45.62 億年前に形成されたことが分かった。

熱力学計算によるファヤライトの温度・圧力安定条件に基づくと、本研究で観察された Fa# < 96 のファヤライトを形成するためには、300 bar 以上の圧力、即ち半径 175 km 以上の CV3 隕石母天体が必要であることがわかった。また、ファヤライト形成年代から推定される水質変成の期間（約 45.65-45.62 億年前）と、ファヤライトを含む CV3 隕石の最高到達温度（約 400 度、Busemann et al., 2007）を仮定し、CV3 隕石母天体の熱進化モデル計算を行った結果、CV3 隕石母天体の集積年代は、現在から約 45.63 億年前であることを特定した。この集積時期は、CI、CM 隕石母天体の集積時期（e.g., Fujiya et al., 2012, 2013）と一致することから、原始太陽系星雲内の雪線付近では、始原天体が同時期に形成されていたことが示唆された。

C型小惑星を模擬した焼結ガラスビーズ試料への クレータ形成実験

○岡本千里¹, 池崎克俊², 今栄直也³, 矢野創⁴, 橋省吾⁵, 土山明⁶, 澤田弘崇⁴,
長谷川直⁴, 中村昭子¹, 富山隆将⁷

1 神戸大学, 2 大阪大学, 3 国立極地研究所, 4 宇宙航空研究開発機構, 5 北海道大学,
6 京都大学, 7 海洋研究開発機構

C型小惑星は、主に炭素質コンドライト類似物質から構成される始原的な天体である。有機物など生命の起源についての情報が得られる事が期待されるため、小惑星探査機によるC型小惑星からの表面物質のサンプリングが考案されている。例えば「はやぶさ2」計画では、C型小惑星1999JU3に弾丸を撃ち込み、クレータ放出物をサンプリングする予定である。また、炭素質コンドライトの放出過程や太陽系形成初期における天体同士の衝突進化を考える上で、C型小惑星のクレータ形成過程を明らかにすることは重要となる。炭素質コンドライトの強度は、S型小惑星など熱進化した岩石質天体由来と考えられる石質隕石と比較し脆弱であり、コンドリュールが豊富に含まれるなど、内部組成も異なる。このため、同等の衝突エネルギーでも衝突破壊の結果がS型小惑星とC型小惑星では異なることが予想される。しかし、C型小惑星の強度まで考慮したクレータ形成過程の解明はまだ十分なされていない。そこで、本研究では、C型小惑星のクレータ形成過程を明らかにするため、炭素質コンドライト隕石のコンドリュールとマトリクスを模擬した焼結ガラスビーズ試料を作製し、火薬銃を用いたC型小惑星模擬物質へのクレータ形成実験を実施した。

炭素質コンドライトは、主にコンドリュールとマトリクスと呼ばれる組織から成る。そこで実験では、隕石中のコンドリュールとマトリクスを模擬するため、2種類の異なるサイズのガラスビーズからなる焼結体を作成した。コンドライト隕石中で一般的に観察される平均的なコンドリュールのサイズ・含有量を模擬するためφ300ミクロンガラスビーズを模擬コンドリュールとして使用し、試料中にこのガラスビーズ含有量が20wt%、50wt%となるよう調整した。また、マトリクス部分にはφ20ミクロン以下のガラスビーズ（含有量80wt%、50wt%）を使用した。このガラスビーズ混合物を模擬コンドリュールが均一に混在するように混合したのち、温度610°C~635°Cで焼結させ、試料の引張強度が0.1MPa~2MPaとなるように試料を作製した。また、衝突実験におけるターゲットサイズによるクレータ形成への影響を調べるため、作製した模擬物質（直径φ10cm、高さ6cm）を引張強度を類似させた石膏により包埋することで、より大きな模擬物質（直径φ22cm、高さ12cm）を作製した。

これらの模擬試料を用い、JAXAに設置された火薬銃を用いてクレータ形成実験を実施した。実験で使用した弾丸として、直径8mm、質量5gのSUS製弾丸を用い、衝突速度100~250m/sの範囲で真空下（~10Pa）で衝突実験を実施した。実験後、形成したクレータ体積、破片放出速度を計測し、炭素質コンドライト模擬物質のクレータ形成過程を明らかにした。クレータ体積は、レーザー変位計を用い、3次的に計測された。また、破片速度は高速度ビデオカメラによるその場観測がなされた。同サイズの試料で比較した場合、強度が2MPaの試料では、0.1MPaの試料に比べ、クレータ体積が2倍程度大きくなるという結果が得られた。また、ターゲットサイズが異なる試料間では、同程度の試料強度におけるクレータ体積は、ターゲットサイズが小さい場合、大きい試料と比較して、およそ2倍程度大きいという結果となった。これは、小さな試料への衝突では、特に低強度の試料に関して、カタストロフィック破壊手前まで破壊されている試料が観察されたことと関係している。本研究により、小惑星表面での一枚岩へのクレータ形成過程および衝突体の~10倍程度のボルダーへの衝突破壊・クレータ形成過程を明らかにすることが可能となった。

模擬低重力下における砂標的への 低速度衝突クレーター形成実験

○木内真人¹, 中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

小天体表面における重力加速度は微小であり、表面の衝突クレーターサイズが重力スケールリングまたは強度スケールリングのいずれに従うのかわかっておらず、またこれまでに得られたスケールリング則が適用できるのかも未知である。クレーターサイズ頻度分布から天体表面の進化の過程を推定するためには、クレーター直径の重力依存性を理解することが重要である。しかし、重力がクレーター形成に与える影響はこれまで詳細には確かめられていない。Schmidt and Housen (1987) は模擬高重力下 (1~400 G) で高速度衝突実験を行った結果、クレーター直径 D と重力加速度 g について $D \propto g^{-0.17}$ という関係を得た。また、Gault and Wedekind (1977) は、模擬低重力下 (0.07~1G) で高速度衝突実験を行い、 $D \propto g^{-0.165}$ の関係を示した。一方、Takagi et al.(2007)では、重力加速度が 10^{-5} G 以下の環境で高速度衝突実験を行ったが、クレーター直径に重力加速度の影響は見られなかった。これらの先行研究の結果の違いの原因は、実験データが少ないこともありよくわかっておらず、詳しく理解するためにはさらなる実験が必要である。

そこで我々は、標的を定荷重ばねで吊るしながら落下させることで標的にかかる重力加速度を模擬的に小さくする装置を開発し、低速度での衝突実験を行った。本装置は、遠心加速器や落下塔など従来の実験装置と比べ、装置の規模が非常に小さくなっている (木内他、2013年日本惑星科学会秋季講演会)。標的にはシリカサンド (粒径~150 μm) とガラスビーズ (粒径~500 μm) を用い、直径 8 mm のステンレス球弾丸を衝突速度 1~4 ms^{-1} の範囲で衝突させた。また、実験は全て大気圧下で行った。結果、クレーター直径はシリカサンドでは重力加速度の -0.188 ± 0.008 乗に比例し、ガラスビーズでは 0.183 ± 0.007 乗に比例した。

各標的のべきの値はほぼ一致しており、重力依存性が一致しているといえる。今回得られた重力依存性は先行研究の高速度衝突における結果 (Gault and Wedekind, 1977; Schmidt and Housen, 1987) と調和的であった (図 1)。しかしクレーターサイズは、シリカサンド、ガラスビーズともに先行研究の結果から予想されるサイズ (図 1 の点線) よりも下回っていた。この原因として、大気圧の影響が考えられる。またもう 1 つの原因として、弾丸サイズに比べクレーターサイズが小さいため、点源近似が成り立たなくなり、スケールリング則から外れたことも考えられる。発表では先行研究との絶対値の不一致の原因について議論する。

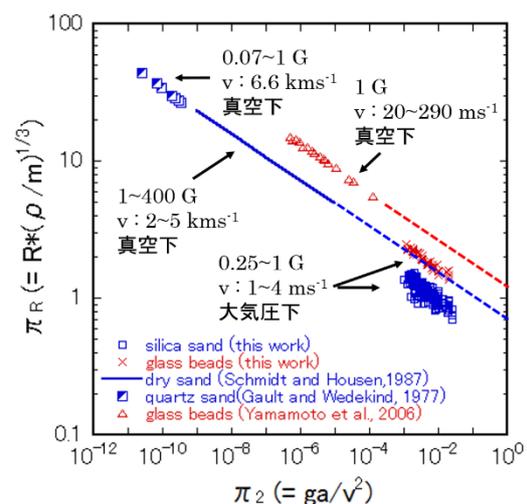


図 1 クレーターサイズの重力依存性
(g :重力加速度、 a :弾丸半径、 v :衝突速度、 R :クレーター半径、 ρ :標的密度、 m :弾丸質量)

高空隙率標的に形成される衝突キャビティに関するスケーリング則: 彗星表面への応用

○岡本 尚也¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所,

小天体表面に衝突体を作るクレーターの形状は、その天体の空隙率 ϕ や密度 ρ_t 、強度 Y_t 、そして衝突体の直径 d_p 、密度 ρ_p 、強度 Y_p 、衝突速度 v_0 によって変わることが考えられる。これまで30% $<\phi<$ 60%のターゲット(石膏、ガラスビーズ焼結体、雪)を用いた衝突実験が行われており、クレーターの深さ d や直径 D が調べられてきた。しかし、近年の観測により小天体は空隙率が非常に高く、特に彗星においては空隙率86%を持つものまで存在することが分かってきた(Consolmagno et al., 2008)。それら小天体の形成期における衝突進化を理解するためにはそれに見合う空隙率を持つターゲットを用いた実験が必要になる。我々は中空ガラスビーズを焼結させることで、これまでよりさらに高い空隙率(87%, 94%)を持つターゲットを作成し、高速衝突実験(1.8–7.2 km s⁻¹)を行ってきた(Okamoto et al., 2013)。弾丸破壊の程度が小さい場合、トラックの形状は細長い“ニンジン型”となる一方、破壊の程度が大きい場合は太短い“カブ型”となった。このカブ型のキャビティをクレーターとみなし、その最大径 D_{\max} を以下の強度支配域のクレータースケーリング則を用いて整理した。

$$\frac{D}{d_p} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{0.4} = H' \left(\frac{Y_t}{\rho_t v_0^2} \right)^{-\frac{\mu}{2}}$$

ここで、 H' 、 μ はスケーリング定数を表す。 D には D_{\max} を、 Y_t にはターゲットの圧縮強度 Y_{tc} を代入した。これにより最大径に関する半経験式を得た(Okamoto et al., 2014)。ここで、 $Y_{tc}/(\rho_t v_0^2)$ というスケーリングパラメーターを使っているが、これまでの実験条件ではこの値の範囲は1桁であった($\sim 10^{-4}$ – $\sim 10^{-3}$)。今回、焼結をコントロールすることでこれまでのターゲットよりもおよそ1桁小さな強度(~ 25 kPa)を持つ空隙率93%のターゲットを新たに作成して実験した。これによりスケーリングパラメーターの値はおよそ 3×10^{-6} にまで拡げることができた。全てのデータについて予備的解析を行い、上式の間係を仮定したところ、 μ 値は0.54となりこれまで我々が得ていた値よりも小さくなり、ターゲットが岩石の場合の μ 値、0.55 (Holsapple, 1993)とほぼ等しくなった。

得られたスケーリング則を、Deep Impact 探査機がTempel1 彗星へ衝突体を発射して形成したクレーター (DI クレーター)へ適用した。Stardust-NEXT の観測結果から、DI クレーターのクレーター直径は 200 ± 20 m (Schultz et al., 2013)、 49 ± 12 m (Richardson and Melosh, 2013)と示されている。直径が200mであった場合、この彗星表面の圧縮強度は数パスカル程度、一方、49mであった場合は数百パスカル程度であることが推定された。

氷地殻を模擬した氷・砂混合物に対する高速度クレーター形成実験

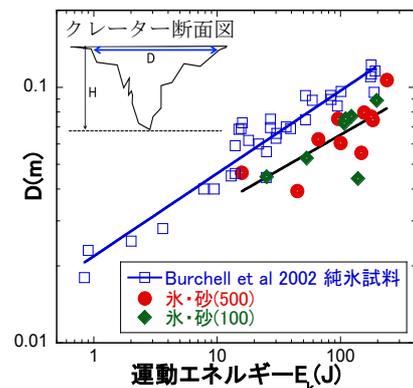
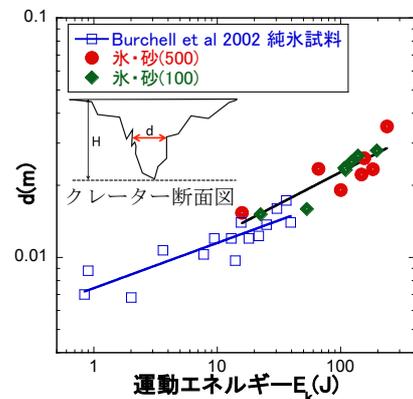
○高野翔太¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ²¹神戸大学大学院理学研究科, ²神戸大学自然科学系先端融合研究環

はじめに：小探査機 Dawn は 2015 年に小惑星ケレスに到達し、その氷地殻に形成した衝突クレーターを観測する予定である。この観測からクレーター形成時に衝突した小天体の種類、ケレス地殻の岩石含有率、そして内部構造などに関する情報を得ることが期待されている。このような調査を実現するには室内実験によって、氷・岩石粒子混合物、さらには内部構造を持つ表面に形成されるクレーターの特徴やその衝突物質の影響を明らかにする必要がある。一方、これまで純氷に対しては広い速度範囲で数種類の弾丸を用いてクレーター形成実験が行われているが、氷・岩石混合物に対しては限られた条件でしか実験が行われてきていない。特にケレスは小惑星帯に位置するので、 km/s 以上で衝突実験を行う必要がある。そこで本研究では 1km/s を超える速度領域で、密度の異なる数種類の弾丸を用いて氷・岩石混合試料へのクレーター形成実験を行い、クレーター形状やクレーター形成効率を純氷と比較した。

実験方法：実験は神戸大学の二段式水素ガス銃を用いて行った。ケレス氷地殻を模擬した氷・岩石混合試料は、粒径 $100\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$ の石英砂と水をそれぞれ質量比 80~83wt% になるように混ぜ、円筒金属容器を用いて、冷凍庫で凍らせて作製した。弾丸には、直径 2mm の 4 種類(アルミ, ジルコニア, チタン, ステンレス)の球を用いた。これらの弾丸を速度 $1.6\sim 5.7\text{km/s}$ で発射した。標的は、衝突直前にチャンバー内に設置し、圧力 $150\sim 230\text{Pa}$ の範囲内で真空引きを行い周囲と断熱する。クレーター形成過程はイメージコンバーターカメラで撮影し、衝突時のエジェクタ成長速度を調べ、純氷との比較を行った。実験後、試料に残されたクレーターの形状をノギスで計測した。

実験結果：形成されたクレーターは、衝突点付近に Pit と呼ばれる円錐型の衝突痕がみられ、その周りに Spall と呼ばれる、表面がはがれた領域がみられた。氷・石英砂混合試料では純氷試料と比べて Spallation が、どの弾丸・速度においても起きにくく、衝突エネルギーが同じ場合、Pit 直径 d は純氷試料の約 1.1 倍(右図上)、Spall 直径 D は約 0.7 倍(右図下)となることがわかった。また、Pit 深さ H は氷・石英砂混合試料では純氷の約 0.6 倍と系統的に浅くなることもわかった。また、クレーター直径は運動エネルギー E_k のべき乗で表され、Pit 直径は E_k の 0.27 ± 0.04 乗(純氷試料では 0.19 乗)、Spall 直径は E_k の 0.28 ± 0.07 乗(純氷試料では 0.32 乗)となった。深さ H と Pit 直径の比は、0.46 となり純氷試料の 0.55 より有意に小さくなった。一方、この深さ直径比の速度依存性・弾丸密度依存性はみられなかった。

イメージコンバーターカメラの撮影画像から、氷・石英砂混合試料では、エジェクタカーテンの外縁部はお椀のような形状となり、純氷の場合の逆円錐形とはかなり異なることがわかった。このクレーター掘削のメカニズムの違いを知るため、エジェクタ放出が起こる先端部が広がる速度からクレーター成長速度を調べた。



粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 II

○松榮 一真¹, 荒川 政彦¹, 保井 みなみ², 松本 恵里¹, 辻堂 さやか¹

高野 翔太¹, 小林 直樹³, 長谷川 直³

¹神戸大学大学院理学研究科, ²神戸大学自然科学系先端融合研究環, ³宇宙科学研究所

はじめに: 小惑星の表面はボルダーなどで構成されたレゴリス層で覆われていることが探査により明らかになってきた。このレゴリス層で覆われた小惑星の表層地形は、天体衝突の様な外因により変化すると考えられている。例えば、小惑星エロスに小さなクレーターが少ない理由は、天体衝突による衝撃がエロス全体を揺さぶり、その結果クレーター孔を支えるレゴリス層の構造が崩れるからだと考えられている(Richardson et al.2005)。このように天体衝突によって発生する振動は小惑星の表層地形進化を支配しているが、衝突励起振動に着目した実験的研究は少ない。McGarr et al.1969 では、月震計で得られた小天体衝突時の地震波形を解析するため、月表層を模擬した試料への衝突実験を行って衝突励起振動を実測した。最近では我々が Matsumoto and Yasui 2014 において 100m/s までの低速度衝突実験を行い、ガラスビーズ(バルク密度は 1.51g/cm³, 安息角は 22°)中を伝播する衝突励起振動の減衰過程を調べた。本研究では、より現実的にレゴリス層を模擬するため石英砂を標的試料として用い、衝突速度も小惑星帯での平均衝突速度(5km/s)まで広げて衝突励起振動の計測を行った。

実験方法: 衝突実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いた。弾丸には、直径 4.7mm のポリカーボネート球を用い、0.2-5km/s の速度まで加速した。標的試料には直径 500 μm (バルク密度は 1.48g/cm³, 安息角は 32°) の石英砂を用いた。標的表面に加速度計(日本アビオニクス製 SV1113;電荷感度 5.47pC/sm⁻², 応答周波数:0.5Hz-10kHz)を、衝突点からの位置を変化させて 2.5cm 埋めて設置した。加速度計の信号はチャージアンプを通した後、A/D 変換速度 100kHz のデータロガーで記録した。なおチャンバー内は 1000Pa から 10Pa で真空引きしている。

実験結果: 図 1 は、5km/s で衝突させたときの衝突振動波形である。単一のピークを示す単発波形で、立ち上がり時間は約 0.5ms であった。加速度計の設置点が衝突点から遠くなると共に最大加速度が小さくなることから、衝突振動の距離減衰を調べることができる。クレーター半径 R で規格化した衝突振動の伝播距離と最大加速度の関係(図 2)から衝突振動の減衰率を調べた結果、衝突速度により変化する事が分かった。本研究の結果、減衰率は -3.1 ± 0.2 (0.2-2km/s)、 -2.78 ± 0.5 (3-5km/s) となった。さらに、衝突速度が大きくなると加速度の絶対値が大きくなることもわかった。一方、ガラスビーズ標的における衝突振動の減衰率は -2.4 (Matsumoto and Yasui 2014) であり、減衰率は標的物質によって変化することが示唆される。また、衝突振動波形のピーク値の時間差を計測することで標的物質中を伝播する振動の速度を計測した。本研究では、衝突速度によらず約 85m/s となり、ガラスビーズについて計測された伝播速度、約 120m/s より遅いことがわかった。今回の結果を用いて、小惑星上の天体衝突により励起された振動でレゴリス層が流動化し、地形が変化する範囲を推定することができる。我々の今後の目標は、このような実験と議論を通してレゴリス層で覆われた小惑星表面地形の衝突進化を明らかにすることである。

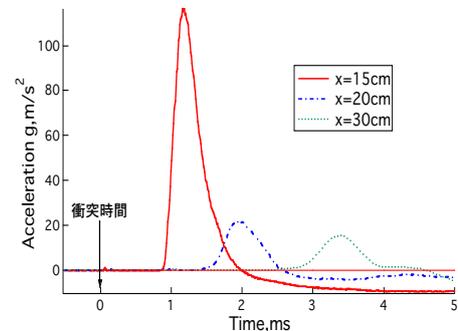


図 1. 観測された衝突振動波形

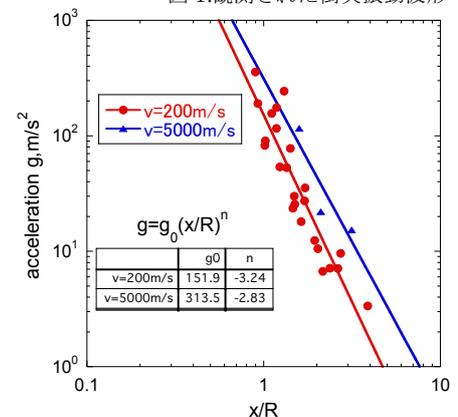


図 2. 衝突振動の距離減衰

粒子径分布と形状がレゴリス層の空隙率に及ぼす影響についての実験的研究

Experimental study of the effect of particle shape and size distribution on porosity of regolith

○大村知美¹、木内真人¹、Guettler Carsten²、中村昭子¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

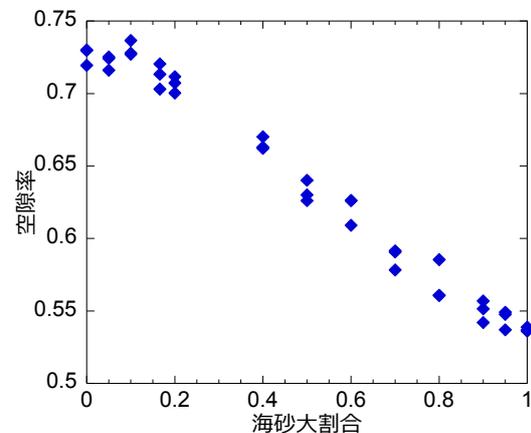
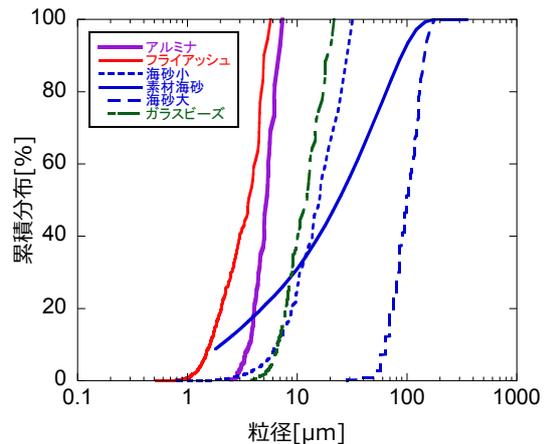
小天体表面にあるレゴリス層の空隙率はその反射率や熱慣性、クレーター形成過程に影響を与える。小天体表面のレゴリス層を構成する粒子サイズは様々で、その粒子径は均一ではない。例えば直接測定された月レゴリスの粒子径は0.01-10mm程度で、その粒子形状は球形のものから角ばったものまで様々である(Mitchell et al., 1974)。粒子径分布幅、粒子形状がどのように空隙率に影響するかを知ることは小惑星表面の空隙率を推定する際の一つの手がかりとなる。

本研究では粒子径、粒径分布幅、粒子形状、組成の異なる粉体として3種類の海砂、フライアッシュ、ガラスビーズ、溶融アルミナを用いた。試料の粒子径分布を図に示す。それらを1G下で容器にふるい入れて作成した

模擬レゴリス層の空隙率を測定した。それらに遠心加速装置を用いて1-18Gの範囲で模擬重力を加えた際の空隙率の変化を調べた。

粒子径が同じくらいで形状が異なる場合、角ばっている粒子は丸い粒子に比べ空隙率が大きくなった。重力を加えると模擬レゴリス層の空隙率は小さくなったが、その変化の様子は試料によって異なった。

また、海砂については粒径分布幅の異なる2種類の試料を割合を変えて混合した実験も行った。大小の粒子を混ぜ合わせる、すなわち粒径分布幅が広がると大粒子の作る空隙に小粒子が入り込むことで空隙率が最小となる点があるとされている(鈴木他、1985)。しかし今回の実験ではそのような傾向は見られず、片方の粒子が体積で全体の9割以上を占める場合を除き、図に示すように、混合後の試料の空隙率は混合割合に対しほぼ線形に変化した。



低密度天体への脆性衝突体の挙動に関する実験的研究

○原田竣也¹, 中村昭子¹, 岡本尚也¹, 鈴木絢子², 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

空隙を持つ小天体が太陽系に存在している(Consolmagno et al., 2008)ことや、惑星形成の元となる微惑星が高い空隙率を持っていた(Kataoka et al., 2013)と考えられていることから、惑星科学において空隙を持つ天体への衝突過程を理解することは重要である。一方、これまで多くの衝突実験が行われ、その解析を通して衝突過程に関する議論はなされてきたが、空隙を持つ物質の衝突過程の理解は十分ではない。今回は空隙を持つ天体表面を模擬した物質を用意し、そこへ空隙を持つ脆性な弾丸を衝突させた際の弾丸の貫入や破壊といった現象に着目する。

実験にあたり、標的には中空ガラスビーズ焼結体や石膏を用いた。焼結体は焼結時間を変え、また石膏は焼石膏と水の比率を調整してその空隙率や強度を変化させた。空隙率は焼結体が 74-94%, 石膏が 50-73%である。脆性な弾丸としては多孔質アルミナ球とガラスビーズ焼結体を使用した。衝突には神戸大学の小型ガス銃と縦型火薬銃、宇宙科学研究所の二段式ガス銃を用い、衝突速度約 35 m/s から 5 km/s の間で実験を行った。

弾丸が標的に衝突した際、弾丸は標的内に貫入したが、低速度の場合は弾丸が標的から反発することがあった。また、弾丸は破壊される場合とそのまま生き残る場合が観察された。弾丸の貫入深さは貫入モデル(Kadono and Fujiwara, 2005; Okamoto et al., 2013)を用いることで説明でき、弾丸の密度によらずモデルが適用できることがわかった。

弾丸を回収し、その最大破片質量と衝突時の発生圧力との関係を調べた。これまでの研究結果では、弾丸の引張強度の 10 倍程度の初期発生圧力で弾丸が壊れ始める(Okamoto et al., 2013; Nagaoka et al., 2014)ことがわかっていたが、

今回の実験結果からも同様の傾向が見られた。

ただし、標的に空隙がある場合はより大きな発生圧力が破壊に必要な場合が見られる。

このことから、空隙を含む標的の場合の初期発生圧力の見積もりの見直しや、標的空隙率の考慮などが必要だと考えられる。

また、空隙を持つ弾丸は衝突時に圧密され、大きな発生圧力でも

最大破片質量が大き

くなることがあった。

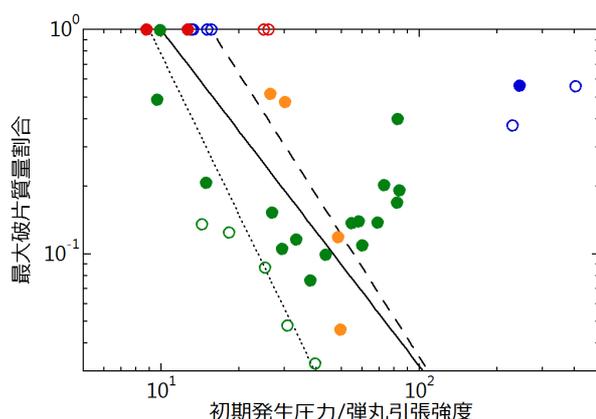
● 多孔質アルミナ球-焼結体78%

○ 多孔質アルミナ球-焼結体74%

● 多孔質アルミナ球-石膏70%

● 多孔質アルミナ球(大)-石膏70%

○ 多孔質アルミナ球-石膏50%



● 多孔質アルミナ球-アルミニウム

○ 多孔質アルミナ球-ナイロン

--- パイロフィライト-砂 (Nagaoka et al., 2014)

..... 玄武岩-砂 (Nagaoka et al., 2014)

— 金属, 玄武岩-焼結体94, 87% (Okamoto et al., 2013)

イジェクタ構成粒子の空間密度分布および光散乱特性が イジェクタカーテンの輝度分布に与える影響

Shalima Puthiyaveetil¹, ○和田浩二², 木村宏³

¹Indian Institute of Astrophysics, ²千葉工業大学惑星探査研究センター, ³神戸大学/惑星科学研究センター

天体衝突時に放出されるイジェクタと呼ばれる掘削物とその集合体の形状や物性は、天体内部の構造や物性を反映するものであり、天体の形成進化過程を解明するうえで重要な要素である。近年では実験室のみならず惑星探査においても能動的な宇宙衝突実験が行われつつあり、その衝突実験の際に発生するイジェクタカーテンの観測とそこから引き出される諸性質を検討する必要性が高まっている。本研究では、イジェクタカーテンにおける光散乱をモンテカルロ法で計算し、その散乱強度におけるイジェクタのパラメーター依存性を議論した。

具体的な設定として、1AUに位置する小惑星において高さ10mの典型的な衝突イジェクタ（頂角 90° 、厚さ0.1mの逆円錐形カーテン）の発生を考え、太陽光を模擬した平行光で照らされた状態を1km遠方から観測することとした。本研究におけるパラメーターは、イジェクタカーテンの方向、イジェクタカーテンの光学的厚さ（粒子数密度・粒径が縮退した物理量）、粒子の散乱位相関数である。とくに散乱位相関数は、等方的、彗星塵的、Henye Greenstein関数、の3通りで与えその違いを見る。

結果として以下の各項目が得られつつある：（1）イジェクタカーテンの方向によって観測イメージが大きく異なる。このことは観測イメージからイジェクタカーテンの方向を推定することが可能であることを示唆する。（2）光学的厚さが小さい場合には、イジェクタカーテンの内壁の散乱光が透過して観測される。カーテン内壁は、天体内部由来のイジェクタ粒子から構成されると考えられるため、内壁散乱光の情報から天体内部物性についての情報を引き出すことができると期待される。（3）用いた散乱位相関数の違いによって、散乱強度に有意な差がみられる。したがって、モデル計算と観測を組み合わせることで、粒子の位相関数を特定し粒子物性を特定することが可能であることが示唆される。

今後も引き続きモデルの詳細化およびパラメータスタディを行うとともに、実験室におけるイジェクタカーテン観測とも組み合わせてモデルの検証を行うことを検討している。

高速度域におけるクレーターエジェクタ速度の スケール則に関する実験的研究

○辻堂さやか¹, 保井みなみ¹, 荒川政彦¹, 松榮一真¹, 高野翔太¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

はじめに：太陽系の多くの天体表面には衝突クレーターが観察されており、衝突クレーター形成は太陽系の形成、進化の過程において普遍的な現象であると言える。そして、衝突クレーター形成に伴うエジェクタの速度分布に対する理解は、天体表層の衝突進化について議論する上で不可欠であり、これらの研究を行う上では衝突クレーターに関するスケール則が重要となる。例えば、エジェクタ速度分布のスケール則を利用することで、クレーター周りのエジェクタ堆積物の分布を定量的に決定することや (Housen et al., 1983)、衝突の際に天体から脱出するエジェクタの量を決定することが可能となる (Yamamoto and Mukai, 1998)。Housen and Holsapple, 2011 は、点源近似を仮定して次元解析により次のようなエジェクタ速度のスケール則を提案した。 $v_0/(gR)^{1/2} = a(x_0/R)^{-1/\mu} \dots (1)$: μ と a は衝突実験によって決定する定数, v_0 は放出速度, g は重力加速度, R はクレーター半径, x_0 は初期位置である。これまでも様々な衝突クレーター形成実験により、このスケール則が検証されて来たが、個々のエジェクタ粒子の観測によって速度分布を調べた研究はまだ十分であるとは言えず、さらに衝突速度 v_i を広範囲で変えた実験は行われていない。そこで、本研究では高速カメラの映像から個々の粒子の運動を解析してエジェクタ速度分布を求め、スケール則を検証することを目的とした。特に、衝突速度を 1.6-5.2km/s の範囲で系統的に変化させ、以前同様の方法で行った低速度域 ($v_i < 200\text{m/s}$) における実験結果と比較することで、エジェクタ速度分布の衝突速度依存性について調べた。

実験・解析方法：標的粒子には、石英砂 (直径 $500\mu\text{m}$, 密度 $\rho_t 1.47\text{g/cm}^3$) を、弾丸にはポリカーボネイト球 (半径 $r_p 2.35\text{mm}$, 密度 $\rho_p 1.2\text{g/cm}^3$, 質量 $m 68\text{mg}$) を用いた。標的を設置する真空チャンバー内の圧力は約 7Pa とし、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃により、弾丸を衝突速度 1.6 - 5.2km/s まで加速した。衝突クレーター形成の様子を 3 台の高速ビデオカメラを用いて撮影した。撮影速度は 600 コマ/秒, 2000 コマ/秒, 20000 コマ/秒とし、それぞれ、エジェクタカーテン成長の全体を把握すること、加速ガスの影響を受ける直前までの個々のエジェクタ粒子を観察すること、初期速度の大きいエジェクタ粒子を観察することを目的とした。取得した画像データから、エジェクタ粒子が加速ガスの影響を受けて軌道が乱れ始める前の段階の 40 個以上の粒子の軌跡を追い、個々の粒子が弾道軌道を描いていると仮定して、それぞれの粒子の放出位置と放出速度、放出角度を求めた。

結果：衝突後のクレーターサイズ (R) を計測することにより、規格化クレーターサイズ ($\pi_R = R(\rho_t/m)^{1/3}$) と規格化重力 ($\pi_2 = gr_p/v_i^2$) の関係を調べ $\pi_R = 0.90\pi_2^{-0.15}$ となることが分かった。エジェクタ速度分布については、エジェクタ粒子に加速ガスの影響がはじまる前まで (衝突後約 15ms) を測定したため、低速度で放出された粒子は計測不能であった。また、エジェクタカーテン角度は $45^\circ - 50^\circ$ であったが、加速ガスによりカーテンの形状が乱されてしまうため、初期の段階でしか計測できなかった。それぞれのショットについて、おおよそ $0.05R - 0.6R$ の範囲でのエジェクタ速度分布を求めることができた。全ての実験で $x_0 = 4r_p$ を境に速度分布に傾きの違いが見られ、 $x_0 < 4r_p$ の範囲ではデータがばらつき傾きは測定不能であった。これは $x_0 < 4r_p$ では衝突点に近すぎるために、点源近似が成り立たない可能性を示唆する。一方、 $x_0 > 4r_p$ の範囲では衝突速度によらず全ての実験結果がほぼ一致し、その傾きは -2.8 ± 0.5 となった。最高速度の $v_i = 5.2\text{km/s}$ の実験では、エジェクタ速度分布のスケール則の定数は $\mu = 0.34$, $a = 0.51$ となり、これらの定数に衝突速度依存性は見られなかった。エジェクタ粒子の放出角度は衝突点からの距離にかかわらず $35^\circ - 45^\circ$ とほぼ一定となり、衝突速度依存性も見られなかった。

今回のポリカーボネイト弾丸を用いた高速度域での実験結果と、ナイロン弾丸 (密度 1.1g/cm^3) を用いた $< 200\text{m/s}$ の低速度衝突の実験結果と比較すると、式 (1) の速度分布、放出角度共にほとんど一致した。これは、同密度程度の弾丸を用いた実験では、エジェクタの速度分布、放出角度は衝突速度によらないということを意味する。さらに、これらの結果は Z モデル (Maxwell, 1977) から求まる μ と放出角度の関係と一致する。

衝突破片形状の実験的研究と小惑星イトカワの岩塊の形状

○道上達広¹、吉田明史¹、門川隆進¹、島田玲²、土山明³、長谷川直⁴

¹近畿大学工学部、²大阪大学理学研究科、³京都大学理学研究科、⁴ISAS/JAXA

室内実験において、衝突破壊における破片の形状の分布は、実験条件に依らず、特徴的かつ普遍的な分布になっていることが知られている。それは破片の長軸 a : 中間軸 b : 短軸 c の比が、分布に拡がりはあるものの、平均で $2:\sqrt{2}:1$ になっていることである。すなわち平均で b/a が 0.7、 c/a が 0.5 程度になっている[1]。しかしながら、この破片形状は、衝突エネルギー密度 Q が 4000J/kg 以上と大きく、激しいカタストロフィック破壊によって得られたデータであった（ここで Q は 標的が単位質量あたりに受ける弾丸の運動エネルギーで、弾丸の運動エネルギー÷標的の質量 で定義される）。最近の研究では、クレーター形成 (Q が 200J/kg 以下) における c/a の平均値は 0.3 程度とカタストロフィック破壊の c/a の平均値 0.5 より小さい値をとることが確認されているが[2]、なぜこのような小さい値をとるのかよく分かっていない。また、過去の研究において、クレーター形成からカタストロフィック破壊まで、破壊によって飛び出した岩石の破片の形状を系統的に調べた実験的研究はない。そこで、本研究では、衝突エネルギー密度 Q を 200J/kg (クレーター形成) から 15000J/kg (カタストロフィック破壊) の広い範囲で衝突実験を行い、玄武岩の衝突破片形状の変化を調べることを目的とした。

今回行った実験の概要は、前回の秋季講演会で発表した概要と同じであるが[3]、今回は追加実験として次のような特徴がある。(1) 標的の形状を前回の立方体だけでなく、球、直方体、平板についても行った。(2) 衝突エネルギー Q の上限を前回の 8500J/kg から 15000J/kg にした。(3) 飛び出した破片がチャンバーにぶつかり 2 次破壊が起こらないように工夫した。

得られた結果は、破片形状の軸比の b/a の平均値は破壊の程度に依らず、ほぼ 0.7 で一定の値をとるのに対して、 c/a の平均値はクレーター形成 (Q →小) に近づくほど、値が小さくなっていることが今回の実験で初めて分かった。この実験結果を小惑星イトカワに応用することを考える。小惑星探査機はやぶさのホームポジションにおける画像データから、小惑星イトカワの大きなボルダー 21 個の見かけ上の 3 軸比を測定した。その結果、 c/a の平均値は 0.46 であった。小惑星イトカワの母天体を一枚岩と仮定すると、衝突破壊によって、母天体の数%の質量を持った最大破片が誕生したことが予想される。つまり、小惑星イトカワの母天体は、かなりの激しい破壊を受けた可能性がある。イトカワ微粒子の化学組成の分析結果からイトカワの母天体は 20km とも考えられているので[4]、今回のボルダーの軸比から予想される結果はそれを支持する結果となった。

参考文献 [1]Fujiwara., et al. (1978) Nature 272, 602-603. [2] 島田玲 2013 年度修士論文 大阪大学大学院理学研究科宇宙科学専攻 [3] 道上達広 他 2014 年日本惑星科学秋季講演会予稿集 08-08 [4] Nakamura, et al. (2011)Science 333, 1113-1116.

ラブルパイル小衛星の衝突破壊による 土星 F リングの形成

○兵頭龍樹, 大槻圭史

神戸大学理学研究科

土星の F リングは土星のロッシュ半径のすぐ外側に位置する非常に細いリングである。また、その両側には羊飼衛星を従えているが、その起源は未だ不明である。また、F リングは太陽系において現在でも日単位で、その形状進化・ダイナミカルな変化が起こっている唯一のものである。それゆえに、現在進行形の探査機カッシーニの観測データの解析と共に、その起源・進化を理論的に明らかにする事は、惑星形成過程の詳細を明らかにする手がかりになるため非常に重要となる。

近年、土星の順行内側衛星は、ロッシュ半径内に存在する粒子円盤が拡散進化した結果、形成されることが明らかにされた (Crida & Charnoz 2013, Hyodo et al. 2014 in prep)。しかし、ロッシュ半径のすぐ外側の潮汐力が非常に強く働く領域では、円盤の拡散進化で形成されたラブルパイル小衛星の衝突合体の効率は 100%ではなく、破壊も起こりえる事が明らかになった (Karjalainen 2007, Hyodo & Ohtsuki 2014)。

本研究は、局所 N 体計算を用いて、現在の F リングが存在する領域におけるラブルパイル小衛星の衝突破壊過程の詳細を調べる事で、F リングのように細いリングとその両側に衛星が存在する系が形成されうることを明らかにした。

あかり衛星によるケンタウルス天体と TNOs の 低温熱放射観測

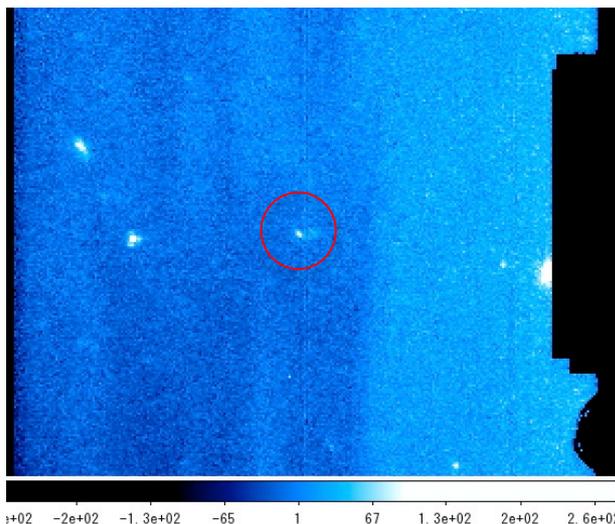
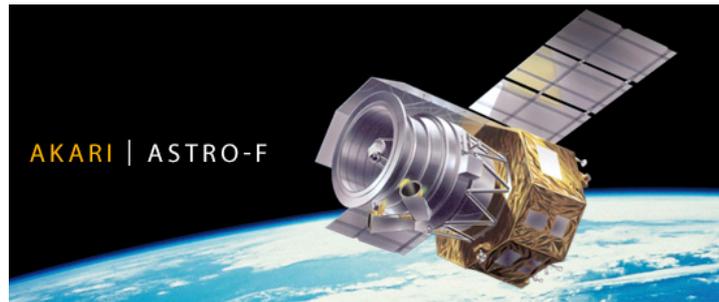
○関口朋彦¹, 大坪貴文², 長谷川直³, 臼井文彦³, Thomas Müller⁴

¹北海道教育大学 旭川校, ²東京大学, ³宇宙科学研究所/JAXA,

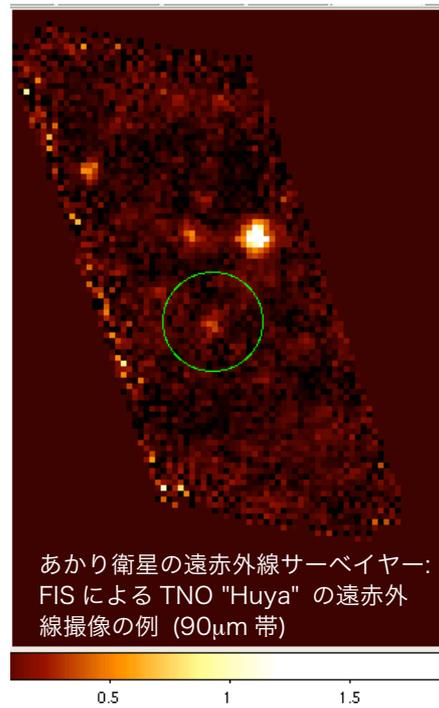
⁴Max-Planck-Institut für Eisenforschung

赤外線衛星あかり (ASTRO-F) は宇宙科学研究所が 2006 年に打ち上げた太陽同期極軌道 (高度 750km) を取る有効口径 68.5cm の天文観測衛星で 2006 年に打ち上げられ, 2011 年に運用を終了した。

我々は太陽系の微惑星の候補天体とも言える太陽系外縁天体の TNOs とケンタウルス天体に対してポインティング観測モードによる測光観測を遂行した。日心距離が大きくその表面温度に低い (~50K 程度) TNOs に対しては遠赤外線サーベイヤー (FIS) を用いて波長 90 μm と一部 60 μm での遠赤外線測光を行い、日心距離が 15au 以内でその表面温度が中程度の低温 (~100K 程度) であるケンタウルス天体に対しては FIS による遠赤外線観測に加え、近・中間赤外線カメラ (IRC) を用いて波長 15 μm 及び 24 μm での中間赤外線測光観測を行った。これに際し現在、アメリカのスピッツァー宇宙望遠鏡 (SST) とヨーロッパのハーシェル宇宙望遠鏡による観測結果と我々のあかりによる観測結果を統合することによって、新たにサイズとアルベドの再評価を行っており、ここに報告する。



あかり衛星の近・中間赤外線カメラ: IRC によるケンタウルス天体 "Asbolus" の中間赤外線撮像の例 (15 μm 帯)



あかり衛星の遠赤外線サーベイヤー: FIS による TNO "Huya" の遠赤外線撮像の例 (90 μm 帯)

小惑星(704) Interamnia の立体形状

○ 佐藤勲

小惑星(704) Interamniaは、メインベルトで6番目に大きな小惑星である。1996年12月17日にアメリカの13ヶ所、2003年3月23日に日本とハワイの50ヶ所で恒星の掩蔽が観測され、その断面形状が得られた。また、ローウェル天文台や浜野和天文台などで測光観測が行われ、対恒星自転周期が8時間43分44.2818±0.0003秒と求められた。これらの観測結果を解析した結果、自転軸の方向は黄経 $259 \pm 8^\circ$ 、黄緯 $-50 \pm 5^\circ$ の逆行自転、3軸の長さが $(361.8 \pm 2.8\text{km}) \times (324.4 \pm 5.0\text{km}) \times (297.3 \pm 3.5\text{km})$ の楕円体であることがわかった。これから、平均密度は、 $3.8 \pm 1.0\text{g/cm}^3$ と求められた。

詳しくは、IIAJ 2014 (4), pp. 91-118 を参照されたい。

チェリャビンスク火球からの光放射

○柳澤正久¹

¹電気通信大学・情報理工学研究科

チェリャビンスク火球は多くのモニタ・カメラによって撮影され、その動画がインターネット上に公開されている。我々はその中の一つを解析し光度の時間変化を調べた[1, 2]。その結果、(1)放射は 3500 K の黒体放射で近似できること、(2)光度の最大値は 1.0×10^{15} W であったこと、(3)放射には 120 km^2 の黒体表面が必要なこと等が分かった。その後の解析でこれらの値は若干修正されたが、広い面積が放射にかかわっていたという結論は変わっていない。



図 1. 光度最大時の火球。火球は左上から右下に進んでいる。チェリャビンスク市の北北東 140 km のカメンスク・ウラリスキー市から車載カメラで撮影(Aleksandr Ivanov 氏)。フレームの一部をトリミングした。火球中心が細長く暗く写っていることに注目。

解析に用いた動画を詳細に調べると、火球の中心付近に細長い暗い部分が存在する(図 1)。長さは約 9 km、幅は約 1 km である。過度に明るい部分が逆に暗く写る現象は、CMOS や

CCD を画像センサとしたカメラではよくある現象のようである。そこで CMOS カメラの一つで太陽を写してみた(図 2)。薄雲のかかった青空に太陽が暗く写っている。

火球動画の暗い部分は、極めて明るい火球本体である可能性が高い。光は、点ではなく細長い光源から放射されたと近似した方がよさそうである。



図 2. moticam1000 カメラ(ホーザン株式会社)に焦点距離 25 mm レンズ(絞り 16)と ND8 フィルタを取り付けて写した太陽。

参考文献

- [1] 柳澤, チェリャビンスク火球の光度曲線, 惑星科学会予稿集 2013 秋(石垣島), O10-07
- [2] 柳澤, チェリャビンスク火球の明るさと色の時間変化, 遊星人, 23, 82-91, 2014.

大気中形成の炭素含有粒子の特徴：大気中ダスト、ロシア落下隕石と月隕石

Characteristics of carbon-bearing grains formed in air: Air dusts, Russian meteorite and lunar meteorites

三浦保範（山口市；山口大学）

1. はじめに：

炭素含有物質粒子は、物質状態変化時に固化して残存するので、炭素起源と変化過程について特に人工起源炭素含有組織や天然風化炭素含有組織などが区別できる。今回は、地球に衝突時に大気中で急冷固化した炭素含有組織を単に小惑星起源でなく地球の大気中で（地上元素等混入無しで）再固化した事をこれまで収集した分析 FESEM データベースから考察する。

2. 地球上大気で再固化した隕石燃焼物：

隕石の炭素について、今回は日本の仁保隕石（大気中爆発落下物採集破片）と最近のチェリャビンス Chelyabinsk ロシア隕石（落下採集破片）の分析 FESEM などの解析から、状態変化後残存した炭素含有組織（と炭素濃縮）と含有元素（主要）の特徴があることが分かった。

3. 地球外炭素の地球ダイヤモンド炭素起源の供給：

この手法は、月や火星隕石の形成過程における炭素含有物の対比推定と、地球上の炭素などの軽元素（ダイヤモンド炭素含む）の供給過程について、炭素含有物が再固化前後に存在していることを確認することで、新しく炭素源についての時空情報から展開できる事を示す。

4. まとめ：

炭素含有物質粒子は物質状態変化時に固化前後に残存するので、炭素起源と変化過程について解明できる。地球に衝突時に大気中の隕石シャワーで急冷固化した炭素含有組織と炭素濃縮は、地球の大気中で地球混入なしで再固化変動した事がナノ FESEM 分析から得られた。地球の炭素源を地上で行われている事を新たに示す新成果である (Miura, 2007, 2012, 2014)。

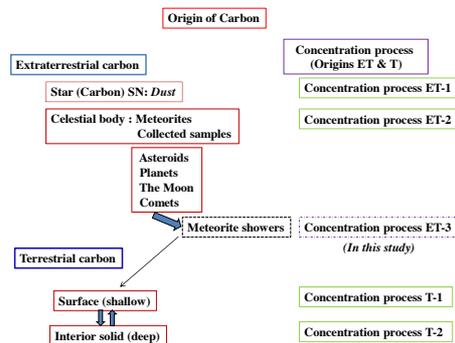


Fig. 1. New origin of carbon concentration from meteorite-shower above the terrestrial solid surface.

謝辞：チェリャビンスロシア隕石ご提供で高橋典嗣（日本スペース協会）と田野崎隆雄（工学院大）各氏に感謝します。

引用文献：Miura Y. (2007): Front. Mineral Sci. 2007 (Univ. Cambridge), 223. Miura Y. (2012): LPSC 43rd (LPI)#1203.

Miura Y. (2012): 日本惑星科学会講演要旨集（神戸大）.pp.1. Miura Y. (2014): (Submitted; accepted).

IKAROS-ALADDIN が発見した
地球周太陽ダストリング中の大型宇宙塵の粗密分布
Flux Anisotropy of Large Dust Particles
within the Circumsolar Dust Ring of Earth Discovered by
the IKAROS-ALADDIN

○ 平井隆之¹, 矢野創¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

いくつかの太陽系惑星の公転軌道上には、惑星とダストの平均運動共鳴に起因する周太陽ダストリングの存在が確認されており、その内部にはダストの凝集領域と減衰領域があることが示唆されている。このようなダストリングは太陽系外の惑星系にも存在すると考えられ、その形成機構を解明することは、惑星系ダスト円盤一般の進化過程を理解することにも貢献する。また、面光源としてダスト円盤を解像できれば、直接撮像が難しい惑星の物理特性を制約することも可能になると考えられる。

本講演では、JAXA のソーラー電力セイル小型実証機「IKAROS (イカロス)」に搭載されたダストその場計測器「ALADDIN (アラジン)」による、地球の周太陽ダスト凝集領域と減衰領域のその場計測結果を報告する。また、観測結果を整合的に解釈するために開発しつつある、新しいダスト分布モデルの試計算結果も紹介する。

ALADDIN のダストフラックス観測および過去のその場計測の結果から、地球周囲の減衰領域と公転運動の背後に位置する Trailing 領域では約 10 倍の数密度差があることがわかった。我々はこの観測結果を説明するため、平均運動共鳴を考慮した既存の分布モデルに、ダスト相互衝突アルゴリズムを組み合わせた「共鳴-衝突ハイブリッドモデル」を提唱・開発している。このモデルを使った試計算結果は、過去の各モデル単独の計算結果に比べ、より宇宙実測に近い密度差を示すことができた。

大型レーダ流星ヘッドエコー観測による太陽系ダ ストの観測

○ 阿部 新助¹, Johan Kero², 中村 卓司³, 藤原 康德³, 渡部 潤一⁴,

¹ 日本大学理工学部 航空宇宙工学科, ² スウェーデン・IRF(Institute of Space Physics), ³ 国立極地研究所, ⁴ 国立天文台

流星ヘッドエコー (meteor head echoes) は、メテオロイド (meteoroids) の大気突入時、高度 70~130km でメテオロイド周辺に生成される濃いプラズマ領域からの反射電波として観測される。我々は、周波数 46.5MHz, 有効直径 103m の京都大学生存圏研究所・信楽 MU レーダを用いた流星ヘッドエコー観測を実施している。天頂方向に出力 1MW のビームを視野角約 15 度に照射する 475 本の八木アンテナで構成される位相配列レーダーにより、24 時間平均で 3,000~4,000 個の流星ヘッドエコーを捉えることに成功している (e.g., Kero et al. 2012).

「ふたご座流星群」を対象に 2013 年 12 月 9-14 日の 6 日間のうち輻射点在地平線上にある延べ 48 時間という長期間の観測を行った結果、軌道が大きく分散していることが確認された。ふたご座流星群の母天体である小惑星 Phaethon・ファエトンは、近日点通過時に僅かに彗星活動を示すことが太陽観測衛星の画像から観測された (Jewitt et al. 2012)。しかし、彗星活動が極めて弱い「枯渇彗星」であり、毎年出現している「ふたご座流星群」の活動を説明することはできない。MU ヘッド・エコーで観測された軌道データと過去の MU のデータから、経日変化、経年変化を調査し、メテオロイドの放出された時期を推定し、小惑星ファエトンが彗星からどのように枯渇彗星へと遷移して行ったのかを理解する手がかりを得られることも期待される。

これまで知られている流星は、彗星起源のメテオロイドであり、小惑星を起源とするメテオロイドについては、まだ殆ど知られていない。小惑星を起源とする隕石についても、母小惑星が特定された隕石は皆無である。小惑星起源のメテオロイドは、対地速度が遅く、発光効率が速度の 3-4 乗で減衰するため、光学観測では隕石になるような明るい火球しか観測されない。一方、MU のような大型レーダーにより、地球軌道と交差する（ふたご座流星群のような）小惑星起源のメテオロイド群を捉えられる可能性が高く、地球近傍小惑星 (NEA; Near-Earth Asteroids) の軌道との交差条件から観測日を限定したヘッド・エコー観測の実施を提案していく計画である。

- Kero J. et al., (2012), “The 2009-2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: radiant and diurnal rates”, MNRAS 425, 135-146
- Abe, S., Kero, J., Nakamura, T., Fujiwara, Y., Watanabe, J.-I., (2014), “Orbital Evolution of Geminids and Quadrantids by MU Radar Observations”, Asteroids, Comets and Meteors (ACM), Helsinki, Finland.
- Jewitt, D., Li J., & Agarwal J. (2013), “The Dust Trail of Asteroid (3200) Phaethon”, ApJ., 77, L36-40

流星観測衛星 S-CUBE のミッション紹介と 開発進捗報告

○石丸亮¹、坂本祐二^{1,2}、小林正規¹、郷内稔也²、藤田伸哉²、千秋博紀¹、和田浩二¹、石橋高¹、黒澤耕介¹、山田学¹、阿部新助³、吉田和哉²、佐藤光輝⁴、高橋幸弘⁴、松井孝典¹

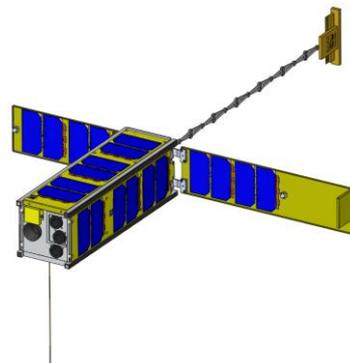
¹千葉工業大学惑星探査研究センター、²東北大学、³日本大学、⁴北海道大学

千葉工業大学惑星探査研究センターでは、新たに惑星科学探査を目的とする超小型衛星キューブサットプロジェクトを立ち上げた。巨額の予算と長期に渡る開発期間が必要である国による惑星探査とは対照的に、キューブサットは大学規模のリソース（ヒト、モノ、カネ）により短期間で開発できることがメリットとして挙げられる。

初号機は宇宙からの流星観測をミッションとする。衛星名は S-CUBE である。流星は彗星や小惑星のような太陽系始原天体を起源とするため、流星観測により地球に居ながらにして太陽系始原天体の情報（軌道、組成など）を得ることができる。また、地球に衝突する微小天体の頻度の時間変化や空間分布の評価に繋げることができ、宇宙物質の地球への供給量を議論できる。

人工衛星を使って宇宙から観測すると、天候に依らず定常的に流星観測できることに加え、衛星が地球を周回するので北半球から南半球まで広範囲を観測できるメリットがある。特に、観測が不足している南半球や高緯度での観測は流星フラックスを適切に評価する上で重要である。さらに、宇宙観測ならば、地上からは不可視の流星の紫外光を捉えることができ、その観測からは新たな元素輝線の観測が期待される。

開発しているのは、10cm 立方のユニット (U) が3つ連なった、3U キューブサットと呼ばれる超小型衛星である。S-CUBE には可視カメラと紫外に感度を有する光電子増倍管を搭載し、流星の可視-紫外同時観測を実施する。惑星科学分野でのキューブサットの利用は初めての試みであり、本プロジェクトの推進が新たな宇宙惑星探査の方向性となることを期待している。本発表では、S-CUBE のミッション概要と開発進捗について報告する。



BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション：MMO プロジェクト最新状況報告

○早川 基¹；前島 弘則¹；BepiColombo MMO プロジェクトチーム²

¹独立行政法人 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

²国内外大学・研究所・宇宙航空研究開発機構

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であった。米国マリナー10号による3回のフライバイ観測(1974-5)は、この小さな惑星にはあり得ないと考えられていた磁場と磁気圏活動の予想外の発見をもたらしたが、その究明は長らく夢に留まってきた。近年の技術革新により、ようやく周回観測が可能となってきており、2011年3月からは米国 MESSENGER が周回軌道からの観測を行っている。「BepiColombo」は、欧州宇宙機関（以下、ESA）との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらすし、内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。また、MESSENGER によってなされた数多くの発見は BepiColombo によって解き明かされる事が期待されている。

本計画は、最適化された2つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された「水星表面探査機(MPO)」（3軸制御、低高度極軌道）、水星周辺環境の観測に最適化された「水星磁気圏探査機(MMO)」（スピン制御、長楕円極軌道）から構成される。JAXA は、日本の得意分野である周辺環境の観測を主目標とする MMO 探査機の開発と水星周回軌道における運用を担当し、ESA が残りの全て、すなわち、打ち上げから惑星間空間の巡航、水星周回軌道への投入、MPO の開発と運用を担当する。

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、MMO は FM の総合試験を実施しており、今年度末に終了の予定である。また ESA 側開発のモジュール (MPO, MTM) も各々の FM 総合試験を実施しており、来年上半期に終了予定である。各モジュールは来年夏より年末までスタックレベル (MCS:Mercury Cruise System) の総合試験に供された後射場へと輸送され 2016年7月に予定されている打ち上げに備える事になる。なお、BepiColombo 全体のミッション CDR は今年末に予定されている。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する

「BepiColombo 科学ワーキングチーム」（年1回程度開催）で立案・実施される。本講演では、これら科学観測に関連した状況、日本側が製作を担当する MMO の状況並びに ESA 側進捗状況について最新状況を報告する。

JUICE木星系探査が拓く科学

Science Objectives of JUICE (JUperiter ICy Moon Explorer) Mission

○佐々木晶¹, 齋藤義文², 藤本正樹², 木村淳³, JUICE-JAPAN²

¹大阪大学, ²ISAS/JAXA, ³東京工業大学ELSI

JUICEは、ESAが主体となり日米が参加する木星系探査計画である。2022年打ち上げ、2030年木星系到着、木星系（磁気圏、木星大気、エウロパ・カリストのフライバイ観測）の観測の後、2032年ガニメデ周回軌道に投入され、太陽系最大の氷衛星を精査する。木星との潮汐相互作用によるダイナミックで多様な衛星系、とくに地下海は生命居住環境としても注目されている。

日本は、BepiColombo水星探査計画の日欧協力の枠組みを生かす形で、立案時から計画に参加してきた。現在、機器開発、サイエンス参加を含めて、JANUS（カメラ）、GALA（レーザー高度計）、SWI（サブミリ波動）、JMAG（磁力計）、PEP（プラズマ粒子計測）、RPWI（プラズマ波動）に共同研究者として参加する。

JUICEの科学目的の中で、潮汐相互作用をエネルギー源とする氷天体地下海の状態の解明と、最強の加速器である木星磁気圏中での高エネルギー粒子の挙動の解明は、大きな課題で、日本が関わる機器は、重要な役割を果たす。さらに、氷衛星の組成や内部構造等に関する情報から、木星系の形成過程や形成位置（太陽からの距離）に関してどのような制限を加えることができるのかを考察し、惑星理論研究者と連携して、太陽系形成時での外惑星領域の描像を新たにしたい。

JUICEが木星系の観測を行うのは2030年代であるが、その時点でJUICEが生み出す科学成果は、現在に増して価値の高いものになる。

(i) JWST宇宙望遠鏡や30m級地上望遠鏡の観測により、周惑星円盤（サブ円盤）の検出や、系外惑星を周回する衛星が2030年までには発見されている可能性は高い。（Kepler望遠鏡のデータからも、衛星の存在可能性を示すシグナルは得られているが、確定はしていない。）今後発見される、系外衛星や衛星を育む周惑星円盤を理解するための対象天体として、木星系の精査は重要である。

(ii) 計算機の計算速度と取り扱えるデータ量はこれからも伸長していく。現在の計算機能力では、周惑星円盤と原始惑星系円盤の進化を同時に解析することは難しいが、10年後には可能になるだろう。磁気圏においては、幅広いエネルギーレンジ、空間スケールを含めたシミュレーションを行えるようになる。2010年代には、ISASのERGをはじめとする探査機が地球の放射線帯を観測し、数値シミュレーションにより現象の解釈が行われる。規模がはるかに大きい木星磁気圏のマルチスケールのフルシミュレーションも2030年には可能で、JUICEの観測データが高エネルギー宇宙プラズマの理解に大きく役立つことが期待できる。

木星圏探査機 (JUICE) 搭載サブミリ波分光計の 開発と科学目標

○笠井康子^{1,2} 佐川英夫³ 関根康人⁴ 黒田剛史⁵ 碓井英雄¹ 菊池健一⁶ 西堀俊幸⁷

真鍋武嗣⁸ Paul Hartogh⁹ JUICE-SWI チーム

¹情報通信研究機構 ²東京工業大学 ³京都産業大学 ⁴東京大学 ⁵東北大学 ⁶国立天文台

⁷宇宙航空研究開発機構 ⁸大阪府立大学 ⁹マックス・プランク研究所

サブミリ波分光計 (Submillimetre Wave Instrument: SWI) は、欧州宇宙機関 (ESA) の次期木星圏探査機 JUICE に搭載予定の観測機器の 1 つであり、深宇宙探査におけるサブミリ波による惑星観測を行う初の提案である。サブミリ波観測では、得られる惑星大気分子スペクトルから、大気中に含まれる分子やラジカルの検出・定量を行うことができる。また、その高い波長分解能 ($\lambda/\delta\lambda \sim 10^7$) から、観測分子の同位体比やオルト・パラ比を導出すること、あるいはドップラー効果を利用した風速測定なども行うことができる。さらに、固体地表面からの熱放射を観測することで、地表面の物性に制約を与えることもできる。このように JUICE-SWI は、これまでの探査で行われてこなかった極めてユニークな観測を可能にする測器であり、本講演ではこの開発状況と科学目標を発表する。

JUICE-SWI の観測ターゲットは主に、1) 木星成層圏、2) ガリレオ衛星の希薄大気およびプルームである。以下では、その科学目標をまとめる。1) の木星成層圏は、内部熱源により循環が駆動され化学平衡に近い対流圏と、太陽紫外光など外部からのエネルギー源が支配的で化学的には非平衡な上層大気との境界である。成層圏のダイナミクスや化学組成の決定要因を明らかにするためには、SWI が得る高空間分解かつ長期継続的な観測データが不可欠であり、対流圏深部を観測する Juno 搭載マイクロ波放射計と相補的に木星大気の物理と化学の理解を進める。2) のガリレオ衛星の希薄大気については、原始太陽系円盤の木星形成領域の物理化学状態を制約し、内部海の化学組成やハビタビリティを理解することを目指す。特に、地質活動がほとんど起きていないカリストは、原始円盤の木星形成領域の氷微惑星組成を保持していることが期待される。カリスト大気中の H_2O の D/H や $^{18}\text{O}:^{17}\text{O}:^{16}\text{O}$ 比、 NH_3 や CO などの有無から、円盤温度や物質の動径方向への混合・輸送過程を制約する。また、エウロパ、ガニメデの希薄大気およびプルームから、内部海における生命必須元素の有無を明らかにし、溶存種の酸化還元状態から生命が利用可能な化学合成エネルギーが得られるかを調べることを目標とする。

深宇宙探査技術実証機 DESTINY

Deep Space Explorer DESTINY

○川勝康弘、船木一幸、西山和孝、岩田隆浩¹

¹ 所宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

DESTINY(図 1)は、H25 年度イプシロン搭載宇宙科学ミッションに提案中の、深宇宙探査技術実証ミッションである。大型イオンエンジン $\mu 20$ 、薄膜軽量太陽電池パドルなど、ISAS、JAXA が強みとする最先端技術を結集した、小型高性能深宇宙輸送機であり、最大約 5km/s の増速能力、最大 200kg のミッションペイロード搭載能力を有する。この DESTINY をイプシロンロケットで打ち上げ、宇宙科学小型計画の枠組みで実現する新しい深宇宙探査の方法を提示する。これにより、宇宙科学ロードマップ が謳う、小型・高頻度な太陽系探査を実現する道を拓く。

イプシロン級小型計画には、多くの新規技術を要する DESTINY の開発・実証、ならびに、DESTINY を使いこなすミッションコンセプト(図 2)の実証を主目的とした飛翔実験を提案している。また、これら主目的に加えて、限られた飛翔機会を有効に利用し、今回の実証飛行のペイロードとして、将来の深宇宙探査の鍵となる工学実験を行うこととし、さらに、リソースが許す範囲で理学観測機器を追加搭載することも検討している。

現行イプシロン(4 段キックステージ付)で打ち上げれば、DESTINY は 50kg のペイロードを搭載して月、ラグランジュ点に到達、あるいは地球圏を脱出することができる。能力向上型イプシロン(M-V 級)で打ち上げれば、DESTINY は 200kg のペイロードを搭載して、火星・金星を周回する軌道に到達することができる。このペイロード輸送能力があれば、第一級の科学成果を狙った競争力のあるミッション構想が充分可能であり、イプシロン級小型計画による深宇宙探査ミッションを軸とした「小型・高頻度な太陽系探査」が現実のものとなる。

本発表では、この DESTINY の概要を紹介する。

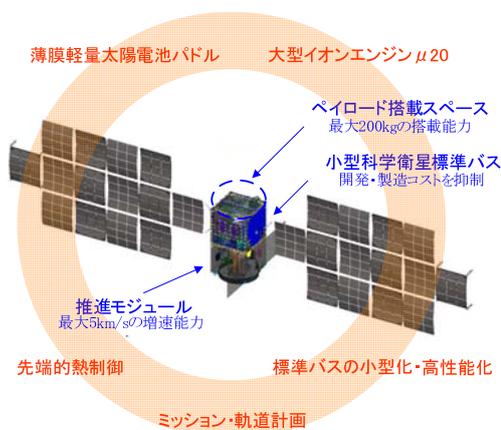


図 1 小型高性能深宇宙輸送機 DESTINY

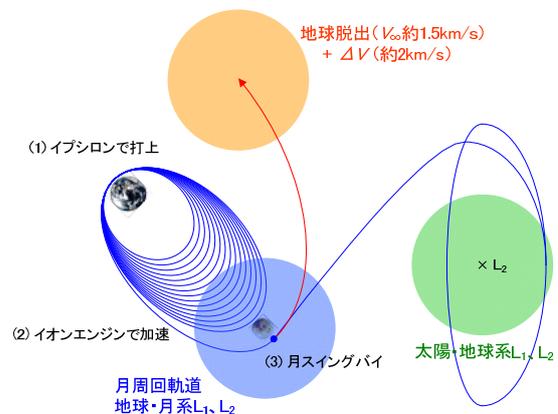


図 2 DESTINY ミッション・コンセプト

深宇宙探査技術実験機 DESTINY による太陽系探査

Explorations for the Solar System using DESTINY: Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary Voyage

○岩田隆浩^{1,*}、川勝康弘¹⁾、江副祐一郎²⁾、亀田真吾³⁾、桂華邦裕⁴⁾、荒井朋子⁵⁾、
松浦周二¹⁾、佐伯孝尚¹⁾、今村剛¹⁾、安藤紘基¹⁾、小郷原一智⁶⁾、大山聖¹⁾

¹⁾JAXA 宇宙科学研究所、²⁾ 首都大東京、³⁾ 立教大、⁴⁾ 名古屋大、⁵⁾ 千葉工大、⁶⁾ 滋賀県立大

*) Takahiro Iwata (ISAS/JAXA)

イプシロンロケット搭載小型衛星として提案している深宇宙探査技術実験機 DESTINY の実証機では、10kg 程度の理学観測機器を搭載し、太陽地球ラグランジュ点 L_2 または L_1 への遷移軌道中およびハロー軌道到達後に観測を行う計画である。DESTINY が向かうラグランジュ点 L_2 ならびに L_1 は、地球磁気圏の観測や地球近接小天体 (NEO)、ダスト等の地球近傍の惑星間空間・現象の観測に適した場所であること、また将来のスペース天文観測衛星の設置候補地点として注目されており、様々な理学観測機器が提案準備されている。一方、DESTINY 応用ミッションとして検討している、実証機に続く実用機や、イプシロンロケットの打ち上げ能力を改良した増強型を用いたミッションでは、探査可能範囲が金星・火星にまで広がるとともに、ペイロード質量も増大する。これらの各フェーズで想定されている理学観測の条件およびモデルミッション候補を表 1 にまとめる。本講演では、太陽系科学・スペース天文学等のサイエンス、ならびに具体的なモデルミッションの可能性について述べる。

(表 1) DESTINY の各フェーズの特徴 (目標) とモデル観測機器・ミッション候補

フェーズ	実証機 (イプシロン3号機 提案)	応用ミッション	
		カテゴリ A	カテゴリ B
ロケット	現行イプシロン+4段キックステージ		能力向上型イプシロン (M-V 級を仮定)
M_{payload}	10 kg	50 kg	200 kg
探査範囲	太陽-地球 L_2 または L_1 (+オプション軌道可能性有り)	地球近傍 ~ 火星・金星 フライバイ ($\Delta V_{\text{max}} \sim 2 \text{ km/s}$)	地球近傍 ~ 火星・金星 周回軌道投入 ($\Delta V_{\text{max}} \sim 5 \text{ km/s}$)
モデル 観測機器 ・ ミッション 候補	高速中性粒子カメラ、X線望遠鏡、熱赤外線イメージャ、ダスト観測装置、小型望遠鏡、偏光観測装置、 γ 線・宇宙線検出器、紫外線望遠鏡	地球圏プラズマ撮像、小惑星 Phaethon フライバイ、黄道面外からの宇宙背景放射観測、紫外線望遠鏡による太陽系外惑星観測、宇宙衝突再現実験	低コスト小型小天体探査、オービタ間の電波掩蔽による金星気候探査、火星気象衛星と火星航空機によるダスト輸送メカニズムの解明、宇宙塵・惑星間塵採取

火星着陸探査技術実証ミッション

○藤田和央¹, 佐藤毅彦¹, 火星着陸探査技術実証ワーキンググループ

¹ 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

宇宙航空研究開発機構では、2008 年より国内の惑星科学研究者と連携し、火星複合探査 (MELOS)WG の下、火星着陸探査の検討が進めてきたが、諸々の理由からミッション立ち上げを実現することができなかった。そこで 2014 年度より、火星着陸探査技術実証を目的とする「火星着陸探査技術実証 WG」を工学委員会に新たに立ち上げ、MELOS WG を含む複数の関連 WG の成果を継承し、2014-15 年度に予定されている中型ミッション AO への応募を想定した活動を開始した。新 WG は工学実証を主眼とするものの、理工連携となったスコープの実現を目指している。MELOS WG においては、ローバを用いた生命探査を中核とするミッションスコープを定義して概念検討を進めた。しかしスコープの決定プロセスが曖昧であったためポテンシャルを有する科学観測提案を十分に取り込めないなどの課題が生じ、その結果ミッション提案が限定的なものとなった。この反省を踏まえ新 WG では 60 日スタディを実施し、ポテンシャルを有する複数の探査機形態と複数の科学観測提案を再精査し、合理的な評価によってこれらに優先順位を設定し、選択と集中によって現在の内外情勢に最も適合したミッションスコープへと一本化し、探査計画を立案する作業を進めている。本項の執筆時点では、4 つの探査機形態(A.飛行機とランダ、B.多機能ローバ、C.長距離走破ローバ、D.複数ランダ)を想定し、表 1 に示す主要な科学観測提案を組み合わせた幾つかのミッションスコープを立案し、外部有識者を交えた審査を行っているところである。審査は 9 月初頭に結審し、講演会の時点では一本化された火星着陸技術実証ミッション案として紹介できる予定である。

表 1 火星探査技術実証機の科学観測提案一覧

正式名称	測器	PI
生命探査顕微鏡による生命探査	生命探査顕微鏡	山岸明彦
地中レーダーによる地下構造探査	地中レーダー	宮本英昭
電磁波・音波計測器による火星大気中における放電現象の観測	電磁波・音波計測器	山本真行
気象観測システム、粒子センサー、環境監視カメラによる気象観測	気象観測システム	乙部直人
	粒子センサー	千秋博紀
	環境監視カメラ	鈴木睦
LIDAR によるダスト観測	短距離 LIDAR	千秋博紀
ナビゲーションカメラによるダストデビル観測	ナビゲーションカメラ(バス系)	小郷原一智
ナビゲーションカメラの高機能化による地質探査	地質カメラ(ナビゲーションカメラの高機能化)	佐藤毅彦
宇宙測地学的手法を用いた火星回転変動計測	通信システム(バス通信系の高機能化)	岩田隆浩
地震波を用いた火星内部構造探査	地震探査システム	新谷昌人
LIBS-TOFMS 装置による火星表面年代のその場計測	LIBS-TOFMS 装置	亀田真吾
波長変調分光器によるメタン・水蒸気計測	ガス検出器	戸野倉賢一

火星表面での生命探査：LDM 生命探査顕微鏡開発 の現状報告

Search for life on Mars surface: Current status of LDM (Life Detection Microscope)

○山岸明彦¹, 宮川厚夫¹, 佐藤毅彦², 塩谷圭吾², 吉村義隆³, 本多元⁴, 今井栄一⁴,
佐々木聰⁵, 石上玄也⁶, 出村裕英⁷

¹東薬大・生命, ²JAXA・ISAS, ³玉川大・農, ⁴長岡技大, ⁵東京工科大, ⁶慶応大, ⁷会津大
A. Yamagishi¹, A. Miyakawa¹, T. Satoh², K. Enya², Y. Yoshimura³, H. Honda⁴, E. Imai⁴,
S. Sasaki⁵, G. Ishigami⁶, H. Demura⁷

¹Tokyo Univ. Pharmacy Life Sci., ²JAXA・ISAS, ³Tamagawa Univ., ⁴Nagaoka Univ. Tech.,
⁵Tokyo Univ. Tech., ⁶Keio Univ., ⁷Univ. Aizu

近年の火星探査結果を反映して、火星における微生物存在の可能性が再検討されている。第一に、40億年前の火星に生命が誕生していたかも知れないという可能性が浮上している。当時の火星表層にはおそらく大量の水が存在しており、温暖湿潤な気候がある程度長期間保たれ、当時の地球と極めて似ていた可能性がある。第二に、現在も微生物生存可能環境が保たれている。すなわち、液体の水が流れた後と推定される場所が複数のクレーター斜面に季節的に観測されており(1)、酸化鉄、還元型硫黄(H₂S、おそらく硫化鉄由来:文献2)など微生物生存に必要な非平衡が報告されている。さらに、火星環境を検討すると数cm表面下であれば生命は十分生存可能と推定されている(5)。第三に、Vikingの結果の見直しが進み、Vikingの有機物検出感度は究めて悪く、1g土壤中に10⁷個の細胞が検出できる程度でしかなかった(3,4)。一方、地球上微生物密度の低い地域(アタカマ砂漠、深海底、南極土壌等)では1g土壤中に10⁴個細胞程度しかない。

我々は、火星土壌表面数cmに今も細胞が生存している可能性が十分あると予測し、現存する細胞を検出する装置の開発を進めている(5)。装置は採集した土壌標品を蛍光色素で染色して、顕微鏡観察、画像解析の後、地球に転送する。我々は、火星での生物が地球型の細胞でない場合でも検出できるシステムとして開発を行っている。装置開発の現状を報告する。

引用文献

1) McEwen, A. S., et al. 2011, *Science* **333**, 740 ; 2) Ming, D. W. et al. 2014, *Science* **343**; 3) Glavin, D. P. et al. 2001, *Earth Planet Sci. Let* **185**,1; 4) Naborro-Gonzalez, R. et al. 2006, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **103**; 5) Yamagishi et al., 2010, *Biol. Scie. Space* **24**, 67-82.

火星ローバのナビカメラによる地質探査

○佐藤毅彦¹、宮本英昭²、新原隆史²、石上玄也³、火星着陸探査技術実証 WG

¹JAXA、²東京大学総合研究博物館、³慶應義塾大学工学部

火星探査ローバが自律走行をするために、ローバのマスト上にステレオ視カメラ＝ナビカメラを搭載することは必須である。そのカメラを理学観測に流用する可能性について多方面からさまざまな案が出されており、そのひとつとして、多色撮像により鉱物を見分ける「地質探査カメラ」の可能性を検討している。

地質探査カメラとして要求される機能・性能は「遠景をカラー撮像し、色調などから近接すべき対象を発見する」「近接撮像（多色、数ミリ分解能）により、硫酸塩鉱物や珪酸塩鉱物などを識別する」ことである。これらをできるだけ単純なハードウェアで実現し、かつナビカメラとの共有化をはかれることが望ましい。低消費電力という観点では CMOS センサに利点がある。宇宙機としては、GOSAT 衛星搭載のモニターカメラという先例があり、それを参考に概念検討を行った。

- ステレオ視のために、カメラヘッドは二つ必要である (H1, H2)。
 - 各カメラヘッドは二眼とする (H1L1/L2, H2L3/L4)。
 - 各レンズ後方にダイクロイックを置き、二つの CMOS に結像させる (H1L1S1/S2, H1L2S3/S4, H2L3S5/S6, H2L4S7/S8)。
- ナビカメラはローバ運用の重要機器であるから、次のような冗長性をもたせる。
 - S1, S3, S5 をカラー用とし、S1+S5 または S3+S5 でステレオ視
 - S2, S6, S7 を IR1 波長 (TBD) とし、S2+S6 または S2+S7 でステレオ視
- 地質探査用には S2, S6, S7 の IR1 波長と、S4 に IR2 波長、S8 に IR3 波長（いずれも TBD）を設定し、3 波長での鉱物識別を可能とする。

光学系に関しては像側テレセントリックで高解像度の市販レンズ（2/3 型センサに対して長手方向 40 度視野）があり、それを出発点としてカスタマイズすることで要求性能を満たすことができると考えている。本講演では、ナビカメラ＋地質探査カメラのハードウェアおよび、鉱物識別に適した波長の選択について報告する。

音波を利用した火山湖探査

○佐伯和人¹、金子克哉²、大場武³

¹大阪大学・理、²京都大学・人環、³東海大学・理

カメルーンでは1980年代にニオス湖とマヌーン湖の2つの火口湖で、湖底に溜まった大量のCO₂が突然湖面に噴出する湖水爆発が起こり、ふもとの3つの村で1800人の住民が亡くなった。現在、発表者は火口湖中のCO₂量のモニタリングおよび、CO₂の供給源を探査する研究を行っている。カメルーンでは社会基盤構造が発展途上であるので、精密な測定装置を長年月維持管理しながら観測活動をすることは困難である。このことは、月惑星探査の事情にも似ている。そこで単純なしくみで実現できる測定方法として実用性を模索しているのが、水中音速を用いた湖水の化学成層構造の推定と、ソナーを使った湖底地形計測である。

水中音速は、水に塩類が溶けると上がることが知られている。しかし、溶存CO₂濃度によって音速が変化するかどうかの研究は例がなかったので、実験室で確認し、変換係数を求めた。音速度を溶存CO₂濃度に変換するためには、変換係数を決めるために、時々、湖水を採取して溶存CO₂濃度の化学定量をする必要がある。いったん係数を決めてしまえば、湖水に溶け込むイオンの種類や比率が大きく変化しない限りは、同じ係数で近似できる。ただ、音速度を溶存CO₂濃度に変換するためには、水の電気伝導度も同時に計測する必要がある。結局のところ、湖にセンサーを沈めて、深度分布のデータとして取得するのは、水圧（深さを知るため）、温度、音速度、電気伝導度の4種類となる。ただし、湖水の化学成層構造を大雑把に知るだけであれば、水圧、温度、音速度の3種類だけでも様々な推測ができる。2014年3月にマヌーン湖で行った観測では、湖の中央部の湖盆と、東部の湖盆では、音速度垂直分布の形に明らかな違いが現れた。音速度垂直分布から、東側の湖盆のCO₂濃度は、脱ガスパイプの効果で下がっているが、中央部の湖盆のCO₂濃度は、下がっていないことがわかった。また、ソナーによる測深データとあわせると、両者の湖盆の間にある水中尾根の標高に相当する水深20mの深さから、音速度分布が分岐していること、すなわち、水深20m以浅は、どちらの湖盆も、全く同じ化学成層構造となっていることがわかった。

今後、土星の衛星タイタンのように液体の川や湖を持つ天体の測深探査にはソナー技術が使われることになるであろう。小型で極低温でも作動するソナーの開発が必要である。また、土星の衛星エンケラドスや、木星の衛星エウロパなど、地下海を持つ天体の内部構造の推定の際には、地震波データが使われることになるであろう。そうなれば、水溶液の音速度と水溶液に溶け込む物質との関係の研究が基礎研究として必要になる。衛星探査の基礎研究として、類似の地球観測に普段から参加しておくことも、重要なのではなからうか。地球という惑星にも調査すべき場所はたくさんある。

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS)の援助によって実施している。

熱流量プローブを用いた月惑星表層レゴリスの 熱伝導率に対する精度評価

○堀川大和¹, 田中智², 坂谷尚哉¹, 滝田隼³

¹総合研究大学院大学, ²ISAS/JAXA, ³東京大学

月惑星における地殻熱流量は、天体内部の熱的な状態を反映しており、その主な熱源には放射性元素の壊変熱や惑星集積時の熱エネルギーがある。したがって地殻熱流量を精密に観測することは、天体の放射性元素のバルク存在度や熱進化を制約する上で重要である。熱流量をその場で観測するために、1~数 m の深さに埋設可能な高速貫入プローブ（ペネトレータ）が開発された。耐衝撃性や軽量化を重視したため、熱流量計はペネトレータの構体表面上に搭載されている。しかしその結果、熱流量測定値はペネトレータとレゴリスの熱伝導率の違いによって生じるペネトレータ周囲の温度擾乱に影響されやすく不確定性を持つ。

そこで本研究では、温度擾乱を避けた位置で熱流量を精密観測するために（目標精度：10%以内）、貫入プローブの構体表面からニードルプローブを伸展させるシステムの開発を提案する。熱流量は表層物質の熱伝導率と垂直温度勾配を独立に測定することで推定する。

本研究はこれまで、月ペネトレータへの搭載性を考慮したニードルプローブを試作し、レゴリス模擬物質としてのガラスビーズを用いた熱伝導率測定に関する検証実験を行い、熱伝導率の推定に向けたデータ解析方法の検討と推定した熱伝導率の精度評価を行ってきた。通常のニードルプローブは、線加熱法による測定のためプローブの中心付近に測温点を配置する。一方、本研究は温度擾乱の影響が極力少ない位置での温度と熱伝導率の測定を目指すため、プローブの中心付近だけでなく先端部分にも測温点を配置した。先端部分の測温点において熱伝導率を推定する理論解も存在する。ニードルプローブによる熱伝導率測定値を理論解から求める一例として、ガラスビーズの熱伝導率を月の地下数 m での熱伝導率に調整した場合、プローブとの比較測定のために線加熱法で測定した 0.0207 W/m/K に対して、中心測温点で 1.14 倍、先端測温点で 0.80 倍となった。測温点各々の差異は、理論解の仮定条件が実際のプローブの特性と異なる（プローブと周囲のサンプル間の接触熱抵抗の違いなど）からだと考えられる。そこで我々は、実際のプローブの物性を導入した熱数学モデルによる数値シミュレーションとインバージョンによる解析を行うことで、プローブの任意の位置において周囲の物質の熱伝導率を決定する手法を開発した。その結果ガラスビーズの熱伝導率 0.0207 W/m/K に対して、ニードルプローブによる熱伝導率測定値は、中心測温点で 1.03 倍、先端測温点で 1.04 倍となり両方の測温点でガラスビーズの熱伝導率により近い値となった。またこのときの熱伝導率測定精度は中心、先端測温点ともに目標精度の約 5%以内（熱流量目標精度約 10%以内から概算）を満たすことが分かった。

現在、上記の解析手法を用いて、月ペネトレータが埋設可能な月地下 1~数 m での熱伝導率範囲（約 0.01-0.03 W/m/K）における、熱伝導率測定実験および測定精度の評価を進めており、本発表ではそれらの結果を報告する。

月の縦孔・地下空洞探査—UZUME 計画—の

ミッションとシステムの構想

○春山 純一、西堀 俊幸、山本 幸生、岩田 隆浩、永松 愛子、石原 吉明、山本 圭香、河野 功、大槻 真嗣、加藤 裕基(宇宙航空研究開発機構)、諸田 智克、西野 真木(名古屋大学)、清水 久芳、宮本 英昭(東京大学)、白尾 元理(惑星地質研)、橋爪 光、佐伯 和人(大阪大学)、小林 憲正(横浜国立大学)、横堀 伸一(東京薬科大学)、押上 祥子(国立天文台)、長谷部 信行(早稲田大学)、長谷中 利昭(熊本大学)、道上 達広(近畿大学)、横田 康弘、山本 聡(国立環境研究所)、小松 吾郎(ダヌンツィオ大学)、小林 敬生(韓国 地質資源研究院)、有隅 仁(産業総合研究所)

SELENE(かぐや)地形カメラにより、数10m直径・深さを持つ縦孔が、マリウス丘、静の海、そして賢者の海に三つ、人類史上初めて発見された。その後の米国探査機LROの観測により、いずれの孔も、地下の巨大な空洞の上を開いたものであると確認できるデータが得られてきている。こうした空洞は地球や火星の玄武岩質溶岩流にも多く見られる現象で、溶岩チューブまたは火山ガスの放出孔と考えられており、月面における火成活動に起源を持つことはほぼ確実である。高温の溶岩が冷却と共に流動を続けることで形成されたか、または揮発性成分の分別時に形成されたものであろう。いずれにせよ、溶岩の流動メカニズムや噴出時の揮発性成分も含めた組成など、活動中の火山でないとなかなか得ることのできない重要な情報を保持していると考えられる。また微小隕石の衝突やレゴリスの被覆といった風化を受けていないため、噴出当時の構造が新鮮な形で残されていることが確実な、月面において類まれなる露頭ということもできるため、火成活動史を解明する上でも地下空洞の構造探査を行う意義は大きい。さらに縦孔や地下空洞の内部は水や氷などの揮発性物質の天然貯蔵場所となっている可能性もある。そのためこうした構造は、特に火星においては、生命の発現可能環境としても重大な意味を持つことになる。月・火星の縦孔・地下空洞は更に、厳しい宇宙環境の中において優れた、有人・無人による月面活動拠点となり得るという点でも、その存在意義は大きい。

月の縦孔が発見されて以来5年。これまで、研究会などにより、その探査を目指して、理学・工学、更にはアウトリーチなど、様々な点から検討が深められてきた。SELENE2着陸点検討会では、縦孔探査が提案され、11候補地点の中で首位とも僅差の4番目の推薦を受けている。

SELENE2着陸点検討会での縦孔探査提案では、月面への早期実現を念頭におき、縦孔近傍への着陸と、縦孔への接近までを行うこととした。しかし、着陸点検討会では、縦孔の中にまで降りることを期待する声も大きかった。そこで、月縦孔に降下し、地下空洞内を直接探査、更には活動拠点建設を企図する計画の研究・検討が開始されている。この計画を、我々は、UZUME(Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration)計画とよんでいる。UZUME計画の第一段階として、縦孔直接技術実証にむけた検討・研究を行っている。今回、UZUME計画のミッションと、その実現に向けたシステムの構想について、議論・研究の経過を報告する。

木星型惑星を想定した雲対流の数値計算

○ 杉山 耕一朗¹, 中島 健介², 小高 正嗣³, 倉本 圭³, 林 祥介⁴

¹JAXA 宇宙研, ²九大理・地惑, ³北大理・宇宙理学, ⁴神戸大理・地惑

1. はじめに

木星型惑星の雲対流は、地球大気の場合と同様に、大気の成層構造と物質分布の決定に重要な役割を担っていると考えられている。しかし、厚い雲に覆われた巨大惑星の雲層を遠隔観測するのは困難であり、巨大惑星における雲対流と平均的大気構造との関係については未だ明らかとなっていない点が多い。この問題に対し我々は、複数成分の凝結および化学反応を考慮した雲解像モデルを開発し、木星大気条件において、雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる統計的平衡状態での大気構造を調べてきた (Sugiyama *et al.*, 2009, 2011, 2014)。本発表では、土星と天王星を想定した同様の 2 次元数値計算を実行し、雲対流と平均的大気構造との関係を議論する。

2. 計算設定

モデル方程式として準圧縮系方程式 (Klemp and Wilhelmson, 1978) を用いる。雲微物理過程は Nakajima *et al.* (2000) と同様に、地球で良く利用されている単純な雲微物理パラメタリゼーション (Kessler, 1969) を用いて定式化した。放射過程は陽に計算せず、水平一様かつ時間変化しない熱強制で代用する。土星・天王星では雲層における正味の放射加熱・冷却の鉛直プロファイルが観測されていないため、木星の観測結果に基づき 2 bar 高度から対流圏界面 (0.1 bar) の間を冷却することにした。統計的平衡状態に至るまでの計算時間を短縮するため、熱強制の値は木星大気における観測値より 2 桁大きい -1 k/day とする。計算領域は、土星条件で 7680 km \times 480 km, 天王星条件で 7680 km \times 650 km, 解像度は水平方向と鉛直方向共に 2 km とする。下部境界での温度圧力は熱平衡計算 (Sugiyama *et al.*, 2006) に基づいて決定し、下部境界での凝結性成分気体の存在度は太陽組成と同じとする。

3. 計算結果

土星条件と天王星条件の計算結果は、メタンの雲の有無を除き定性的に似ているため、以下では土星条件の結果を示す。雲対流層内 ($0.1 < p < 10$ bar) では強い下降流が多数見られる (図 1a)。強い下降流が存在するという特徴は、狭くて強い上昇域と広くて弱い下降域によって特徴づけられた木星条件での数値計算の結果と対照的である。下降流は冷却層 ($0.1 < p < 2$ bar) で冷やされた気塊の下降によって駆動されており、その大きさは 50 m/s 程度である。鉛直速度の自乗平均が H_2O 持ち上げ凝結高度 ($p = 10$ bar) において局所的な最小値を取ることは (図 1b)、その高度に形成される安定層が流れ場に対する境界として作用することを意味する。また、活発な対流によって、 H_2O と NH_4SH の雲粒は NH_3 持ち上げ凝結高度より上空まで移流され (図 2a)、 NH_3 と H_2S 蒸気は H_2O 持ち上げ凝結高度より高度と共に減少を始める (図 2b)。

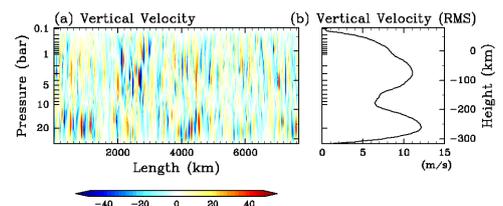


図 1: 土星大気を想定した数値実験で得られた (a) 鉛直速度, (b) 鉛直速度の自乗平均。

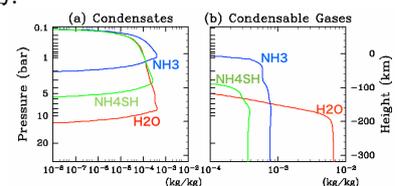


図 2: 土星大気を想定した数値実験で得られた水平・時間平均した (a) 凝結物と (b) 凝結性成分気体の鉛直分布。

P1-02

ASTE望遠鏡を用いた、木星成層圏微量分子のサブミリ波帯分光観測の初期成果

飯野孝浩(*1)、大山博史、秀森丈寛、加藤智隼、水野亮(*2)、塚越崇(*3)、平原靖大(*4)

(*1): 東京農工大学科学博物館

(*2): 名古屋大学太陽地球環境研究所

(*3): 茨城大学

(*4): 名古屋大学環境学研究科

1994年に発生した木星への彗星衝突イベントは、木星成層圏上部に大量の揮発性ガスを供給した。中でも、硫黄化合物の化学反応は興味深い。地上からのミリ波及び赤外線分光観測により、衝突直後には S_2 、 CS_2 、 OCS 、 H_2S 分子が検出されたものの、これらは数日~1ヶ月以内に消滅し、代わりに CS 分子が卓越した。 CS 分子の量は、それまで検出されていた中で最大量を占めた S_2 分子と調和的であったため、木星成層圏では中~長期的には CS 分子が安定な硫黄のリザーバーである可能性が示唆された。いっぽう、過去に大規模な彗星衝突が発生したと考えられている海王星においては CS 分子は検出されず(lino et al. 2014, Submitted)、両者の差異はガス惑星大気における硫黄化学に新たな課題を提示した。木星における事例を詳細に検討すべく、我々は2013年、チリ国アタカマ高地に設置された国立天文台ASTE望遠鏡を用い、供給後約20年後における木星成層圏中 CS 分子の時間変動を検出する観測を行った。1時間程度の積分により、 CS 分子の輝線構造は十分なS/Nで検出された。木星軌道付近における CS 分子の光解離寿命は、太陽活動極小期においてすら80日程度でしかない。そのため、解離したS原子が CS 分子をリサイクルする機構が必要である。我々は、木星成層圏に豊富に存在するラジカルである CH_3 ラジカルに着目した。 CH_3 ラジカルはS原子と容易に反応して H_2CS 分子を形成する。 H_2CS 分子の光解離は CS 分子をリサイクルし得る。このサイクル反応が、木星において CS 原子を長期にわたって維持する機構の有力な候補と考えられる。この仮説は、今後木星成層圏に対する H_2CS 分子のサーベイ観測により検証可能であると考えられる。しかし一方で、海王星大気においても CH_3 ラジカルは豊富に存在するため、未だ両者の差異を説明するには至っていない。

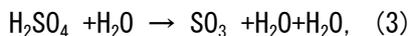
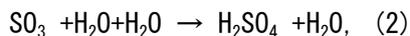
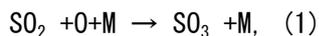
Venus GCM への金星硫酸雲生成・消失と大気化学過程の導入（1）

○伊藤一成¹、黒田剛史¹、笠羽康正¹、高橋正明²

¹東北大院理、²東大大気海洋研

金星の高度約 50-70km には全球的に濃硫酸の雲が存在している。この硫酸雲の分布は大気循環による影響を受け、また放射によるその熱放射・吸収が大気循環へ影響を与えるため、その生成・消失の数値モデル内における再現は重要と考えられる。しかし、これまでの VGCM (Venus General Circulation Model) では、雲の緯度・高度分布は観測に基づいて固定されており、雲の熱放射・吸収もその固定された雲分布をもとに計算されているため、その変動および大気循環との相互作用の再現は試みられていない。そこで我々は、VGCM 上に硫酸雲の生成・消失過程を組み込み、金星大気における硫酸雲の分布変動とその大気循環との相互作用の解明が可能なシステムの構築を進めてきた。これまでに、CCSR/NIES/FRCGC AGCM をもとに開発された VGCM [Ikeda, 2011] をベースとして、雲分布の大気循環による変動を追跡可能とすべく、硫酸エアロゾルを導入してその輸送、蒸発/凝縮、雲粒成長過程をモデル化して雲分布の再現を試みた。ただし現段階では結果として得られる雲分布は大気の熱放射・吸収の空間分布に影響を与えず、従来コードを踏襲して固定された雲分布をもとに計算している。2014 年春期までのコードでは、観測で見られる雲層下（高度約 40-45km）での硫酸蒸気量混合比の急激な減少が再現されず、このため雲分布の下限高度が非現実的な値となっていた[加藤修士論文, 2014]。

本講演では、この問題の解決に向けて行った、硫酸蒸気を分解する化学過程を導入した計算結果を紹介する。本コードは、地表から高度 95km 付近までを水平分解能 T21（格子間隔約 5.6°）、鉛直 σ レベル 52 層で計算を行った。これに以下の（1）～（4）の化学反応を導入している。



これにより、低高度で硫酸蒸気が分解するようになり、雲層下（高度約 40-45km）での硫酸蒸気量混合比の急激な減少を再現できた。また、雲層の上部（高度約 67-80km）での SO_2 の消失および硫酸蒸気量の生成、雲層の下部（高度約 50km 付近）での SO_2 の生成および硫酸蒸気量の消失も再現された。これは Imamura and Hashimoto [1998] の 2 次元モデルにより示唆された硫酸蒸気の生成・分解過程と整合する。本講演では、このコードにおける $\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 等の分布再現の評価結果を併せて示す予定である。これら硫酸雲の生成・消失に係る一連の過程が VGCM 内で矛盾なく再現できるようになれば、この雲分布が与える大気の熱放射・吸収への影響、およびそれによる金星大気大循環への影響の評価に踏み込むことが可能となるであろう。

ピリカ望遠鏡およびVMC/VEXを用いた 紫外撮像による金星スーパーローテーション周期と その時間発展の観測

○今井 正亮, 高橋 幸弘, 渡部 重十, 渡邊 誠¹

¹ 北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻

金星スーパーローテーションの力学メカニズムは、理論モデルが複数提唱されているも、観測的裏付けが十分なされておらず、未だ解明には至っていない。雲頂高度 70 km で惑星の自転速度の 60 倍を超える風速が維持される原因として、惑星波による大気加速が示唆されている。[e.g. Yamamoto and Tanak, 1997] また惑星波の存在は、Pioneer Venus 等によって観測されてきた惑星規模の紫外模様形成にも関わっていると考えられている。この惑星規模の模様は、その伝搬によって紫外輝度に 4-5 日の周期変化をもたらす。[Del Genio and Rossow, 1990]

本研究の目的は、金星における惑星波の存在とその発生源を観測的に明らかにすることである。先行研究によって示された紫外輝度の周期変化には、赤道と南北中緯度で独立した時間スケールでの周期の変化が観測されていた。我々は長期にわたる金星紫外輝度の観測を実施し、輝度の周期性をもたらす明暗構造の時間変化を捉えることを行っている。現行の金星探査機 Venus Express は遠点を南極近傍にもつ極軌道をとるため、惑星規模の模様の観測は南半球に限られる。そこで、北海道大学の惑星観測に優先使用が認められたピリカ望遠鏡とそこに搭載されている Multi-Spectral Imager (MSI) を用い、地上から金星の両半球 60°N – 60°S の範囲を、最大コントラストの得られる紫外波長 365 nm で、約 2 週間-1ヶ月連続した撮像観測を 1ヶ月程度毎に定期的実施することを可能とした。

我々はすでに 2013 年 8 月から 2014 年 6 月の約 1 金星年に及ぶ期間観測を遂行し、この内 8/19-11/9 の約 3ヶ月間に実施した 3 度 (計 51 日分) の観測結果の解析から、明暗構造に有意な時間変化があることを明らかにした。観測当初の 2013 年 8 月には、約 5 日周期で赤道対称な、南北緯度約 30° を境に赤道と中緯度で位相の反転する特徴をもった輝度構造が存在した。このような構造は、Galileo による金星フライバイ時に撮像された画像を解析した結果からも得られており、惑星波の特徴が再現されたものだと考えている。一方でその後 2013 年 11 月までの継続的な観測結果の中には、上記構造の顕在化と減衰を繰り返す様子が捉えられており、減衰時には南北対称性や明暗を繰り返す周期的特徴が失われる結果が示された。我々の結果は、同期間観測を行った Venus Express の南半球の輝度分布も再現していることを確認している。このように、金星の惑星規模の紫外模様が示す輝度構造を観測し、その時間変化を捉えた観測例は今までに存在せず、今回の結果は我々の南北両半球をカバーした連続観測によって初めて明らかとなった。本発表では、我々の観測結果を交え、惑星波によるスーパーローテーション形成の理論研究の観測的検証について議論する。

短周期地球型惑星の大気構造と放射スペクトル

○ 伊藤祐一¹、生駒大洋¹、河原創¹、永原裕子¹、川島由依¹、中本泰史²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

現在までに 1000 個近くの系外惑星が検出されている。最近では、地球の 1-10 倍の質量を持つ、あるいは地球の 1-2 倍の半径を持つ小規模惑星が多数発見されている。それらはスーパーアースと呼ばれる。これまでに検出されたスーパーアースの中には、密度が高く、岩石が主成分であると考えられる惑星が存在している (CoRoT-7b や Kepler-10b、Kepler-78 b など)。それらは中心星に非常に近いため、強烈的な恒星輻射によって表面が蒸発し、岩石蒸気大気をまとっていると推測される。本研究では、このような惑星を特に「短周期地球型惑星」、それが保持する岩石蒸気大気を「ミネラル大気」と呼ぶ。こうしたミネラル大気が実際に検出されれば、岩石惑星であることの直接的な証拠やその惑星の材料物質や形成過程に対する重要な制約を得ることが期待される。これまでに、化学平衡計算に基づいたミネラル大気組成に関する先行研究はある。しかし、ミネラル大気の温度構造や放射スペクトルは理解されていない。そのため、ミネラル大気の検出可能性を評価することができない。

本研究では、化学平衡計算コード MELTS を用いて、岩石メルトと気液平衡状態にある大気の組成を求めた。そして、主要成分である Na, K, O₂, O, Si, SiO の放射吸収断面積を求め、それらを用いて大気の鉛直温度構造と放射スペクトルを求めた。さらに、二次食観測 (惑星光と中心星光の比を検出する観測手法) による検出可能性を評価した。吸収断面積の計算では、Kurucz (1992) と HITRAN2012 (Rothman et al., 2013) で公開されている吸収線パラメータを用いた。そして、Piskunov & Kupka (2001) と Unsold (1955) の計算方法を適用し、各分子の吸収線について分子の熱運動・エネルギーの不確定性・吸収分子間の衝突を考慮し計算した。温度構造の計算では、Toon et al. (1989) の手法を用い、振動数依存性のある輻射に 2 流近似を用いて、輻射平衡を満たす大気の鉛直温度構造を計算した。これまでは大気の化学組成が一様であることを仮定していたが、今回新たに気相中の化学平衡計算を行い、鉛直組成分布を考慮した。平衡計算には、Gordon & McBride (1996) の化学平衡計算コードを用いた。

本結果から、このミネラル大気は、主に Na と SiO の吸収の影響により、長波長領域よりも中心星輻射波長である短波長領域の光を吸収しやすいことが明した。そして、この大気は放射平衡温度が 2300 K 以下では、等温構造を持つ一方、放射平衡温度が高い場合には、SiO の解離に伴う温度逆転構造が形成されることが明らかになった。今回新たに気相中の化学平衡を考慮したことで、高温低圧である大気上層では、SiO や O₂ の解離が効率的であることが示された。この SiO の解離により、大気上層では短波長領域の吸収が弱まり、SiO の減少に従い温度が低くなることが判明した。また大気上層が低温になった結果、放射スペクトルは弱まった。放射量は小さくなったが、新たに計算された放射スペクトルの検出可能性の評価を行なったところ、将来計画されている 5 m 級宇宙望遠鏡 (e.g., JWST) によって、短周期地球型惑星でミネラル大気の検出が期待される。

マグマオーシャンに覆われた惑星の光度進化曲線とその検出可能性

○濱野景子¹, 河原創¹, 阿部豊¹, 大西将徳², はしもとじょーじ³

¹ 東京大学, ² 神戸大学, ³ 岡山大学

惑星形成論によれば地球型惑星はその形成の最終段階で複数回の巨大衝突を経験する。惑星は巨大衝突のたびに全球的に溶融しマグマに覆われたと推測される。岩石の融点を超えるほどの高温の地表からは赤外だけでなく、近赤外～可視領域からも強い放射が射出される。これが惑星の大気によって完全に吸収・散乱されずに十分残る場合、高温の惑星特有のスペクトルとして系外惑星系でも観測されうる。

惑星放射スペクトルは大気の構造（温度・圧力・組成）によって決まる。これまでの水蒸気大気をまとった惑星の固化についての研究では、固化の過程での地表温度・大気量の進化が、恒星からの軌道距離に強く依存することが示された。この大気進化の違いは温室効果を介して、惑星の冷却・固化のタイムスケールも大きく左右する。これは、溶融した惑星が観測される頻度とその間の惑星放射スペクトルの両方が、惑星の軌道によって大きく異なることを意味する。

そこで本研究ではこれまでの進化モデルにラインバイライン計算を組み込み、固化に伴う地表温度・大気量の進化と、それに整合的な惑星放射スペクトル・中心星放射の反射スペクトルを求めた。より波長の短い大気の窓領域では、より深く高温の大気層からの放射が射出される。また、恒星放射の反射光は、可視領域では惑星放射よりも大きい。近赤外では水蒸気大気による強い吸収のため非常に小さくなることがわかった。近赤外領域のバンド（J, H, K, L）で期待される惑星—恒星放射コントラストは恒星からの軌道距離が小さいほど高くなる。一方、高い観測頻度が予想されるのは 0.7-0.8AU 付近である。本発表では、これらの結果に基づき、計画されている宇宙・地上望遠鏡でこうしたスペクトルの特徴が検出可能かどうか議論を行う予定である。

地球型惑星が持つ水量と表層環境： 海惑星における炭素循環

○中山 陽史¹, 阿部 豊¹

¹ 東京大学

ハビタブルゾーンと呼ばれる、惑星表面に液体の水を保持できる軌道領域に 10wt%程度までの H₂O を持つ地球型惑星の存在が理論的に予測されている [Raymond et al., 2007 など]. 惑星に水が供給するプロセスの多様性を考慮すると、地球型惑星が表面に持つ水量には幅があると予測される. 本研究では、全球的に海で覆われた地球型惑星(海惑星)を想定して、水量が違う場合の表層環境を考える.

全球的な炭素循環は地表面温度を安定化させる気候調節メカニズムである. 地球のような部分海惑星の場合、大陸風化による負のフィードバックが働くことで気候が安定化されている [Walker et al., 1981]. しかし、海惑星では大陸が存在しないため、大陸風化が働かず、海洋地殻による海洋底風化が重要な役割を担うと示唆されている [Abbot et al., 2012]. 海洋底風化には正の温度依存性があることが実験的に知られている [Brady and Gislason, 1997] ので、水量の増加に伴う海底の温度増加によって、表面水量の多い海惑星における海洋底風化は効率的に働くことが予測される. しかし、表面水量の多い海惑星では、惑星がもつ総炭素量も増加すると予測される. マントルに貯蔵されている炭素量に依存する脱ガス量とマントルに沈み込む炭素量がつりあうような平衡状態における海惑星の大気 CO₂ 量はこれらの競合で決まると考えられる. 大気 CO₂ 量は表面状態に依存するので、これから、部分海惑星と海惑星の区別が可能であるかもしれない.

本研究では、地球型惑星が持つ表面水量と大気 CO₂ 量の関係を明らかにするために、地球の炭素循環モデル [Tajika and Matsui, 1992] をベースに、水量をフリーパラメータとした炭素循環モデルを構築した. 海洋底風化は現在の地球の海底風化で予測されている Ca²⁺ の供給量をもとに、Brady and Gislason (1997) で提案された温度依存性に従い、海底の温度に依存すると仮定した. また、海の温度勾配は断熱温度勾配に従うと仮定した. 太陽定数などのパラメータについては現在の地球と同じ値を用いた. 1 海洋水量の海惑星を想定した場合、大気 CO₂ 量は約 0.015 bar まで上昇し、地球に比べ約 50 倍の大気 CO₂ 量を持つことが分かった. 表面水量だけを増加させた場合、大気 CO₂ 量は徐々に減少し、50 海洋水量程度の表面水量を持つ海惑星は地球と同程度の大気 CO₂ 量を持つことが分かった. しかし、表面水量が増加すると総炭素量も増加するため、海惑星が持つ大気 CO₂ 量は水量だけを増加させた場合よりも多いと考えられる. また、火星や金星のような表面に水のない地球型惑星では大量の大気 CO₂ を持つと考えられる. 1%程度の少ない大陸の割合でも、部分海惑星での大気 CO₂ 量は地球と同程度に維持されることが示唆されている [Abbot et al., 2012]. よって、部分海惑星だけが地球と同程度の比較的少ない大気 CO₂ 量を持つことが可能であると示唆される.

ホットネプチューンの水素ヘリウム大気量推定における内部組成分布の影響

○黒崎 健二¹, 生駒 大洋¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

観測技術の向上により、地球の数倍程度の質量・半径をもつ系外惑星の観測例が増えてきた。また、それらの惑星の平均密度からバルク組成を推定する試みもなされている。これまで惑星の内部構造を議論する際には、惑星内部が全対流する構造を仮定してきた (e.g. Fortney et al., 2011)。しかし、惑星内部で全対流していない可能性も示唆されている。惑星内部の組成構造が一様である場合、温度勾配が断熱温度勾配を超えると惑星内部において対流が起こる。しかし、惑星内部の組成構造に勾配が存在する場合、対流が組成による勾配の影響を受けてしまうため、対流しているときの温度構造が断熱温度勾配だけで決まらなくなってしまう。このような条件は Ledoux criterion と呼ばれるが、平均分子量の勾配によって熱輸送の鈍化が定式化されていた (e.g. Chabrier & Baraffe 2007)。Leconte & Chabrier (2012) は、質量と半径が与えられた巨大ガス惑星 (木星・土星) に対して、惑星内部での組成構造による熱輸送の鈍化の影響に注目し、木星・土星の重元素量の分布およびコア質量の理論的推定にどのような影響を与えるか議論した。同様の影響は、近年発見数が増えてきたホットネプチューン (高温環境下にある海王星型の系外惑星) でも起こると考えられる。木星型惑星はその質量-半径の関係から水素ヘリウムが主体であると考えられるが、ホットネプチューンはその質量-半径関係から、水素ヘリウムの質量比が惑星ごとに多様性をもっている。ホットネプチューンの水素ヘリウム質量比を理論的に推定することは、惑星の起源や進化を理解する上で重要な問題である。しかし、惑星内部の組成勾配の影響によって、水素ヘリウム質量比の理論的推定値がどのように変化するかはまだ議論されていない。

そこで、本研究では水素ヘリウムエンベロープに水分子が混ざった場合の Ledoux criterion による温度勾配を計算し、非一様な内部組成分布を持つホットネプチューンについて、惑星内部で組成勾配が維持される状況における内部構造とその水素ヘリウムの質量比に対する、理論的な推定への影響を議論した。水分子が混ざった水素ヘリウムエンベロープをまとった惑星の半径を計算すると、惑星深部のエントロピーが物質の混合と温度勾配の影響によって変化するため、それに応じて惑星半径も変化することがわかった。また、実際に存在する系外惑星に対しても、質量半径の関係から求められる水素ヘリウム大気量の定量的な違いについて議論する。

巨大ガス惑星の熱進化： 重元素分布の不均質性と二重拡散対流の影響について

○黒川宏之¹, 犬塚修一郎¹

¹ 名大理

多くの太陽系外巨大ガス惑星について、理論的予想と比較して惑星半径が最大で2倍程度大きいという、“半径異常”が観測されている (Brafte et al, 2014)。この半径異常を説明するメカニズムとして、惑星内部の重元素分布の不均質に起因する層対流の発達による、冷却収縮の遅れが提案されている (Chabrier and Baraffe, 2007)。また、太陽系内のガス惑星においても、重元素分布の不均質による層対流の発達は、土星の光度異常を説明するメカニズムとして着目されている (Leconte and Chabrier, 2013)。層対流発生の原因となるガス惑星内部での重元素分布の不均質は、形成過程における微惑星降着や形成後の固体コアの浚渫により、自然に発生することが期待されている。

上述の先行研究では層対流構造の存在を仮定していた。しかし、層対流の発生は温度勾配と平均分子量勾配の兼ね合いによって決まっている (Rosenblum et al., 2011; Mirouh et al., 2012)。平均分子量勾配がない場合の対流条件である Schwalzschild 条件で不安定かつ、平均分子量勾配がある場合の対流条件である Ledoux 条件で安定な系において、熱拡散と組成拡散の速さの違いによって発生する小スケールの対流、二重拡散対流が発生する場合がある。さらに、その中の限られた条件の系において、二次的な不安定性により、多数の対流層と境界層の連なりである、層対流が発生する。一方、Ledoux 条件に対して不安定な場合、通常のオーバーターン型対流が発生する。

本研究では、温度勾配と組成勾配の兼ね合いによる対流様式の変化を考慮したガス惑星の熱進化計算を行った。層対流領域では Leconte and Chabrier (2012) の層対流モデルを用い、オーバーターン型対流領域では平均分子量勾配を考慮した混合距離理論 (Stevenson and Salpeter, 1977; Umezu and Nakakita, 1988) を用いた。平均分子量勾配と層対流の層の厚みはパラメータとした。

結果、時間進化によって、対流様式はオーバーターン型対流から層対流、最終的には対流安定な状態へと進化することがわかった。平均分子量勾配が大きく、層対流の層の厚みが小さいほど、層対流の発生する領域は大きくなった。逆に、平均分子量勾配が小さく、層対流の層の厚みが大きい場合、オーバーターン型対流が優勢となる。また、平均分子量勾配が大きく、層対流の層の厚みが小さいほど惑星形成から数十億年後の惑星半径は大きくなった。特に、惑星半径は平均分子量勾配に対する依存性が大きいことが明らかとなった。

平均分子量勾配がある場合、オーバーターン型対流・層対流いずれの場合でも超断熱温度勾配となり、冷却収縮は遅くなるが、組成不均質の緩和時間は大きく異なる。オーバーターン型対流の場合、組成分布は短い時間で均質となるため、組成不均質を維持するためには、層対流構造の発生が重要である。本研究の結果から、層対流発生には、層対流の層の厚みが十分に薄い必要があることがわかった。流体計算による層対流の研究 (Rosenblum et al., 2011 など) では、層対流発生時の平衡状態の有無、平衡状態における層の厚みについては結論が出ておらず、さらなる研究が期待される。また、惑星の冷却収縮にともない、対流様式はオーバーターン型対流から層対流へと変化することがわかったが、これは惑星形成過程で決まる初期エントロピー (初期の全エネルギーに対応) に、惑星進化が依存することを示唆している。

巨大惑星による原始惑星円盤ギャップの形成： ギャップ構造と密度波の減衰

○金川和弘¹、田中秀和¹、武藤恭之²、谷川享行³、竹内拓⁴

¹北海道大学低温科学研究所、²工学院大学、³産業医科大学、⁴東京工業大学

原始惑星系円盤で十分に成長した惑星は、円盤との重力相互作用によって周囲のガスを吹き飛ばし、惑星軌道に沿ってリング状のガス密度が減少した領域(ギャップ)を作る。このようなギャップの形成は、最近の観測によって発見されている、インナーホールを持つ「遷移円盤」やリング状の隙間を持つ「前遷移円盤」の形成に直結する過程であると考えられている。このような円盤観測の結果と惑星形成を結びつけるために、惑星によるギャップ形成の理論モデルの構築が求められている。

また、ギャップの形成による惑星周辺の円盤面密度の低下は、惑星への円盤ガスの降着を制限し、惑星の成長を妨げる。さらに、例えばタイプ I 惑星移動からタイプ II 惑星移動への遷移のように、ギャップの形成は惑星移動を定性的に変えてしまう。このため、観測結果を理解するためだけでなく、相互に依存しあう円盤面密度と惑星質量・軌道の進化を理解するうえでも惑星質量とギャップの深さの関係を理解することは重要である。

我々の円盤中の密度波の伝播と動径方向の圧力勾配による円盤回転則の変化を考慮した 1 次元理論モデルを用いた解析によると、密度波が減衰する位置によってギャップの幅だけでなく深さが大幅に変わることが示唆されている。

そこで、我々はギャップが開いた状態で実際に密度波がどのように減衰するのかを調べるために公開されている数値流体計算コードである FARGO を用いて木星サイズの惑星まわりのギャップ形成の数値流体計算を行った。従来研究では密度波は円盤粘性や衝撃波による散逸によって惑星近傍ですぐさま減衰し、惑星から受け渡された角運動量を円盤ガスに渡すと考えられてきた。しかし、今回の行った数値流体計算の解析結果はその描像とは異なり、密度波は相当量の角運動量をギャップの外側まで運んでいることを示唆している。本講演では、この結果を紹介しつつ、密度波の減衰過程とギャップの幅・深さの関係について議論する。

内縁進化を考慮した原始惑星系円盤の粘性進化

○ 今枝佑輔^{1,2} 戎崎 俊一²

¹ 東京工業大学, ² 理化学研究所

惑星上に生命が発生する一つの要件として、水が液体の状態で存在するという条件だけでなく、誕生する惑星に定量的に過不足のない水が持ち込まれる必要がある。海がない状態も、全球が海で覆われてしまうような状況も、生命発生には不利に働く (Dohm et al. 2013)。また、様々な有機物がどの程度その惑星に持ち込まれるかも重要なファクターとなる。従って惑星が誕生する環境で、どのような物質が固相にあり、どのような物質が気相に存在するかを知ることが重要であり、中心星からの距離と時間の関数として密度や温度がどのように長時間進化するかを知る必要がある。もちろん、このような大局的な密度構造の長時間進化を理解することは、形成された惑星の migration を議論する上でも重要である。

そこで本発表では原始惑星系円盤の 1 次元長時間粘性進化にもう一度立ち返り、原始惑星系円盤の密度進化を詳細に調べる。原始惑星系円盤の粘性進化については古くから様々な研究が行われている (近年でも Matsumura et al. 2009, Morishima 2011 等)。そこには磁気回転不安定 (MRI) の起動不起動に伴うデッドゾーン形成と密度構造の形成、中心星の電離光子がガス円盤表面を炙り電離することでガス散逸を促す光蒸発過程などの物理が取り入れられている。

今回、我々は特に、ガスの動圧に比べ中心星磁場が優勢となる領域においては円盤ガスの動的降着が促され、ガスが原始惑星系円盤から急速に取り除かれる効果を取り入れた。これにより、円盤ガス内縁部が時間 (質量降着率の減少) と共に徐々に晴れ上がる。また、中心星起源の高エネルギー粒子 (=宇宙線) の動径分布を定量的に見積もることにより円盤内縁領域においても磁気回転不安定が生じさせるだけの電離度が保たれ、強い粘性降着が維持されうる効果についても取り入れた。MRI の起動不起動については、Turner and Drake (2009) や Okuzumi and Hirose (2011) 等を参考に判定し、高さ方向どの程度の質量割合で (MRI) が生じうるかを見積もり実効的な粘性計数を決定している。その際必要となる電離度については、各半径ごとに面密度と電離宇宙線の量から Fujii et al.(2011) にならい、電荷のダスト上への吸着・離脱の平衡解として求めた。これらを使い、内縁位置の進化を伴う原始惑星系円盤の長時間進化について発表する。

ずれ境界条件を導入した高次精度 MHD シミュレーションコードの開発と磁気回転不安定性の非線形発展に関する計算機実験

○平井研一郎¹, 加藤雄人¹, 寺田直樹¹

¹東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

原始惑星系円盤における磁気回転不安定性(MRI)は、円盤内で乱流を発生させることにより角運動量輸送を生じさせ、中心星への質量降着の主たる駆動源となると考えられている。近年の研究で、磁気回転不安定性によって発生する乱流が微惑星形成段階においても重要な働きをする事が示唆されている。円盤中のガスは、中心星から外側へ向かう圧力勾配力により、ケプラー速度より遅く回転する。このため、ダストとガスが共存する微惑星形成段階においては両者に回転速度差が生じ、ダストに働くガスの摩擦や衝突の効果によりダストが角運動量を失い、微惑星形成よりも短い時間スケールで中心星に向かい急速に落下する (e.g. Wheadenschilling, 1974)。この問題に対し Kato et al. (2013)では、円盤内の一部を対象とした MHD シミュレーション中でダストの運動を解き進め、1メートルサイズのダスト天体が、MRI が非一様に発生する領域でどのように運動するのかを調べた。その結果、非一様な MRI の発生でガスの回転速度分布が変化することで、ガスの回転速度がダストの回転速度を上回り、その結果としてダストの落下速度が緩和され、微惑星が形成されやすい領域が形成されることが示唆された。微惑星形成段階においては、MRI の効果以外にも、ダストとガスの相互作用によって発生する Kelvin-Helmholtz 不安定性(e.g. Sekiya,1998)や streaming 不安定性 (Youdin & Goodman, 2005)、円盤風によるグローバルな円盤構造の時間変化(Suzuki et al., 2010)など、様々な現象がダスト運動に影響を及ぼす。これらの影響を取り入れることができる MHD シミュレーションを行うためには、乱流の短波長成分に対して高い解像度を持ち、なおかつ不安定性で発生する不連続構造で計算が破綻しないスキームを用いる必要がある。

本研究では、Kawai (2013)により提案されたコンパクト差分法に磁場のソレノイダル条件を乱さずに数値粘性を入れる LAD 法を組み合わせたスキームを用いて、ずれ境界条件を導入した MHD シミュレーションコードを開発した。開発したコードを用いて、軸対象な円盤を仮定した空間 2 次元の系での MRI の成長と非線形発展に関する計算機実験を行った。MRI の最大成長波長の線形成長と非線形段階について、グリッド数を様々な変化させてシミュレーションを行ったところ、線形段階に関しては少ないグリッド数でも成長率は変わらなかったが、非線形段階の飽和レベルはグリッド数に依存する結果となった。本発表では、開発したコードの概要と、計算機実験の詳細な結果を報告し、惑星形成過程への影響について考察する。

原始惑星系円盤における有機物粒子の時空間変化

○沼田実穂¹, 永原裕子¹

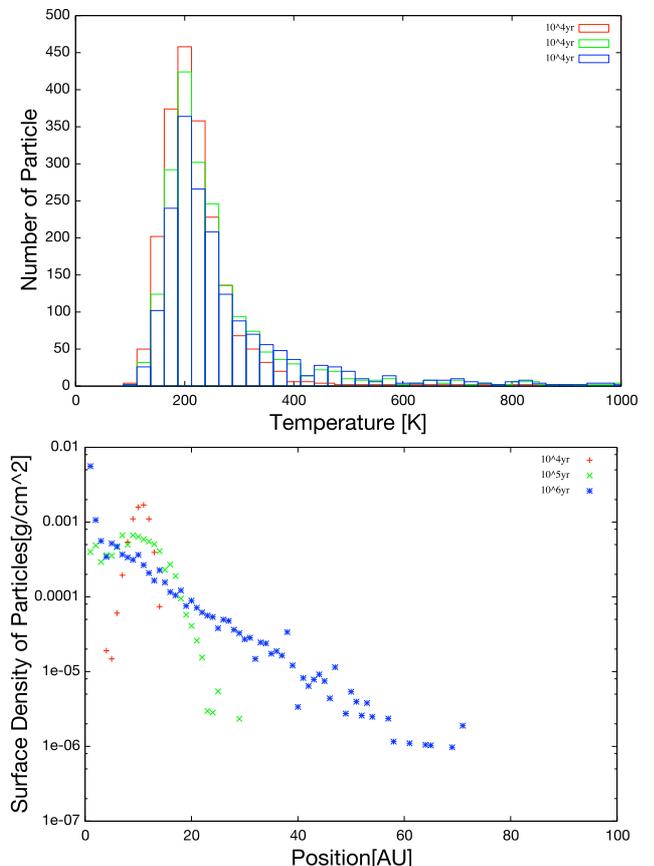
¹東京大学地球惑星科学専攻

星形成初期の分子雲において生成された高分子有機物が、惑星や小天体の生命素材となりうるかという問題は惑星と生命起源の根幹問題の一つである。Nakano et al.(2003)では、隕石中に存在する有機物が分子雲由来有機物の蒸発実験で得られた結果と異なる C/N 比を持つことから、隕石母天体の有機物は分子雲由来ではないと論じた。しかし、粒子は原始惑星系円盤の中での移動を通じて様々な温度圧力条件を経験したはずであり、円盤進化の過程で多様な化学的特徴を持ちうる。Ciesla(2010a)は円盤の進化モデルとそれに伴う揮発性物質の形成を、Ciesla(2012b, 2011)は定常円盤での粒子移動モデルを構築し、物理と化学の結合への道を開いた。

本研究では、Ciesla(2010a, 2011)の Lagrangean 的手法にのっとり、円盤進化と粒子の移動を同時に数値的に解き、有機物粒子が経験する温度を検討した。円盤の面密度の進化については粘性拡散モデルを用いた。粒子の運動は Fokker-Planck 方程式に基づき中心星への重力・ガス圧勾配・ガスの粘性・乱流を考慮し、乱流は確率的なものとして扱った。このモデルによって個々の粒子が到達する位置および経験する温度が、初期状態の中心星からの位置によってどのように変化するか数値シミュレーションを用いて調べた。

図は 10AU から移動した粒子が経験する最高温度の頻度分布と粒子の面密度分布である。Nakano et al.(2003)によると 313K 以下ではすべての粒子が蒸発せずに残り、450K を超えるとほとんどが蒸発することが示されている。10AU から移動した粒子は、 10^6 年後でも 450K を超えるものはほとんどなく、生き残って中心星近傍へと移動するものが多いことがわかる。 10^5 年後には 10AU 以内に多くの粒子が移動し、 10^6 年後には 5 AU 以内の領域に有機物粒子が多く存在することになる。

この結果は、分子雲由来の高分子有機物が蒸発に耐えて円盤内を移動し、隕石母天体や氷微惑星などに取り込まれうることを示唆している。



原始惑星系円盤における 水氷の吸収帯に表れる光脱離反応の効果

○高附翔馬¹, 中本泰史¹, 井上昭雄², 本田充彦³

1 東京工業大学, 2 大阪産業大学, 3 神奈川大学

原始惑星系円盤において、水氷は円盤進化や惑星形成に関わる重要な要素である。現在、原始惑星系円盤の水氷観測が可能となり盛んに行われている。

また、水氷の吸収によって表れる波長 $3\ \mu\text{m}$ の feature を用いる手法により、HD100546周りの円盤表層に水氷の存在が明らかになってきた(Honda et al.(2009))。しかしその一方で、理論的にはこの円盤の表層に氷が存在しないと考えられてきた。なぜなら、HD100546はHerbig Be型星であり、Oka et al.(2012)によると水氷に対するFUVの光脱離反応が強く効くからである。

そこで、我々はHD100546円盤をモデルに光脱離反応が有意に効く天体に対して水氷の $3\ \mu\text{m}$ featureがどれほど表れるか調べた。ダストはシリケートと水氷の2成分、ダストサイズについて4モデル(半径 $0.1\ \mu\text{m}$, $0.3\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$, $3\ \mu\text{m}$)、光脱離反応について2モデル(光脱離反応の効果: 有、無)を仮定し、それらのモデルに対して散乱光の輻射輸送計算を行った。

本研究では水氷の $3\ \mu\text{m}$ featureに表れる光脱離反応の効果を評価する量として、[H2O depth]を導入した。これは $3\ \mu\text{m}$ featureの両隣の測光バンドであるKバンドとL'バンドの輝度を基線としたときのそれに対する波長 $3\ \mu\text{m}$ の輝度の減光等級である。結果から、ダストサイズが大きいほど光脱離反応有無による[H2O depth]の差が大きいことがわかった。また、光脱離反応有モデルではいずれのダストサイズでも $3\ \mu\text{m}$ featureが表れた。これより、水氷に対するFUVの光脱離反応が強く効くHerbig Be型星でも水氷の吸収による波長 $3\ \mu\text{m}$ のfeatureが表れることが判明した。ただし、[H2O depth]にはダストサイズと光脱離反応の効果が縮退しているため、定量的な議論をするにはさらなる検証が必要である。

モノマーサイズ分布のあるダストアグリゲイトの衝突とイジェクタ量

○和田浩二¹, 田中秀和², 小林浩³, 奥住聡⁴, 木村宏⁵

¹千葉工業大学惑星探査研究センター,

²北海道大学低温科学研究所, ³名古屋大学大学院理学研究科,

⁴東京工業大学大学院理工学研究科, ⁵神戸大学/惑星科学研究センター

原始惑星系円盤においてダストアグリゲイトの衝突過程は微惑星形成を考えるうえで重要な要素である。特に、原始惑星系円盤で想定される数 10m/s という速度で衝突した時にダストが成長できるか? という疑問や、衝突の際に生じる放出物（衝突後の最大サイズのアグリゲイト以外の破片を放出物、すなわちイジェクタと定義する）の総量がどれくらいになるか? といった物理量を明らかにすることが重要となる。ダストアグリゲイトはおよそ 0.1 ミクロンほどのモノマー粒子から構成されると考えられており、これまで筆者らの研究においては半径 0.1 ミクロンの等サイズ粒子からなるアグリゲイト同士の衝突シミュレーションを行ってきた。結果として氷ダストの成長限界速度は 60m/s にも達すること、アグリゲイトのサイズ比がついた衝突ではイジェクタ総量は小さい方のアグリゲイトの運動量に比例すること、などが明らかにされてきた。しかしながら、星間塵の観測からも示唆されるようにモノマー粒子にはサイズ分布が存在すると考えるのが自然である。本研究ではサイズ分布のあるモノマー粒子で構成されたアグリゲイト同士の衝突の数値シミュレーションを行い、付着成長限界速度や放出されるイジェクタ量におけるサイズ分布依存性や構成粒子数依存性を議論する。

モノマーサイズ分布については、粒径の -3.5 乗に比例するような冪分布を仮定し、最少・最大粒径はそれぞれ 0.025 ミクロン、0.2 ミクロンとした。また、構成粒子数が 6,600 と 198,000 のアグリゲイトを用意し、それらの等サイズ衝突のシミュレーションを行った。予備的な結果によれば、モノマーサイズ分布を考慮した分、成長限界速度はわずかに増すが、劇的に増加するわけではないこと、カタストロフィック破壊が生じないような比較的小さな衝突速度ではイジェクタ総量はアグリゲイトの運動量に比例すること、などが明らかになりつつある。これらは、エネルギー散逸が効率よく生じる多数の粒子からなる系の性質を良く反映したものであると理解され、サイズ比のついた衝突なども含め今後も引き続きダストアグリゲイトの衝突過程を明らかにしていく予定である。

層流円盤におけるダストの沈殿成長過程で生じる レイリー・テイラー不安定性

○石津尚喜

自然科学研究機構 国立天文台

原始惑星系円盤に一樣に分布していたサブ μm のダストが合体成長して微惑星が形成される過程において、ダストが円盤中心面に沈殿し成長する過程を知ることは重要である。ここでは層流状態の円盤を考える。ダストは中心星の重力の円盤鉛直成分により沈殿を始める。中心面から離れる(以降、上空と呼ぶ)ほど大きな重力が働き、大きな速度で沈殿する。よって、上空ではダストの合体成長が速くなる。ダストが成長するとさらに沈殿速度は増加する。層流状態にある円盤でのダストの沈殿と合体成長のシミュレーションが多くなされている。これらのシミュレーションは、上空の沈殿速度の増加によりある高さにダストが集まり、ダスト密度分布に逆転層が形成されることを示した(Nagagawa et al. 1981)。このような密度逆転層はレイリー=テイラー不安定(以降 R-T 不安定)であることが知られている。この不安定性が生じると、ダスト密度逆転層部分が不安定によって生じた流れによって、ダスト密度分布が一定になることが示された(Yamada & Watanabe 2000)。この過程によって得られるダスト密度分布は、さらなるダスト分布の進化計算や、ダストが中心面付近に沈殿して生じるシア不安定性やストリーミング不安定性の初期条件として重要である。ここでは R-T 不安定性によって生じるダスト密度分布やどの段階で不安定性による摂動の成長が顕著になるのか調べる。

本研究では、ガスとダストの相互作用を考慮した数値シミュレーションを行った。ガスは非圧縮流体とし、ダストはガス流体として取り扱っている。計算に用いられたパラメータは、ストークス数(ダストの摩擦時間とケプラー角速度の積)が 10^{-4} の場合で、林モデルで1 AU ではそれぞれ直径1mmのダスト粒子に相当する。初期ダスト分布としては、中心面からある高さのところにピークがあるガウス分布とした。ピークでのダスト密度は中上面のガス密度の0.1倍である。シミュレーションの結果、これまでも示されていたとおり、逆転層部分のダスト密度分布は一定となった。不安定の成長率は、与えられたダスト密度分布が得られる Brunt-Väisälä 振動数の最大値程度の値であった。不安定が開始してからダストの密度分布一定になるまでの時間も初期の分布から見積もられることが分かった。

周惑星粒子円盤の進化と衛星系の多様性

○兵頭龍樹¹, 大槻圭史¹, 武田隆顕²

¹神戸大学理学研究科、²ヴェイサエンターテイメント株式会社

太陽系に存在する惑星の衛星系は、地球-月のような中心惑星に対して比較的大きな1つの衛星をもつ系と、土星のリング近傍の小衛星群、あるいは天王星の衛星系のように複数の衛星が存在する衛星系に大きく分類できる。複数衛星系では、衛星は中心惑星のロッシュ半径のすぐ外側に存在し、中心惑星から離れるほどその質量は大きくなるという、共通の特徴がある。

単一衛星系の形成過程として巨大衝突等で中心惑星周囲に形成された比較的重い粒子円盤 ($M_{\text{disk}}/M_c \sim 0.05$, M_{disk} : 円盤質量, M_c : 中心惑星質量) が拡散進化することで、惑星のロッシュ半径の外側で集積した結果として一つの比較的重い衛星が形成されることが確認されている (Ida et al. 1997, Kokubo et al. 2000)。一方、より低質量な円盤の拡散進化による複数衛星系の形成モデルが近年提唱された (Crida & Charnoz 2013)。しかし、初期円盤の外側に一つの衛星を配置した状態を初期条件として円盤進化 N 体計算を用いて解くことで、二つ目の衛星が形成される様子を確認した研究 (Takeda 2002) はあるが、円盤構成粒子同士の相互作用を全て考慮した3次元の円盤進化を通して複数の衛星が連続的に集積する過程を示した N 体計算は行われていない。

本研究は粒子間の相互重力と衝突を考慮した N 体計算を用いて、初期に中心惑星のロッシュ半径の内側に制限された粒子円盤の進化を詳細に調べることを目的とする。本研究では中心惑星質量で規格化された初期円盤質量 (M_{disk}/M_c) をパラメータとして、円盤進化と形成される衛星への依存性を調べた。

その結果、より低質量な円盤進化においては1つ目の衛星が形成された後に2つ目の衛星が2:1軌道共鳴に捕獲されて形成されることを確認した。また、比較的重い円盤から単一衛星系が形成される場合、衛星質量は初期円盤質量に線形に依存するが (Ida et al. 1997, Kokubo et al. 2000)、初期円盤質量がより低質量となり、2つ目の衛星が形成される場合、1つ目の衛星質量は、より強く初期円盤質量に依存することが分かった。

捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布

○末次竜^{1,2}、大槻圭史²

¹神戸大学自然科学系先端融合研究環、²神戸大学大学院理学研究科

巨大惑星周りの衛星は規則衛星と不規則衛星に分類できる。ガリレオ衛星などの規則衛星は、惑星の近傍をほぼ円軌道で公転している。こうした軌道の特徴から規則衛星は、巨大惑星形成時に惑星周りに形成された周惑星円盤内で固体物質が集積することで形成されたと考えられている。

規則衛星の材料となった固体物質は、元々太陽周りを公転していたが、ガスとともに周惑星円盤内に流入してきたと考えられている (Canup & Ward 2002)。こうした固体物質の周惑星円盤への供給過程は、主に軌道計算を用いて調べられつつある (e. g., Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)。例えば Fujita et al. (2013) では、周惑星円盤からのガス抵抗による微惑星サイズの固体物質の捕獲過程が調べられ、惑星近傍にあった微惑星も衛星の材料となった可能性が示唆された。また最近、Tanigawa et al. (2014) では流体計算の結果を軌道計算に組み込んで、巨大惑星周りの複雑なガス流からのガス抵抗の効果を検討した計算を行い、様々なサイズの固体物質の周惑星円盤への供給過程を調べた。このような研究によって太陽周りを公転していた固体物質の周惑星円盤への供給過程は調べられつつあるが、周惑星円盤へ供給された後の固体物質の円盤内における空間分布は明らかにされていない。捕獲された後の固体物質の分布は、規則衛星の形成過程や進化過程に影響を与えうるため、重要である。そこで本研究では太陽周りを公転していた微惑星が周惑星円盤によって捕獲され、その後、周惑星円盤内で捕獲された微惑星がどのような分布になるのかを調べた。

本研究では太陽の周りを惑星と無数の微惑星が公転している系を考え、惑星の周りには軸対称の周惑星円盤を仮定した。また今回の計算では微惑星間の重力相互作用は無視した。計算の結果、微惑星が初期に円軌道の場合、微惑星の周惑星円盤内での面数密度は単純なベキでは示せないことがわかった。また離心率や軌道傾斜角を考慮した場合の結果についても示す予定である。

Are Planets Rare in Embedded and Open Clusters?

○Yasunori Hori¹ and Michiko S. Fuji²

¹ Department of Astronomy & Astrophysics, University of California, Santa Cruz

² Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan

Star clusters are the birthplace of most of stars. In a cluster environment, stellar encounters can liberate planets from their host stars. Few planet-hosting stars are known in open clusters in contrast to the field, whereas the detection probability of planets suggests that the planet population in open clusters resembles that in the field. We perform a series of N-body simulations of open clusters similar to the Pleiades, Hyades, and Praesepe and embedded clusters in order to examine the survival rates of planets against stellar encounters. In all cases, most of stellar encounters occur before 10–100 Myr and massive stars such as BA-type stars experience more frequent encounters than low-mass stars due to mass segregation. We predict that the giant-planet frequency in star clusters depends more weakly on the stellar mass than in the field. Only less than 1% of close-in planets within 1 AU and at most several % of planets with 1–10 AU get ejected from star-planet systems. This implies that non-detection of planets in the Pleiades may be due to the incompleteness of planet searches. We estimate the occurrence rates of giant planets with 1–13 M_{Jup} between 1–10 AU to be 22.6–23.6%, 17.1–17.8%, 11.5–12.0%, and 3.8–3.9% for FGKM stars, respectively. Wide-orbit planets at > 10 AU suffer from destructive encounters. The production rates of free-floating gas giants per star are estimated to be 0.122 ± 0.049 in embedded clusters, 0.0385 ± 0.0154 and 0.174 ± 0.069 in low-density and high-density open clusters, which are one order of magnitude lower than the results of microlensing surveys. This suggests that stellar encounters in open clusters are not main pathways of producing free-floating planets.

分子雲に埋もれた星団および散開星団における惑星の生存率

○堀 安範 (カリフォルニア大学サンタクルーズ校), 藤井通子 (国立天文台 理論研究部)

恒星の大部分は星団環境下で誕生する。これまでに4,000個以上の惑星候補天体が発見された散在星に比べて、散開星団内では10個の惑星候補天体しか報告されていない。遠く離れた星団では惑星の検出効率が低いため、限られた惑星発見数である可能性もある。一方で、星団環境下での外的要因(大質量星からの恒星風やXUV照射)や恒星同士の近接遭遇で、惑星形成の阻害あるいは惑星の系外放出の可能性も考えられる。そこで、本研究では後者の力学過程に着目して、分子雲に埋もれた星団および散開星団の力学進化をN体計算し、星団内での惑星の生存率を求めた。惑星系を破壊するような恒星の近接遭遇の大部分は、1千万年から1億年(星団の二体緩和時間程度)以内に生じていた。重い星ほど星団の中心部に集中しやいため、B型やA型星のような大質量星ほど頻繁に近接遭遇を経験する。その結果、星団内では、巨大惑星の存在頻度と中心星質量の依存性は、散在星で見られる傾向よりも弱くなると予想される。1 AUおよび1–10 AU以内の惑星系は近接遭遇でほとんど破壊されることはなかった(それぞれ1%, 数%以下である)。我々の結果は、惑星が発見されている他の散開星団(M67)と似た特徴を持つ「昴」で、現在までに惑星の発見例がないのは、不十分な惑星探査に起因している可能性を示唆している。一方で、10 AU以遠の惑星は恒星遭遇の影響を強く受ける。系外放出された惑星は、星団の脱出速度よりも一般に大きな速度分散を有するため、最終的に星団外で浮遊惑星になる。そこで、直接撮像観測から推定されるガス惑星分布を用いて、浮遊ガス惑星の生成率(系外へ放出される10 AU以遠の惑星の割合)を調べた結果、3.9–17%程度と重力 μ レンズが示唆する存在率より遥かに小さい値となった。このことから、星団環境下での恒星遭遇は、浮遊ガス惑星の主な生成過程ではないだろう。

巨大衝突での衝突に伴う原始惑星の離心率減衰

○ 松本侑士¹, 長沢真樹子², 井田茂³

¹ 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト, ² 東京工業大学 地球惑星科学専攻,

³ 東京工業大学 地球生命研究所

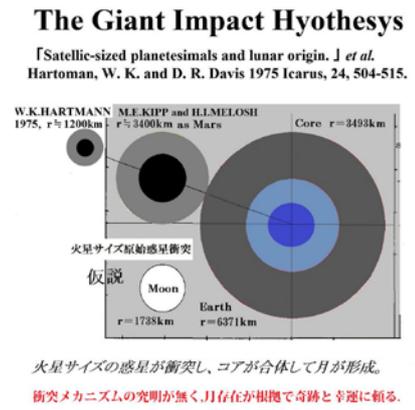
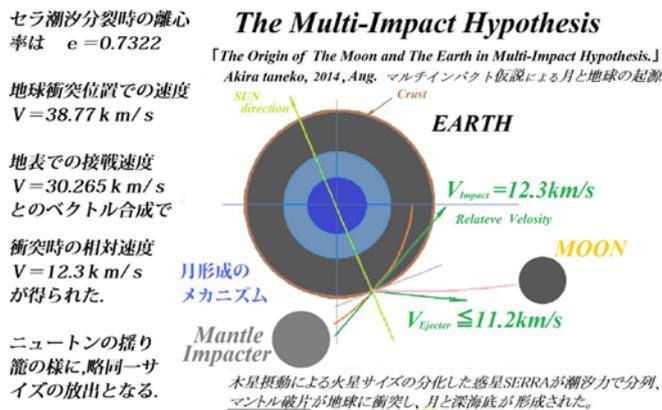
観測精度の向上により、現在までに視線速度法により 60 個程度の岩石あるいは氷惑星と思われる 30 地球質量以下の惑星が 60 個程度発見されている (e.g., Dumusque *et al.* 2012)。これらの惑星の離心率を調べると、散乱によって与えられる値を多くの惑星が下回っていた。この傾向は軌道長半径が 0.1AU を超える、潮汐による離心率減衰の効果の少ないと思われる惑星でも見られた。惑星の離心率成長は主に微惑星の成長段階についてよく調べられている。巨大衝突段階では原始惑星は散乱と衝突によって離心率が変化していくと考えられる。微惑星の離心率は衝突によって大きく変化しないことが明らかになっており (e.g., Ohtsuki 1992)、これを巨大衝突段階に適用すると、惑星の離心率は散乱で与えられる程度の値になることが予想される。一方で、巨大衝突段階の N 体計算をした Kokubo *et al.*, (2006) の結果形成した地球質量程度の惑星の離心率は $e \sim 0.1$ であり、散乱による離心率 0.28 よりも小さい。これは何らかの離心率減衰が働いたことを示唆している。

衝突によって離心率が変化しない理由は微惑星同士の衝突が軌道上でランダムに起きるためである。このようなランダムに衝突が、寡占成長を経て軌道間隔を空けて並んだ原始惑星でも軌道上で起きるかどうかわかってはいない。そこで、本研究では原始惑星の衝突に着目して、巨大衝突段階の N 体計算を行い、原始惑星の離心率進化を調べた。衝突は Kokubo *et al.*, (2006) と同じく完全合体を仮定した。20 ランを行った計算から 203 回の衝突を取り出すと、衝突後の惑星の離心率は衝突前よりも小さくなっていることがわかった。これは原始惑星同士の衝突が近点経度差が 180° に集中して起きることに起因する。惑星のランダム速度は近点からの角度に依存して変化する。衝突時に近点が 180° ずれている場合、ケプラー速度よりも速い惑星と遅い惑星が衝突することになるので、衝突後の惑星はケプラー速度に近づく。このため衝突後の惑星の離心率は 0 に近づく。

また本研究では惑星を 3 体置いた計算をパラメータを振って行うことで、近点経度差が 180° ずれた衝突が起きる条件を調べた。計算は 1 パラメータにつき 100 回の行った。この計算から初期に軌道が交差しているような条件では衝突時の惑星の近点経度差は 180° に集中せず、ランダムな衝突をすることがわかった。また、惑星半径が大きい、あるいは軌道長半径が小さい時も近点経度差はランダムになりやすいことがわかった。また、解析的な見積もりで衝突時の近点経度差の 180° への集中を表すことに成功した。この計算及び解析から、衝突による離心率減衰の起きやすい原始惑星系について本発表では議論する。

木星摂動によるSERRA 潮汐分裂仮説とマントル分裂片地球衝突による月形成のメカニズム
 種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2014-9.

口頭発表^[3]の図2に示す様に、木星摂動で原始惑星SERRAの軌道が太陽を焦点として楕円軌道が約5億年程かかり更に偏平化すると、木星近点に近づくと共に地球軌道とも交差する状況となる。木星近点側で潮汐力により、コアリッチ破片と複数マントル破片に分裂し、コアリッチ部分は太陽に向かい衝突するか、水星となった可能性が高い。複数のマントル破片は同じ軌道を周回し、下図左側の様に接線衝突し、速度が計算可能である。



その値は、地球の公転・自転の速度と後方接線速度の合成で、相対衝突速度は12.3km/sとなる。反発係数eを考慮すると第二次宇宙速度11.2km/s以下となる。月の現在軌道距離 $60 \cdot R_E$ では11.0km/s程度が必要である。本仮説では衝突位置が太平洋となり、衝突による亀裂がプレート境界の起源である更に時間差衝突のマルチインパクトで複数の深海底も形成された。慣性モーメントの偏芯は大陸移動説や海底更新説の駆動力と推定される。他の破片は冥王星(マントル破片)や水星(コアリッチ破片),更に木星へ衝突し大赤斑の起源と推定した。マルチインパクトは度重なる生物大絶滅の根拠となり、海が70%を占める理由でもあり、プレート境界亀裂の起源も理解できた。隕石が分化した鉄隕石や石鉄隕石や石質隕石とコンドライトが混在する事や、セレス位置に小惑星帯が有る事も全て素直に理解できる。

逆にジャイアントインパクト仮説の仮定する衝突速度は0~8km/sなので、射出速度は第一次宇宙速度7.9km/sを超える事が無く、しかも月は $3R_E$ の距離にしかできない。それ以上の速度では、地球へのダメージが大きく、更に破片も全ての方向に飛散する問題が有った。

<結論> 本仮説^[3]では、フィーディングゾーンもセラ位置で、惑星分化も保障されており、しかも射出速度が第二次宇宙速度より若干少ない程度と、現在の月軌道を説明可能である。

更に、小惑星帯の起源と分化した隕石の起源、深海底の起源、プレートテクトニクスの境界亀裂の起源、プレートが他のプレートの下に潜り込む理由、プレート移動の駆動力、地殻無いプレートの起源、キンバリーパイプの起源、地軸23.5度傾きの起源、木星大赤斑の起源、コア割偏芯の起源、冥王星の起源等、全てを統一的に究明できた。 種子彰

^[3]「木星摂動でSERRA 潮汐分裂とマルチインパクト仮説による月と地球の起源 2014-9」

空間量子赤方偏移仮説と新定常宇宙論

Space Quantum Red Shift Hypothesis and New Theory of Non-Expansion Universe

種子彰 TANAKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2014-9.

<現代宇宙論> 定説の膨張宇宙仮説(ビッグ・バン)は、約 160 億年前に一点から爆発的に膨張が始まり、空間が等方的に膨張しているとするものである。これは、遠方からの光の観測結果(赤方偏移)をドップラー効果だけで説明している。問題は赤方偏移の値は時代と共に変遷してきている。更に等方背景輻射(電磁波)は、ビッグバンの名残(宇宙が閉じている)と説明しそれが膨張宇宙の証明だと信じられていた。(他に説明する学説が無かった。)

<ビッグ・バン仮説の問題点> 周波数ドリフトを全てドップラー効果だけで説明。

- (1) 空間の膨張が地球で観測できずに、何故遠方からの光で観測可能という不合理。
 - ・ハッブルの観測法則(彼は膨張を証明していない。最初のハッブル定数=500km/s/Mpc)
- (2) 何故、宇宙が 160 億年前に一点に凝集して膨張し始めたのか、理由が説明できない。
- (3) 宇宙全質量が一点に凝集し、ブラックホールに成らずに膨張し続ける事が、可能か?
- (4) 背景輻射の温度は、ガモフの計算で $6^{\circ} K$ 、デッケの測定値では $3.5^{\circ} K$ であった。

<空間量子赤方偏移仮説> アブダクション =定常宇宙と宇宙半径= $52 \cdot R_s$

宇宙が閉じて且つエネルギー保存則が成り立つと仮定した場合、ランバートの法則による光(拡散進行波)エネルギーが希釈されるとエネルギー保存則と周波数保存は両立しなくなる。この時、エネルギー保存則を優先すれば、波長が赤方(低エネルギー)にズレて観測される。地球中心の赤方偏移等方性は、観測地点が地球である事と宇宙が閉じていれば説明可能である。この様に、ハッブルの法則と背景輻射はビッグ・バン以外でも解釈できた。

しかし、膨張宇宙論では、地球中心は閉じている為と等方性(原理)で説明している。膨張の観測不能をスケールも伸びている風船で説明しているが、遠方の光を観測(赤方偏移)で膨張の観測が可能でも、地上(ここも宇宙)で宇宙の膨張を観測できないという矛盾が残る。

さて、M.Rowan・Robinson 氏が未知の百科事典(1)p95 で、「背景輻射のエネルギー密度(分布プロフィール)が、多くの銀河系から来る星の光を寄せ集めて平均したエネルギー密度と良く似ていることである。こうした星の光を $2.7^{\circ} K$ の黒体輻射の形に変形する方法は見つかっていない。」と述べている。今、宇宙が閉じているならば、宇宙の彼方に進んだ光が逆方向から地球に向かって来ると考えて、太陽(平均的な恒星)光エネルギー密度が閉じた宇宙半径だけ希釈された時、地球(観測地点)中心の赤方偏移が観測される。 エネルギー保存法則と $E=h \cdot \nu$ を考慮すると、希釈されて波長がズレ始める距離 R_s の α 倍の位置では、波長は α^2 倍にズれる。宇宙が閉じていれば、慣性質量は宇宙全ての(引力)の合力であり、宇宙が潰れない理由でもある。ここに、定常宇宙論が完成した。宇宙半径 $52 \cdot R_s$ も計算された。

これはアインシュタインの Z 項より理解し易いと思うし、膨張宇宙論より矛盾が無い。膨張宇宙論では新事実の提案が無く、クエーサーが相対論を利用して光速の 90% で後退する必要が有る。しかも全てビッグ・バンを信じないと始まらない仮説である。

ここに新しい選択肢が示された。貴方は、同じ現象への仮説で、どちらを信じますか。

粒子線照射による種々の組成の模擬星間物質からの

アミノ酸前駆体生成

Formation of Amino Acid Precursors by Particles Irradiation of Possible Interstellar Media with Various Compositions

○松田知之¹, 江藤碧¹, 榎本慎吾¹, 癸生川陽子¹, 金子竹男¹, 大林由美子¹,
吉田聡², 福田一志³, 小栗慶之³, 小林憲正^{1,4}

¹横浜国立大学大学院, ²放射線医学総合研究所,

³東京工業大学原子炉工学研究所, ⁴自然科学研究機構

[緒言] 生命の誕生のためにアミノ酸などの有機物は必要不可欠である。現在、隕石や彗星中には多様な有機物の存在が示唆されている。これらの有機物の起源は、分子雲中の水、メタノール、メタン、アンモニアなどの種々の分子を含む星間塵アイスマントルに宇宙線などが作用して生成したと考えられている。我々は模擬星間物質に粒子線を照射した場合、アミノ酸前駆体が生成することを報告している。しかし生成する有機物の生成機構や、構造の詳細は解明されていない。本研究では出発物の組成を変化させたときの生成物やエネルギー収率を調べることでアミノ酸前駆体の生成機構について検討を行った。

[実験] 陽子線照射: 容積400 mLのPyrex製容器にCO(350 Torr), NH₃(350 Torr)を入れたものと、CO(175 Torr), CH₄(175 Torr), NH₃(350 Torr)を入れたものを作製し、超純水5.0 mLをそれぞれ加えた。前者には、東工大のタンデム加速器から2.5 MeVの陽子線を1—4 mC, 後者には2mC照射した(総吸収エネルギーは1.58 kJ/mC)。生成物をそれぞれCAW, CMAWと呼ぶ。照射生成物中の酸加水分解前後のアミノ酸を陽イオン交換HPLCで分析した。

重粒子線照射: Pyrex製容器にCH₃OH, NH₃, H₂Oをモル比1:1:2.8になるように入れて封管し、放医研のHIMAC重粒子線加速器からの重粒子線を様々な線種(290 MeV/u 炭素線など)、照射線量で照射した。照射生成物は酸加水分解後、陽イオン交換HPLCでアミノ酸を分析した。

[結果と考察] 酸加水分解前のCAW, CMAWからは微量のアミノ酸しか検出されなかったが、酸加水分解後は様々なアミノ酸が高収率で検出された。生成量は概ね吸収エネルギーに比例した。2 mC照射時、CAW(加水分解後)からはGly(76 μmol)が他のアミノ酸と比較して極めて多く検出された。一方、CMAW(加水分解後)ではGly(6.4 mol)の収量がCAWの1/10以下となったが、Ala(13 mol)がGlyよりも多く生成し、アミノ酪酸類やValなどのより炭素数の多いアミノ酸の収量が増加した。COがアミノ酸骨格の生成に大きく寄与したのに対し、CH₄がアミノ酸側鎖の伸長に寄与したことが考えられる。重粒子線照射試料(加水分解後)からもグリシンを主としたアミノ酸が検出されたが、グリシンのG値は10³オーダーで、陽子線照射実験よりも低かった。

現在、出発材料や温度等を、実際の星間環境に近づけた照射実験を計画中である。

星間有機物の亜臨界・超臨界水中における水質変成過程

○松原 康浩¹、中野 英之²¹ 京都教育大学大学院教育学研究科 ² 京都教育大学教育学部

星間分子雲には鉱物、氷、星間有機物からなる 0.1 μm 程度の固体微粒子（星間塵）が存在する⁽¹⁾。星間塵は惑星系の材料となった物質であり、原始太陽系星雲内では星間塵から 10 km 程度の微惑星が形成され、さらに微惑星から隕石母天体が形成される。隕石母天体内部では水質変成作用が起り、鉱物や星間有機物は変成作用を受けて惑星材料物質の化学組成・構造に大きな影響を与えらる。

これまで、鉱物の水質変成については多くの研究が行われてきた。しかし星間有機物については、モデル星間有機物を用いて水質変成過程を再現する研究^(2,3)などが見られるが、あまり行われていないのが現状である。本研究では、これまでに明らかにされてこなかった亜臨界・臨界水下における星間有機物の水質変成過程を明らかにすることを目的としている。

星間分子雲中の星間有機物を入手することはできないため、シミュレーション実験の分析データをもとに試薬を調合して作成した試料⁽⁴⁾を星間有機物のモデル物質として使用した。モデル星間有機物と水を質量比 1:1 に混合した試料 10 g を Hastelloy 製の超臨界オートクレーブ内に封入し、オートクレーブ内を脱気して水質変成実験を行った。試料は常温から目的とする最高到達温度（300 °C, 350 °C, 400 °C, 435 °C）まで電気炉内で加熱した。加熱速度は 3 °C/min とし、最高到達温度に達した後に電気炉の電源を切り冷却し、オートクレーブ内の試料を回収した。出発物質であるモデル星間有機物と水の混合試料は、わずかに褐色がかつた無色透明な物質であったが、400 °C 以上で水質変成実験を行った場合、オートクレーブ内の試料は体積の約 30% を占める黒色の油状の物質と約 70% の体積を占める無色透明の液体の 2 相に分離している様子が観察された。300 °C では、同様に黒色の油状の物質も見られたが、液体の部分は褐色を呈していた。今後は、水質変成後の試料の分析を進めるとともに、隕石母天体内部で水質変成に引き続いて起こったと考えられる熱変成を再現する実験を行い、星間有機物の変成過程を明らかにしていく予定である。

参考文献

- (1) Greenberg 1998, *Astronomy and Astrophysics*, **330**, 375
- (2) Kouchi *et al.* 2005, *Astrophysical Journal*, **626**, L129-132
- (3) Nakano *et al.* 2002, *Proceedings of the Japan Academy*, **78**, Ser. B, 277-281
- (4) Kouchi *et al.* 2002, *Astrophysical Journal*, **566**, L121-L124

氷衛星における生命構成物質の重合反応

木村淳, 北台紀夫

東京工業大学 地球生命研究所

巨大惑星が従える氷衛星は、多量の氷を持つことや地下海の存在可能性などの観点から、地球外生命の発生・居住可能候補地として注目されている。しかしながらその議論に必要な物質化学的な情報は探査手法上の制約が強く、一部の衛星では炭化水素やシアンなどの有機物の存在が確認されているものの、生命関連有機分子の存否に関する情報は極めて限定的である。一方で、スターダスト探査機による Wild 2 彗星でのグリシンの発見や、惑星間環境下における星間塵模擬物質を用いた単純アミノ酸生成実験などを通して、生命前駆物質は宇宙に普遍的に存在することが分かってきた。大部分の衛星は大気をほとんど持たないため、そうした前駆物質は衛星表面へ継続的に供給され得る。また衛星表面での衝突現象や地下海での反応によりアミノ酸が合成される可能性も提示されている。

生命は、タンパク質や DNA/RNA, リン脂質といった生体高分子によって、代謝や自己複製、区画化といった中心的機能が駆動されているが、地球外環境における有機単量体から高分子への進化については理解が進んでいない。本研究では氷衛星（代表例として木星衛星エウロパをとりあげ）内部の熱構造を理論的に見出し、その温度圧力環境におけるアミノ酸重合反応 ($2\text{Aminoacids} \rightarrow \text{Dipeptide} + \text{H}_2\text{O}$) やヌクレオシド生成反応 ($\text{Nucleobase} + \text{Ribose} \rightarrow \text{Nucleoside} + \text{H}_2\text{O}$) に関する熱力学計算（自由エネルギー計算）を行った。

エウロパの場合、極めて希薄な（表面で $0.1 \sim 1 \mu\text{Pa}$ ）酸素大気に覆われた表面の温度は赤道域で約 120 K、極域で約 80 K であり、厚さ数 km～数十 km の固体の水氷を主体とする地殻の下には、厚さ 100km 程度の液体水の海が全球的に広がっているとされる。こうした温度圧力条件下では、表面と深さ数 km までの低温領域においてはグリシン重合反応やヌクレオシドの生成反応の自由エネルギーが負となり、自発的に重合が進むことが分かった。一方で、高温になる氷地殻底部や地下海では重合物の解離が卓越することが見出された（エネルギーの圧力依存性は小さい）。また、グリシンとアラニンおよびグリシンとロイシンの縮合はエウロパ表面では起こらないが、より低温な環境にある海王星衛星トリトンなどでは起こり得ることも分かった。

本研究は熱力学計算のみの議論であり、上記反応の現実性を見出すためには反応速度論への言及が必要であるが、その考察に必要なパラメタが現状では存在していない。しかしながら、衛星表面には硫酸マグネシウムなどの塩が存在しており、これが触媒となって重合反応を促進することが考えられる。またマーチソン隕石などの炭素質コンドライトには高度に凝集した有機高分子が含まれており、低温環境下で長期にわたる脱水重合が起こった可能性が示唆される。

はやぶさ 2 搭載近赤外分光計 NIRS3 のフライトモデル性能

Performances of Flight Model of NIRS3: the Near Infrared Spectrometer on Hayabusa-2

○岩田隆浩^{1,*}、北里宏平²⁾、安部正真¹⁾、松浦周二¹⁾、荒井武彦¹⁾、仲内悠祐^{1,3)}、
中村智樹⁴⁾、大澤崇人⁵⁾、廣井孝弘⁶⁾、松岡萌⁴⁾、尾崎正伸¹⁾

¹⁾JAXA 宇宙科学研究所、²⁾ 会津大、³⁾ 総研大、⁴⁾ 東北大、⁵⁾ JAEA、⁶⁾ ブラウン大

^{*}) Takahiro Iwata (ISAS/JAXA)

近赤外分光計 (NIRS3) は、小惑星探査機「はやぶさ 2」に搭載され、1.8~3.2 μm 帯の近赤外波長域において小惑星表面からの太陽反射光及び熱放射を分光測定するリモートセンシング機器である。NIRS3 の主要目的は、C 型小惑星 1999JU3 において 3 μm 帯での OH 基の対称伸縮振動や水分子の変角振動による吸収を検出し、小惑星表面における水・含水鉱物の分布や水質変成、熱変成等の状態を明らかにすることである。含水鉱物による吸収帯の強度を 1~2%の精度で推定するため、我々は 2.6 μm 帯での SN 比が 50 を超えることを目標に、NIRS3 観測システムを設計した。

NIRS3 は分光計ユニット (NIRS3-S) と電気回路ユニット (NIRS3-AE) から構成され、NIRS3-S には 128 ピクセルのインジウム砒素(InAs)フォトダイオードによる一次元イメージセンサ型検出器が搭載されている。NIRS3 のフライトモデルを用いた地上試験として、2013 年 2 月~2014 年 9 月に、NIRS3 単体でのプロトフライト試験および性能試験、「はやぶさ 2」探査機に組み込んだ一次噛合せ試験および総合試験を実施している。このうち単体性能試験では、NIRS3-S を試験用小型チャンバ内で軌道上温度である -85~-70°C に冷却して、黒体炉からの近赤外光を入射し、感度校正、波長校正のための基礎データを取得するとともに、S/N 等の基本性能を確認した。この結果、軌道上 S/N 予測値は、高度 20km からのホームポジション観測では目標を大きく上回る 300 以上となり、高度を低下させて実施する SCI クレータ等の高解像度観測でも S/N > 50 を満足することを確認した。また NIRS3 の単体熱真空試験・機械環境試験、及びシステム総合試験においても、NIRS3 が軌道上環境で十分な機能・性能を維持できることを確認した。さらに、黒体炉の近赤外光を、鉱物試料、無水炭素質隕石 (中村 他、本講演会)、MASCOT 搭載 MicrOmega 校正板で反射させて NIRS3 で受光することにより、これらの反射スペクトルと FTIR (フーリエ変換型赤外分光計) との整合性の確認、ならびに相互校正データ取得を行った。これらの地上試験の結果から、NIRS3 を用いた C 形小惑星表面での、初期構成、水質変成、熱変成、宇宙風化に関して、新たな知見を得るのに十分な性能を有することを示した。

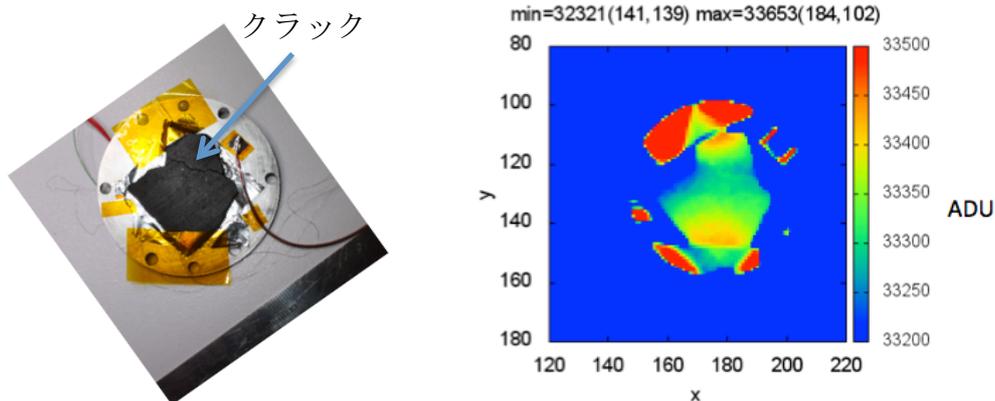
はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラによる隕石の測定

○ 荒井 武彦¹, 中村 智樹², 田中 智¹, 岡田 達明¹,
出村 裕英³, 小川 佳子³, 坂谷 尚哉⁴, 堀川 大和⁴, TIR チーム
¹宇宙航空研究開発機構, ²東北大学, ³会津大学, ⁴総合研究大学院大学

はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ (TIR) は、C 型小惑星 1999 JU3 を上空から中間赤外域 (8 ~ 12 μm) の熱撮像を行い、 $\sim 10\text{m}$ @上空 10km の空間解像度で地域毎の表層温度を決定する。特に小惑星の自転によって時々刻々と変化する温度のプロファイルから表層の熱物性を推定して、小惑星の熱に関連する進化の歴史を紐解く。

本発表では、TIR の最終的な性能評価として行った板状の炭素質隕石の熱撮像結果、及び、市販の赤外カメラで基礎実験として行った粉状の隕石撮像の結果を報告し、実際の小惑星の観測時における表層温度を決定する手順と運用シナリオを議論する。

ここでは結果の一例を挙げる (下図)。評価試験の結果として、TIR のフライトモデルは小さな空間スケールでの温度を決定でき、目標としていた性能を十分に達成できていることを確認できた。また、粉状のサンプルの測定では、10 サンプル (CM, CV, CI, Serpentine) に対して、50°C 設定の加熱で表層温度がおよそ 48~50°C で測定され、隕石表層の放射率 ϵ の違いが温度決定に大きく寄与しないことを確認できた。しかし、粉状のサンプルに対して赤外カメラを 30° 傾けた測定で温度が低く測定される傾向が確認されたため、これも議論する。



左図 : CM 隕石 (Jbilet Winselwan) の写真。右図 : TIR で熱撮像した同隕石 (Z 軸は温度変換前のデジタル値)。隕石の裏側から 50°C に加熱し、コリメータで焦点を合わせて撮像した。クラック部分は加熱された内部が相対的に高い温度で見え、その縁辺部は温度が低く見える。

はやぶさ2搭載小型ランダMASCOTの観測計画

○Tatsuaki Okada¹, Ralf Jaumann², Jean-Pierre Bibring³, Matthias Grott²,
Karl-Heinz Grassmeier⁴, Stephan Ulamec², Jens Biele², Christian Krause²,
Nawarat Termtanasombat², Christian Ziach², Christian Grimm², Tra-Mi Ho²

¹JAXA, ²DLR, ³IAS, ⁴TU Braunschweig

小惑星探査機「はやぶさ2」には小型着陸機 MASCOT が搭載され、小惑星表面で科学観測を行う。MASCOT(=Mobile Asteroid Surface Scout)はドイツ(DLR=ドイツ航空宇宙センター)を中心にフランス(CNES=フランス国立宇宙研究センター)と日本(JAXA=宇宙航空研究開発機構)の協力で開発したもので、総重量が約 11kg(分離機構を除くと 10kg 弱)である。MASCOT の主な科学目的は、1)小惑星表面での高精度科学観測(science)、2)リモート観測とのクロススケール解析用の表面探査(Ground truth)、3)帰還サンプル採取地点の産状把握(Geologic context)、4)サンプル採取地点の選定情報(Scouting)、などである。挑戦的な工学ミッションも多く含まれる。炭素繊維強化プラスチック素材の構造体による軽量化で高い観測機器搭載効率の実現(全体重量の 30%)、微小重量下での長距離ホップや姿勢変更機能、小惑星上での熱環境に耐える熱設計、および自律制御運用である。通信機は小型ローバ OME と共用であり、日本側の新規開発品である。小型・軽量・省電力で最高 37Kbps という高性能を実現している。

MASCOT には 4 台の科学観測機器が搭載される。ひとつは赤外分光顕微鏡(MicrOmega)である。スターリング冷凍機で冷却した HgCdTe の 2次元撮像素子(128×128 画素有効)で、約 5mm 角の領域を 20 μm 解像度で顕微撮像する。光源を音響光学フィルタ AOTF で 0.9~3.5 μm の波長を連続分光(最大 320 波長)して小惑星表面に照射することで、鉱物、水質変成、有機物に関する情報を取得する。広角カメラ(CAM)は 54×54° の広視野角をもつ 1000 画素の CMOS カメラで、MASCOT の手前から地平線にかけて周辺地形や地質構造の撮像を行う。4 色(Blue, Green, Red, IR)の発光ダイオードを用いて、夜間には多色撮像を行うことができる。熱放射計(MARA)は、サーモパイル式の 6 台の熱放射計でそれぞれ異なる波長フィルタが取り付けられている。視野は CAM の観察範囲に含まれており、表層状態をモニタできる。6 台のうち 2 台は広波長帯で主に温度計測用、3 台は 2 μm の狭い帯域で、鉱物情報取得用、1 台は 8-12 μm で、はやぶさ2探査機搭載の中間赤外カメラ TIR と波長を一致させている。小惑星上で昼夜連続して観測することにより、熱慣性を高精度で決定する。磁力計(MAG)は小型軽量の3成分フラックスゲート磁力計であり、MASCOT が小惑星への降下中、小惑星上でのホップ中などに天体規模の磁化を調査する。

MASCOT 観測機器のうち、MicrOmega, CAM, MARA は探査機側の NIRS3, ONC, TIR と対応しており、クロススケールでの相互解析に適している。MASCOT の開発は技術的・時間的に大きな挑戦だったが、「はやぶさ2」での観測の重要性はもちろんのこと、ここで確立した技術は今後の惑星探査で役立つと期待される。

はやぶさ2 レーザ高度計による 小惑星周辺ダスト検出の試み

○押上祥子¹, 千秋博紀², 小林正規², 山田竜平¹, 竝木則行¹, 水野貴秀³

¹国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ²千葉工業大学惑星探査研究センター,
³宇宙科学研究所

大気を持たない天体の表面は、微小隕石の衝突や急激な温度変化にさらされる。このため、天体表面にある岩体は常に破碎され、惑星間空間に存在する微細なダストの定常的な供給源になっているものと考えられている。しかし、天体表面で作られたダスト粒子の供給レートや、移動・蓄積・散逸のメカニズムについてはまだわかっていない。これらは探査による直接観測をもとに、明らかにされてゆくべきものである。

はやぶさ2搭載予定のレーザ高度計(LIDAR)には、視線方向のソフトターゲットの分布を計測するためのモード(ダストカウントモード)が実装されている(図1)。ダストカウントモードによる観測データからダスト分布を見積もるために、我々はライダー方程式を用いたモデルシミュレーションを行った。具体的には、ミー散乱を仮定し、受光部検知限界(9 mV)を超える受光強度が得られるダスト密度を求めた。その結果、ダスト粒径の頻度分布を1-100 μmの範囲で適宜仮定した場合、ホームポジション(高度20 km)からの観測では $10^8 - 10^9$ 個/m³以上、高度1 kmからの観測では 10^6 個/m³以上であることがわかった(図2)。

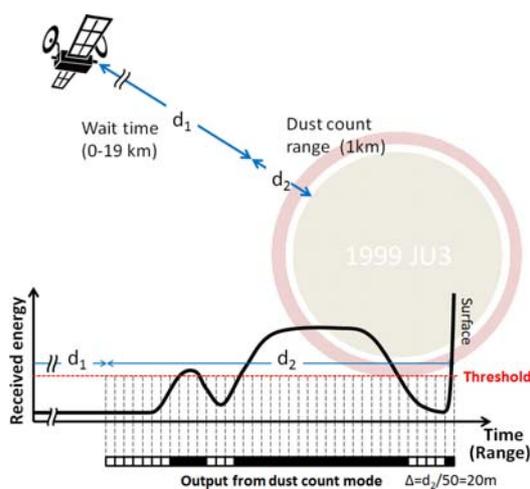


図1. はやぶさ2 LIDAR のダスト観測原理

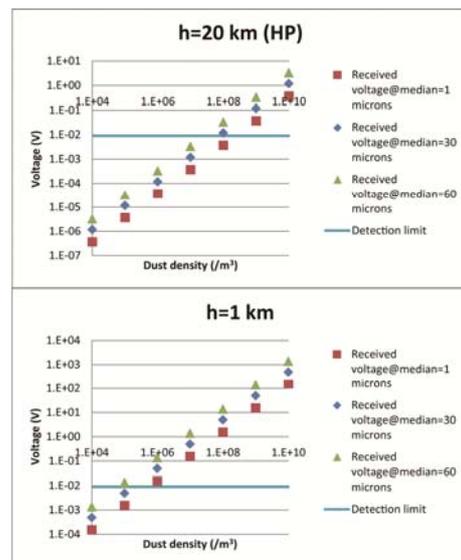


図2. (上)ホームポジション, (下)高度1 km での受光強度シミュレーション結果

はやぶさ2におけるStructure-from-Motion法による小惑星形状推定手法の適用性の検討
 Applicability of Structure-from-Motion on asteroid shape modeling in Hayabusa-2

○平田成¹;森洋平¹;はやぶさ2形状モデル検討グループ²

HIRATA, Naru¹; MORI, Yohei¹; HAYABUSA-2 SHAPE RECONSTRUCTION, Study group²

¹ 会津大学, ² はやぶさ2プロジェクト

¹ARC-Space/CAIST, The University of Aizu, ²Hayabusa-2 project

小惑星探査において、対象天体への到着後の対象天体形状モデルの作成は重要な要素である。対象天体の形状モデルは、探査機の運用のために早期に必要なとされる他、当然ながら対象そのものの重要なデータの一つとして科学的な解析にも用いられる。

はやぶさ2プロジェクトにおいても、上記の事情を鑑みて、形状モデル作成の検討を専門に行うグループが形成され、活動を続けてきた。著者らはその活動の一例として、オープンソースとして公開されている形状復元ツールの小惑星探査データへの適用性について評価を行ってきた。

画像データなどから物体形状を復元する手法は、コンピュータビジョンと呼ばれる分野で精力的な研究が行われている。現在広く用いられているのが、Structure from Motionという、複数画像をまとめて処理し、対象物の形状とカメラのパラメータ（位置、姿勢など）を同時に推定可能な手法である。今回評価対象としたBundler (Snavely et al., 2006) はStructure from Motionのオープンソースな実装例である。また、Bundlerと協働して高解像度の形状モデルを作成可能なソフトPMVS2 (Furukawa and Ponce, 2010) もあわせて評価した。

はやぶさ探査機が取得した、小惑星イトカワの画像を入力として、前記ツールによる形状復元を行い、既存の形状モデルと比較することで精度・解像度などを評価した。解像度0.7 mの画像169枚を用いたテストでは、平均メッシュ間隔1.7 m（画像解像度の約2.4倍）の小惑星イトカワの形状モデルを得ることができた。処理に要した時間は、標準的なパーソナルコンピュータ上で処理を行った場合、数時間以内であった。また、現在得られている最高解像度のイトカワの形状モデル (Gaskell et al., 2006) との差を取ることで誤差評価を行った所、平均4.3 mの精度であった。BundlerとPMVS2による形状復元は、迅速な処理が特徴であり、精度・解像度の点でもはやぶさ探査機ミッション初期に作成された形状モデル (Demura et al., 2006) を上回る質を持っており、探査機の運用初期に必要なモデルとしての条件を満たしている。発表では、BundlerとPMVS2を用いる場合のデータ取得条件に関わる検討結果についても報告する。

Snavely N., S. Seitz, R. Szeliski. Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006), 2006.

Furukawa Y., and J. Ponce. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, Issue 8, Pages 1362-1376, 2010.

Gaskell R., O. Barnouin-Jha, D. Scheeres, T. Mukai, N. Hirata, S. Abe, J. Saito, M. Ishiguro, T. Kubota, T. Hashimoto, J. Kawaguchi, M. Yoshikawa, K. Shirakawa, T. Kominato, Landmark navigation studies and target characterization in the Hayabusa encounter with Itokawa, AIAA paper 2006-6660, AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conf., Keystone, CO, 2006.

Demura, H., Kobayashi, S., Nemoto, E., Matsumoto, N., Furuya, M., Yukishita, A., Muranaka, N., Morita, H., Shirakawa, K., Maruya, M., Ohyama, H., Uo, M., Kubota, T., Hashimoto, T., Kawaguchi, J., Fujiwara, A., Saito, J., Sasaki, S., Miyamoto, H., Hirata, N. Pole and Global Shape of 25143 Itokawa, Science 312, 1347-1349, 2006.

1999 JU3 の衝突確率とクレーター年代学関数の構築

○ 安藤滉祐¹, 諸田智克¹, 杉田精司², 本田理恵³, 亀田真吾⁴,
山田学⁵, 本田親寿⁶, 鈴木秀彦⁷, 渡邊誠一郎¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科,²東京大学大学院新領域創成科学研究科,³高知大学理学部,
⁴立教大学理学部,⁵千葉工業大学惑星探査研究センター,⁶会津大学,⁷明治大学

はやぶさ 2 探査対象天体である小惑星 1999 JU3 についてクレータカウンティングによる年代推定を可能とする為に、我々は 1999 JU3 の表面年代とクレーター数密度の関係を表すクレーター年代学関数モデルの構築を行ってきた。本発表では特に、メインベルトと地球近傍におけるクレーター生成率の違いと、1999 JU3 におけるクレーター統計への寄与について議論する。

メインベルト内と地球近傍における小天体のサイズ頻度分布モデル、平均の衝突確率、衝突速度、クレータースケールリング則を用いて各領域におけるクレーター生成率を求めたところ、10m 以上のクレーターのサイズ範囲ではメインベルト内でのクレーター生成率のほうが地球近傍よりも高いが、10m 以下のクレーターサイズ範囲では地球近傍でのクレーター生成率のほうが高いことがわかった (図)。これはメインベルトと地球近傍における小天体のサイズ分布の傾きの違いに起因する。この情報をもとに、実際にははやぶさ 2 によって得られるクレーターサイズ頻度分布形状から、1999 JU3 の形成からメインベルトにいた期間と地球近傍に移動してから現在までの期間の比について、導出可能性について議論する。

また、本研究ではメインベルトでの平均の衝突確率のみではなく 1999 JU3 の母天体がいたと考えられる内側小惑星帯に存在した場合の衝突確率を計算し、クレーターの形成頻度を求める。この結果とメインベルト内での平均の衝突確率を用いたクレーターの形成頻度とを比較し、はやぶさ 2 によるクレーター観測に基づく 1999 JU3 の起源推定の可能性について議論をする。

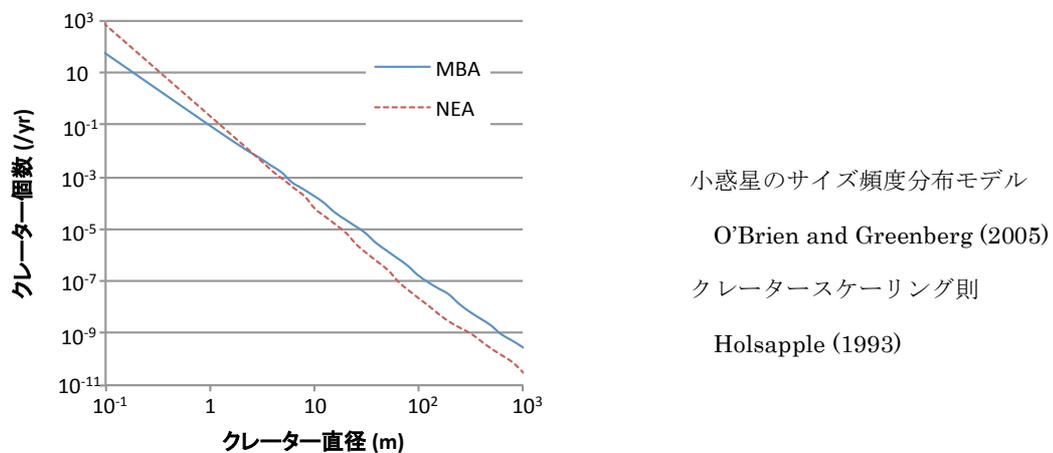


図1 1999 JU3 におけるメインベルト (MBA) と地球近傍 (NEA) で単位時間あたりに形成されるクレーターのサイズ分布

アグリゲート型イトカワ粒子の三次元構造解析

○矢田達¹、上相真之¹、上杉健太郎²、唐牛讓¹、鈴木芳生²、竹内晃久²、土山明³、
安部正真^{1,4}、岡田達明^{1,4}、葛巻徹⁵

¹宇宙航空研究開発機構(JAXA)/宇宙科学研究所(ISAS)、

²高輝度光科学研究センター(JASRI)/SPRING-8

³京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

⁴宇宙航空研究開発機構(JAXA)/月惑星探査グループ(JSPEC)

⁵東海大学工学部材料工学科

微粒子の集積(アグリゲート形成)は惑星物質進化の重要な素過程の一つである。例えば、原始太陽系星雲において、微粒子が何らかの過程で成長して出来たより大きな粒子が集積して微惑星は形成されたと考えられている[1, 2]。微粒子アグリゲート形成は、大気を持たない天体表層でも起こっていると考えられる。月のレゴリスの進化過程の研究は進んでいるが、それ以外の大気のない天体表層でのレゴリス進化過程は実試料がなかった為、ほとんど研究がされていない。これまで探査されたすべての小惑星の表層にレゴリス層の堆積が確認されている[例えば 3]。この小惑星のレゴリス粒子の形成・進化については、衝突破砕の放出物として形成され[4]、更なる隕石の衝突による破砕・振動による摩耗、熱疲労[5]などによる粒径減少などの過程が考えられている。小惑星探査機「はやぶさ」がS型小惑星イトカワの試料を初めて持ち帰ったことで、我々は小惑星表層レゴリスの実試料の分析・解析が行えるようになった[6, 7]。本研究ではイトカワ粒子にみられる微小粒子が集積したタイプ(以後アグリゲート粒子と呼称)について、その三次元構造解析を行い、さらに透過電子顕微鏡観察・破壊強度計測から、微粒子の成長過程の解明、及び微小天体表層のレゴリス形成・進化過程の解明を目指す。

本研究では電子顕微鏡像・EDSによる元素組成情報などからアグリゲート型イトカワ粒子を5個選択した(RA-QD02-0184, RA-QD02-0236, RB-CV-0026, RB-CV-0036, RB-CV-0044)。これらについて、電界放出形電子顕微鏡で表層の詳細観察を行った後、SiN製試料ホルダーに収納して、高輝度放射光施設SPRING-8のBL47XUにて7keVおよび8keVの二色のX線CT解析を行った。解析の結果、アグリゲート型粒子は、微粒子が単に集積したように見えるタイプ(RB-CV-0026, RB-CV-0036, RB-CV-0044)と微粒子が互いに接合して一つの粒子を形成しているタイプ(RA-QD02-0184)の2種類に分類できることが分かった(RA-QD02-0236はアグリゲート型でなく、単にクラックの入った粒子であることが分かった)。現在、後者の接合タイプのアグリゲート型粒子について詳細を解析中である。

今後は、テスト粒子による試験を経た上でFIBによりそれぞれのアグリゲート型粒子の超薄切片を作成し、微粒子間の境界層の詳細観察を行う予定である。また、アグリゲート型粒子のいくつかについて、電子顕微鏡内で破壊強度計測を実施する予定である[8]。

参考文献: [1] Dominik C. and Tielens A. G. G. M. 1997. *Astrophys. J.* 480, 647. [2] Poppe T., Blum J. and Henning T. 2000. , *Astrophys. J.* 533, 454 [3] Veverka J. et al. (2001) *Science* 292, 484. [4] Housen K. R. and Wikenning L. L. (1982) *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 10, 355. [5] Delbo M. et al. (2014) *Nature* 508, 223. [6] Abe M. et al., (2011) *Lunar Planet. Sci.* 42, #1638. [7] Yada T. et al. (2013) *Meteoritics Planet. Sci.* 49, 135. [8] Kuzumaki T. et al. (2012) *Diam. Relat. Mater.* 25, 1.

火星隕石 Tissint に含まれる 硫化鉄中の鉛同位体不均質

○森脇涼太¹, 臼井寛裕¹, J. I. Simon², A. Schmitt³, K. McKeegan³, 横山哲也¹

¹東京工業大学理工学研究科 ²ARES, NASA/JSC ³Dept. Earth and Space Sci. UCLA

火星は隕石試料の存在する唯一の惑星であり、これまで火星隕石を用いた地球化学的研究により火星地殻・マンツルの化学進化についての多くの知見が得られてきた。特に、火星マンツルの化学進化の解明には、火星マンツルの熔融液を起源とした玄武岩であるシャーゴット隕石の地球化学的研究が最も有効である。しかし、地球に落下してからの変質作用や、火成活動中の地殻同化作用などにより火星マンツル以外の成分が混入している可能性が示唆されており、隕石毎にこれらの影響を評価する必要がある。

カンラン石玄武岩シャーゴット隕石に分類される火星隕石 Tissint は、地球への落下直後に回収された落下隕石であるために地球上での汚染の影響が極めて小さく、化学分析に非常に適した火星隕石試料である。Tissint にはカンラン石・輝石・斜長石などの火成鉱物の他に、副成分鉱物として硫化鉄の他形結晶が存在している。この硫化鉄は斜長石晶出後のマグマの分化残液の化学組成を反映していると見られ、後期の火成活動に関する情報を保持していると考えられる。本研究ではこの他形硫化鉄結晶に着目し、空間分解能の高い二次イオン質量分析計 (SIMS, Cameca ims-1270, UCLA) を用いて鉛同位体組成の測定を行い、Tissint の親マグマが経験した火星における火成活動についての考察を行った。

Tissint 薄片試料中に含まれている最大径 0.5mm の他形硫化鉄結晶について 5 点の鉛同位体測定を行った結果、ひとつの結晶中に同位体的な不均質が存在していることが確認された。特に、硫化鉄結晶の中心部分は地球化学的に枯渇した特徴 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=1.02\pm 0.05$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.72\pm 0.09$) を保持している一方で、周縁部には地球化学的に富む特徴 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.94\pm 0.04$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.55\pm 0.06$) が見られた。このような同位体的不均質は、硫化鉄晶出後にマグマの分化残液と反応した結果であると考えられる。以上から、Tissint 親マグマの分化残液は硫化鉄晶出後には地球化学的に富む同位体組成を保持していたことが明らかとなった。この結果は、段階的酸処理法によって、火成活動の初期と後期で異なる同位体組成を保持していたことを示した我々の分析結果と同様に、Tissint 隕石が火成活動の中で地殻同化作用を経験したことを示している。

加熱実験生成物の鉱物学的・酸素同位体的変化に基づく加熱脱水炭素質隕石形成過程への示唆

Implications for the formation process of thermally metamorphosed carbonaceous chondrites based on mineralogical and oxygen isotopic changes in experimentally heated products

○中藤亜衣子¹、Ahn Insu²、中村智樹³、Chan Queenie H.-S⁴,
Zolensky Michael⁴、Lee Jong-lk²

¹宇宙航空研究開発機構、²Korea Polar Research Institute、³東北大学、⁴NASA/JSC

加熱脱水炭素質隕石(TMCCs)は、母天体上での水質変成後、含水鉱物が脱水分解するような加熱イベントを経験したと考えられている。この加熱イベントは長期間の熱変成ではなく、短時間加熱であった可能性が高い[1]。小惑星の反射スペクトル観測から、水質変成後に加熱脱水を経験したと思われるC型小惑星の存在が多く報告されており[2]、今年度打ち上げ予定のはやぶさ2のターゲット天体199JU3に関しても同様に加熱脱水した表面をもつ可能性が指摘されている[3]。

このようなC型小惑星の後期熱進化を解明するために、Murchison隕石(CM2)を閉鎖系高真空下で600°C1時間(600°C/1h)、750°C1h、900°C1hの条件で加熱した。実験生成物とTMCCsのPCA02012, Belgica7904, DOM03183, Yamato86695を鉱物学的に比較することで、TMCCsは加熱の程度に様々なバリエーションがあることが分かった。また実験生成物の酸素同位体組成は、先行研究と同様に加熱の程度が大きくなるにつれて重い酸素同位体組成を示した[e.g., 4]。強い加熱を経験したPCA02012の酸素同位体組成は900°C1hの実験生成物で再現することができた。

Thermally metamorphosed carbonaceous chondrites (TMCCs) are known as the meteorites experienced dehydration of hydrous minerals by heating after aqueous alteration on the parent bodies. The heating event might be short duration heating rather than the long term heating [1]. Based on the reflectance spectra of the asteroids, some C type asteroids having a dehydrated surface have been reported [2]. 1999JU3, a target asteroid of Hayabusa 2 mission that will launch this winter, also shows the evidence of dehydration of the surface [3].

To understand thermal evolution of C type asteroids, we heated Murchison CM chondrites at 600°C, 750°C, and 900°C for 1 hour under controlled oxygen partial pressures. Compare the mineralogy of heating products to TMCCs, the conditions of thermal metamorphism experienced by these meteorites may have been quite variable. The oxygen isotope compositions of the experimental products become more ¹⁸O rich with increasing temperature. It is consistent with previous studies [e.g., 4]. The product heated at 900°C well reproduces the oxygen isotope of strongly heated PCA02012.

References : [1] Nakato et al. 2008. *Earth, Planets and Space*, 60, 855-854. [2] Hiroi et al. 1993. *Science*, 261, 1016-1018. [3] Michel and Delbo. 2010. *Icarus*, 209, 520-524. [4] Ivanova et al. 2010. *Meteoritics & planetary Science*, 45, 1108-1123.

CM 炭素質コンドライトの岩石学的特徴に基づいた C型小惑星の水質変成による物質進化過程

○仲田愛里¹、中村智樹¹、木村勇氣²、武藤潤¹

¹東北大学大学院理学研究科

²北海道大学低温科学研究所

炭素質コンドライトは水や有機物といった揮発性元素を多く含む始原的な隕石である。しかし、炭素質コンドライトは小惑星上で二次的なプロセス（水質変成や熱変成）を経験しており、これらの変成過程を理解することは、太陽系形成初期の物質進化を理解する上で重要である。本研究では、水質変成を経験している炭素質コンドライトに対し岩石学的・鉱物学的観察を行うことで、水を含む小惑星の物質進化過程の解明を目指した。雪線以遠の領域で、氷とともに形成された含水小惑星は、天体内部に含まれる放射性同位元素の崩壊熱で氷が溶け水になり、岩石粒子と反応し水質変成が進行する。変成の進行に伴い元素分布の変動、無水鉱物の含水化、同位体の均質化、有機物の構造変化などが引き起こされる。本研究ではCM炭素質隕石に含まれるコンドリュールの含水鉱物化の程度や、水質変成に伴い形成される二次鉱物の組成変化などの岩石学的特徴に基づき、CM炭素質コンドライト隕石17試料に対して水質変成の程度を見積もった。この際、CM炭素質コンドライトの水質変成指標を与えた3つの異なる手法（Rubin et al., 2007; Browning et al., 1996; McSween, 1987）を用いて水質変成の程度を見積もり、それらの整合性について考察した。また、水質変成の過程で形成する硫黄を含む含水鉱物の集合体であるPCPの形成プロセスの解明を試みた。

Rubin et al. (2007) の方法でそれぞれの隕石の水質変成の程度（2.6-2.0: 2.6が最も変質していない）を見積もった結果、LEW 85311, CM 2.6; LAP 03178, CM 2.6; GRO 95566, CM 2.5; GRA 06172, CM 2.5; LEW 87022, CM 2.4; LAP 02333, CM 2.4; DNG 06004, CM 2.4; LAP 02269, CM 2.3/2.4; MAC 88176, CM 2.3; LAP 02336, CM 2.3; LEW 87148, CM 2.3; MET 01072, CM 2.2/2.3; ALH 85013, CM 2.2; MGY 05230, CM2.1/2.2; MAC 88100, CM 2.1; LON 94101, CM 2.1; LAP 031166, CM 2.1となった。Browning et al. (1996) の方法を一部の隕石に適用した結果、DNG 06004, 0.93; MAC 88176, 1.30; LON 94101, 1.85; ALH 85013, 1.87となった（0-2: 0が最も変質していない）。一方、McSween (1987) の方法を用いた結果、経験した水質変成の程度は、DNG 06004 < MAC 88176 ≈ ALH 85013 < LON 94101 となった。3つの方法から決定したそれぞれの試料の水質変成の程度は類似しており、整合性がみられる。従って、これらのモデルはそれぞれ適切にCM炭素質コンドライトの水質変成を指標化しているといえる。また、試料間でみられた特徴の違いは、水質変成の過程で水溶液の温度やpHといった性質が変化していたことを示している。このことは、含水小惑星の環境が水質変成の間で変化していることを示しており、今度は安定同位体などを用いてそれぞれの隕石の変成の温度などを検討する予定である。

参考文献

Browning et al. (1996) *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 2621-2633.

McSween (1987) *Geochim. Cosmochim. Acta* 51, 2469-2477.

Rubin et al. (2007) *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 2361-2382.

コンドリュールの強度とコンドライトの圧縮過程に関する実験的研究

○紫垣 沙央¹, 中村 昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

コンドリュールの形成については諸説あるが、コンドリュールは形成された後にコンドライト母天体に取り込まれ、衝突や熱進化のプロセスを経て、現在の姿に至ったと考えられている。Beitz et al.(2013)において、コンドライト中のコンドリュールのうち壊れずに元の形状を維持しているものの割合と、コンドリュールの引張強度から、コンドライト母天体が受けた最大圧力を推定できる可能性が示唆された。この方法を用いてその最大圧力を推定するため、コンドリュールの引張強度を求める実験的研究を行った。

今回試料として用いたコンドリュールはアエンデ隕石から掘り出したものである。実験には神戸大学の圧縮試験機を使用し、静的圧縮を行うことで強度を算出した。コンドリュールについて求めた強度は球形試料の圧壊強度であるので、引張強度との関係を調べる必要がある。そこで、球形・円板形のかんらん岩試料を用いてその圧壊強度・引張強度を求めそれらの関係を調べ、コンドリュールの引張強度を推定し、Beitz et al.(2013)に適用することを試みた。

30個のコンドリュールについて静的圧縮実験を行った結果、その圧壊強度は 7.7 ± 5.8 MPaとなった。かんらん岩の実験より、圧壊強度と引張強度はほぼ等しいことが分かった。今回求められたコンドリュールの引張強度に対し、Ueda et al.(2001)によるコンドリュールの衝突破壊圧力はおよそ30倍と見積もられたが、この関係はNagaoka et al.(2013)における玄武岩とパイロフィライトの引張強度と衝突破壊圧力の関係とほぼ一致している。

また、コンドリュールの引張強度からコンドライト母天体を受けた圧力を推定できる。実際の隕石中の壊れていないコンドリュールの割合(Nelson et al., 2002)を、Beitz et al.(2013)による関係式に適用すると、この隕石が経験した最大圧力は約20-50 MPaと見積もることができた。しかしBeitz et al.(2013)に示された圧縮曲線によると、この圧力でコンドライト前駆物質を圧縮しても実際の隕石の体積充填率に満たないと推定される。すなわち、物理的圧縮などコンドリュールが破壊されるものとは別の過程によってコンドライト母天体が空隙を失ったことが示唆される。

浮遊法による全溶解した放射状輝石コンドリュールの再現実験

○野村逸郎¹, 中村智樹¹, 木村勇氣², 塚本勝男³

¹東北大学, ²北海道大学, ³大阪大学

原始惑星系円盤におけるコンドリュールの形成条件には未だに不明な点が多い。コンドリュールの形成条件に制約を与えるために、コンドリュールの再現実験が多数行われてきた (e. g. Tsuchiyama et al., 1980)。天然のコンドリュールを再現できた場合の実験条件から、円盤内部のコンドリュールの形成環境を推定することが可能になってくる。従来コンドリュールの再現実験は、白金ワイヤーに吊り下げられた塵を溶かす手法が用いられたが、Nagashima (2006)ではガスジェット浮遊炉という装置を用いた。ガスジェット浮遊炉は、試料と装置が接触しないため、宇宙空間で非接触で形成されたコンドリュールを模擬できる点が優れている。

本研究では、Nagashima (2006)と同一のガスジェット浮遊炉を用いて、放射状輝石および微結晶コンドリュールの組織を再現する実験を行った。実験条件は、加熱温度は1600–1800°C程度で、加熱後の冷却率は 10^4 – 10^6 K/hr程度であり、浮遊にはアルゴンガスを用いた。化学組成は天然の放射状輝石コンドリュールの化学組成と似た組成（鉄を除いた）を試薬を混合して作成した。再現実験で得られたコンドリュール試料は、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡で観察した。一部の試料は高エネルギー加速器研究機構にてX線回折分析を行った。

実験の結果、いくつかの試料では幅 $10\mu\text{m}$ 程度の輝石の結晶が放射状に成長している構造が観察できた。これは、天然の放射状輝石コンドリュールに近い構造である。また、他の試料では、直径がサブミクロンオーダーの輝石の微結晶の集合物が観察できた。これは、天然の微結晶コンドリュールに近い構造である。放射状輝石、および微結晶コンドリュールともに天然のコンドリュールに近い構造を再現できた試料の冷却率は 10^4 K/hr程度であった。これ以上の冷却率(10^5 – 10^6 K/hr)では透明なガラス状のコンドリュールが形成された。隕石中のコンドリュールは様々なサイズと組成を持つにもかかわらず、全体が透明なガラス状の組織は確認されていない。天然のコンドリュールが再現された冷却率($\sim 10^4$ K/hr)は同じサイズのメルトが真空中で放射冷却される冷却率(10^5 K/hr)よりも小さい。今後、天然と実験での雰囲気ガスや加熱時間の違いを検討することで、コンドリュールが形成された円盤領域はガスが存在するなど何らかの保温効果があったと結論付けられる可能性がある。

Nagashima K. (2006) Reproduction of chondrule from levitated, hypercooled melts, *Journal of Crystal Growth*, 293, 193–197.

Tsuchiyama A., Nagahara H., Kushiro I. (1980) Experimental reproduction of textures of chondrules, *Earth and Planetary Science Letters*, 48, 155–165.

アエンデ隕石中コンドリュールの 3次元外形と内部組織の分析

○中本泰史¹，高橋栄一¹，津田彩花¹，西田圭佑²，奥井航¹，横山哲也¹，
柳田泰宏³，奥村聡³，中村美千彦³，佐々木理⁴

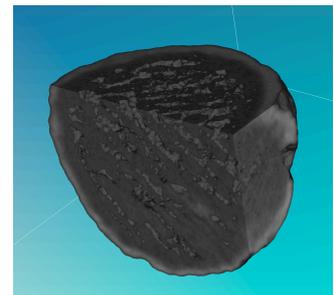
¹東京工業大学 地球惑星科学専攻，²東京大学 地球惑星科学専攻，
³東北大学 地学専攻，⁴東北大学 総合学術博物館

コンドリュールは、大きさが0.1mmないし1mm程度のほぼ球形をしたシリケート組成組織で、コンドライト隕石の主要構成要素である。ほぼ同じ組成と質量を持つ前駆体が加熱され、一部ないし全部が溶融した後、再固化して形成されたと考えられている。コンドリュール形成は微惑星形成や惑星形成の過程と同時に進行していたと考えられるだけでなく、相互に関連していた可能性も高い。よってコンドリュール形成過程を解明することはそれ自身が興味深いものであるにとどまらず、惑星形成過程全般を解明する上での鍵にもなると考えられる。

原始惑星系円盤中でコンドリュールを形成するにいたる加熱機構としてはいくつか提案されているが、衝撃波加熱モデルは有力な説の一つである。衝撃波加熱モデルでは、円盤ガス中に発生した衝撃波をコンドリュール前駆体が通過する際、ガスとの相対速度が生じ、その結果ガス摩擦加熱を受けて溶融するにいたると考える。このモデルによれば、溶融中のコンドリュールは一定の方向から高いガス動圧を受ける。すると、溶融しているコンドリュールは動圧に応じて形状が球からずれることが期待される。液滴内部が全溶融している場合は、ガス動圧と変形度の関係が理論的に求められている。

本研究では、コンドリュール内部の溶融の程度を推定するために内部の結晶組織を観察し、全溶融していると思われるコンドリュールの外形を測定して球形からのズレを定量的に明らかにする。これにより、コンドリュールが形成時の溶融段階でガス動圧を受けていたかどうかを判定することを目指す。統計的に意味のある結果を得るため、多数のコンドリュール試料の測定を試みる。本研究では、多数のコンドリュール試料に対し1つ1つを割ることなく内部組織観察を行い、同時に外形も測定し得る手法として、X線CTによる測定を行った。

まず、アエンデ隕石(CV3)の小片約11gに対し冷凍解凍法を施し、コンドリュール数十個を取り出した。次に、東北大学総合学術博物館のX線CT装置を用い、これらコンドリュールの内部組織と3次元外形を測定した。右図に、結果の1例を示す。3次元データとして得られた構造に対し、仮想的な3つの切断面で切った図を表示している。この例の場合は棒状構造（3次元的には面構造）が見られ、全溶融していたことが推定される。



これまでのところ、全溶融していたと思われるコンドリュール15個ほどに対する3次元形状データが得られている。それを見ると、理論的に予想される変形度分布と調和的である。すなわち、これらコンドリュールは溶融時にガス動圧を受けていたことが示唆される。

今後はさらに測定試料数を増やし、議論の定量性および統計的精度を高めていくことを考えている。

「かぐや」等最新データを基にした 新しい月地質図作成プロジェクト

○大竹 真紀子¹、本田 親寿²、諸田 智克³、長 勇一郎⁴、晴山 慎⁵、平田 成²、
石原 吉明¹、鎌田 俊一⁶、唐牛 譲¹、木村 淳⁷、小林 直樹¹、長岡 央⁸、
出村 裕英²、佐伯 和人⁹、中村 良介¹⁰、小川佳子²、嵩由美子¹¹

¹JAXA ²会津大 ³名古屋大 ⁴立教大 ⁵聖マリ医大
⁶AIST ⁷北大 ⁸東工大 ⁹早稲田大 ¹⁰阪大 ¹¹NIES ¹¹京大

近年の月探査の成功を通して月進化過程理解の鍵となる岩石種（高純度の斜長岩やMg/Fe比の高い未分化斜長岩など）が複数発見されており、従来のマグマオーシャン固化過程（地殻形成過程）を再考する必要性が生じている。再考のためには、月全球にわたる詳細な地質図から地殻形成以降の40数億年の間に受けた隕石衝突に伴う岩石攪拌などによる組成変化を考慮して初期状態を復元し、月の初期地殻組成を正確に把握することが必須である。これまで月の地質進化の理解に大きく貢献してきた月の全球地質図は、アポロ時代以降の1980年代に作成されたものであるため近年の探査で見出された新しい岩石種の情報は含まれておらず、大幅な改訂が望まれる。

そこで我々は、月周回衛星「かぐや」が取得した地形、鉱物、元素組成などのデータを用いて新しい岩石種の分布を含めた月全球地質図作成を行い、この地質図を基に月の初期地殻組成を復元するプロジェクトを開始した。地質図作成手法を検討する対象地域としてアリストアルコスクレータ周辺を選定し、分光スペクトルデータを用いた鉱物・岩石種の分布による地表区分を手動で行い、区分手順のアルゴリズム化を試みた。一方、手動による区分結果と手動により区分された各領域の典型的な反射スペクトルを端成分にした教師付き分類法による解析的な区分結果との比較も行っている。発表ではこれまでの検討結果の詳細について紹介する。

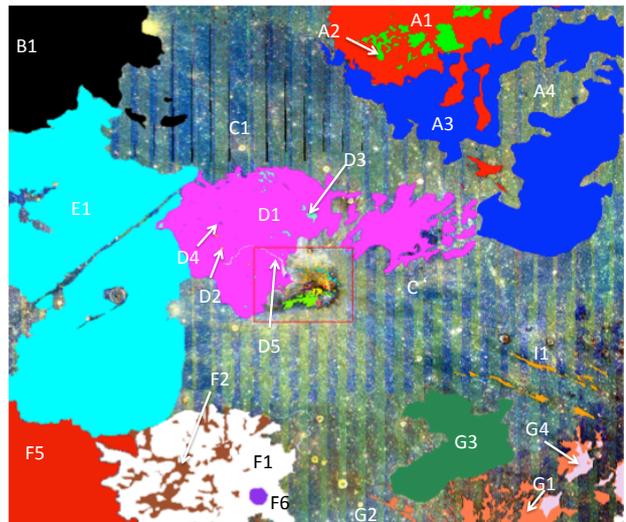


図1 アリストアルコスクレータ周辺の表層区分例
手動により分けられた領域毎に仮記号と色をつけた。ベースの画像は「かぐや」マルチバンドイメージャにより作成した吸収強度によるRGB画像(R: 950, G: 1050, B:1250 nm)

月表層誘電率の全球分布

Global distribution of the lunar surface dielectric constant

○熊本篤志¹, 石山 謙¹, 押上祥子², 春山純一³○A. Kumamoto¹, K. Ishiyama¹, S. Oshigami², and J. Haruyama³¹ 東北大, ² 国立天文台, ³ JAXA¹Tohoku Univ., ²NAOJ, ³JAXA

組成による誘電率の差異が乏しい月において、レーダで観測される誘電率コントラストは主として、物質の密度・空隙率の差異を反映しているものと考えられる (Ono et al., 2009; Oshigami et al., 2012). 地下反射層まで掘り起こされたクレータ地形を利用して海領域で誘電率決定を行った研究からは、地下数 100m までの密度(1.6~2.6 g/cm³)はアポロサンプルの平均より低く、隕石衝突によるマクロな空隙が予想以上に多く含まれていることが示唆された (Ishiyama et al., 2013). こうした空隙は、表層が形成されてから現在までの隕石衝突の履歴を反映しており、GRAIL の重力場観測に基づく高地領域での地殻の密度推定 (Wieczorek et al., 2012) とも合わせて関心がもたれている。そこで本研究では、かぐや (SELENE) レーダサウンダ (LRS) で観測される表面エコーの強度をもとに、月の全球で、表層のレゴリス層・玄武岩層の平均的な密度 (バルク密度) を導出した。

月表面地形の roughness が、反射率に影響を与えているため、本研究では以下の手順に従って、月表層の誘電率推定を行った: まず、かぐや地形カメラ(TC)観測 (Haruyama et al., 2008)に基づくデジタル地形モデル (DTM) から、自己アフィン地形モデルを仮定して Hurst 係数等の roughness パラメータを求めた。次に、仮の誘電率 3 を仮定して、Kirchhoff 近似による自己アフィン地形からのエコー強度 (Franceschetti et al., 1999; Shepard and Campbell, 1999; Bruzzone et al., 2011) を入射角の関数として算出した。最後に算出されたエコー強度と観測されたエコー強度を比較することで、観測データに合致する誘電率を決定した。

これらの解析の結果、誘電率は、海領域 (Hurst 係数<0.5) では 3~4, 高地領域 (Hurst 係数>0.7) では 2~3 と推定された。さらに、嵐の大洋の東部分、雨の海の西部分に高誘電率領域($\epsilon_r \sim 5$)が分布していることが明らかにされた。これらの誘電率をもとに、アポロサンプルに基づく経験式 (Carrier et al., 1991) を用いて導かれるバルク密度は海領域では 1.8~2.3 g/cm³, 高地領域では 1.2~1.8 g/cm³, 高誘電率領域では 2.6 g/cm³ となった。アポロのドリルコアサンプルの計測によれば、月レゴリスのバルク密度は表面から深さ 3m にかけて、1.3 g/cm³ から 1.9 g/cm³ に変化する。深さに応じてバルク密度が増大する媒質モデルでの電波伝搬を検討した結果、かぐや LRS で観測された誘電率は、月表面から深さ 3m までのレゴリス層のバルク密度を反映しており、高誘電率領域では、(a) イルメナイトの含有量が高い、(b) 表面の形成年代が新しく、隕石衝突による空隙率増大を経っていない、等の理由によって、他の海領域に比べ、バルク密度が高いことが示唆された。

かぐやレーダーサウンダー観測データに基づいた 雨の海の地下構造の研究

○石山謙¹, 熊本篤志¹, 中村教博¹

¹東北大学

月の表側にある雨の海盆地は~38.5億年前の隕石衝突で形成され、月で二番目に大きい盆地であることから、月の火山活動や熱的進化過程を解明する上で重要な盆地と考えられている[e.g., Bugiolacchi and Guest, 2008]。「かぐや」衛星に搭載した月レーダーサウンダー(LRS)は、月の火山活動を調査するため、4~6MHzの電磁波を放射することで、月面と地下からの反射波(表面エコーと地下エコー)を検出し、月全球で地下探査を行うことに成功した[Ono et al., 2009]。雨の海でも、地下数百mからの地下エコーを検出し、主に、月表面と並行するような地下反射面が数多く発見された。

本研究では、この構造以外に、表面エコーと地下エコーが並行せず、月表面に対して地下反射面が下方に湾曲しているような地下構造を発見した。この地下構造の成因は、主に次の2つが考えられる:(a)弾性体であるリソスフェアが玄武岩の荷重によってたわんだ。(b)断層によって地形が変化した。(b)については、類似した逆断層地形が、地球でも見受けられる。本研究では、この地下構造が、(a)玄武岩の荷重によるリソスフェアのたわみによるものと仮定して、単純なモデルと比較検討を行った。

モデルは、Solomon and Head [1980]のモデルを使用した。このモデルは、均質な媒質および厚さが一定のリソスフェアで覆われた球殻構造上に、玄武岩による荷重を加えた単純なモデルを想定している。リソスフェア表面のたわみ角を調べた結果、LRSで観測された地下構造のたわみ角よりも低く推定されることがわかった。この原因は、モデルにおいて厚さが一定のリソスフェアを仮定したためと考えられる。かぐや重力場探査から求められた月の地殻厚マップデータ[Ishihara et al., 2009]によれば、今回発見した地下構造周辺では、地殻の厚さに不均一性があり、部分的に地殻の薄い領域が存在するため、部分的に薄いリソスフェアが存在する可能性がある。

我々は不均一なリソスフェア厚を想定したモデルを考えるため、現在、MSCソフトウェア社の汎用プリポストシステム(Patran)を使用してモデルの作成を行い、同社の汎用非線形有限要素法解析プログラム(Marc)によって荷重によるたわみの数値計算を行っている。本研究では、リソスフェアを均質な平板状媒質の集合体と捉え、平板の厚さの分布を変えることで、不均一なリソスフェア厚を再現する。発表では、Solomon and Head [1980]のモデル・不均一なリソスフェア厚を考慮したモデルと観測の比較結果を報告する。

ポシドニウスクレータの構造と地質解釈

○石原吉明 (JSPEC/JAXA) ・千葉達郎 (アジア航測) ・春山純一 (ISAS/JAXA)
大嶽久志 (JSPEC/JAXA) ・大竹真紀子 (ISAS/JAXA)

ポシドニウスクレータは、月の表側、晴れの海近傍に存在する典型的な Floor-Fractured Crater であり、インブリウム代に形成されたと考えられている。地上望遠鏡でもクレータフロアの複雑な様子を見る事が出来るため、探査機による観測データが得られる以前から、フロアの複雑な構造の成因が注目されているが、未だにはっきりとしていない。そこで、我々は、月周回探査機「かぐや」に搭載された「地形カメラ」によって得られた詳細な地形データと、「マルチバンドイメージャ」により得られた分光画像データをもとに、ポシドニウスクレータの構造と地質の特徴から成因の推定を試みた。

これまでポシドニウスクレータ内のリルは、クレータ内に流入した溶岩流により形成されたと考えられてきたが、「かぐや」で得られた詳細な地形データからは、逆にクレータ内での火山活動により噴出した溶岩流により形成され、クレータ外へ流出していると解釈される。また、地形データ・分光画像データを組み合わせる事で、フロアの東部の大部分は高地地殻物質であり、さらに全体として西下がりになっている事、また割れ目には特に玄武岩の噴出が見られない事が分かった。これらを組み合わせて考えると、ポシドニウスクレータの複雑な構造の成因は、クレータ形成後にクレータ内で起こった火山活動により、高地地殻からなるフロアの下に玄武岩溶岩が噴出し、引き剥がされたフロアが玄武岩と高地地殻との密度差により、鍋蓋様に浮いた構造となった、またフロアのひび割れは、引き剥がし・浮揚の際に入ったと考える事が出来る。

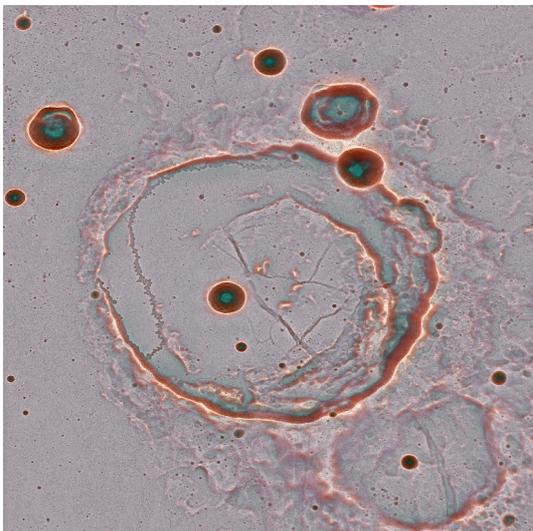


図 1 「かぐや」に搭載された地形カメラによる地形モデルから作製されたポシドニウスクレータの赤色立体画像。西下がり傾いたフロアや、非常に蛇行したリル、さらには南部のリムを切る断層と思われる構造を見る事が出来る。

月面swirl地域における主要鉱物分布と 風化過程への制約～Mare Ingenii地域を中心に～

○小川佳子¹, 春山純一², 松永恒雄³, 大竹真紀子², 中村良介⁴, 廣井孝弘⁵, 林洋平,
横田康弘³, 山本聡³, 佐々木晶⁶

¹会津大CAIST/ARC-Space ²ISAS/JAXA ³国立環境研究所 ⁴産総研 ⁵ブラウン大 ⁶大阪大学

月面swirlは、反射率の高い明るく白いゾーンと反射率の低い暗く黒いゾーンが不規則に渦を巻いているように見えるアルベドコントラスト構造であり、比較的強い磁気異常を示すことが知られている [ex. Richmond and Hood, 2008]。これまでに月全球で15個のswirl構造が確認されている。その大きさや分布、渦模様については、まちまちであり、系統性は見られない [Blewett et al., 2011]。月面swirlの成因については、磁場シールドにより太陽風が遮蔽され、宇宙風化が”まだら”に起こったという説 [ex. Hood and Schubert, 1980]と、彗星(小天体)衝突により表面物質が”ところどころ”吹き飛ばされたという説 [Pinet et al., 2000]が古典的である。しかし、定量的な議論は部分的な観測データに限定されてきた。最近では、ダストトランスポート説 (荷電粒子巻き上げ) [Garrick-Bethell et al., 2011] や compaction光効果説 [Pieters et al., 2014] などの新しい物理モデルや仮説も提案され始めてきた。依然swirlの成因と明暗模様の実態について統一的な理解は得られていないと言える。

本研究では、月全球を高精度で網羅している最新の観測データを横断的に利用し、swirlの実態解明に迫ることを目指す。まず、可視画像を用いて、Mare Ingenii地域 (33.7S, 163.5E)を中心に、未知のswirlの探索を行う。この地域では、これまで認識されてきた大規模なアルベド構造の他に小規模のswirl構造が見られることが指摘されている (大竹さんとの私信, 2014)。従来から確認されているswirl構造と合わせ、大小swirlが偏在する比較的広い領域を範囲として、可視-近赤外分光データを用いた主成分分析と修正ガウシアンモデル [Sunshine et al., 1990]による網羅的なスペクトル分解を行う。周辺領域における主要鉱物マップと風化度マップを作ることを目指す。750nm反射率強度と可視波長域赤化度そして1 μ m吸収帯強度の変化の関係に基づいて風化度マップを、吸収帯中心波長、半値幅、深度から1次的な鉱物分布指標マップを作成することを試みる。また、Mare Ingenii以外のswirl地域においても同様の手法で鉱物と風化度の空間分布を明らかにすることを目指す。そして、結果をWeb-GIS「月光」(http://fructus.u-aizu.ac.jp/gekko_info/)上に可視化する。鉱物と風化度とアルベド分布の相関解析を行い、swirlの明暗部分の実態(アルベド高低が鉱物差か宇宙風化度の違いか、両方か、他の要素の可能性が高いか)を理解する。また、さらに、残留磁化、元素分布、地下構造、表面粗度との相関性も定量的に調べたい。swirlの成因と明暗模様の実態について、これまでに提案されてきた仮説の可否を検討し、swirl形成過程に制約を与えることにつなげたい。なお、本研究はWeb-GISを用いた将来的な月全球統合解析のテストケースを兼ねている。

かぐや MI データを用いた光学関数の再考

○小林直樹, 大竹真紀子¹, 横田康弘²

¹宇宙科学研究所, ²国立環境研究所

かぐやの搭載機器の一つであるマルチバンドイメジャー (MI) は可視 5 バンド, 近赤外 4 バンドを持つ多バンド分光イメジャーである。MI データはこれまで, 純粋な斜長石に近い鉱物組成を持つ斜長岩 (PAN) が月面に普遍的に存在すること, 主に高地地殻の Mg# の分布を示すなど, 近年の月面上の物質科学研究に大きな成果を与え, 月地殻の形成・進化の議論を深化させる成果を出し続けている。MI データから物質科学的な議論を展開する上で正しい反射スペクトルを校正し求めることが重要である。MI データは多くの科学成果を生み出しつつあるが, 一方, その輝度や反射スペクトルには奇妙な問題もあることが知られている。その一つが同一地点の校正された反射スペクトルが異なる周回間で若干の違いを示すことである。また MI のモザイク画像には時間間隔の開いた周回のデータを重ねる必要がある。このため, 反射率の校正に誤差があるとモザイク画像に周回間の違いが帯状のパターンとして出現する。科学成果の創出にはこうした問題を念頭において注意深くデータを扱えば問題となることは多くはないが, スペクトルの変化は鉱物組成同定の際の誤認要因となりうるし, モザイク画像の帯状パターンは地質区分境界と近接すると境界の判断を難しくする場合などがある。このためこれらの問題の原因を見極め, 対処法を編み出すことは今後のかぐや MI データの利用促進の面において重要な課題となっている。今回我々は問題の原因候補の一つである光学補正関数を再検討した。MI の光学補正に使われている光学関数 (測光関数) はディスク関数と位相関数からなる。ディスク関数には Lunar Lambert 関数が用いられており, 位相関数も含め光学補正関数に含まれる各種パラメータは Yokota et al. (2011) のかぐやスペクトルプロファイラ (SP) の解析結果が用いられている。今回, 上に述べた輝度・反射スペクトルの差異の原因究明と対策のため, 特に光学関数の一部であるディスク関数について再考した。Lunar Lambert 関数は経験的な光学補正関数であり, Lommel-Seeliger 関数と Lambert 関数の分配 (重み付け) を表す limb darkening $L(\alpha)$ からなる。L は位相角 α の関数であり, α の 3 次の多項式として与えられている (McEwen 1996)。ディスク関数は α の他, 入射角 i , 出射角 e にも依存するため, 反射点の正確な斜度も必要となる。今回の解析では MI の視差から求められた形状モデルを用いた。原理的には観測データから光学補正関数の経験式を構成することは可能であるが, i, e, α の分布にも限りがあるので, 表現パラメータの自由度を下げるためアルベド区分別に $L(\alpha)$ の多項式の係数をデータから決め直した。これまで $L(\alpha)$ は波長依存性の無いものとして扱われていたが, $L(\alpha)$ の最適解は若干の波長依存性を示した。今回得た $L(\alpha)$ を用いた反射スペクトルの結果も報告する。

月の初期における膨張過程と火成活動

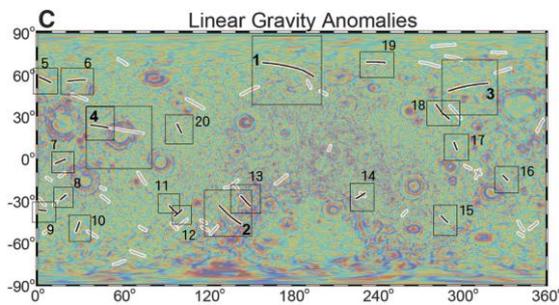
○澤田 なつ季¹・諸田 智克¹・加藤伸祐¹・石原 吉明³・平松 良浩²

1 名古屋大学 2 金沢大学 3 宇宙航空研究開発機構

月はマグマオーシャン(LMO)の状態から始まり、その後マントル再溶融による火山活動があったと考えられているが、LMO 固化～マントル再溶融までの熱進化の経緯については明らかになっていない。それはマントル再溶融による月の全球膨張に伴う表面地形にその痕跡が見られないからである。Andrew-Hanna et al. (2013)は月の重力分布図から線状重力異常(LGA)を発見し、その成因が月歴史初期の全球膨張によるマグマの貫入であると推定した。本研究では月形成初期の熱進化過程を理解するため LGA に着目し、月歴史初期の全球膨張とマグマの貫入について地形学的、物質科学的観点から検証した。

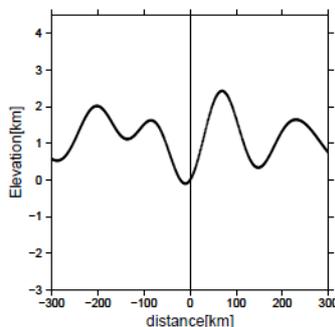
LOLA 地形データ[1]を用いて月形成初期膨張由来の地形学的証拠を探索する。まず LGA 上の地形的特徴を強調するため、LGA に垂直な測線の地形断面図を平均化した地形プロファイルを各 LGA について作成した。作成した地形プロファイルを用いて、「LGA 上の標高」と「周辺標高」を比較した。その結果、大多数の LGA(20ヶ所中 18ヶ所)では「LGA 上の標高」は「周辺標高」と比べて谷地形を示すことが分かった。このことから LGA 上の地形は月形成初期の全球膨張に起因する伸張場で形成したと考えられる。これらの谷地形から見積もられる月半径変化量は 0.1~1.0km であり、月熱史モデル[Solomon and Head (1979)]による推定値と矛盾しない。

また LGA がマグマ貫入起源と仮定すると、その後の天体衝突により貫入岩が表面に露出した可能性がある。そのような露頭の発見は LGA がマグマ貫入起源である仮説に対する最も直接的な証拠となる。そこで我々はかぐやのマルチバンドイメジャー (MI)[2]データから Fe・Ti 含有量に換算した[Otake et al. (2012)]データを用いて貫入岩の露頭を探索したが、発見されなかった。しかし、LGA 上の平均 Fe 量は高地地殻よりも優位に高いことが分かった。この結果から、LGA 上の表層物質は天体衝突によって掘削されたマグマ起源物質が混入していると考えられる。

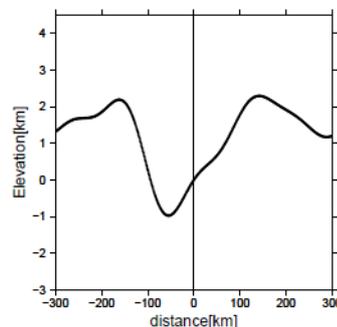


左：各 LGA の位置情報

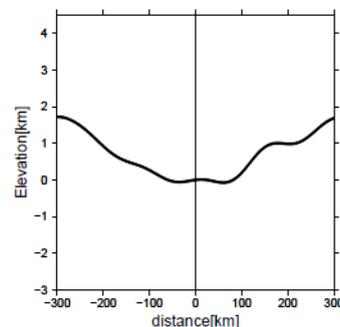
[Andrew-Hanna et al., 2013 より加筆]



LGA1



LGA2



LGA3

上：LGA 上(横軸 0 の時)の標高をゼロとして相対評価した時の地形プロファイル

[1] LOLA Date Archive (<http://imbrium.mit.edu/LOLA.html>)

[2] Kaguya Date Archive (<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja>)

20 億年前に発生したスーパーブルームに伴う月面地形の変形

○加藤 伸祐¹ 諸田 智克¹ 山口 靖¹ 渡邊 誠一郎¹ 大嶽 久志² 大竹 真紀子²

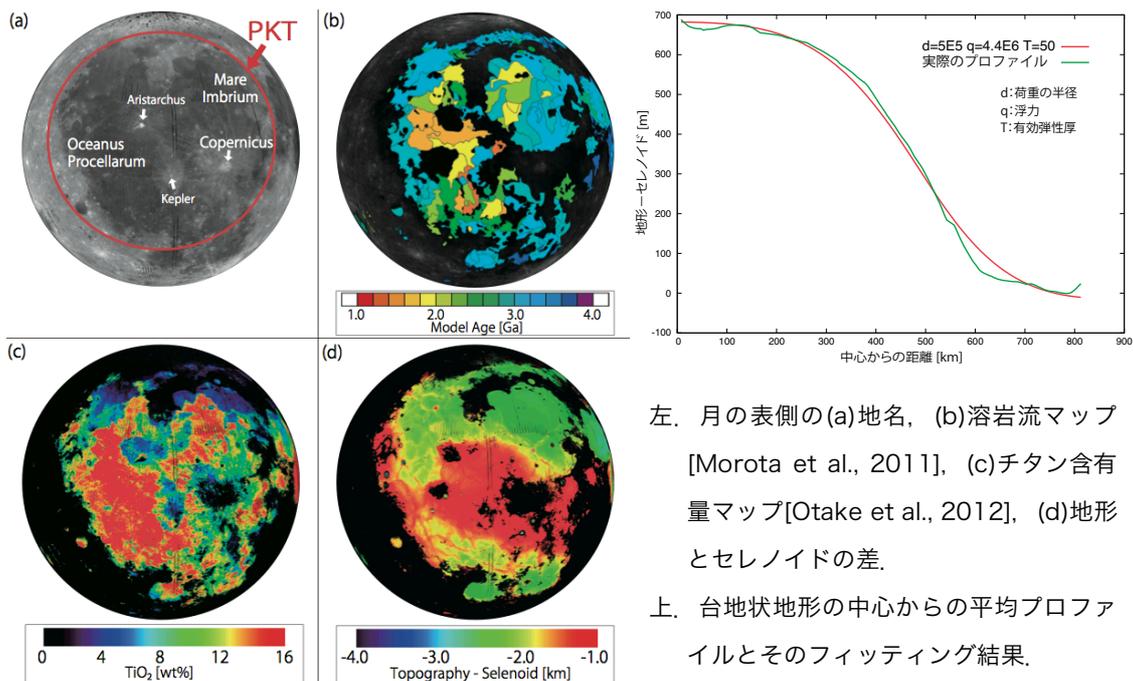
¹名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻 ²宇宙航空研究開発機構

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の大規模な構造変化の有無については未だに良く分かっていない。その解決の方法として、月の海の玄武岩の組成を調べることは有効である。玄武岩の組成と年代との関係からマンツルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性があり、マグマオーシャンの固化モデルや月マンツルの進化モデルを制約できると期待される。

月の海の噴出年代とチタン含有量の関係を調査したこれまでの我々の研究から、約 23 億年を境にしてチタン含有量が有意に上昇していることが分かっている。我々は 23 億年前以前を「Phase-1 火成活動」、23 億年前以後を「Phase-2 火成活動」と呼び、このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えた。そして、Phase-2 火成活動は一部の領域で短期間に集中して起きていること、選択的に高いチタン含有量であることから、月深部に起源を持つスーパーホットブルームによるものであるという仮説を提唱している。

もしスーパーホットブルームが起こったとすると、それに伴う何らかの地形的な痕跡が残されている可能性がある。そこで地形とセレノイドとの差をとってみると、PKT (Procellarum KREEP Terrane) の中心で直径約 1000km、高さ 700m の円形の台地状の地形が観測された(左図 d)。またこの台地は Phase-2 の火成活動の中心地とよく一致しており、これはスーパーホットブルームの上昇による表面の隆起であることを強く示唆している。

Solomon and Head [1980]では弾性リソスフェアにかかる荷重によってできる撓みを計算し、月の海の地域の地形をよく説明する有効弾性厚を定量的に評価した。これによると、Mare Imbrium の下のリソスフェアの有効弾性厚は 50~75km とされている。本研究では、Solomon and Head [1979]の手法を用いて、スーパーホットブルームの浮力が台地状の地形をつくったと仮定し、ブルームの浮力・半径、弾性リソスフェアの厚さを変えて地形プロファイルを出し、観測地形との比較を行った。その結果、もっとも観測をよく説明する有効弾性厚は~50km であった。スーパーホットブルームが発生した時期は Mare Imbrium の主要な噴出時期 (30 億年前以前) よりも遅いため、この台地の下の有効弾性厚は 50~75km よりも厚いと考えられる。しかし実際は Mare Imbrium の下よりも薄い。これは高温のスーパーホットブルームが上昇してきたため、リソスフェアの下面の温度が上昇し、有効弾性厚が薄くなったためだと考えられる。



左. 月の表側の(a)地名, (b)溶岩流マップ [Morota et al., 2011], (c)チタン含有量マップ[Otake et al., 2012], (d)地形とセレノイドの差。
上. 台地状地形の中心からの平均プロファイルとそのフィッティング結果。

月の衝突盆地の放出物厚モデルにもとづく メガレゴリス厚分布

○諸田 智克¹, 春山 純一², 大竹 真紀子², 松永 恒雄³, 山本 聡³, 横田 康弘³, 本田 親寿⁴,
石原 吉明², 小林 進悟⁵, 古本 宗充¹, 武田 弘⁶,
¹名古屋大学環境学研究科, ²宇宙航空研究開発機構, ³国立環境研究所,
⁴会津大学, ⁵放射線医学総合研究所, ⁶東京大学

巨大衝突によるクレータ形成過程の理解は初期の月惑星の構造や熱進化を理解する上で重要である。特に衝突盆地の放出物は月惑星の全球にわたって表面を覆い、水平方向の混合を引き起こした。この混合層の厚さや分布の理解はリモートセンシングやサンプルリターン試料の物質科学的な情報を解釈する上で欠かせない。そこで本研究では月の衝突盆地上のクレータカウンティングに基づいて他の衝突盆地からの放出物厚を推定する新たな手法を提案するとともに、衝突盆地放出物厚のモデルを制約する。さらに放出物厚モデルを用いて、月全球のメガレゴリス厚分布の推定を行う。

クレータ放出物厚のモデルは経験的に [McGetchin et al. 1973; Pike 1977], 次元解析にもとづいて実験的に [Housen et al. 1983] 得られている。衝突盆地の層序関係は知られているので、それぞれの衝突盆地上に、それよりも若い盆地からの放出物がどれだけ堆積しているかは放出物厚の各モデルを用いて推定できる。それによりその場所でいつの時代にどれだけのサイズのクレータが消失したかを模擬することができ、その結果としてクレータサイズ頻度分布 (CSFD) 形状モデルの作成が可能である。これを実際に観測される CSFD と比較することで、最も妥当な放出物厚モデルの制約を行った。その結果として、どの盆地においても McGetchin et al. [1973]モデルは <2km の CSFD においてクレータ数密度の過剰を示す。一方で、次元解析に基づくモデルでは観測された CSFD 形状を最も良く再現することが分かった。

Housen et al. [1983] の放出物厚モデルを用いて月全球のメガレゴリス厚分布を推定した (図1)。これを見ると月面でもっとも厚いメガレゴリス領域は SPA 盆地内と Procellarum 盆地内であり、その厚さは>10km に及ぶ。最も薄い領域は月の裏側の北半球で見られ、この領域が月の初期地殻組成を最もよく保存していると考えられる。このことは、かぐや GRS による Th 分布 [Kobayashi et al. 2012] や SP による Mg# の分布 [Ohtake et al. 2012] から、月の裏側北半球において最も始原始的な地殻が存在していることが示唆されていることと整合的である。

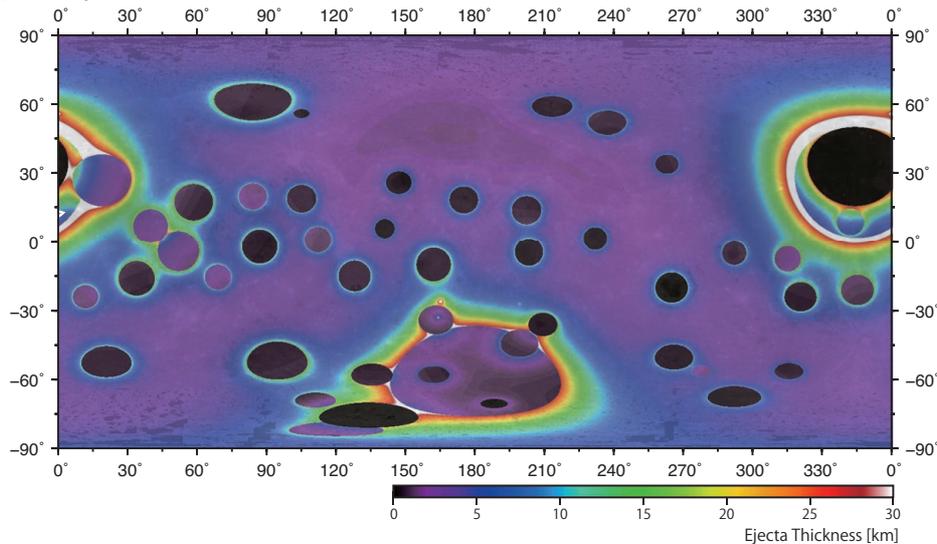


図1 メガレゴリス厚分布。月全球において衝突盆地は 48 個発見されている。それぞれについて、一時クレータサイズ [Craft 1985; Ishihara et al. 2010]を用いて放出物厚を推定し積算した。

GRAIL 衛星重力データを用いた月の地殻形成過程についての考察

○山本圭香¹・春山純一¹・大竹真紀子¹・岩田隆浩¹・石原吉明¹・福田洋一²

¹宇宙航空研究開発機構・²京都大学大学院理学研究科

月の地殻の構造とその形成過程についての理解は、月の初期の熱進化を解明する上で重要である。月の地殻の形成とその非対称性については、これまで潮汐作用、対流や結晶化の非対称性、他天体の衝突などさまざまな仮説が提唱されてきたが、十分な精度の観測データの不足により、詳細な検証はおこなわれてこなかった。

近年、かぐや、LRO、GRAIL などの月探査衛星による高精度、高解像度の衛星データが利用できるようになり、実観測データに基づいた詳細な仮説の検証や考察が可能となった。たとえば、Garrick-Bethell et al. (2014)では、LRO、GRAIL 衛星から得られた高精度の地形、重力場データに基づき、月の形成初期の潮汐による熱摩擦の差が地殻厚の非対称性を形成したとの仮説を提唱した。一方で、Kobayashi et al. (2012)では、かぐやのガンマ線データから得られた月のトリウム分布が、月の地殻厚と良い相関を持つことを示した。こうした鉱物学的なアプローチから得られる情報は、上記のような物理的観点から得られた仮説の検証に重要な役割を果たす。

本研究では、地殻の形成過程についての手がかりを得るために、Kobayashi et al. (2014) によるトリウム分布と、LRO、GRAIL 衛星から得られた月の地殻厚マップとの相関を再調査した。両者のデータを球面調和関数展開し、波長ごとの相関を調べた。その結果、トリウム分布と地殻厚は球面調和関数の 2 次の項における相関は低いことがわかり、2 次の項を除いた 3 次以降の高次項とは高い相関を持つことが示された。この事実からわれわれは、月の地殻形成において、2 次の項とそれよりも高次の項が異なるプロセスにおいて形成された可能性があると考えた。発表では、この考察と過去の代表的な仮説との整合性について検討し、月の地殻形成過程についてのディスカッションをおこなう。

<参考文献>

Garrick-Bethell, I. et al.: The tidal-rotational shape of the Moon and evidence for polar wander. *Nature* (2014), doi:10.1038/nature13639.

Kobayashi, S. et al. : Lunar farside Th distribution measured by Kaguya gamma-ray spectrometer. *EPSL* 337-338,(2012) 10-16.

高圧での月の高Ti玄武岩の熔融関係

The melting relation of lunar high-Ti basalt at high pressure

○五十嵐 愛子¹、大谷 栄治¹、坂巻 竜也¹、朝原 友紀¹、鈴木 昭夫¹

1 東北大学大学院理学研究科

月表面には月深部から噴出したとされる、チタンに富む玄武岩が存在する。月マントルはマグマオーシャン固化の最終過程で大規模なオーバーターンを経験したと考えられており、密度の高いチタンに富む玄武岩が深部に沈み込んだ可能性が指摘されている。従って月の玄武岩の月深部条件での熔融関係を調べることは月の成り立ちや内部構造を知る上で重要である。そこで本研究では月の玄武岩のうち最もチタンに富む Apollo Black glass 14 の組成を用いて、月震波の高減衰域が存在する最下部マントルの圧力条件(~4 GPa)までの高温高圧実験を行った。本実験により、月マントル最下部におけるチタンに富む組成のマントルの相関係を実験的に検証し、月内部構造モデルとの対比を行った。

深さ400 km程度にあたる2 GPaと、深さ800 km程度にあたる4 GPaで Apollo Black glass 14 の熔融関係を調べた(図1)。4 GPaにおけるリキダス相はザクロ石で、次に単斜輝石、イルメナイトの順で晶出した。ソリダス温度は1325 °C、リキダス温度は1450 °Cであった。化学組成からメルトの密度を見積もった結果、1450 °Cのメルトの密度は3.64 g/cm³であった。また部分熔融度が低いほどチタンの濃度が高く、部分熔融液の密度が大きい。Apollo Black glass 14 のメルトの密度と最下部マントルの密度の推定値を比較するとメルトはマントルより重くなり、最下部マントルで重力的に安定であることがわかる。本実験結果より、月の最下部マントルの温度が1325 °Cより高温である場合マントルオーバーターンによって沈降したチタンに富むマントル成分は部分熔融し、月震波の高減衰をもたらしている可能性が示唆された。

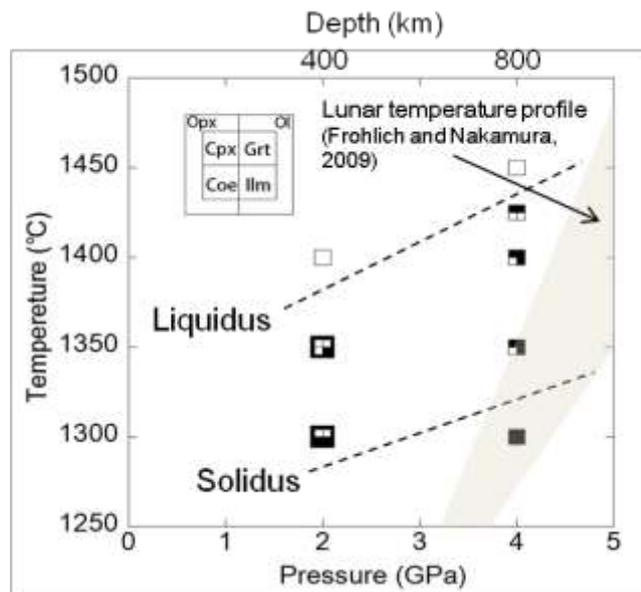


図1. Apollo Black glass 14 の熔融関係

高圧下における月マグマの粘度

Viscosity of lunar magma at high pressure

○鈴木 昭夫¹

1 東北大学大学院理学研究科

月のマグマは TiO_2 の含有量に応じて区分され、地球の玄武岩と同程度のものから 15wt% を超えるものまで多岐にわたる。地球のマグマについては、モデル組成も含め様々な研究が進んでおり、密度や粘度を計算によって求めることも可能である。しかしながら、高い TiO_2 含有量で特徴付けられる月マグマに対して、地球のマグマの計算式を適用することはできない。その主たる理由はマグマ中における TiO_x の構造が圧力・温度・化学組成に依存して変化するためである。マグマの構造が変われば物性も変わる。また、高い TiO_2 含有量のメルトに関する高温高圧下での知見は充分でない。そこで本研究ではまず、モデル組成として $\text{K}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{11}$ 組成のメルトについて、高温高圧下での粘度を測定した。粘度測定は高エネルギー加速器研究機構の放射光施設である PF-AR の NE7A ステーションにおいて X 線イメージング落球法で行った。高圧セルに $\text{K}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{11}$ 組成の試料と白金球を入れておき、高温高圧下で融解させたときに試料中を落下する白金球の速度を測定し、終端速度から粘度を求めた。実験の結果、およそ 3GPa までは圧力の増加とともに粘度が減少するのに対し、3~6GPa までは粘度の変化が緩やかになることが示された。 $\text{K}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{11}$ 組成のメルトの高温高圧下での構造は調べられていないが、高圧下でメルトから急冷して作ったガラスについては Paris et al. (1994) によって XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) で調べられている。その結果、 $\text{K}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{11}$ ガラス中の Ti は常圧では 4.8 であるが 2.5GPa で 5.8 まで増加し、3.0GPa でも 5.8 のままであった。本研究によって得られた粘度と対比すると、粘度減少は Ti の配位数増加、すなわちメルト中の網目の切断によるものと解釈できる。 $\text{K}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{11}$ の Ti/Si 比は高チタンマグマとほぼ等しい、月の高チタンマグマについても Ti の配位数変化により、低圧すなわち月面に近づくほど粘度が増加するものと考えられる。

アポロ月震計による走時データと 最新の測月データから推定される月深部構造

○松本晃治¹, 山田竜平¹, 菊池冬彦¹, 鎌田俊一², 石原吉明³,
岩田隆浩³, 花田英夫¹, 佐々木晶⁴

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

² カリフォルニア大学サンタクルーズ校

³ 宇宙航空研究開発機構

⁴ 大阪大学

月の内部構造を知ることは、月の起源と進化を理解するうえで重要である。アポロ月震計データを利用して月の内部構造を推定する研究は数多くなされたが、およそ 1000 km 以深の構造には大きな不確定性が残る。質量、平均慣性モーメント、ラブ数などの測月学的な観測データも内部構造を拘束しうる。ラブ数は天体の潮汐変形のし易さを表すものであり、一般に、内部に流体層を持つ天体は固化した天体より大きなラブ数を持つ。最新の GRAIL ミッションによって月の 2 次のポテンシャルラブ数 k_2 の精度は 1 % まで向上した。本研究は、 k_2 を含む最新の測月データ(Williams et al., 2014)とアポロ月震計による走時データを組み合わせ月内部構造を推定することを試みる。

月の内部を、地殻、上部・中部・下部マントル、低速度層、流体外核、固体内核の 7 層に分けたモデルを考え、それぞれの層の厚さ、密度、ずり弾性率、体積弾性率をパラメータとする。ただし、上部・中部マントル境界と中部・下部マントル境界はそれぞれ表面から 500 km、900 km の位置に固定し、固体内核の密度は 8000 kg/m^3 と仮定した。

平均地殻厚さは $46 \pm 4 \text{ km}$ と推定された。これは Wieczorek et al. (2012) による 34 - 43 km という見積もりと調和的である。平均地殻密度の多くは $2500 \sim 2600 \text{ kg/m}^3$ の間にサンプルされ、同じく Wieczorek et al. (2012) が報告した 2550 kg/m^3 という値と調和的である。推定されたマントル中の密度、P 波速度、S 波速度は深くなるほどその不確定性が大きくなるが、全体的に見て Weber et al. (2011) や Garcia et al. (2011) の結果から大きく外れるものではない。観測値を満たす流体外核の半径と密度の幅は広く、双方を精度よく決定するのは難しい。流体外核の半径と低速度層の厚さの間には明瞭な負の相関関係が見られる。小さな流体外核には厚い低速度層が伴わなければならない、その逆も成り立つ。電磁気観測から流体外核の半径の上限値が 400 km と与えられている(Shimizu et al., 2013)。これを考慮に入れると、低速度層は少なくとも百数十 km 以上の厚さを持たねばならない。低速度層内の S 波速度はおよそ 3 km/s 以下であり、 $1 \sim 2 \text{ km/s}$ という低い値の確率密度が高い。固体内核の半径の上限値は 280 km であることが期待され、2 次の変位ラブ数 h_2 の値は 0.0423 ± 0.0004 と予想される。

月面クレータからみた過去 10 億年の天体衝突史

加藤麻美 諸田智克¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

月は過去 40 億年の天体衝突の記録をクレータとして保存しており、それは太陽系内側の小天体の軌道・衝突進化史を知る上で重要な情報である。天体衝突史の理解は、アポロとルナの岩石試料の放射年代とサンプル採取地点のクレータ数密度の関係から得られているが、岩石試料は 39 億年～31 億年間に集中しているため、過去 30 億年間の天体衝突の歴史はよく分かっていない。一方で、月の光条クレータや地球クレータの統計研究、月試料中の衝突ガラスの研究などから、ここ数億年にクレータ生成率が上昇しているという仮説が提案されている。

近年、月探査の成功により高解像度の画像データによる月面の詳細画像が蓄積され、個々のクレータの年代決定が可能となった。本研究では、月周回衛星「かぐや」に搭載された地形カメラの画像データを用いて、直径 20km 以上の光条クレータを対象に月表側のクレータの相対年代を決定した。そして Wilhelms et al. [1978] で同定された Eratosthenian (32～8 億年前) + Copernican (8 億年間～現在) クレータと本研究で同定された Copernican クレータの数密度から、過去 32 億年間と過去 8 億年間の平均のクレータ生成率を比較した。

解析の結果、過去 32 億年に比べて過去 8 億年間のフラックスは 0.34 倍と低いことがわかった。この結果の解釈として、下記の 2 つの可能性が考えられる。(1) 実際に生成率が 0.34 倍程度に減少した。(2) Copernicus の年代は実は 3 億年程度であり、生成率は過去 32 億年間一定である。本発表では両者の可能性について議論する。

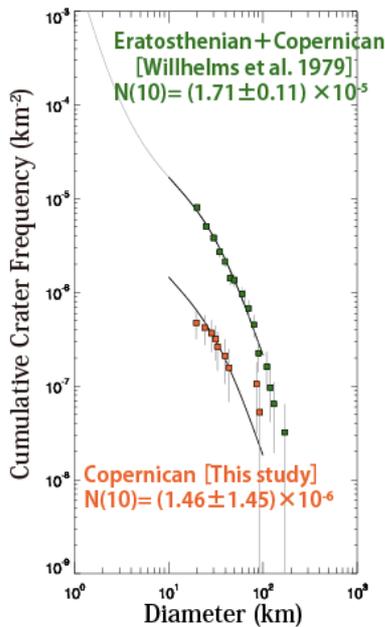


図 2. Eratosthenian + Copernican [Wilhelms et al. 1979] と Copernican [This study] のサイズ頻度分布の比較。

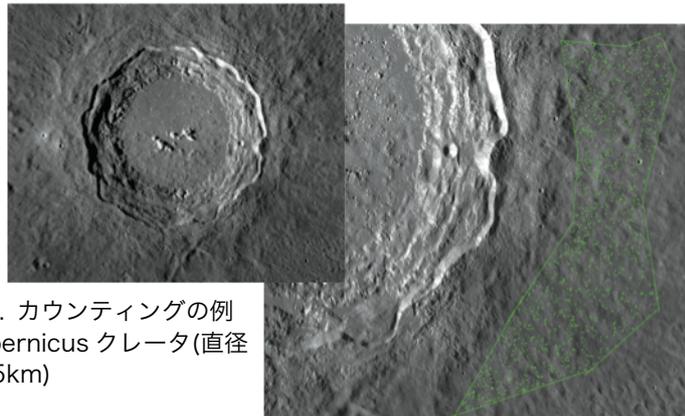


図 1. カウンティングの例
Copernicus クレータ (直径 92.5km)

	年代 [Gyr]	クレータ 個数	調査領域の 面積[km ²]	個数密度 N(>10km) [10 ⁵ km ²]	生成率 F (>10km) [10 ⁷ km ² ・Gyr ⁻¹]
Eratosthenian+Copernican [Wilhelms et al. 1979]	3.2	251	3.1 × 10 ⁷	1.71 ± 0.11	5.34 ± 0.33
Copernican [This study]	0.81	9(10)	1.9 × 10 ⁷	0.146 ± 0.145 (0.190 ± 0.188)	1.80 ± 1.80 (2.34 ± 2.32)

月と水星のクレーター空間分布の定量的解析

○伊東里保¹, 本田親寿¹, 平田成¹, 諸田智克²

¹会津大学大学院コンピュータ理工学研究科, ²名古屋大学大学院環境学研究科

衝突クレーターは天体表面において一般的にランダムに分布している。しかし、月のように自転と公転が同期回転している天体ではクレーターの空間分布に偏りが生じる可能性がある。その特徴として、クレーターの生成率は apex (0°N , -90°E) で最大となり antapex (0°N , 90°E) で最小となるとされている (Zhanle et al., 2001)。光条を持つクレーターの空間分布について調べた研究では、クレーターのサイズに関わらず Leading side (180°E - 360°E , apex を含む公転の進行方向を向いている半球)の方が Trailing side (0°E ~ 180°E) よりもクレーターの数密度が高いという結果が得られている (Morota et al., 2005)。

クレーターの空間分布を定量的に説明する手法としてクレーターの位置と大きさを基に地表面を分割したポロノイ領域面積を用いた手法が提案されている (Kinoshita, 2014)。本研究では月全球のクレーター空間分布についてポロノイ領域面積を用いた評価を行なった。また、自転と公転が同期回転をしている月の比較対象として、太陽の周りを同期回転していない水星のクレーター空間分布についても評価を行う。用いたクレーターのデータベースは、月は “LOLA Large Crater Catalog” (Head et al., 2010)、水星は “Crater $\geq 20\text{km}$ on Mercury from MESSENGER and Mariner 10 data” (Fassett et al., 2011) であり、本研究ではクレーターの抽出漏れがないとされる直径 100km 以上のクレーターを評価した。月全球の直径 100km 以上のクレーターに対しポロノイ分割を適用し、クレーターが理想的にランダムな分布を示す天体表面と比較する事で、各クレーターの空間分布が密か疎かを定量的に判断する。その結果、空間分布が密であると判断されたクレーターの 66 % が Trailing side に分布していた。同様の手法で水星の直径 100km 以上のクレーターの空間分布について調べてみると、空間分布が密となっているクレーター群は、全球に満遍なく散らばっているように見える。本発表では月と水星のクレーターに対してポロノイ分割を適用して得られた結果から、それぞれの天体のクレーター空間分布にどのような特徴があるのかについて詳細を議論する。

衝突実験に基づいたクレーター周辺バルク密度と誘電率の測定

○石山謙¹, 熊本篤志¹, 高木靖彦², 中村教博¹

¹東北大学, ²愛知東邦大学,

月では、地球と異なって、その誕生から現在にいたるまでの隕石衝突の履歴がその表層にとどめられている。近年、日本が打ち上げた月周回探査機「かぐや」のレーダーサウンダー観測データにより、領域における表層数百 m までの玄武岩の比誘電率が調べられた[Ishiyama et al., 2013; 石山 他, 2014]。その比誘電率は、岩石のバルク密度に強く依存するため[e.g., Carrier et al., 1991]、表層の空隙率も知ることができる。

月の湿りの海では、玄武岩が約 20%以上の空隙をもつことが示唆された[Ishiyama et al., 2013]。この空隙源の候補は主に 3 つあり、火山灰の空隙成分、溶岩固有の空隙成分（気孔やマイクロなクラック）、および隕石衝突由来の空隙成分（マイクロ・マクロなクラック）である。溶岩固有の空隙成分や隕石衝突由来のマイクロなクラックは、アポロ計画で月面から採取された玄武岩サンプルにも含まれており、平均で約 7%の空隙率が含まれている[Kiefer et al., 2012]。したがって、「かぐや」で推定された空隙率は、その倍以上の隕石衝突に由来するマクロなクラックの寄与によるものであることが示唆された。一方で、実際の隕石衝突で形成されるクラックが定量的にどのくらいの空隙を生じうるかは、明らかにされていない。本研究では、隕石衝突由来のクラックの影響を調べるため、衝突実験を行い、形成されたクレーター周辺のバルク密度や比誘電率の測定を行った。

本研究では、2011 年 12 月に宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス（水素）銃を使って行われた衝突実験で得られた玄武岩試料の計測を行った。玄武岩試料のサイズは 20cm x 20cm x 8.9cm、そのバルク密度は $2.92 \pm 0.01 \text{g/cm}^3$ であった。この標的に直径 0.71cm のナイロン弾丸 (0.218g) を 4380 m/sec で衝突させて、クレーターを作成した。このクレーターの直径は ~6cm であり、そのクレーター内で直径 2.5cm の円柱状のコアサンプルを切り出した。このコアサンプルを 22 分割して、約 2mm の厚片を作成し、深さ方向のバルク密度と比誘電率の分布を測定した。比誘電率は、東陽テクニカ社の誘電体測定システム（1260 型周波数応答アナライザ、12962A 型温室サンプルホルダー）で 5MHz の周波数で測定した。

衝突実験後の玄武岩のバルク密度は、最上部の厚片（深さ ~1.4cm）で $2.87 \pm 0.02 \text{g/cm}^3$ であり、深くなるにつれ徐々に低下していき、深さ ~3.0cm から ~7.0cm の範囲では、 $2.90 \pm 0.01 \text{g/cm}^3$ となった。深さ ~7cm より深い範囲では、密度は低下の傾向を示した。~7.0cm より深部で低下したのは、ターゲットの背面（クレーターの反対側の自由表面）で発生した反射波による引張り応力により形成された、クレーター近傍とは異なる成因・分布のクラックによるものと考えられる。衝突実験前の玄武岩のバルク密度と比べると、衝突実験後は最上部の厚片で $\sim 0.04 \text{g/cm}^3$ の低下を示し、これが衝突実験で形成されたクラックによるバルク密度変化と考えられる。しかし、この結果から 1 回の衝突実験によって形成されるクラックは、月表層の主な空隙源になりえないことが示唆され、クレーター周辺に堆積するイジェクタ層などの別の空隙源の可能性も検討する必要もでてきた。また、比誘電率は、最上部の厚片で最低値 (~6.5) を示し、深くなるにしたがって最大で ~8 程度まで増加することがわかった。測定したバルク密度から推定される比誘電率は、経験的に求めることができ[e.g., Carrier et al., 1991]、深さ方向でほぼ一定値 (~6.6) となるが、測定した比誘電率の傾向とは一致しない。この原因は、空隙の形状や入り方に由来する可能性があり、今後、その効果を考慮したモデルの検討や、この効果の「かぐや」の観測への寄与についても検討する。

石膏の衝突破壊強度に対する複数回衝突の影響

保井 みなみ

神戸大学自然科学系先端融合研究環

はじめに：太陽系の天体はその進化過程において、他天体との衝突を多数回にわたり経験したと考えられている。そのため、天体表面下または内部にわたって、多くのクラックが存在すると思われる。事前衝突を受けた天体の衝突破壊強度は、事前衝突を経験していない天体と比べて小さくなるため、その後の天体の進化過程に大きな変化をもたらすと考えられる。本研究ではこれまで、多結晶氷の複数回衝突破壊実験を行い、氷天体の衝突破壊条件に対する事前衝突の影響を明らかにした。一方で、微惑星や小惑星、彗星、小・中衛星は多孔質であると考えられている。そこで今回は、多孔質天体を模擬した石膏を用いて複数回衝突破壊実験を行い、衝突破壊条件に対する衝突回数の依存性を定量的に調べることにした。

実験方法：弾丸は直径 25mm の石膏球、標的は直径 70mm の石膏球を用いた。伴に空隙率は 52~56% である。衝突実験は神戸大学の横型一段式軽ガス銃で行った。弾丸を同標的に 1, 2, 4, 15 回と衝突させ、衝突面は衝突回数毎に変化させた。また 1 つの標的に衝突させる弾丸速度は変化させず、衝突速度 V_i は 71~167m/s とした。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、破片速度を計測した。また、実験後は弾丸、標的共に回収し、その破片質量を計測した。

実験結果：図 1 は、1 つの標的に与えられる換算エネルギー密度 ($Q_\mu = m_p M_t V_i^2 / 2(m_p + M_t)^2$, m_p が弾丸質量、 M_t が標的質量) の積算値と、弾丸及び標的の最大破片質量をそれぞれの元質量で規格化した値の関係を示す。ただし、弾丸は各衝突時に破壊するため、横軸は換算エネルギー密度である。標的の結果を見ると、Yasui *et al.* (2014) の多結晶氷の結果とは異なり、壊れ始める積算エネルギー密度が衝突回数に依存することがわかった。一方で、破壊後の最大破片質量は、Yasui and Arakawa (2011) の石膏 (弾丸はポリカーボネイト円柱) の結果とほぼ一致した。弾丸の結果を見ると、最大破片質量はエネルギー密度が約 200J/kg 以下では 4 点を除いて約 0.2 とほぼ一定で、200J/kg 以上では低下することがわかった。しかし、弾丸と標的の結果は一致しなかった。このことから、弾丸と標的では異なるエネルギー密度で最大破片質量が決まることが考えられる。

先行研究：

Yasui *et al.* (2014), *Icarus* 233, 293-305.

Yasui and Arakawa (2011), *Icarus* 214, 754-765.

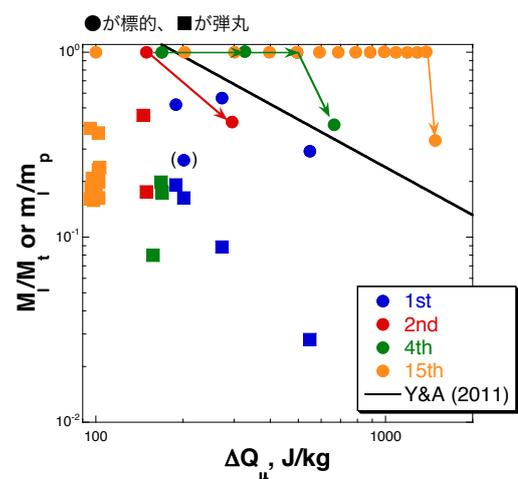


図 1：積算エネルギー密度と最大破片質量の関係

チェリアビンスク隕石大気突入の数値シミュレーション

○高田 淑子

宮城教育大学理科教育講座

2013年2月のチェリアビンスク隕石落下に伴う大気中の爆発・発光は1908年のツングースカイベント以来、地球上でおきた最大の天体衝突現象である。

撮像映像等の解析結果により、隕石は、約18 km/s の速度で、地上から約20° の低角で大気突入し、高度20-30 kmで最大光度に達し、分裂後広範囲に落下したことが判明している。隕石本体は、普通コンドライト、直径約17-20 m、質量約10 kton と見積もられる (Brown et. al., 2013)。

今回の隕石落下は人的・物的被害をもたらしたことから、隕石をはじめとする小天体の大気突入のメカニクスを明らかにすることは重要である。そこで、隕石の大気突入の数値シミュレーションを実施し、隕石大気通過中の大気と隕石の相互作用、隕石ならびに大気の圧力温度状態の変化、隕石の溶融の経過、特に衝撃波の伝播と減衰等を再現した。

計算では SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) コードを用い、初期条件として大気は温度一定の理想気体とし、大気密度 $4.0 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ (地球大気で高度約25 kmに相当)、 $3.2 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ (同約10 km) とした。隕石は密度 2700 kg/m^3 、岩石の Tillotson 状態方程式を適用し、隕石の突入速度を20 km/s と仮定した。ただし、岩石強度は考慮されていないため、隕石の岩石破壊による分裂は再現されない。

シミュレーション結果では、隕石が大気中を高速で通過する際、放物面状に衝撃波面が形成・伝播し、大気・隕石ともに衝撃圧縮を受け内部エネルギーの増加がみられる。

高度25 km付近の大気密度では、隕石前面における大気の動圧は~10 MPa に達し、隕石前面中央の大気のみ点から隕石表層に沿って衝撃圧縮を受けた大気が衝撃波面の伝播とともに広がり、徐々に減圧・減速する様子が観察される。

高度10 km付近の大気密度では、隕石は前面より内部エネルギー・密度が上昇し、球状から扁平・円盤状に広がり、隕石の断面積が約4倍まで拡大する。これに伴い、放物面状の衝撃破面も進行方向に対し垂直横方向に拡大し、隕石の減速が始まることから、爆発的様相につながると考えられる。その後、隕石は、隕石後方からの希薄波の進行とともに隕石横端の相対速度が減少し円錐台状に変化することが確認できた。

現状では隕石直径を SPH 粒子10個で表現する低解像度の計算のため、解像度の向上が、今後の課題である。また、実際の最大発光が高度25 km付近にもかかわらず、計算では隕石への影響がより低高度の大気密度で表れることから、大気と隕石粒子の密度差が大きい場合の SPH コード適用の問題も検討する必要がある。

謝辞：本研究の計算は東京大学地震研究所地震火山計算センターシステムを使用した。

C型小惑星表面物質を模擬した有機物混合試料の光散乱測定

○藤原彩香¹、北里宏平¹

¹会津大学

小惑星はこれまでの地上望遠鏡観測からスペクトル型によって表面の光散乱特性が異なる特徴を持つことが知られている[1]（例えば、C型小惑星はS型小惑星に比べて位相曲線の傾きが大きく、後方散乱が卓越している）。このことは表面物質の組成の違いに起因すると考えられているが、隕石の光散乱特性を測定した最近の研究[2]によると、C型小惑星の位相曲線は炭素質コンドライトの光散乱特性を用いて再現される位相曲線と一致しないことが示されている。その原因について[2]の著者らは、小惑星表面の地形的な起伏がつくる影の影響を指摘している。しかし、不規則形状の影の割合を数値的に調べた研究[3]から、地形による影の影響ではその位相曲線の差異を説明できないことが明らかにされた。そこで本研究では、C型小惑星に存在すると考えられている有機物に着目し、その含有量が位相曲線に与える変化を調べることを目的として、C型小惑星の表面物質を模擬した有機物とケイ酸塩鉱物の混合試料の光散乱特性を測定した。

光散乱の測定を行うために、われわれはゴニオメータと分光器を組み合わせた計測系を開発した。60cm長の可動アームの先端から光が試料に照射され、散乱された光をもう一方のアームに取付けたコリメータレンズで受光して光強度を計測する仕組みである。アームは鉛直方向と水平方向に回転させることが可能で、位相角を6~90°の範囲で測定することができる。試料にはカンラン石と、炭素質コンドライトに含まれる有機物と光学特性の似ているフミン酸を用いた。本発表では、測定結果をもとに有機物量と光散乱特性の関係性について議論する。

参考文献：[1] Muinonen et al., 2002, in *Asteroids III*, 123. [2] Beck et al., 2012, *Icarus* 218, 364. [3] 松浦隆裕ら, 2013, 日本惑星科学会秋季講演会予稿集.

小惑星のラフ表面モデルと温度場に対する影響の評価

○滝田隼^{1,2} 田中智² 千秋博紀³

東京大学大学院理学系研究科¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所²

千葉工業大学惑星探査研究センター³

近地球型小惑星の形状は一般にいびつであるため、天体表面における熱的な環境の再現とその理解に対してはできるだけ詳細な形状に関するデータが必要である。現在、はやぶさ探査機の近接撮像で得られたデータをもとに復元した小惑星 25143 Itokawa の形状モデルでは、最も解像度の高いもので 1m 程度の表面地形の凹凸が数値的な座標値として得られている (Gaskell, 2006)。しかしながら、探査で取得できる数値形状には観測精度面で限界があるだけでなく、計算面での技術的制約から小惑星の熱的なモデリングに対して利用できる形状モデルの解像度にも限界がある。熱モデル構築の観点からは、小惑星表面の凹凸の解像度の増減に対する表面温度の変化の傾向を把握しこれを適用する方法が現実的と思われる。

小天体の表面温度は一般に天体を構成する岩石の熱的な物性（熱慣性）と天体が太陽から受ける熱量を決める境界となる表面地形（表面ラフネス）で決まる。小天体では形状が歪なため後者の表面温度場に与える影響は無視できないことが予想される。過去の探査において彗星表面の温度分布の直接観測例があるが、このとき単純な熱モデルでは観測結果を再現することができず表面ラフネスの影響の適切な補正が必要であることが指摘されている (Groussin, 2007, 2013)。ここでは表面温度に対するこの両者の影響を如何に切り分けて理解することができるかが論点となる (Davidsson, 2013 他)。本発表では、表面ラフネスの解像度を考慮した天体の温度場の評価について公表する予定である。表面を構成するポリゴンが 4 万から 300 万の間の異なる解像度をもつ 4 つの Itokawa の形状モデルを用いた。ここでは最高で 1m 程度のラフネスの温度場への影響を評価した形となる。形状モデルの解像度の増加に対して天体表面温度の変化の傾向が漸近する場合、探査機の投入で現実的に取得できる凹凸の解像度からその極限值としての表面ラフネスの影響を考慮した表面温度に対する知見が得られ、これを利用することで天体表面を構成する岩塊の熱慣性を決定することができる。岩塊の形状が解像度に対して自己相似的な傾向を示すこともこれを支持すると思われる。なお詳細な地形モデルの数値データは小天体表面を構成するポリゴンの面要素数が数百万にも及ぶため、小天体全体での実施には大規模な計算が必要である。今回は計算資源の制約からイトカワ表面の一部の領域に限って計算と評価を実施した。

小天体の表面温度場を再現するための数値シミュレーションは数学的には熱伝導方程式を時間発展させて解く境界値問題である。境界条件は天体が太陽から直接受ける熱量および地形に起因する 2 次的な加熱冷却効果ならびに天体表面からの熱放射による冷却過程により構成される。計算コードは有限差分法とレイトレーシング法で実装した。本研究の成果は、はやぶさ 2 計画での 1999JU3 の熱赤外観測において適用することも想定しており、現在形状モデルが作られている NEA のうちで大きさがこれに近い小惑星 Itokawa の形状モデルを用い評価を進めている。

小惑星ベスタの熱進化の数値シミュレーション

○野上竜彦、城野信一¹

¹名古屋大学環境学研究科

小惑星ベスタは分化していることが知られている。分化にはマグマオーシャン説と部分熔融説という二つのシナリオがある。前者はできたメルトがその場に留まりマグマオーシャンが形成される説であり、後者はできたメルトが表面へと移動する説である。

どちらのシナリオが妥当か明らかにするために数値シミュレーションを行った。

メルトは地下の割れ目を通して噴出する。しかし、内部にどれだけ割れ目が存在するか分からず、どのように走っているかも分からないため生成したメルトのうちのどれだけが噴出するかは分からない。そこで、生成したメルトに対して表面に噴出する割合をメルト移動効率 α として定義した。

メルトが表面に噴出する際、熱源である ^{26}Al はメルト中に融けて移動する。また、高温のメルトが冷却された表面へと移動するので、メルトの噴出はベスタ内部を冷やす方向に働く。また、内部で対流が発生すれば、内部の冷却に寄与する。メルトの噴出と対流の効果は熱進化に大きな影響を与えるため、二つの効果を入れて計算を行わなければならない。

熔融するためには熱源が存在しなければならず、 ^{26}Al が有力視されている。 ^{26}Al は放射性元素であり、CAI 形成時から測ったベスタ形成時刻 t_0 によって発生する熱量は変わる。

α と t_0 をパラメータとして数値計算を行った。

数値計算から求められる単位時間当たりのメルトの噴出量をベスタの表面積で割ることで、実効的な浸透率/粘性率を求めた。内部のメルトの総体積がベスタ体積の 9 割以上になる global magma ocean から内部にメルトが残らない no magma ocean へと進化のモードが変わるときの実効的な k/η の変動幅が大変狭いことが分かった。浸透率 k は内部の割れ目の幅、大きさ、空隙率によって 10 桁以上変動し、粘性率 η も温度により大きく変動する。 k/η は大きな不定性があるにもかかわらずこのような結果になるということは、 $\alpha=0$ もしくは $\alpha=1$ のどちらかであることが予想される。このことは、生成したメルトが全く噴出しないか、もしくは非常に効率よく噴出するかのどちらかであることを意味する。

Sub-km サイズ地球近傍小惑星 2011 XA₃ の高速自転 II

○ 浦川 聖太郎¹、大塚 勝仁²、阿部 新助³、伊藤 孝士⁴、中村 智樹⁵

¹ 日本スペースガード協会、² 東京流星観測網、³ 日本大学、⁴ 国立天文台、⁵ 東北大学

小惑星の時系列光度変化 (ライトカーブ) から、小惑星の自転状態や内部構造を推定することができる。これまでの研究から、自転周期が 2.2 時間より短い小惑星 (高速自転小惑星) の多くは直径 200 m 以下であると分かっている (Pravec & Harris 2000)。高速小惑星は強い遠心力に打ち勝つ事ができる一枚岩構造をした小惑星であると考えられている。一方、自転周期が 2.2 時間より短い小惑星は、重力により複数の岩塊が集合したラブルパイル構造をとることができる。高速自転小惑星の成因の一つとして、母天体小惑星における衝突現象で発生した放出物が考えられている。高速自転小惑星のサイズ分布やとり得る最大直径を明らかにできれば、小惑星で発生する衝突事象のメカニズムに対して観測的に制約を与えることができる。

我々は、美星スペースガードセンターの 1 m 望遠鏡と 0.5 m 望遠鏡を用いて、地球近傍小惑星 2011 XA₃ のライトカーブ観測を実施した。その結果、この小惑星が自転周期 43.8 分と高速自転している事を発見した。さらに、多色測光観測からこの小惑星のスペクトルタイプが S-complex (Q, O, R タイプを含む広義の S タイプ)、あるいは V タイプであることが分かった。また、その直径は 225 ± 97 m (S-complex)、 166 ± 63 m (V タイプ) であり、高速自転小惑星として大型のものであった。さらに、2011 XA₃ の軌道は、見かけ上ふたご座流星群の母天体である (3200)Phaethon と類似していた。2011 XA₃ と Phaethon に対して軌道計算を実施し、両天体が同一起源であるか調査を行った。計算結果と 2011 XA₃ の Phaethon (B/F タイプ) と異なるスペクトルタイプは両天体が同一起源でないことを示唆した。

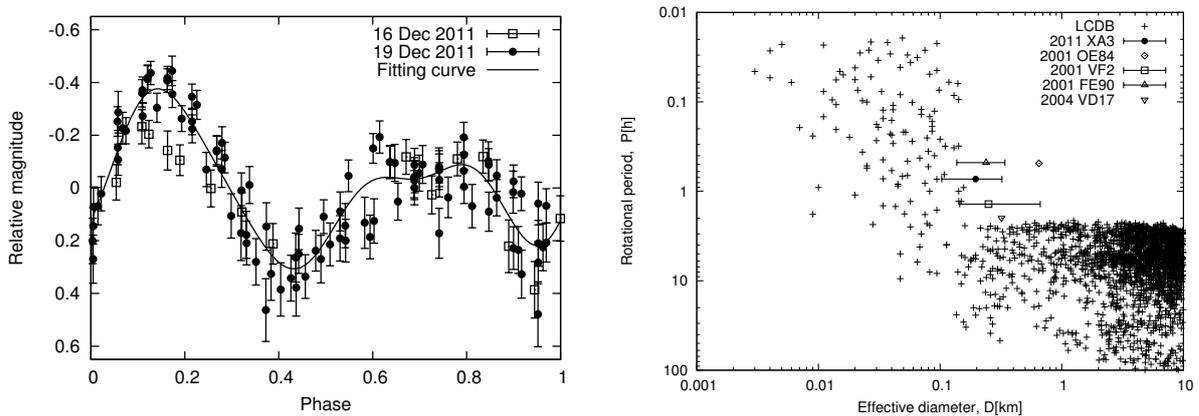


図 1: 左: 地球近傍小惑星 2011 XA₃ のライトカーブ。右: 小惑星の自転周期と直径の関係。凡例の LCDB はライトカーブデータベースに登録されている小惑星の自転周期と直径を示す。また、直径 200 m を超える可能性がある個別の小惑星の結果も示す。

すばる望遠鏡によるメインベルト小惑星の ライトカーブ観測

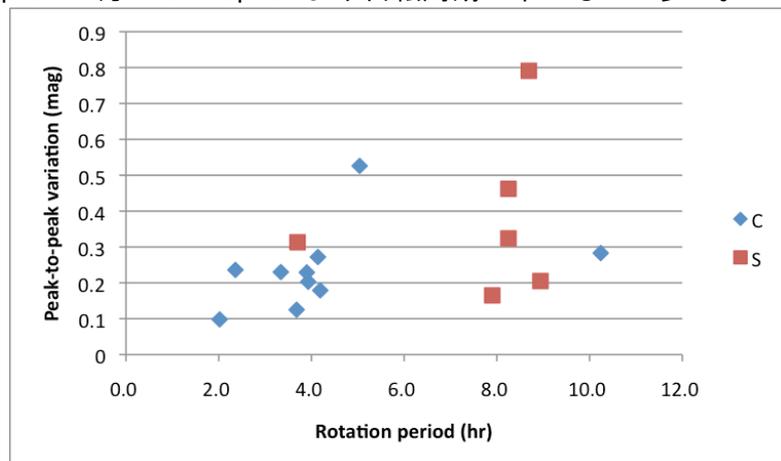
○吉田二美¹, D. Souami^{2,3}, S. Bouquillon⁴, 中村士⁵, B. Dermawan⁶, 八木雅文¹, J. Souchay⁴
¹国立天文台, ²University of Namur, ³Universite Pierre & Marie Curie, ⁴SYRTE, Observatoire de Paris, ⁵帝京平成大学, ⁶Bandung Institute of Technology

メインベルト小惑星の自転周期分布を調べるため、2002年9月2日、すばる望遠鏡+Suprime-Camを用いて、黄道面上で衝付近の0.25平方度（Suprime-Camの一視野）を約8時間にわたって撮像した。この観測はすばる望遠鏡の大口径とSuprime-Camの広視野を活かして、直径数km程度のメインベルト小惑星約100個をまとめて検出してそれらのライトカーブを一気に得ることが出来るため、従来の小惑星のライトカーブ観測に比べてきわめて観測効率が高い画期的な方法である。一回の露出時間は2分、主にRバンドで撮像したが、小惑星タイプ（S, C-complex）を区別するため、Bバンドでも数回撮像した。

検出できたメインベルト小惑星の数は112個であった。我々はGAIA-GBOT（GAIA衛星を地上から追跡するために開発されたパイプライン）を改良して、検出天体の座標と明るさを測定できるようにし、半自動的に112個の小惑星のライトカーブを作成した。ライトカーブの周期解析は異なるアルゴリズムを使用した2種類のソフトウェアで行い、両方のソフトウェアが検出した周期のみを有効な値とした。さらに得られた自転周期が確実であるかどうかを判断するための基準を作り、確実に周期決定できたものだけを取り出した。一晩より長い光度変化を示すものが多く、自転周期が決定できたのは22個の小惑星のみだった。

最終リストに残った小惑星の大きさは直径0.3~6.8kmの範囲で、このうち16個の小惑星のB-Rが得られた。そこでB-Rカラーに基づいて、S-complex（6個）とC-complex（10個）に分類した。S-complexとC-complexの平均自転周期は、それぞれ7.6時間と4.3時間で、理由はわからないが、C-complexの方がS-complexより自転周期が早いものが多い。

Dermawan et al. (2011)はsub-kmメインベルト小惑星の自転周期分布を調べ、約50%が高速自転小惑星（自転周期2時間以下）と結論したが、今回の観測では1つの高速自転小惑星候補（P=2.02時間）が見つかっただけであった。



木星トロヤ群小惑星の軌道安定性について

○岡山博明, 大槻圭史¹

¹神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

木星のラグランジュ点 L4、L5 近傍にはトロヤ群と呼ばれる小惑星群が存在する。特徴としては大きな軌道傾斜角 ($\sim 40^\circ$) をもつ天体があることや、平衡点周りでの秤動の振幅 D は $0.6^\circ \sim 88.7^\circ$ と幅広いことなどがあげられる。

トロヤ群の起源としては近年では惑星形成後の軌道進化の過程に微惑星が捕獲されたと考えられている。そしてこれらのモデルに基づいた数値計算で得られたトロヤ群の軌道要素の分布は観測と一致することも確認されている。

また捕獲後のトロヤ群小惑星の軌道安定性についても研究されており、Levison et al. (1997) では巨大惑星からの重力を考慮した軌道計算を行い、太陽系年齢では秤動の振幅 $D > 80^\circ$ となるトロヤ群小惑星は惑星の摂動により木星と共軌道でいることができず不安定となることなどを示した。

しかし、いずれの研究においてもトロヤ群はテスト粒子として計算されており、小惑星同士の相互重力は考慮されていない。質量の軽い天体同士なら問題ないが、無視できないほどの大きな天体が捕獲されることも考えられる。そのような場合、捕獲後の安定性に変化が起こる可能性がある。

そこで本研究ではトロヤ群内に大きな天体が存在すると仮定し、トロヤ群小惑星の軌道安定性を、数値計算を用いて太陽系年齢のスケールで調べた。その結果、木星を円軌道と近似した計算と実際の木星の離心率を与えた計算ではトロヤ群小惑星の安定性に大きな差が出るということがわかった。また大きな天体が複数存在する場合のトロヤ群の不安定性の変化についても調べた。これらの結果について報告する。

オールト雲起源新彗星の力学進化

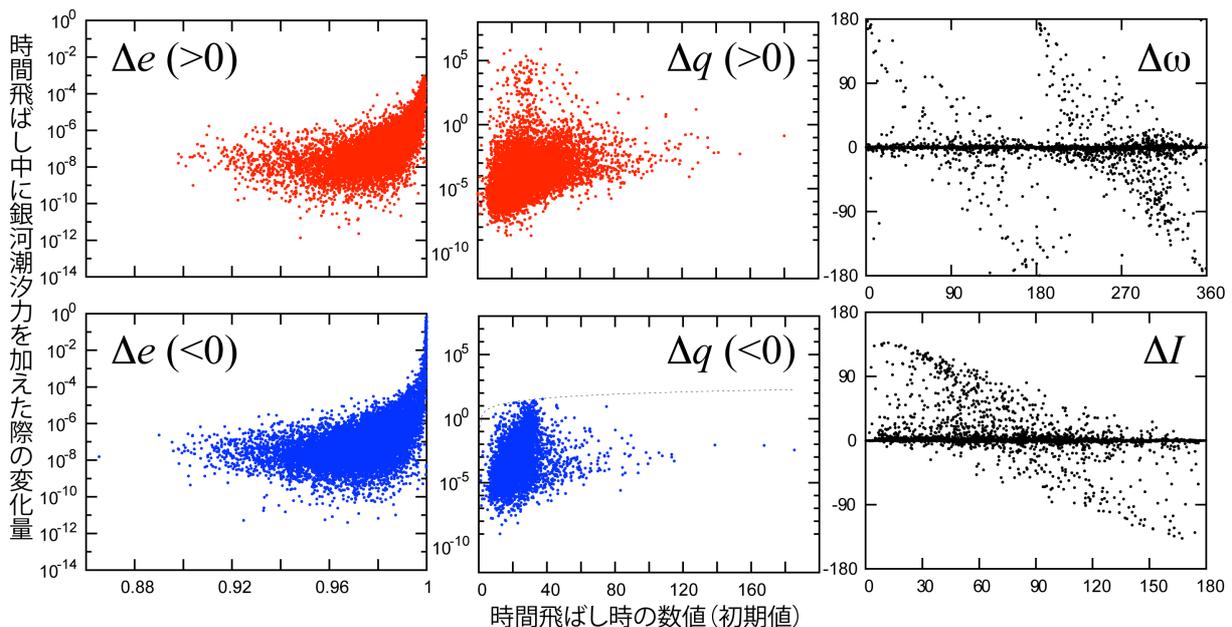
Dynamical evolution of the Oort Cloud new comets

○伊藤孝士（国立天文台）・樋口有理可（東京工業大学）

We again present our result of the numerical integration of the orbital evolution of new comets transported from the Oort Cloud toward the planetary zone. For reducing computational amount, we have assumed that the cometary motion beyond $r = 800\text{au}$ is purely Keplerian. This time we concentrate our attention on how the Galactic tide can affect the orbital elements of the comets by applying an analytical Galactic tide function on the cometary orbits beyond $r = 800\text{au}$. As a result our assumption seems overall justified, with a small fraction of exceptions where the Galactic tide enhances perihelion distance of some comets to a great deal.

私達はオールト雲から落下する新彗星の軌道進化を数値実験により追い掛けている。現時点までの結果は以下の二点である。(1)惑星領域に突入した後の新彗星の力学的寿命は数千万年程度であり、その後は大半が惑星に散乱されて双曲化する。(2)新彗星が平面的に飛来する太陽系形成期にはいわゆる惑星バリアが有効に働く。今回は惑星摂動の計算時に遠方では無視した銀河潮汐力の効果を検証した。

この研究では太陽から距離 $r = 800\text{au}$ に到達した時点に於いて離心率 e が 1 未満の新彗星はそれ以遠の領域では何の摂動も受けず、純粋なケプラー運動を行うと仮定している。これを私達は「時間飛ばしスキーム」と呼んでおり、これにより計算量は数十分の一に削減される。しかし $r > 800\text{au}$ の領域を長く飛行する彗星は幾分か銀河潮汐力を受けるはずである。そこで今回は時間飛ばし時の軌道要素に対し解析的な銀河潮汐力関数を作用させ、その影響を見積もった。下図はその結果で、左列が離心率 e の変化（上段は銀河潮汐力による変化量が正の場合、下段は変化量が負の場合）、中列が近点距離 q の変化（上段は正、下段は負。両軸の単位は au。下図内の点線は $\Delta q = q$ 即ち近点減少の上限線）、右上は近点引数 ω の変化（両軸の単位は度）、右下は軌道傾斜角 I の変化（両軸の単位は度）である。これを見て分かるようにどの軌道要素も $r > 800\text{au}$ 領域に於いて銀河潮汐力を受ける事による変化量は小さく、私達が置いた仮定（ $r > 800\text{au}$ の領域ではケプラー運動）が悪くない事が分かる。但し一定の注意を要する結果も見られる。例えば一部の彗星についてはこの領域で受ける銀河潮汐力により近点距離 q が大きく跳ね上がる（中段上）。これは彗星雲形成初期に惑星に散乱されつつある微惑星の軌道を見ていることと等価であり、力学的に興味深い。また近点引数 ω と軌道傾斜角 I が受ける影響には明瞭に周期 π および 2π の痕跡が見え、これらは銀河潮汐力を起源とする Lidov-Kozai 振動の影響と考えられる。今後はこうした検証結果に留意し、惑星領域からオールト雲へ再び戻る新彗星の割合などを検証したい。



オールト雲の構造の進化と寿命

○樋口有理可¹, 小久保英一郎²

¹ 東京工業大学理学部, ² 国立天文台理論研究部

惑星に散乱された後の微惑星が、恒星などからの摂動によってオールト雲としてどのように進化するかを調べた。微惑星全体の個数の減少、軌道要素の分布の進化、動径方向の分布の進化を数値計算で調べ、定量的に評価した。本発表では主に微惑星の動径方向の分布の時間進化、すなわち中心星と微惑星間の距離を r 、微惑星個数を n として、 dn/dr がどのような関数であるかを発表する。

初期の微惑星の分布として、 $dn/dr \propto r^{-2}$ を与えた。これは先の研究から得た、惑星散乱によって達成される分布である。この円盤に、ランダムな方向からやってくる恒星からの摂動をインパルス近似で与え、100 億年の分布の進化を調べた。恒星のパラメータは、現在の太陽系近傍の観測から推測される分布から平均を計算し、それを使った。計算の結果、微惑星円盤はオールト雲へと進化する過程で、全体の彗星個数は減少しながらも、その動径方向分布は $dn/dr \propto r^{-2}$ の分布を保ち続けることがわかった。このことは、オールト雲の e-folding time が r によらず一定であるということである。この e-folding time は 100 億年程度であった。解析的に見積もられる恒星摂動によるオールト雲彗星数の e-folding time は、 r の逆数に比例する。すなわち、オールト雲は外側から削られ、その大きさは小さくなっていくことになる。解析的見積りに反して e-folding time が r によらず一定であるということは、内部オールト雲から外部オールト雲への彗星の十分な供給があるということである。オールト雲は薄くなっていくが小さくはならない、といえるかもしれない。

また、初期の微惑星円盤に、仮想的に $dn/dr \propto r^{-2}$ 以外の分布を与えた計算も数例行った。その結果、いずれの場合も最終的には $dn/dr \propto r^{-2}$ に近づくことがわかった。この $dn/dr \propto r^{-2}$ という分布の形は、微惑星の軌道半長径が r に比例すると仮定したときに、エネルギー分布が一様であるということである。これは、恒星遭遇の影響によりエネルギー分布が十分拡散し、その分散の幅がオールト雲のエネルギー範囲と同程度まで広がるため、その範囲においては平たんな分布、すなわち一様分布と見なせるからである。

土星リング中での小粒子の重力集積による小衛星形成

○安井 佑貴¹, 大槻 圭史¹, 台坂 博²

¹神戸大学理学研究科 ²一橋大学商学部

最近のリング-衛星系形成モデルでは、土星リング及び近傍に存在する小衛星は周土星系粒子円盤から形成されたと考えられており、粒子の重力集積が重要であると考えられている。実際に土星リング近傍に存在する小衛星形状の観測から、小衛星形成に関して、重力集積が重要であったことが示されている。さらに、土星リング中では集積が現在も続いていると見られる観測が報告されている。

土星リング中では、プロペラ形状の構造が観測されており、その構造の中心には小衛星が存在していると考えられている。これらの構造は土星リングでも外側の A リングで主に発見されており、近年 B リング中에서도観測が報告されている。またより内側の C リング中에서도同様の構造が観測されており、周囲のリング粒子よりも大きな粒子の存在が示唆されている。我々は、これら小衛星及び周囲よりも大きなリング粒子の起源を明らかにすることで、リング-衛星系の起源と進化に対して制約を与えることを目指す。また小衛星の集積過程はリングの力学的特性と関係があると考えられている。集積によって形成された衛星形状と集積当時のリングの厚みには関係性があると考えられるが、詳しい研究は行われていない。

そこで本研究では、これらの問題を解決するために局所 N 体シミュレーションを用いて、土星リング中に存在する小衛星コアへの重力によるリング粒子の集積について詳しく調べた。本研究の計算結果から小衛星コアの密度を氷の密度程度と仮定すると、C リング中では小衛星コア周りのリング粒子の重力集積は無視でき、また B リングの内側領域でも同様に重力集積が難しいことが示される。さらにリングの厚みが小衛星の形状形成に与える影響について、例えリングの厚みがコア半径に比べて十分小さくても、コア表面の高緯度面への粒子集積が生じることを明らかにし、さらに A リング中央部では、形成される小衛星形状はリングの厚みにほとんど依らないことを示した。一方で、土星からの距離が遠くなると、リングの厚みが小衛星の形状形成に与える影響が生じてくることも明らかにした。本研究の結果から、リング近傍に存在する小衛星の形状は集積時のリングの厚みを反映している可能性が指摘される。

土星 A リングの太陽春分における不完全冷却と そこから推察されるリング粒子の内部構造

○森島龍司^{1,2}、Linda Spilker²

¹カリフォルニア大学、²ジェット推進研究所

2004年の軌道投入以来、カッシーニ赤外分光計により土星のリングの温度が計測されている。リング温度はリングの開き角の変化と共に季節変化をし、2009年の太陽春分時（太陽の方向がリング面に一致する時）に最も低い温度が観測された。Aリングの太陽春分時に観測された温度（約 50 K）は直接太陽光を無視したモデル温度と比較すると、優位に高いことが Spilker et al. (2013) によって示された。もし A リングが太陽春分時に完全に冷えきっていなかったならば、温度の季節変動はリング粒子の奥深くまで伝わるために、リング粒子のサイズや内部構造に制約を与えることができる。

本研究では、まず本当に A リングが冷えきっていなかったかを調べるため、二種類の異なる放射輸送コード (Morishima et al. 2009, 2014) により太陽春分時の平衡温度を計算した。計算の結果モデルの温度はやはり観測された温度よりも低く、A リングの中心付近でその差は最大となることが分かった。また、太陽春分の前と後の温度を同じリングの開き角の場合で比較すると、春分前の温度の方が高いことが分かった。これらのことから A リングは冷えきっていなかったと結論づけることができる。

太陽春分時にリングがどれだけ冷えるかは、リング粒子のサイズと熱慣性に依存する。これらの物理量を見積もるために、リング温度の季節変動のモデリングを行った。モデルでは、リングの北面と南面の温度変化を考え温度の角度依存性は無視した。それに合わせて、温度が高い低太陽位相角のデータと温度が低い土星の影でのデータはフィッティングでは取り除いた。リング粒子への太陽フラックスの季節変動は Froidevaux (1981) の解析モデルを用い、熱拡散方程式を解くことにより時間依存性を考慮にいった。計算の結果、リングの粒子サイズは場所によらず約 1 m であることが分かった。熱慣性は A リングの中心付近では約 $30 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ という大きめの値であるのに対し、A リングの内縁と外縁付近では約 $10 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ であり、これはリング温度の日変化から求められた熱慣性値と同程度である。

いくつかの研究から示される熱伝導率と密度の関係を用いると、A リング粒子の空隙率は 90% を超えるほど高いことが示唆される。しかし、A リングでは自己重力による波構造が観測されており、リング粒子の空隙率はそこまで高くないと考えられる。その問題を回避するために、中心に密な氷コアがあり、低密度のレゴリスマントルで覆われた粒子構造を考え、レゴリスの厚さを見積もった。その結果、A リングの中心ではレゴリスの厚みが粒子半径の 0.1 倍程度と薄く、リングの端に行くに従いレゴリスが厚くなることが分かった。

「あかり」遠赤外線拡散光全天マップに見られる 黄道光微細構造

○大坪貴文¹, 土井靖生¹, 服部誠²,
瀧田怜³, 有松亘³, 川田光伸³, 松浦周二³, 中川貴雄³, 臼井文彦¹

¹ 東京大学, ² 東北大学, ³ ISAS/JAXA

日本の赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ観測は、遠赤外線波長域を 65, 90, 140, 160 μm の4つの測光バンドでカバーし、ミッション期間中に全天の97%以上の観測を達成した。この「あかり」遠赤外線拡散光全天マップは、銀河系内や系外銀河の研究だけでなく、我々太陽系内の惑星間塵からの熱放射である黄道光の研究にとっても貴重なデータである。

我々太陽系の惑星間空間には、惑星・衛星・小惑星・彗星以外にも、粒径が数 μm から mm 程度の固体微粒子が広く分布している。この固体微粒子(惑星間塵)は、太陽光を散乱、あるいは吸収・熱再放射し、黄道光・黄道放射として特に赤外線波長域では空全体で明るく光っている。過去の赤外線衛星 IRAS や COBE/DIRBE の観測は、黄道光・惑星間塵の分布に様々な空間的微細構造があることを発見し、黄道光の空間構造に関して様々な分布モデルが提唱された (Kelsall et al. (1998), Wright (1998) など)。

「あかり」の遠赤外線全天マップでも、短波長側の2バンド (65, 90 μm) で数 MJy/sr レベルの小惑星ダストバンドと circumsolar ring の構造がはっきりと受かっており、特に黄道面と黄緯 ± 10 度の2つのバンド構造も確認できた。しかし、DIRBE の観測データに基づく黄道光モデルでは、「あかり」で見られる小惑星ダストバンドの構造はその黄緯・輝度ともに再現できない。その原因としては「あかり」と COBE/DIRBE の観測手法や約15年という観測時期の違い、あるいは観測波長の違いなどが考えられる。また、既存の DIRBE モデルは、当時の計算機能力の限界もあり、DIRBE の膨大な全天データをモデル構築に十分に使いきれていないことも大きな理由として考えられる。本講演では、「あかり」の全天マップの詳細と今後の「あかり」黄道光モデル構築についても紹介する。

JUICE-JAPAN WG 木星氷衛星探査計画 — JUICE-GALA レーザ高度計 —

○並木則行¹, 小林正規², 木村淳³, 野田寛大¹, 荒木博志¹, 鹿島伸悟⁴, 宇都宮真⁵,
Hussmann Hauke⁶, Lingenauber Kay⁶, Oberst Jurgen⁶

¹国立天文台・RISE 月惑星探査検討室, ²千葉工業大学・惑星探査研究センター, ³東京工業大学・地球生命研究所, ⁴国立天文台, ⁵宇宙航空研究開発機構, ⁶DLR Institute of Planetary Research

木星系の大氷衛星であるガニメデでは、氷に覆われた表層の下に地下海が存在すると推定されている。木星系探査計画 JUICE ではこの存否を確認することを目指す。レーザ高度計はレーザ光の往復飛行時間を測定することによって、木星からの潮汐力により生じる固体潮汐の振幅（地形の時間変化）の大きさを測り、地下海の存否を確定できる。GALA はドイツ、スイス、日本の国際共同チームにより開発され、日本チームは反射光受信部（受信光学系および検出器）を担当する。数多の課題とともに進捗している GALA の開発状況を報告する。

JUICE 搭載多バンド分光カメラ「JANUS」ミッション

○春山 純一（宇宙航空研究開発機構）、高橋 幸弘、佐藤 光輝（北海道大学）

GALILEO による木星、木星衛星のデータは、太陽系/惑星科学の理解に大きな飛躍をもたらした。ESA が主導して開発を進める JUICE は、更にそれを進めるものであり、2022 年打ち上げ、2030 年の木星系到着を目指している。JUICE に搭載される Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator (JANUS) は、13 枚以上のフィルターを搭載した 350-1050nm に感度を持つマルチカラーカメラで、口径 120mm で対角 1.4 秒角の望遠光学系を持つ。具体的な観測波長は、狭帯域（バンド幅 10 または 20 nm）の 590 nm, 656 nm, 727 nm, 760 nm, 889, nm, 940 nm、広帯域（60-150 nm）の 410 nm, 450 nm, 530 nm, 656 nm, 910 nm, 1000 nm、それにクリアフィルターが想定されている。JANUS は、1) Geology of Ganymede, Callisto, and Europa, 2) Habitability and Water Worlds in the Solar System, 3) Io Observations, 4) Jupiter' s Atmosphere and magnetosphere, 5) Sodium around Io and Europa, 6) Jupiter' s Ring System, Regular and Irregular Satellites と多岐に渡る観測対象を、その解像度と被覆率の GALILEO からの性能向上によって、より詳細に調査することを企図している。

対象の数に呼応して、チームメンバーの数も多く、約 60 名にのぼる。1/3 がイタリア人で PI の Pasquale Palumbo が含まれる。また、Co-PI の Ralf Jaumann をはじめとするドイツ人が 1/4 を占め、ほか、米国、英国、そして日本など多くの国から参加がある。日本側の研究体制としては、現時点では、春山他の固体グループと高橋・佐藤他の大気・雷放電グループとで構成する。前者は、SELENE/LISM (TC, MI, SP の総称) の開発、及びその運用やデータ処理・校正、更に高次データ作成・公開を主導し、また多くの科学成果を挙げてきている。後者は、JEM/GLIMS 搭載の地球での雷放電観測や、金星探査機 Akatsuki 搭載の雷・大気光カメラ LAC の開発などの経験がある。

JANUS への参加は、日本の惑星探査コミュニティにとってもおおいに活かす機会となるだろう。これまで、日本の固体惑星科学コミュニティが、外惑星探査を実施する機会は無かった。そして我が国の経験、宇宙科学予算状況からも、今後 10 年程度で独自のプロジェクト化は殆ど不可能かもしれない。一方、はやぶさ、SELENE で、国内の固体惑星（地形・構造、地質・鉱物）分野の人材が育ち、また世界的にもその研究レベルの高さが認められるようになってきている。そのような中、引き続き、国内の固体惑星科学研究者が、その開発段階から、これまでの機器開発、科学データ研究の経験とともに本ミッションに参加し、本ミッション情報を国内において展開し、将来研究への基礎を築いておくのは、コミュニティにとって大いにメリットがある。

一方、大気・雷放電研究という点では、日本が中心になって組織した国際研究チーム以外に、当該分野の専門家はおらず、積乱雲観測の実施は、日本の参加なしに十分な成果を挙げることは困難である。高橋ら日本チームは、地球大気で発生している雷放電及びスプライトなどの高高度高放電発光を、衛星及び航空機を使って計測する研究で世界を大きくリードしている。また、積乱雲の発達について大気成分を考慮した本格的な数値シミュレーションは世界の最先端である。日本チームは大気電気研究の世界人脈を活かして、当該サイエンスに貢献する国際研究チームを組織し、中心的な役割を果たす。

将来の惑星探査に向けた小型放射線分光装置の提案

○長岡央¹、長谷部信行¹、草野広樹¹、内藤雅之¹、柴村英道¹、天野嘉春¹、太田亨¹、
ティモシー・フェイガン¹、Waseda AXS team
¹早稲田大学

惑星科学において、天体表層の元素組成情報により惑星の起源や進化を制約することが可能である。そこで、天体を構成する元素情報を取得することは主要な課題の一つである。我々は将来の惑星探査機へガンマ線・中性子分光計を搭載し、周回軌道からの全球的な元素観測を、また、着陸探査では探査車に小型のX線発生装置を搭載して局所的な地域の元素分析を目指す。本発表では、現在開発を進めている放射線分光計の研究計画の概略と研究状況について述べる。

我々は、X線発生装置とシリコンドリフト検出器 Silicon Drift Detector (SDD) を組み合わせた能動型蛍光X線分光計 Active X-ray Spectrometer (AXS) の開発を進めている。従来のX線の励起源にはアルファ線源やX線源が用いられた。しかし、惑星探査用のX線発生装置としては、小型軽量・低消費電力であることが望ましい。また、日本では放射線源を探査機に搭載することは、現状では難しい。従って、小型軽量・低消費電力かつ放射性物質を使用しない安全性にも優れた元素分析装置の開発が求められる。励起源には焦電結晶 (LiNbO_3 、 LiTaO_3) を採用した。焦電結晶は加熱・冷却により高電圧が発生し、X線を発生させることができる。焦電結晶をX線発生装置に応用することで、小型・軽量・低消費電力化が可能で高圧電源や放射性物質は不要である。

周回軌道からの遠隔探査には、高純度 Ge を用いたガンマ線分光計と、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータとボロンをドーピングしたプラスチックシンチレータからなる中性子検出器を合わせたガンマ線・中性子分光計 Gamma-ray and Neutron Spectrometer (GNS) の開発を進めている。惑星表面からのガンマ線は、天然放射性元素が自然崩壊の際に放出するものと、銀河宇宙線と惑星表面で発生する中性子を介在して発生するもの、二通りがある。岩石惑星の主要元素であるシリコンや鉄、カルシウム由来のガンマ線は後者で放出される。したがって、これらの元素を高精度に定量するためには中性子の同時検出が必須である。

地殻マントルに覆われた岩石惑星では、その金属核の調査は非常に困難である。しかし、鉄隕石の母天体への遠隔探査では、剥き出しとなった金属核を直接観測することができる。特に、岩石が部分的にでも保存されている鉄隕石母天体であれば、金属核と岩石の境界に着陸し、その周辺を探査することで、両方の物質化学的情報を取得できるため、惑星が核とマントルに分化する初期の物質進化史を知る手がかりとなるだろう。

イオンビームによる月面反射鏡の精密加工に関する研究

○相原寛樹¹、青木悠登¹、水野裕一郎¹、瀧野日出雄¹、谷口淳²、
荒木博志³、鹿島伸悟⁴、宇都宮真⁵、野田寛大³、花田英夫³

¹千葉工業大学、²東京理科大学、³国立天文台 RISE 月惑星探査検討室、
⁴国立天文台 JASMINE 検討室、⁵宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

国立天文台を中心としてコーナーキューブミラー(Corner Cube Mirror, CCM)を月面に設置し、月までの距離を正確に測定するという計画が進められている。CCMの反射面には0.1秒角の高い精度が必要である。このようなCCMを実現するために、我々はCCMの加工プロセスを検討している。加工プロセスの最終工程は反射面の精度を決定する重要なものであり、ここにイオンビーム加工を利用することを計画している。そこで本報では、イオンビームによるCCM反射面の精密加工に関する研究の進捗状況を報告する。

2. イオンビームによる反射鏡の精密加工

図1に、我々が提案しているCCMの加工プロセスを示す。同図に示すように、このプロセスでは、単結晶Siブロックを研削によってCCM状に除去し、研磨による表面の平面化を行った後、イオンビーム加工により高精度化を行う。イオンビーム加工は、スパッタリングに基づいて除去を行うため、原子レベルの精密加工が可能である。また、コーナー部の高精度加工も期待できる。しかし、イオンビームで3面体を加工した例は見られない。そこで、まず3面体を加工するための基礎データを収集し、これに基づいて、CCMの高精度加工を行う計画である。

3. イオンビーム加工装置

図2に、イオンビーム加工装置のチャンバ内の装置構成を示す。ここでは2面体にイオンビームを照射している様子を模式的に示している。このようにして、イオンビームの入射角や照射距離の違いによる加工量、加工形状の変化などの加工特性を調べる予定である。

本イオンビーム装置のワーク移動機構は、図2に示すように4軸ステージ(X,Z,Y, θ)から構成されている。Xステージ、Zステージはコンピュータ数値制御で駆動可能であり、これにより加工面に対するイオンビームの滞留時間、滞留移動距離が設定可能である。 θ ステージは手動ステージであり、試料へのイオンビーム入射角を任意の角度に変えることができる。Yステージも手動ステージであり、照射距離を変えることができる。これらを用いて、高精度加工に必要な基礎データを取得することを計画している。なお現在、 θ ステージ、Yステージを製作中である。

4. おわりに

上記のように、現在、ワーク移動機構の製作を行っている。また、イオンビームのイオン電流の安定性の評価を進めている。このイオン電流の安定性は加工で高精度加工を行うために極めて重要である。これらが完了した後、3面体加工のための基礎実験を実施する計画である。

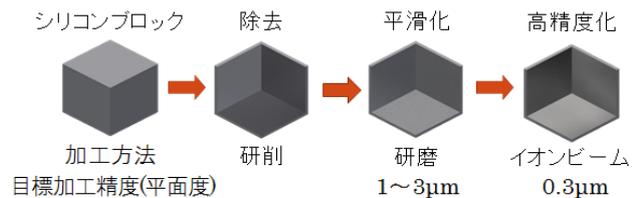


図1: CCM加工プロセス

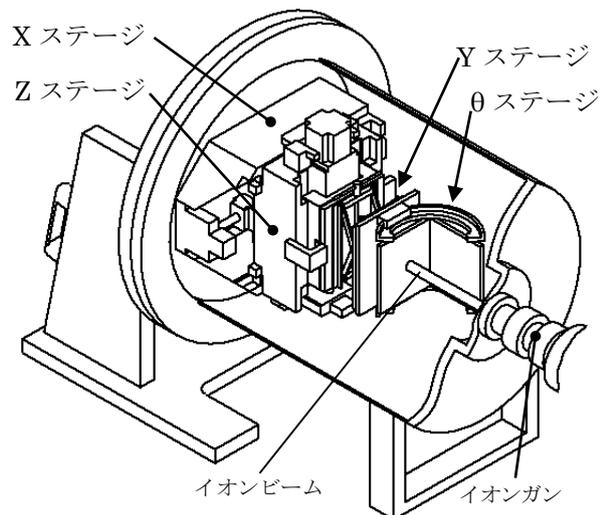


図2: イオンビーム加工装置(チャンバ内透視図)

月面コーナーキューブミラーの製造及び高精度角度測定方法の検討

○鹿島伸悟、荒木博志、野田寛大、花田英夫、宇都宮真*、安田進*

無印:国立天文台、*:JAXA

【LLR計画】

次期SELENE計画の一環として、月面に口径20cmクラスの新たなコーナーキューブミラー(CCM)を設置することを考えている。これにより、地球・月間の距離をcmオーダーで精測し、その微妙な変動を高精度に解析することにより、月の内部構造やその起源を明らかにすることが目的である。

【光学応答解析】

CCMで最も問題となるのが、重力や環境温度の変化に伴う反射面の変形である。様々なケースで変形に伴う光学応答の劣化を計算し、どの程度の変形までが許容可能かを数値的に明らかにし、それを満たす素材の選定にまで結びつけた。その結果、現在は単結晶シリコンを第1候補と考えている。

【製造方法】

今回のCCMには、各面の直角度に対して、誤差0.1秒(1/36000度)が要求されるため、その製造は非常に困難を極める。製造方法としては、1)一体ものとして製造する、2)3面を別々に製造してを高精度に貼り合わせる、という2手法を並列に検討している。これらもそれぞれに一長一短があるが、今回は2)に関する技術の報告である。3面貼合せに関しては、オプティカルコンタクトしか方法がないことがほぼ明らかになったため、その強度、及びそれを更に強固にする方法を考案し、その実験確認に着手した。

【オプティカルコンタクト実験検討】

単結晶シリコンでは、単にオプティカルコンタクトしただけでは強度的に弱いため、高温にさらして強度を上げる必要があることがわかった。そのため、下記の実験を実施する。

- ①単結晶シリコン板を100/400/600/800/1000°Cで1時間加熱し、加熱前後で面変形や面荒れがないかどうかを確認する
- ②常温でオプティカルコンタクトしたサンプルをいくつか製造し、これを上記と同じ温度条件で加熱し、加熱前後の密着強度を破壊試験で確認する
- ③ほぼ実際に近い形状のものを製造し、上記と同じ温度条件で加熱する。その前後で2面の直角度の変化を測定する。測定には干渉計とレーザコリメータを使う予定であるが、精度0.1秒を如何にして測定するかが重要課題である。

地上局用広帯域・広域受信機システムの開発

○菊池冬彦¹、河野裕介¹、浅利一善¹、松本晃治¹、花田英夫¹、佐々木晶²

¹国立天文台、²大阪大学

背景

月や惑星の重力場計測や回転変動計測において、相対 VLBI 法は有効な観測手法のひとつである。近年では惑星探査機の軌道決定にも広く用いられている。相対 VLBI 法では複数の探査機（あるいは探査機とクエーサー）の相対的な位置や速度を精密に計測する。VLBI 観測における最大の誤差要因は、地球の大気や電離層による伝搬遅延である。相対 VLBI 法では、複数の探査機を交互あるいは同時に観測することで、伝搬遅延を相対的に打ち消す。SELENE の VRAD ミッションでは、2 機の子衛星の離角が小さい場合に、ひとつのアンテナビームで 2 機の子衛星から送信された S 帯 (2.2GHz) と X 帯 (8.4GHz) の信号を同時に受信する同一ビーム VLBI 法を用いた。しかしながら、アンテナのビーム幅の制限により観測時間は限られていた。国立天文台 VERA 局の口径 20m の電波望遠鏡の場合、S 帯のビーム幅は約 0.6 度、X 帯では約 0.1 度である。電離層遅延を効果的に取り除くためには S/X 帯の同時受信が必要であるため、観測は離角が 0.1 度以下の場合に限られ、時間率は 10%であった。

手法

本研究では複数の探査機の常時同時観測を可能とする広帯域・広域受信機システムを開発している。S/X 帯の同時受信を可能とするためアンテナ素子は広帯域特性 (2-10GHz) を有するヴィバルディアンテナとした。またアンテナをアレイ化することで広域特性を持たせた。アンテナの概念設計には電磁解析ソフトウェア HFSS14.0 を用いた。設計においては、Rajaraman (2004、博士論文)などの先行研究を参考とし、スロットラインやキャビティなどのアンテナ形状の最適化を行った。その後、基板設計、同軸コネクタインターフェイス方式の検討、アレイ化にむけたアンテナ素子の配置検討を行い、アンテナを試作した。

結果

試作したアンテナの電気特性について、反射性能 (リターンロス) と、放射中心方向から 90 度までの 2.2GHz、8.4GHz でのビームパターンを計測した。その結果、概念設計時に解析によって得られた性能と実測値でほぼ同様の値が得られる事を確認した。この結果をもとに、24 式アレイの製作を行い、同様に電気特性を計測した。アレイについても、解析結果と実測値でほぼ同様の値が得られる事を確認した。本講演では、アンテナのモデルと電気特性の計測結果について詳しく紹介する。

イプシロンロケットを用いた月探査の課題

○村上英記¹, 小林直樹, 白石浩章, 田中智, 早川雅彦, 後藤健², 石原吉明³,
山田竜平⁴, 川村太一⁵, 月内部構造探査 WG

¹高知大, ²宇宙研, ³JSPEC, ⁴国立天文台, ⁵IPGP

今回、我々はペネトレータ（以下 PNT）1機を月の高地に投下し、隕石衝突による月震を観測することで月の高地の地殻厚を評価することを目的としたミッションを立案した。その際に直面した課題の中には今後イプシロンロケットを用いた科学ミッションを立案する上で共通の課題となるものもあると考えられるので、立案プロセスを含めて紹介する。2007年 LUNAR-A 計画の中止後、ロシアの月着陸探査機に4機の PNT を搭載し内部構造探査をするために月内部構造探査 WG を ISAS 理学委員会に提案・設立した。しかし、2008年の PNT 貫入試験で発生した不具合対策に時間を要したため LUNA-GLOB 計画への参加は見合わせた。その後、PNT 技術の完成を優先させ2010年に完成を確認し、LUNA-GLOB 以降の計画に再提案する機会を検討していた。そうした折、2013年度イプシロン搭載宇宙科学ミッションの公募があり、たとえ1機でも PNT の end-to-end の実証試験を行い、その有効性を示すことが次の国際共同ミッションの萌芽には大変有効であると考え応募にいたった。イプシロン搭載宇宙科学ミッションは今後20年を見据えた宇宙科学のロードマップの柱の一つである公募型小型計画（100-150億円規模）に位置付けられる。特に惑星探査に関しては「今後10年を小型ミッションで工学課題の克服・技術獲得をし、10年以降の大型ミッションによる本格探査に備える」と位置付けられている。そうした状況の中、小型科学衛星3号機への提案母体（ISAS 理・工学委員会の WG）を持ち、既にミッション部に関しては搭載機レベルにある PNT 搭載提案は、固体惑星探査の推進に当り WG を超えた戦略的な位置づけを持つものであった。実証目的の PNT 1機の試験であっても高い理学的な成果が要求され、その目標・成功基準の設定や現状のロケット性能と予算枠での開発は多くの困難が予測された。およそ半年の検討の末、将来の発展・応用性が高いと考えた3軸姿勢制御衛星の採用は見送り、成立解としてスピン衛星、大胆な新規バス（SLIM バス技術）の導入が必要であった。新規技術は開発要素の増加、開発のコストや時間のかかるリスクが高い。開発の低コスト化は小型ミッション全般の大きな課題である。一方、理学検討においては惑星探査コンソーシアムのミッション検討機能の実証プラットフォームとして、今回の提案を題材に検討を進めた。小型ミッションといえど100億円規模でありコミュニティの総意を求められる時代、WG 外の研究者を巻き込み科学目的を先鋭化することは意義深い。今回の提案がその検討機能の練習台として役に立ったことは幸いである。本講演ではこうしたイプシロンロケットによる小型科学衛星ミッションを立案する過程にて直面した問題点や今後解決すべき課題について紹介する。

火星探査における K-Ar 年代測定対象試料の検討

○三浦弥生¹、長勇一郎²、杉田精司³、亀田真吾²

¹東大地震研、²立教大、³東大新領域

火星表層には様々な特徴的地形が見られるが、それらがいつどのように形成されたかは不確定性も大きく明らかではない。クレーター年代や火星隕石の示す年代から火星表層の年代は過去 45.6 億年間の広範囲にわたると推測されるが、これまでに火星上の試料で年代測定が行われたのは、NASA が打ち上げた火星探査機 Curiosity が Gale crater の堆積岩を分析した一例のみである。年代は 42.1 ± 3.5 億年と報告されたものの、その岩石は火山岩砕屑物を含む堆積岩（かつ両者の割合が不確定）であるため、得られた年代値の解釈は難しい。

著者らは、将来の火星探査においてその場年代測定を行うことを目指し、探査機搭載用小型 K-Ar 年代測定装置の開発を進めている（LIBS-MS 装置；e.g., Cho et al., LPSC 2014）。これまでに行った基礎実験や火星隕石データからの知見をもとに、この装置を用いて火星で年代測定を行う場合の探査目標・計画、装置性能、試料への条件等について整理し、測定対象候補試料について検討を行った。

火星表層は特徴の違いや層序から大きく 3 つの時代（古い方からノアキアン、ヘスペリアン、アマゾニアン）に分けられていて、ノアキアンやヘスペリアンの一部の時代には水が大規模あるいは断続的に存在していた可能性が高いと考えられている。ヘスペリアン（あるいはヘスペリアンに近いアマゾニアン）の火山岩の K-Ar 年代を決めることができれば、水がいつ頃まで存在していたかを知る直接的な情報となる。探査候補地点は、(i) 水が関与してできた地形が見られ、それと溶岩流の関係が明確である、(ii) ダストの降積量が少ない（衛星による熱慣性データをもとに例えば $>200 \text{ J/m}^2 \text{ K s}^{1/2}$ ）、(iii) K 濃度が高い（衛星による K 濃度データをもとに火星全球平均より高い地域）、(iv) 予想年代が 30-40 億年程度、(v) 安全に着陸できる、といったことを満たす場所が望ましい。さらに、衝突や変質の影響が小さい岩帯を選んで測定する必要があり、事前に衛星画像やデータをもとに吟味するとともに、現地では地質状況を調査（遠距離カメラ）、岩石・鉱物の観察（マクロカメラ）と化学組成分析（LIBS 測定）、溶岩層の規模推定（地中レーダーによる地下計測）を行う。Tharsis 溶岩流、Syrtis Major 溶岩流などが候補地として考えられるが、一部の条件が満たされていない。

また、火星隕石をもとに鉱物サイズや二次的な Ar 脱ガスの影響についても検討をしている。主要 K 含有鉱物である plagioclase（または maskelynite）は数十ミクロンの不定形であることが多く、我々が岩石照射に用いるレーザーの直径より小さいため単独にこの鉱物のスポット分析を行うことは難しい。アイソクロンで年代の信頼性の評価を行い、年代値は K 量の多いスポットから求めることが好ましい場合も考えられ数値解析を進めている。

K-Ar 年代その場計測法の開発: アイソクロンデータの詳細解析

○長 勇一郎¹、亀田 真吾¹、三浦 弥生²、杉田 精司³

¹立教大学、²東大地震研、³東大新領域

背景とこれまでの研究の問題点: 著者らは、惑星着陸探査への応用を目指して岩石の K-Ar 年代のその場計測法を開発している。これまでの研究で天然岩石の K-Ar アイソクロン年代の計測可能性を示してきた[e.g., 長ほか, 惑星科学会 2013]。これまでの解析においては、一つの測定点(レーザースポット)に対して得られる 500-1000 個の LIBS スペクトルを単純平均し、そこから得られる平均 K 濃度をレーザースポットの質量と乗算することで K の総量を算出していた。しかし本来、測定点中の K の総量は K 濃度に蒸発質量の重みをつけて積算したものである。従って、試料の深さ方向に K 発光輝線強度が大きく変化する測定点においては、スペクトルの単純平均から得られる K 濃度は正確な K 量を与えない。そのため正確なアイソクロン年代を得るためには、K 濃度が顕著な深さ分布をもつ測定点を回帰分析に使うことができなかった。これは、惑星探査で得られる貴重なデータの全てを年代測定に活かすことができないことを意味する。

研究目的: そこで本研究では、K 濃度が深さ方向に変化する測定点の LIBS データをアイソクロン計測に取り入れるため、K 定量のためのスペクトル解析法を改良することを目指した。

新たな解析手法: 新手法では、500 ないし 1000 個の LIBS スペクトルの単純平均を取るのではなく、スペクトルを 100 回のレーザー照射毎に分割して各層(厚さ 50-100 μm 相当)における平均 K 濃度を求める。その K 濃度に掘削質量を乗ずることで、測定点の各層での K 量(mol 数)を得る。

解析結果と議論: 本稿では、過去の実験で取得してあった南極産片麻岩(5 億年)の測定点のうち、特に深さ方向の K 分布が顕著だった Spot 12 の再解析結果を示す。これまでの実験から、1-1000 パルス程度ではレーザー照射数と掘削体積との関係は冪関数で近似できることが分かっている[長修論 2011]。500 回の照射を行った spot 1-6 の掘削体積の平均値は $(29 \pm 9) \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ 、1000 回の照射を行った spot 7-14 の平均値が $(46 \pm 8) \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ であったことから、この試料に対しては平均的に $V \sim N^{0.66}$ に従って掘削されるとした。すなわち、100 パルスで最終体積の 22%、200 パルスで 35%、500 パルスで 63%までが掘削されるとした。

Spot 12 は表面付近には K を多く含む鉱物がありながら、200 パルス程度で K を含まない鉱物に移行し、K 輝線が消失した測定点である。各層の平均 K 濃度を求めると、1-100 パルスの層で $\text{K}_2\text{O}=0.98 \text{ wt}\%$ 、101-200 パルス層で $0.33 \text{ wt}\%$ であった。201-1000 パルスでは輝線が検出できなかったため便宜上 0 とした。この点の掘削体積が $52 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ であったことから、1-100 パルスで $11 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ 、101-200 パルスで $6.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ が蒸発したと推定した。以上より掘削孔中の K 量を求めると、従来の解析法では平均 $\text{K}_2\text{O}=0.09 \text{ wt}\%$ から $^{40}\text{K}=3.6 \times 10^{-13} \text{ mol}$ としたところが、今回の解析法ではその 2.6 倍の $^{40}\text{K}=9.3 \times 10^{-13} \text{ mol}$ となった。この点をアイソクロン図上にプロットすると、この点のみを用いたモデル年代は 32 億年から 19 億年まで若返り、既知の年代 5 億年に一致はしないものの、より近づくことが分かった。更に高精度・高確度の定量を行うためには、レーザーによる岩石掘削モデルをより精密に立てる必要があるが、各層の K 濃度を蒸発量で重み付けする本手法を用いれば、惑星探査の測定データを全て利用したアイソクロン年代計測が行える可能性がある。

K-Ar 年代測定のための、真空紫外 LIBS を用いた Ar イオン輝線検出実験

○芝崎和夫¹, 奥村裕¹, 長勇一郎¹, 亀田真吾¹, 三部賢治², 三浦弥生², 杉田精司²

¹立教大学, ²東京大学

背景: 惑星表面の形成年代を知ることは、惑星科学において重要である。近年ではサンプルリターンを行わずにその場で年代測定をする方法が模索されている。これまでに地球外で行われたその場年代測定は、NASA のローバ Curiosity が火星で行った 1 例のみである。Curiosity は K を α 粒子 X 線分光計(APXS)、Ar を四重極質量分析計(QMS)で測定し、K-Ar 年代測定を行った。これらの装置は大型であり、運用には大型のローバが不可欠である。そこで、本研究では LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy:レーザー誘起絶縁破壊分光装置)を用いたその場 K-Ar 年代測定法を検討している。本手法が実現すれば LIBS のみで K と Ar を測定することにより装置の小型化が期待できる上、遠隔性があり、迅速な測定が可能になる。

目的: これまで LIBS を用いた岩石中の Ar の検出例はない。そこで本研究では、LIBS による Ar 検出の可能性を検証するための実験を行った。

Ar 輝線強度計算と実験: 本研究では、真空紫外域に存在する Ar 輝線を検出対象とした。実験開始当初はレーザー生成プラズマの温度を 1 eV 程度と想定しており、このとき最も輝線強度が高くなると予想された中性原子が発する輝線が 104.82 nm と 106.66 nm に存在するからである。しかしながら、純粋な Si を試料として予備実験を行ったところ、レーザー生成プラズマの電子温度、電子密度が当初の予想よりも高いことがわかった。これらの値を考慮し Saha の式を用いて輝線強度を再度計算したところ、真空紫外域から赤外域のなかで 83.5 nm にある Ar⁴⁺の輝線の強度が最も高いことが示唆された。よって本実験では 83.5 nm に存在する輝線の検出を目標とした。岩石に対して Ar 輝線を検出した前例がないため、本研究では AIST の玄武岩標準試料 JB-1a と、この標準試料に Ar を加えた試料(Ar 含有量 0.1 cc/g)を使い、2 つの試料の発光スペクトルを比較した。レーザーには Nd:YAG レーザー(波長 1064 nm, パルス幅 5-7 ns, パルスエネルギー 50 mJ)を用いた。レーザー照射によって生成されたプラズマは凹面回折格子で分光される。検出器には蛍光面付 MCP を使用し、蛍光面に映ったスペクトル像を CCD カメラで撮像してスペクトルを得た。試料、凹面回折格子、蛍光面付 MCP を真空チャンバー内にセットし真空度が 10^{-4} Pa 台になった時点で実験を行った。検出にあたり S/N を向上させるために 50 個のスペクトルを積算した。予備的な結果では、Ar 輝線を検出するには至っていないが、本発表では Ar 周辺に出現する他の輝線の評価を含めて Ar の検出可能性を議論する。

固体天体の内部構造探査に向けた岩石の比誘電率の計測

○小熊みどり¹、新原隆史¹、宮本英昭¹

¹ 東京大学総合研究博物館

火星の表層はレゴリスによって岩石や地層が覆い隠されているため、レゴリス下の地下構造を調査するには、地中レーダー等による探査が必要である。これまでに周回機搭載のサウンダー（MARSIS、SHARAD）を用いることで深部の構造を探査している。今後の火星探査ミッションでは着陸機搭載型の地中レーダーによる地下浅部探査が計画されている。これらの探査手法は電磁波の反射を利用しており、地下の物質境界面での電磁波の反射時間から深度情報を得るためには、媒質となる岩石の比誘電率が重要となる。しかし岩石の比誘電率は空隙率や密度、含水率、組成、測定周波数等によって大きく変化することが報告されている[e.g., Campbell and Ulrichs, 1969¹]。これらの変化要因を考慮した比誘電率の計測は複数の研究者により行われているが[e.g., Ulaby et al., 1990²]、計測条件や比誘電率の値が一定でなく、基準となる値はほとんどない。そのためレーダーにより得られた地下構造に正確な深度を与えることが困難な状況にある。さらに、複素比誘電率の虚部については定量的な検証が十分に行われていない。本研究では、比誘電率の計測要件（再現性のある計測法・試料の調整法）を確立した上で、岩石の比誘電率を測定し、データベースの構築を目指す。

本研究では、少量の試料で計測が可能で低周波数での計測に適した同軸プローブ（Agilent 85070E 誘電体プローブ・キット）を用いて地下浅部探査に用いられる周波数帯 0.1 - 1 GHz の比誘電率計測を行う。松本[2014]³は、岩石の不均質性の影響を排除するために粉体にして計測することが有効であるとしたが、定量的な議論は行われていない。そこで、試料の粒径が誘電率測定に与える影響の定量的に評価を行うことを目標とした。Milli-Q 水（18.2 MΩ・cm）と空気を用いて同軸プローブのキャリブレーションおよび確度を保証した。以下の試料を計測し、比誘電率と粒径の関係を評価した。

- ・アクリルキューブ：同軸プローブの安定性の確認
- ・ガラスビーズ（粒径の異なる 5 種類）：粒径による違いを確認

同軸プローブ法では同じ試料でもプローブを当てる位置や接触状況で値が変化することがあるが、1 GHz において 8 回以上の計測を行ったところ、アクリルで $1\sigma=1.8\%$ 、ガラスビーズで 5.7% 以下のばらつきで測定値を得た。このことは同軸プローブを用いた計測で、均質な試料の場合、複数回計測しても 5% 程度のばらつきで比誘電率計測が可能であることを示す。

粒径分布がほぼ一様なガラスビーズの測定では、粒径が小さい試料ほど比誘電率が大きくなるという結果が得られた（図 1）。ガラスビーズの組成・空隙率（～40%）はどのガラスビーズ試料においても一定であるため、今回得られた比誘電率の変化は粒径による影響だと考える。今後は結晶や岩石において測定を行う。

参考文献： [1] M.J.Campbell and J.Ulrichs, "Electrical Properties of Rocks and Their Significance for Lunar Radar Observations", Journal of Geophysical Research, Vol.74, No.25, pp.5867-5881, 1969.11. [2] F.T.Ulaby et al., "Microwave Dielectric Properties of Dry Rocks", IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol.28, No.3, pp.325-336, 1990.5. [3] 松本岳大, "不均質性を考慮した岩石の誘電率測定法の開発", 平成 26 年度修士論文.

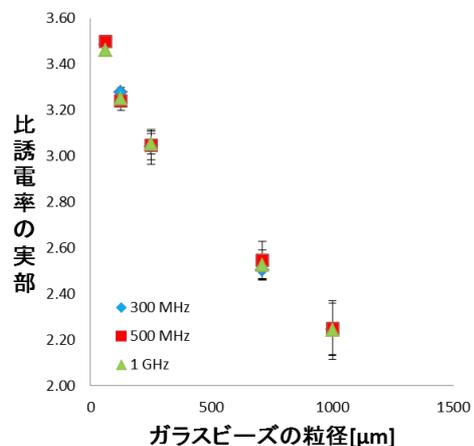


図 1 ガラスビーズの粒径別計測結果

日本惑星科学会 賛助会員 一覧

アメテック株式会社カメラ事業部

株式会社五藤光学研究所

有限会社テラパブ

株式会社ニュートンプレス

フジカット有限会社

日本惑星科学会 2014 年 秋季講演会実行委員会

実行委員長 中村智樹

副実行委員長 笠羽康正、井田茂

実行委員 古川善博、中嶋大輔、木村勇氣、中川広務、玄田英典
寺田直樹、瀧哲朗、熊本篤志、鈴木昭夫、中本泰史
高田淑子、松本弥登美、黒田剛史、柴崎裕樹

2014 年 9 月 10 日 初版発行

9 月 15 日 改訂版発行