

日本惑星科学会 秋季講演会予稿集 2013

**2013年11月20日(水)～22日(金)
石垣市民会館**

**主催：日本惑星科学会、石垣市
後援：自然科学研究機構 国立天文台**

日本惑星科学会 2013 年秋季講演会

●一般講演会

場所：石垣市民会館 大ホール

〒907-0013 沖縄県石垣市浜崎町 1 丁目 1 番 2

日時：2013 年 11 月 23 (土・祝) 13:30～ (開場 13:00)

題目：「New Worlds：太陽系外惑星観測の最前線」

講演者：^{たむら もとひで}田村 元秀 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

主催：石垣市教育委員会

共催：日本惑星科学会，自然科学研究機構 国立天文台

●秋季講演会

場所：石垣市民会館

〒907-0013 沖縄県石垣市浜崎町 1 丁目 1 番 2

口頭発表会場：大ホール

ポスター発表会場：1 階ホワイエ・展示ホール

日程：2013 年 11 月 20 (水) ～11 月 22 日 (金) (3 日間)

講演数：口頭 113 件 ポスター 83 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

○11 月 20 日 (水)

09:00 開館・受付

09:30 特別セッション 最優秀発表賞選考

10:55 口頭発表セッション 1 地球型惑星 I

11:45 昼食

12:40 ポスターセッション 1

13:40 口頭発表セッション 2 地球型惑星 II

14:50 口頭発表セッション 3 系外惑星

16:50 口頭発表セッション 4 惑星形成

○11 月 21 日 (木)

09:20 口頭発表セッション 5 円盤・物質

10:40 口頭発表セッション 6 衛星系・リング

12:00 昼食

12:50 ポスターセッション 2

13:50 口頭発表セッション 7 小天体 I

14:20 口頭発表セッション8 衝突

16:30 総会

17:20 最優秀研究者賞特別講演

18:30 懇親会 (会場：ホテルミヤヒラ)

○11月22日(金)

09:20 口頭発表セッション9 はやぶさ

11:50 昼食

12:50 ポスターセッション3

13:50 口頭発表セッション10 小天体 II

15:10 口頭発表セッション11 月科学・探査

17:30 口頭発表セッション12 分析・実験

18:30 口頭発表セッション13 惑星大気

日本惑星科学会2013年秋季講演会・会場案内

於：石垣市民会館

〒907-0013 沖縄県石垣市浜崎町1丁目1番2

受付：1階

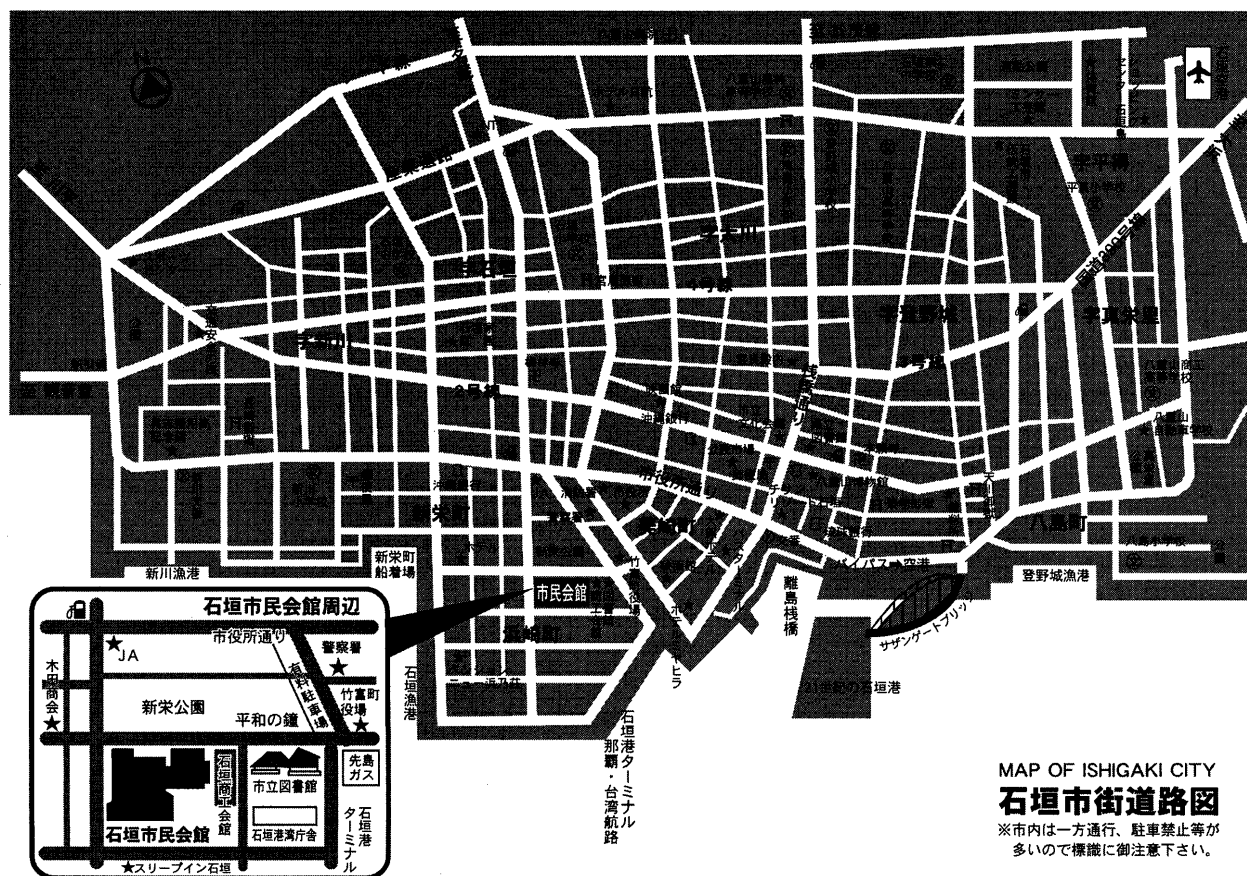
講演会場：大ホール

ポスターセッション会場：1階ホワイエ・展示ホール

★懇親会会場

場所：ホテルミヤヒラ

日時：11月21日(木)18:30-20:30



<石垣市民会館地図>

※ 地図中の空港は旧石垣空港です。



＜石垣市民会館外観＞

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 分間の質疑時間含む) です。

11 月 20 日(水)

09:00-09:25 受付 (9 時より開館)

09:25-09:30 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: 城野信一 (名大環境)

09:30 S01 高空隙ダストの静的圧縮を考慮した微惑星形成

*片岡章雅 (総研大), 田中秀和 (北大低温研), 奥住聡 (東工大理工), 和田浩二 (千葉工大)

09:45 S02 遠赤外スタッキング解析による太陽系外オールト雲ダストの発見

*有松亘 (東大理/JAXA), 和田武彦 (JAXA), 土井靖生 (東大理)

10:00 S03 月面マリウス丘における玄武岩質溶岩噴出の時間推移に関する研究

*今枝隆之介 (東大理), 春山純一, 大竹真紀子, 岩田隆浩 (JAXA)

10:15 S04 周惑星円盤との相互作用による不規則衛星の捕獲

*末次竜, 藤田哲也, 大槻圭史 (神戸大理)

10:30 S05 粉体物質の熱伝導率測定実験と月惑星表層の熱伝導率構造

*坂谷尚哉 (総研大/JAXA), 小川和律 (東大新領域/JAXA), 飯島祐一 (JAXA), 津田彰子 (東大理/JAXA), 本田理恵 (高知大), 荒川政彦 (神戸大理), 田中智 (JAXA)

10:45-10:55 休憩

口頭発表セッション 1 (地球型惑星 I) 座長: 玄田英典 (東工大 ELSI)

10:55 O1-01 地殻のリサイクリングと地球型惑星の進化

*小河正基 (東大教養)

11:05 O1-02 水の散逸を伴う地球型惑星の進化

*小玉貴則 (東大理), 玄田英典 (東工大 ELSI), 阿部豊 (東大理), ザンレ ケビン (NASA Ames)

11:15 O1-03 ハビタブルゾーンにおける地球型水惑星表層環境に対する炭素循環の影響

*門屋辰太郎 (東大理), 田近英一 (東大新領域)

11:25 O1-04 系外惑星の直接撮像へ向けた系内天体の測光特性モデリング

*藤井友香, 木村淳, ドーム ジェームズ (東工大 ELSI), 大竹真紀子 (JAXA)

11:35 O1-05 星雲遭遇による K-Pg 境界の大量絶滅

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

11:45-12:40 昼食

12:40-13:40 ポスターセッション 1

口頭発表セッション 2 (地球型惑星 II) 座長：玄田英典 (東工大 ELSI)・臼井寛裕 (東工大理工)

13:40 O2-01 火星表層水の酸素同位体組成

*臼井寛裕 (東工大), コーネル アレキサンダー, ワン ジンワ (カーネギー研究所), ジャスティン サイモン, ジョン ジョーンズ (NASA ジョンソン宇宙センター)

13:50 O2-02 火星着陸生命探査計画 MELOS1

*佐藤毅彦, 久保田孝, 藤田和央, 岡田達明, 岩田隆浩, 今村剛, 大山聖, 尾川順子, 山田和彦 (JAXA), 宮本英昭 (東京大), 山岸明彦 (東京薬科大生命科学), 小松吾郎 (千葉工業大), 臼井寛裕 (東工大理工), はしもとじょーじ (岡山大), 出村裕英 (会津大), 千秋博紀 (千葉工大), 佐々木晶 (大阪大) 石上玄也 (慶応大)

14:00 O2-03 MELOS 火星着陸探査システムの概念設計現状

*藤田和央 (JAXA), 石上玄也 (慶応大), 尾川順子, 畠中龍太, 佐藤毅彦 (JAXA), 山岸明彦 (東京薬科大生命科学), 宮本英昭 (東大), 鈴木俊之, 山田和彦, 松本秀一, 豊田裕之, 中塚潤一, 竹内央, 大山聖, 久保田孝 (JAXA)

14:10 O2-04 MELOS 1 生命探査装置：火星表面用自動蛍光顕微鏡の開発状況

*山岸明彦, 宮川厚夫 (東京薬科大生命科学), 佐藤毅彦 (JAXA), 佐々木聰 (東京工科大), 今井栄一, 本多元 (長岡技術科学大), 吉村義隆 (玉川大)

14:20 O2-05 小型飛行機を用いた火星上空での風速観測

*平栗弘貴 (金沢大自然), 得竹浩 (金沢大理工)

14:30 O2-06 フォボスにみられるグリーブの形態的特徴と分布

*菊地紘, 宮本英昭 (東大総合研究博物館)

14:40-14:50 休憩

口頭発表セッション 3 (系外惑星) 座長：成田憲保・堀安範 (国立天文台)

14:50 O3-01 短周期低質量系外惑星の内部組成と起源：大気スペクトル観測の重要性

*生駒大洋 (東大理), 成田憲保, 福井暁彦, 堀安範 (国立天文台), 黒崎健二, 川島由依 (東大理)

15:00 O3-02 スーパーアース GJ1214b の多波長トランジット観測とその惑星大気組成

*成田憲保 (国立天文台／総研大), 福井暁彦 (国立天文台), 生駒大洋 (東大理), 堀安範 (国立天文台), 黒崎健二, 川島由依 (東大理), 永山貴宏 (名大理), 鬼塚昌宏 (国立天文台／総研大)

15:10 O3-03 可視近赤外同時観測による hot Uranus GJ3470b の大気調査

*福井暁彦, 成田憲保 (国立天文台), 黒崎健二, 生駒大洋 (東大理), 柳澤顕史, 黒田大介, 清水康廣 (国立天文台), 高橋安大 (国立天文台／東大理)

15:20 O3-04 M 型星まわりの短周期低質量惑星の熱進化：GJ3470b の場合

*黒崎健二, 生駒大洋 (東大理)

15:30 O3-05 低温度星周りでの低質量惑星の特徴付け：水の存在量と大気量

*堀安範 (国立天文台), 井田茂 (東工大 ELSI), リン ダグラス (カリフォルニア大学サンタク

ルーズ校)

15:40 O3-06 水素大気を持つ Super-Earth の大気散逸が惑星組成に与える影響

*黒川宏之 (名大理), 中本泰史 (東工大理工)

15:50 O3-07 ホットスーパーアースの大気の放射特性と検出可能性

*伊藤祐一 (東工大理工/東大理), 生駒大洋, 河原創 (東大理), 中本泰史 (東工大理工)

16:00 O3-08 水蒸気大気とマグマ・オーシャンに覆われた惑星のスペクトル: 系外惑星系での検出可能性

*濱野景子, 阿部豊, 河原創 (東大理), 大西将徳 (神戸大理), はしもとじょーじ (岡山大)

16:10 O3-09 月食データを用いた地球大気の透過光高分散分光観測

*川内紀代恵, 佐藤文衛 (東工大理工), 成田憲保 (国立天文台), 平野照幸 (東工大理工), 三澤瑠花 (CNRS/Universite Paul Sabatier)

16:20 O3-10 HD 209458b 大気の流体力学的散逸の数値モデリング

*渡辺健介, 倉本圭 (北大理)

16:30 O3-11 極めて若いホットジュピターCVS040b の赤外トランジット観測

*鬼塚昌宏, 成田憲保 (国立天文台/総研大), 福井暁彦 (国立天文台), 永山貴宏 (名大理), 鈴木大介 (大阪大理), 平野照幸 (東工大理工), 高橋安大 (東大理), 大貫裕史, 川内紀代恵 (東工大理工), 田村元秀 (東大理)

16:40-16:50 休憩

口頭発表セッション 4 (惑星形成) 座長: 長沢真樹子 (東工大広域理工)・生駒大洋 (東大理)

16:50 O4-01 原始惑星の自転特性

*柴田雄 (東大理/国立天文台), 小久保英一郎 (国立天文台)

17:00 O4-02 火星は重い原始惑星系円盤中で小さい微惑星から形成された

*小林浩 (名大理), ダウファス ニコラス (シカゴ大学)

17:10 O4-03 Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics による巨大衝突シミュレーション

*細野七月 (東工大理工), 斎藤貴之 (東工大 ELSI), 牧野淳一郎 (東工大 ELSI/理研)

17:20 O4-04 ジャイアントインパクトは見えるか?

*玄田英典 (東工大 ELSI), 小林浩 (名大理), 河原創 (東大理), 松尾太郎 (京大理), 小谷隆行 (国立天文台), 村上尚史 (北大), 藤井友香 (東工大 ELSI), 小久保英一郎 (国立天文台), SEIT メンバー

17:30 O4-05 中心星加熱円盤における惑星のタイプ I 軌道移動の数値計算と解析的見積もり

*前島直彦, 渡邊誠一郎 (名大環境)

17:40 O4-06 Type I 惑星移動に対するダストの影響について

*山田耕 (早稲田大政経), 稲葉知士 (早稲田大国際教養)

17:50 O4-07 高精度測光と高分散分光観測を用いた星の自転軸傾斜角測定

*平野照幸 (東工大理工), サンチスオジェダ ロベルト (MIT), 竹田洋一, 成田憲保 (国立天文台), ウィン ジョッシュ (MIT), 須藤靖 (東大理)

18:00-18:10 休憩

18:10 O4-08 巨大惑星まわりの原始惑星系円盤ギャップ構造

*金川和弘 (北大低温研), 武藤恭之 (工学院大), 田中秀和, 谷川享行 (北大低温研), 竹内拓 (東工大理工)

18:20 O4-09 巨大ガス惑星の影響下での微惑星集積の N 体計算

*押野翔一, 堀安範 (国立天文台)

18:30 O4-10 ホットジュピター存在下での多重惑星系の形成

*荻原正博, 犬塚修一郎, 小林浩 (名大理)

18:40 O4-11 太陽系外における木星型連惑星の形成

*落合裕道 (東工大理工), 井田茂 (東工大 ELSI), 長沢真樹子 (東工大広域理)

18:50 O4-12 原始惑星のガス捕獲による軌道進化～円軌道長周期巨大ガス惑星の形成～

*菊地章宏, 樋口有理可 (東工大理工), 井田茂 (東工大 ELSI)

11 月 21 日 (木)

口頭発表セッション 5 (円盤・物質) 座長: 谷川享行 (北大低温研)

09:20 O5-01 新学術領域研究「宇宙における分子進化: 星間雲から原始惑星系へ」

*香内晃 (北大低温研)

09:30 O5-02 惑星間塵中の有機物と生命の起源: 地上および宇宙実験による検証

*小林憲正 (横浜国立大工/自然科学研究機構), 古川天, 川本幸徳, 金子竹男, 大林由美子 (横浜国立大), 三田肇 (福岡工業大), 奥平恭子 (会津大), 矢野創 (JAXA), 田端誠 (JAXA/千葉大), 橋本博文 (JAXA), 横堀伸一 (東京薬科大), 山岸明彦 (東京薬科大/自然科学研究機構), たんぽぽWG

09:40 O5-03 原始惑星系円盤における有機分子生成

*古家健次, 相川祐理 (神戸大理)

09:50 O5-04 原始惑星系円盤の水氷に対する光脱離反応の検出における理論的示唆

*高附翔馬, 中本泰史 (東工大理工), 井上昭雄 (大阪産業大), 本田充彦 (神奈川大)

10:00 O5-05 焼結ダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーション

*城野信一 (名大環境)

10:10 O5-06 原始惑星系円盤における大局磁場の輸送と進化

*奥住聡, 竹内拓 (東工大理工), 武藤恭之 (工学院大)

10:20 O5-07 HD142527 に付随する非対称ギャップ円盤の ALMA 観測

*百瀬宗武 (茨城大理), 深川美里 (大阪大理), 塚越崇 (茨城大理), 西合一矢, 大橋永芳 (国立天文台), 北村良実 (JAXA), 犬塚修一郎 (名大理), 武藤恭之 (工学院大), 野村英子 (京大理), 竹内拓 (東工大理工), 小林浩 (名大理), 花輪知幸 (千葉大), 秋山永治 (国立天文台), 本田充彦 (神奈川大理), 藤原英明 (国立天文台), 片岡章雅 (総研大/国立天文台), 高橋実道 (名大理/京大理), 芝井広 (大阪大理)

10:30-10:40 休憩

口頭発表セッション6 (衛星系・リング) 座長：奥住聡 (東工大理工)

10:40 O6-01 波構造を考慮にいたした土星Aリングの温度モデル

*森島龍司 (カリフォルニア大/ジェット推進研究所), スピルカー リンダ, ターナー ニール (ジェット推進研究所)

10:50 O6-02 周惑星円盤中の固体分布

*谷川享行 (北大低温研), 丸田有希人, 町田正博 (九州大理)

11:00 O6-03 周惑星円盤の形成・進化についての理論的解析

*藤井悠里 (名大理), 高橋実道 (名大理/京大理)

11:10 O6-04 惑星まわりの粒子円盤の進化と衛星形成

*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)

11:20 O6-05 周惑星ガス円盤中で集積する巨大氷衛星の原始大気

*三上峻, 倉本圭 (北大理)

11:30 O6-06 土星衛星エンセラダスにおける熱水活動

*関根康人 (東大新領域), 渋谷岳造, 鈴木勝彦 (JAMSTEC), 桑谷立 (東北大), 橘省吾 (北大)

11:40 O6-07 木星の影におけるガニメデからの近赤外線放射

*津村耕司 (JAXA), 新井俊明 (JAXA/東大), 有松亘 (東大理), 江上英一 (アリゾナ大), 本田親寿 (会津大), 木村淳 (東工大 ELSI), 倉本圭 (北大理), 松浦周二 (JAXA), 中島健介 (九州大), 中本泰史 (東工大理工), 白簾麻衣 (JAXA), スレース ジェyson (カリフォルニア工科大), 和田武彦 (JAXA)

11:50 O6-08 JUICE 搭載レーザ高度計 (GALA) のサイエンス目標

*木村淳 (東工大 ELSI), Hauke Hussmann (ドイツ航空宇宙センター), 並木則行 (千葉工大), 鎌田俊一 (北大), 松本晃治 (国立天文台), 倉本圭 (北大理), 佐々木晶 (大阪大理), 平田成 (会津大)

12:00-12:50 昼食

12:50-13:50 ポスターセッション 2

口頭発表セッション7 (小天体 I) 座長：小久保英一郎 (国立天文台)

13:50 O7-01 ケンタウルスの軌道進化と彗星活動 2

*樋口有理可 (東工大理工), 井田茂 (東工大 ELSI)

14:00 O7-02 トロヤ群小惑星の力学進化

*岡山博明, 大槻圭史 (神戸大理)

14:10 O7-03 原始惑星系円盤内で高速になる微小天体の軌道進化

*長沢真樹子 (東工大広域理), 田中今日子, 田中秀和 (北大低温研), 三浦均 (名古屋市立大), 山本哲生 (北大理/神戸大理), 中本泰史 (東工大理工)

口頭発表セッション 8 (衝突) 座長：道上達広 (近畿大工)・荒川政彦 (神戸大理)

14:20 O8-01 天体スケールにおける衝突破壊モデルの再検討

*藤田智明 (東大理), 玄田英典 (東工大 ELSI), 小林浩 (名大理), 田中秀和 (北大低温研), 阿部豊 (東大理)

14:30 O8-02 普通コンドライト母天体を形成した微惑星の低速度衝突実験：同サイズ試料の衝突破壊に対する斜め衝突の影響

*河本泰成, 荒川政彦 (神戸大理), 保井みなみ (神戸大自然)

14:40 O8-03 C型小惑星模擬物質への衝突実験

*岡本千里 (JAXA), 池崎克俊 (大阪大), 今柴直也 (国立極地研), 矢野創 (JAXA), 橘省吾 (北大理), 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)

14:50 O8-04 事前衝突を経験した多結晶氷の衝突破壊条件に関する実験的研究：氷天体の蓄積ダメージの見積もり

*保井みなみ (神戸大自然), 羽山遼, 荒川政彦 (神戸大理)

15:00 O8-05 高空隙な始原天体の衝突進化：衝突キャビティ形成の実験的研究

*岡本尚也, 中村昭子 (神戸大理), 長谷川直 (JAXA)

15:10 O8-06 カンラン岩ターゲットへの高速度衝突により放出される破片の3次元形状分布

*島田玲 (大阪大理), 土山明 (京大理), 荒川政彦 (神戸大理), 道上達広 (近畿大工), 門野敏彦 (産業医科大), 松島亘志 (筑波大工), 中野司 (産総研)

15:20-15:30 休憩

15:30 O8-07 斜め衝突時の衝撃圧縮段階の超高速撮像観測

*黒澤耕介 (千葉工大), 門野敏彦 (産業医科大), 長岡洋一 (千葉工大), 長谷川直 (JAXA), 松井孝典 (千葉工大)

15:40 O8-08 衝突エネルギー密度と玄武岩衝突破片の形状分布

*道上達広 (近畿大工), 島田玲 (大阪大理), 土山明 (京大理), 吉田明史, 濱田貴大 (近畿大工), 長谷川直 (JAXA)

15:50 O8-09 クレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究：Wada's method の応用

*辻堂さやか, 荒川政彦 (神戸大理), 和田浩二 (千葉工大), 鈴木絢子 (JAXA)

16:00 O8-10 C型小惑星含有鉱物における太陽風プロトンの影響

*仲内悠祐 (総研大), 安部正真 (JAXA)

16:10 O8-11 炭素質隕石の衝突蒸発：室内実験の結果と引き起こされる環境変動

*大野宗祐 (千葉工大), 門野敏彦 (産業医科大), 境家達弘 (大阪大), 黒澤耕介 (千葉工大), 重森啓介, 弘中陽一郎, 藪田ひかる, 近藤忠 (大阪大), 山中高光 (カーネギー研究所), 杉田精司 (東大), 松井孝典 (千葉工大／東大)

16:20 O8-12 ガラスビーズ焼結体の熱伝導率測定と微惑星熱進化への応用

*津田彰子, 小川和律 (東大理), 坂谷尚哉 (総研大), 飯島祐一, 田中智 (JAXA), 荒川政彦 (神戸大理), 本田理恵 (高知大)

16:30-17:20 総会
17:20-18:10 最優秀研究者 受賞講演
18:10-18:30 休憩 (会場移動)
18:30-20:30 懇親会
会場：ホテルミヤヒラ

11月22日(金)

口頭発表セッション9 (はやぶさ) 座長：千秋博紀 (千葉工大)・渡邊誠一郎 (名大)

09:20 09-01 はやぶさ NIRS/LIDAR データの再解析で分かった小惑星 Itokawa の宇宙風化と重力傾斜の相関
*阿部新助 (日大理工), 北里宏平, 平田成 (会津大), 安部正真 (JAXA), はやぶさ NIRS/LIDAR チーム

09:30 09-02 多バンド画像を用いたイトカワ表面スペクトルの高空間分解能解析
*古賀すみれ, 杉田精司 (東大新領域), 鎌田俊一 (北大理), 石黒正晃 (ソウル大)

09:40 09-03 イトカワ表面の礫の姿勢・サイズ・形状測定による表層流動性の考察
*青木隆修, 中村昭子 (神戸大理), 平田成 (会津大コンピュータ理工)

09:50 09-04 鉛直振動を受けた粉体層の対流構造とその速度のスケーリング
*山田智哉, 桂木洋光 (名大環境)

10:00 09-05 はやぶさ2の統合サイエンスと運用戦略
*渡邊誠一郎 (名大環境/JAXA), 小林直樹, 藤本正樹 (JAXA), はやぶさ2 統合サイエンスチーム

10:10 09-06 小惑星 1999JU3 の重力および軌道推定について
*池田人 (JAXA), 松本晃治 (国立天文台), 大坪俊通 (一橋大), 並木則行 (千葉工大), 津田雄一, 三桝裕也, 吉川真 (JAXA)

10:20 09-07 CV コンドライト及び CR コンドライトの水質変成について
*小松睦美 (早稲田大), 三河内岳 (東大), 荒井朋子 (千葉工大), 山本彩 (RESTEC), 中村智樹 (東北大), 廣井孝弘 (ブラウン大), 北里宏平 (会津大)

10:30 09-08 炭素質コンドライトの可視・近赤外反射分光特性の「はやぶさ2」ミッションへの応用
*廣井孝弘 (ブラウン大), 佐々木晶 (大阪大理), 小島秀康, 今栄直也 (国立極地研)

10:40 09-09 はやぶさ2の試料採取地点の決定に向けた隕石反射分光実験
*武井亮斗, 佐藤允基 (立教大理), 古賀すみれ, 長勇一郎 (東大), 鈴木秀彦, 亀田真吾 (立教大理), 杉田精司 (東大)

10:50-11:00 休憩

11:00 09-10 はやぶさ2 LIDAR によるアルベド観測の検証
*山田竜平 (国立天文台), 千秋博紀, 小林正規 (千葉工大), 野田寛大 (国立天文台), 阿部新助 (日大), 吉田二美 (国立天文台), 並木則行 (千葉工大)

11:10 O9-11 はやぶさ 2 LIDAR を用いたダスト観測

*千秋博紀, 小林正規 (千葉工大), 山田竜平 (国立天文台), 並木則行 (千葉工大), はやぶさ 2 LIDAR サイエンスチーム

11:20 O9-12 「はやぶさ 2」中間赤外カメラ (TIR) の開発の現状

*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 (JAXA), 千秋博紀 (千葉工大), 中村良介 (産総研), 今村剛 (JAXA), 関口朋彦 (北海道教育大), 長谷川直 (JAXA), 出村裕英, 小川佳子, 北里宏平 (会津大), 松永恒雄 (国立環境研), 和田武彦 (JAXA), 滝田隼 (JAXA/東大), 坂谷尚哉 (JAXA/総研大), Joern Helbert (ドイツ航空宇宙センター), Thomas Mueller (マックスプランク研究所), Axel Hagermann (オープン大)

11:30 O9-13 はやぶさ 2 DCAM3-D の光学性能検証試験

*石橋高 (千葉工大), 荒川政彦 (神戸大), 飯島祐一 (JAXA), 小川和律 (東大), 白井慶 (JAXA), 和田浩二 (千葉工大), 本田理恵 (高知大), 澤田弘崇 (JAXA), 坂谷尚哉 (総研大), 門野敏彦 (産業医科大), 小林正規 (千葉工大), 中澤暁, 早川基 (JAXA), 池田優二 (フォトコーディング)

11:40 O9-14 はやぶさ 2 ONC-T の光学較正試験結果について

*佐藤允基, 武井亮斗, 鈴木秀彦, 亀田真吾 (立教大理), 山田学 (千葉工大), 澤田弘崇 (JAXA), 杉田精司 (東大), 本田理恵 (高知大), 諸田智克 (名古屋大), 本田親寿 (会津大)

11:50-12:50 昼食

12:50-13:50 ポスターセッション 3

口頭発表セッション 10 (小天体 II) 座長: 渡部潤一 (国立天文台)

13:50 O10-01 太陽系小天体名の発音調査 【講演キャンセル】

*佐藤勲

14:00 O10-02 地球近傍小天体 2012 DA₁₄ の可視分光観測

*浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 藤井貢 (藤井黒崎天文台), 花山秀和 (国立天文台), 高橋隼 (兵庫県立大 西はりま天文台), 寺居剛 (国立天文台), 大島修 (水島工業高)

14:10 O10-03 メインベルト小惑星のアルベド分布の傾向

*臼井文彦 (東大理), 長谷川直 (JAXA), 石黒正晃 (ソウル大), 大坪貴文 (東北大)

14:20 O10-04 石垣島天文台 105cm むりかぶし望遠鏡による太陽系小天体観測

*花山秀和 (国立天文台), 石黒正晃 (ソウル大), 福島英雄, 宮地竹史, 渡部潤一 (国立天文台)

14:30 O10-05 反射スペクトルから見た木星の小衛星とヒルダ群・トロヤ群小惑星との関係

*高遠徳尚, 吉田二美 (国立天文台), 大槻圭史 (神戸大)

14:40 O10-06 チェリャビンスク隕石の現地調査と衝突前発見の可能性

*高橋典嗣 (日本スペースガード協会/明星大), 吉川真, 三輪田真 (JAXA/日本スペースガード協会), 布施哲治 (日本スペースガード協会/NICT), 奥村真一郎, 西山広太, 浦川 聖太郎, 坂本強 (日本スペースガード協会)

14:50 O10-07 チェリャビンスク火球の光度曲線

*柳澤正久（電通大情報理工）

15:00-15:10 休憩

口頭発表セッション 11（月科学・探査） 座長：小林直樹（JAXA）・山田竜平（国立天文台）

15:10 O11-01 月バルク組成制約に向けたマグマオーシャン熱進化モデルの構築

*酒井理紗，永原裕子，小澤一仁（東大理），橘省吾（北大理）

15:20 O11-02 月高地地殻の Mg# と Th 濃度相関から考察するマグマオーシャン固化過程

*大竹真紀子（JAXA），小林進悟（放射線医学研），武田弘（千葉工大），諸田智克（名大環境），石原吉明（産総研），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），唐牛譲（JAXA），佐伯和人（大阪大）

15:30 O11-03 月隕石 DaG 400 に含まれるトロクトライト地殻

*荒井朋子（千葉工大），廣井孝弘（ブラウン大），佐々木晶（大阪大理），松井孝典（千葉工大）

15:40 O11-04 月の海の玄武岩組成が示唆する月マンツルの進化史

*加藤伸祐，諸田智克，山口靖（名大環境），大嶽久志，大竹真紀子（JAXA）

15:50 O11-05 月核条件での Fe-O-S 系の融解とオリビン・鉄メルトの反応：月核マンツル境界への応用

*赤松明香（東北大理）【講演キャンセル】

16:00 O11-06 かぐや GRS で得られた月表面の鉄成分の全球分布

*晴山慎（聖マリアンナ医科大），山下直之（Planetary Science Institute），唐牛譲（JAXA），長岡央（早稲田大），小林進悟（放射線医学研），長谷部信行（早稲田大）

16:10 O11-07 観測衛星による連続分光データを使った月面上の Ca に富む輝石の全球搜索

*山本聡（国立環境研），中村良介（産総研），松永恒雄（国立環境研），小川佳子（会津大），石原吉明（産総研），諸田智克（名大環境），平田成（会津大），大竹真紀子（JAXA），廣井孝弘（ブラウン大），横田康弘（国立環境研），春山純一（JAXA）

16:20 O11-08 アポロ試料粒子形状を用いた月表面での影隠し衝効果のシミュレーション

*丸山薫，佐伯和人（大阪大理），片桐淳（産総研），松島亘志（筑波大），大竹真紀子（JAXA），土山明（京大理）

16:30 O11-09 月・小天体・火星の縦孔・地下空洞探査の科学目的

*春山 純一，西堀 俊幸（JAXA），西野真木（東工大），清水久芳（東大），白尾元理（惑星地質研），佐伯和人（大阪大），小松吾郎（ダヌン ツィオ大学），小林憲正（横浜国立大），山岸明彦，横堀伸一（東京薬科大），押上祥子（国立天文台），橋爪光（大阪大），山本幸生，永松愛子（JAXA），諸田智克（名大），宮本英昭（東大），長谷中利昭（熊本大），長谷部信行（早稲田大），今枝隆之介（東大），道上達広（近畿大），石原吉行（産業総合研），横田康弘，山本聡（国立環境研）

16:40 O11-10 月縦孔・地下空洞探査に向けたキャスティングシステムの開発

*有隅仁（産総研），大槻真嗣，久保田孝，春山純一（JAXA）

16:50 O11-11 月惑星熱流量の精密観測手法に関する検討と測定プローブの基礎開発（2）

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

17:00 O11-12 ボロノイ図を用いたクレーターの空間分布の評価

*木下達生, 本田親寿, 平田成 (会津大コンピューター理工), 諸田智克 (名大環境)

17:10 O11-13 火山観測ロボット野外実証試験活動報告

*佐伯和人 (大阪大理)

17:20-17:30 休憩

口頭発表セッション 12 (分析・実験) 座長: 永原裕子 (東大理)

17:30 O12-01 K-Ar 法を用いた惑星着陸探査におけるその場年代計装置の開発: 天然岩石のもつアイソクロン年代の算出

*長勇一郎 (東大理), 三浦弥生 (東大地震研), 諸田智克 (名大環境), 杉田精司 (東大理/東大複雑理工)

17:40 O12-02 真空紫外 LIBS による K-Ar 年代測定方法の検証

*奥村裕, 大石峻裕, 芝崎和夫 (立教大理), 長勇一郎 (東大理), 亀田真吾 (立教大理), 三浦弥生, 三部賢治, 杉田精司 (東大)

17:50 O12-03 Type II コンドリュールに含まれるカンラン石斑晶に見られる FeO-rich overgrowth 層の形成条件

*三浦均 (名古屋市立大システム自然科学), 山本哲生 (神戸大)

18:00 O12-04 珪酸塩の高温加熱過程の放射光によるその場観察実験

*上相真之 (JAXA), 安田秀幸 (京大工), 柳楽知也 (大阪大工), 中塚憲章 (京大工), 上杉健太郎 (JASRI/SPRING-8)

18:10 O12-05 観測ロケット “S-520-28 号機” を用いた微小重力実験から探る鉄微粒子の生成過程

*木村勇氣 (東北大理), 田中今日子 (北大低温研), 塚本勝男 (東北大理), 竹内伸介, 稲富裕光 (JAXA)

18:20 O12-06 分子間水素原子移動による HOCO ラジカルの分解

*大島基, 谷篤史 (大阪大理), 菅原武, 大垣一成 (大阪大基礎工学), 北野勝久 (大阪大工)

口頭発表セッション 13 (惑星大気) 座長: 林祥介 (神戸大理)

18:30 O13-01 大気大循環モデルを用いた木星型惑星大気の数値実験

*高橋芳幸 (神戸大理), 竹広真一 (京大数理解析研), 林祥介 (神戸大理)

18:40 O13-02 木星大気における雲の凝結メカニズム: 放射対流平衡モデルを用いた大気成分鉛直分布の推定

*高橋康人 (北大理), はしもとじょーじ (岡山大/CPS), 大西将徳 (神戸大), 倉本圭 (北大理/CPS)

18:50 O13-03 同期回転惑星大気の数値実験: 非灰色放射スキームと雲スキームを用いた場合

*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)

ポスター発表プログラム

ポスターは3日間掲示できます。最終日の口頭発表セッション12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(11月20日) 12:40~13:40

S01 高空隙ダストの静的圧縮を考慮した微惑星形成

*片岡章雅(総研大), 田中秀和(北大低温研), 奥住聡(東工大理工), 和田浩二(千葉工大)

S02 遠赤外スタッキング解析による太陽系外オールト雲ダストの発見

*有松亘(東大理/JAXA), 和田武彦(JAXA), 土井靖生(東大理)

S03 月面マリウス丘における玄武岩質溶岩噴出の時間推移に関する研究

*今枝隆之介(東大理), 春山純一, 大竹真紀子, 岩田隆浩(JAXA)

S04 周惑星円盤との相互作用による不規則衛星の捕獲

*末次竜, 藤田哲也, 大槻圭史(神戸大理)

S05 粉体物質の熱伝導率測定実験と月惑星表層の熱伝導率構造

*坂谷尚哉(総研大/JAXA), 小川和律(東大新領域/JAXA), 飯島祐一(JAXA), 津田彰子(東大理/JAXA), 本田理恵(高知大), 荒川政彦(神戸大理), 田中智(JAXA)

P1-01 周惑星円盤内におけるガス抵抗による微惑星軌道進化

*清水俊平, 大槻圭史(神戸大理)

P1-02 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(東工大理工)

P1-03 N体計算と統計的計算を組み合わせた惑星集積コードの開発

*森島龍司(カリフォルニア大/ジェット推進研究所)

P1-04 原始惑星からの地球型惑星形成

*小久保英一郎(国立天文台), 井田茂(東工大 ELSI)

P1-05 高解像度シミュレーションによる地球型惑星形成における巨大惑星の移動中の検証【講演キャンセル】

*Sofia Lykawka Patryk(近畿大総合社会), 伊藤孝士(国立天文台)

P1-06 平均運動共鳴への捕捉条件の導出と系外惑星が経験した惑星移動速度への制限

*荻原正博, 小林浩(名大理)

P1-07 惑星がつくるギャップ形状を考慮したガス惑星の成長と軌道進化

*和田義輝, 竹内拓(東工大理工)

P1-08 散逸円盤中のスーパーアースの大気獲得

*廣瀬翔, 生駒大洋(東大理)

P1-09 トランジット低質量系外惑星の透過スペクトルモデル

*川島由依, 生駒大洋(東大理)

P1-10 海惑星が有するH₂O層の構造と熱的状态

*中山陽史, 阿部豊(東大理)

P1-11 氷ダストの“こしとり”による地球への水供給量の調整

*佐藤貴央, 佐々木貴教(東工大理工), 井田茂(東工大 ELSI)

P1-12 楕円軌道ガス円盤の永年進化

*今枝佑輔（東工大総合理工）

P1-13 光蒸発を考慮した中質量星周りでの原始惑星系円盤の散逸

*國友正信，竹内拓（東工大理工），井田茂（東工大 ELSI）

P1-14 原始惑星系円盤でのダスト落下問題における電荷を帯びたダストの運動と磁場の影響について

*平井研一郎，加藤雄人，寺田直樹（東北大理）

P1-15 原始惑星系円盤のガス圧力バンプにおけるダスト・ガス密度分布の進化とストリーミング不安定性

*瀧哲朗（東工大理工），藤本正樹（JAXA／東工大 ELSI），井田茂（東工大 ELSI）

P1-16 層流円盤におけるダスト層の重力不安定性の数値シミュレーション

*石津尚喜（国立天文台），関谷実（九大理）

P1-17 原始惑星系円盤初期のダストの組成分布～熱力学的平衡計算と Particle Tracking Model～

*中田守，永原裕子，小澤一仁（東大理）

P1-18 始原的隕石と斑状コンドリュールのストロンチウム安定同位体異常に関する研究

*奥井航，横山哲也，中本泰氏，高橋栄一（東工大理工），佐々木理（東北大総合学術博物館），中村美千彦，奥村聡（東北大地学）

P1-19 有機物マントルをもつダストの衝突合体速度の温度依存性

*上田裕太（東大理），奥住聡，中本泰史（東工大理工），田中秀和，香内晃（北大低温研），永原裕子（東大理）

P1-20 潮汐場における自己重力アグリゲイトの衝突破壊

*兵頭龍樹，大槻圭史（神戸大理）

P1-21 Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics の非理想気体への拡張

*細野七月（東工大理工），斎藤貴之（東工大 ELSI），牧野淳一郎（東工大 ELSI／理研）

P1-22 任意の物理量の微分可能性を必要としない SPH 法の開発

*山本智子（東工大理工），斎藤貴之（東工大 ELSI），牧野淳一郎（東工大 ELSI／理研）

P1-23 火星の表層水量の進化：火星隕石中の水素 3 位体からの制約

*黒川宏之（名大理），佐藤雅彦（九大），潮田雅司，松山健志，森脇涼太（東工大理工），James M. Dohm（東工大 ELSI），臼井寛（東工大理工）

P1-24 火星大気の組成混合比変動を考慮した MG4 電波掩蔽観測データの再導出

*野口克行，池田さやか（奈良女子大理）

P1-25 火星隕石 Tissint の地球化学的研究：火星マントル化学進化の理解に向けて

*森脇涼太，臼井寛裕，横山哲也（東工大理工）

P1-26 火星回転計測のための逆 VLBI 宇宙実証実験

*岩田隆浩（JAXA），松本晃治，菊池冬彦（国立天文台），石原吉明（産総研），佐々木晶（大阪大）

P1-27 InSight で観測される大気励起火星常時微動

*小林直樹（JAXA）

P1-28 Viking Lander 2 地震計のデータ復元

*山本幸生（JAXA），山田竜平（国立天文台），中村吉雄（テキサス大学オースティン校）

ポスターセッション 2 : 2 日目 (11 月 21 日) 12:50~13:50

P2-01 最近の 13 個の彗星(核)の偏光撮像観測結果

*古荘玲子 (都留文科大／国立天文台), 篠田知則 (放送大学), 寺居剛, 渡部潤一 (国立天文台)

P2-02 北大ピリカ望遠鏡による探査候補小惑星の観測

*関口朋彦 (北海道教育大旭川校), 石黒正晃 (ソウル大), 黒田大介 (国立天文台), 長谷川直 (JAXA), 花山秀和 (国立天文台), 渡辺誠, 中尾光 (北大)

P2-03 地球大接近小惑星 2012 DA14 の表面特性測定

*寺居剛 (国立天文台), 浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 高橋隼 (兵庫県立大), 吉田二美 (国立天文台), 大朝由美子, 大島吾一, 荒谷健太, 星久樹, 佐藤太基, 潮田和俊 (埼玉大),

P2-04 2012 DA14 地球最接近時の近赤外カラー観測

*高橋隼 (兵庫県立大 天文科学センター), 浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 寺居剛, 花山秀和 (国立天文台), 新井彰, 本田敏志, 高木悠平, 伊藤洋一 (兵庫県立大)

P2-05 NASA Deep Impact/EP0XI フライバイ探査ターゲット小惑星 (163249) 2002 GT の多色ライトカーブ観測

*大島雅英, 阿部新助 (日大理工)

P2-06 Sub-km メインベルト小惑星のカラー分布

*吉田二美 (国立天文台), Edward Lin, Wing-Huen Ip (NCU), Ying-Tung Chen (ASIAA)

P2-07 太陽系小天体の深撮像観測に特化した可視広帯域フィルターの開発と性能評価

*奥村真一郎, 西山広太, 浦川聖太郎, 坂本強 (日本スペースガード協会), 高橋典嗣 (日本スペースガード協会／明星大), 吉川真 (JAXA)

P2-08 沖縄地方における小惑星による恒星の掩蔽の予報 【講演キャンセル】

*佐藤勲

P2-09 小惑星表面の温度場に対する 2 次加熱とその応答について

*滝田隼 (東大理), 田中智 (JAXA), 千秋博樹 (千葉工大)

P2-10 熱水実験と反応理論モデルに基づくセレスの表面鉱物の解釈: 形成・熱進化への示唆

*森愛美 (東大理), 関根康人 (東大新領域), 桑谷立 (東北大環境科学), 橋省吾 (北大理), 澁谷岳造, 鈴木勝彦, 正木裕香 (JAMSTEC)

P2-11 チェリャビンスク隕石火球: 微気圧および広帯域地震観測網に記録された衝撃波シグナルの特徴

*石原吉明 (産総研), 平松良浩 (金沢大), 西田究 (東大地震研), 新井伸夫, 岩國真紀子 (日本気象協会), 柿並義宏 (高知工科大), 古本宗充 (名大), 山本真行 (高知工科大)

P2-12 木星火球の観測

*今井啓輔, 柳澤正久 (電通大情報理工)

P2-13 木星火球シミュレーション

*片桐陽輔, 柳澤正久 (電通大情報理工)

P2-14 木星火球のメタンバンド観測

*森山正和, 柳澤正久 (電通大情報理工)

P2-15 木星衝突発光現象の検出の試み

*渡部潤一 (国立天文台), 田部一志 (リブラ), 柳澤正久 (電気通信大), 伊藤孝士 (国立天文台), 杉田精司 (東大)

P2-16 小天体衝突によりガス惑星大気中に生成された揮発性分子の化学進化

*飯野孝浩（名大太陽地球環境）

P2-17 模擬星間環境中での宇宙線による複雑態アミノ酸前駆体の生成

*江藤碧，伊勢絢一，金子竹男，大林由美子（横浜国立大），福田一志，小栗慶之（東工大原原子炉工），吉田聡（放射線医学総合研），小林憲正（横浜国立大工）

P2-18 宇宙線による星間物質からの核酸塩基無生物的生成の検証

*時村隼人，岡部拓人，金子竹男，大林由美子（横浜国立大），福田仁志，小栗慶之（東工大），吉田聡（放射線医学総合研），小林憲正（横浜国立大）

P2-19 最新のカッシーニ探査データに基づくディオオーネの表層進化史

*平田直之，宮本 英昭（東大総合研究博物館）

P2-20 ガニメデの金属核形成と膨張地形形成，カリスト・タイタンとの進化の分岐

*木村淳（東工大 ELSI），倉本圭（北大）

P2-21 鉛直加振による粉粒体・液体系の液状化と流体輸送の実験

*安田奈央，隅田育郎（金沢大自然）

P2-22 砂への低速度衝突による衝突励起地震の観測

*松本恵里，荒川政彦（神戸大理），保井みなみ（神戸大自然），小林直樹（JAXA）

P2-23 低密度脆性弾丸による空隙率を持つ標的への衝突実験

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

P2-24 レゴリス模擬標的に対するインパクターの破壊と破片固化

*長岡宏樹，中村昭子（神戸大理），鈴木絢子，長谷川直（JAXA）

P2-25 粘性流体への固体弾衝突によるフィンガリング不安定性とクレーター構造

*桂木洋光（名大環境）

ポスターセッション 3：3 日目（11 月 22 日）12:50～13:50

P3-01 NaCl を含むはやぶさ帰還粒子のコンソーシアム研究

*矢田達（JAXA），Michael E. Zolensky（NASA ジョンソン宇宙センター），上相真之，唐牛譲，石橋之宏，岡田達明，安部正真（JAXA）

P3-02 はやぶさ試料のコンソーシアム研究：最大試料の分析について

*上相真之，矢田達，唐牛譲，石橋之宏，岡田達明，安部正真（JAXA），上杉健太朗，竹内晃久，鈴木芳夫（高輝度光科学研究センター），土山明（京大），Jisun Park（ラトガース大学），長尾敬介（東大），西泉邦彦（カリフォルニア大）

P3-03 はやぶさ試料のコンソーシアム研究：金属粒子およびリン酸塩鉱物を含む粒子の分析について

*唐牛譲，上相真之，矢田達，石橋之宏（JAXA），海老原充，白井直樹（首都大学東京），関本俊（京大），寺田健太郎（大阪大），岡田達明（JAXA），安部正真（JAXA）

P3-04 C 型小惑星の位相曲線：地形による影の影響

*松浦隆裕，北里宏平（会津大 先端情報科学），

P3-05 はやぶさ 2 近赤外分光計 NIRS3 の運用計画

*北里宏平（会津大 先端情報科学），岩田隆浩，安部正真，大竹真紀子（JAXA），平田成（会津大），

千秋博紀（千葉工大）、中村智樹（東北大）、小松睦美（早稲田大）、荒井朋子（千葉工大）、廣井孝弘（ブラウン大）、松浦周二、津村耕司、荒井武彦、仲内悠祐（JAXA）、高木靖彦（愛知東邦大）、本田親寿（会津大）、松永恒雄（国立環境研）、高遠徳尚（国立天文台）、渡邊誠一郎（名大）

P3-06 はやぶさ 2 LIDAR の光トランスポンダ機能を使った機器アラインメント測定

*野田寛大（国立天文台）、水野貴秀（JAXA）、國森裕生（情報通信研究機構）、竹内央（JAXA）、並木則行（千葉工大）

P3-07 Hayabusa-2 DCAM3-D の耐環境設計と検証試験

*小川和律（東大新領域）、荒川政彦（神戸大理）、飯島祐一、白井慶、澤田弘崇（JAXA）、和田浩二（千葉工大）、本田理恵（高知大）、石橋高（千葉工大）、坂谷尚哉（総研大）、中澤暁（JAXA）、門野敏彦（産業医科大）、小林正規（千葉工大）、早川基（JAXA）

P3-08 はやぶさ 2 搭載 DCAM3-D 用 CMOS 光学センサの性能評価

*白井慶（JAXA）、小川和津（東大）、石橋高（千葉工大）、坂谷尚哉（総研大）、飯島祐一（JAXA）、荒川政彦（神戸大）、和田浩二（千葉工大）、本田理恵（高知大）、澤田弘高（JAXA）、門野敏彦（産業医科大）、小林正規（千葉工大）、中澤暁、早川基（JAXA）

P3-09 はやぶさ 2 小型衝突装置の中空弾丸がクレーター形成過程に及ぼす影響

*荒川政彦（神戸大理）、門野敏彦（産業医科大）、辻堂さやか（神戸大理）、保井みなみ（神戸大自然）長谷川直、白井慶（JAXA）

P3-10 はやぶさ 2 探査機データを用いた小惑星形状モデル作成手法の検討

*平田成、森洋平（会津大）

P3-11 はやぶさ 2 搭載ミネルバ2における紫外 LED を用いた有機鉱物検出の試み

*出村裕英（会津大コンピュータ理工）、三田肇（福岡工業大）、阿部新助（日大）、吉光徹雄、久保田孝（JAXA）

P3-12 月・水星・小惑星のナトリウム大気

*亀田真吾、布施川綾花、鈴木秀彦（立教大理）、鍵谷将人（東北大）、杉田精司（東大）

P3-13 かぐや搭載マルチバンドイメージャの分光画像データ校正・解析最前線

*大竹真紀子、大嶽久志、春山純一（JAXA）

P3-14 かぐやレーダサウンダ観測による月表層媒質の実効誘電率及び密度の推定

*熊本篤志（東北大）小林敬生（韓国地質資源研究院）、押上祥子（国立天文台）、小野高幸（東北大）、春山純一（JAXA）

P3-15 かぐや衛星搭載レーダサウンダーと地形・分光カメラに基づいた月玄武岩層のバルク誘電率と空隙率の推定

*石山謙、熊本篤志、小野高幸（東北大）山口靖（名大）、春山純一、大竹真紀子（JAXA）、加藤雄人、寺田直樹（東北大）、押上祥子（国立天文台）

P3-16 月の物理探査：次のターゲット

*佐々木晶（大阪大理）、RISE 月惑星探査検討室

P3-17 次期月探査計画 SELENE-2 の検討状況（3）

*田中智、三谷烈史、大嶽久志、小林直樹（JAXA）、小川和律（東大新領域）、橋本樹明、星野健、大槻真嗣（JAXA）、木村淳（東工大 ELSI）、倉本圭（北大理）、若林幸子（JAXA）

P3-18 月レーザ測距用ホロー型新規月面反射板の開発

*荒木博志, 鹿島伸悟, 野田寛大 (国立天文台), 國森裕生 (情報通信研究機構), 千葉皓太 (岩手大), 大坪俊通 (一橋大), 宇都宮真 (JAXA), 松本吉昭 (プラネット)

P3-19 DOE (Diffractive Optical Element) を用いた月面天測望遠鏡の開発及び DOE 試作状況

*鹿島伸悟, 荒木博志, 鶴田誠逸, 花田英夫 (国立天文台), 宇都宮真, 安田進 (JAXA), 鈴木浩文 (中部大工)

P3-20 月面 CCR の光学応答解析及び CCM 作製基礎検討

*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), 國森裕生 (情報通信研究機構)

P3-21 月縦孔・地下空洞探査

*春山純一, 久保田孝, 水野貴秀, 大槻真嗣, 河野功, 西堀俊幸, 川勝康弘, 野田篤司, 加藤裕基, 渡辺恵佑, 上田敦史 (JAXA), 吉田和哉 (東北大), 石上玄也 (慶應大), 有隅仁 (産総研), 茂渡修平 (東大)

P3-22 月の線状重力異常地域の地形的特徴

*澤田なつ季 (金沢大理工), 諸田智克 (名大), 石原吉明 (産総研), 平松良浩 (金沢大)

P3-23 月面 swirl4 地域における分光特徴量の比較と swirl 形成過程への制約

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

P3-24 月の初期分化におけるチタンの役割

*堀文子, 酒井理紗, 永原裕子, 小澤一仁 (東大理)

P3-25 クレータ生成率モデルの修正と月進化史への影響

*諸田智克 (名大環境), 春山純一 (JAXA), 本田親寿 (会津大), 大竹真紀子 (JAXA), 平田成, 出村裕英 (会津大), 山本聡, 松永恒雄, 横田康弘 (国立環境研), 中村良介, 石原吉明 (産総研), 渡邊誠一郎, 古本宗充 (名大)

P3-26 模擬低重力下での砂標的へのクレーター形成実験

*木内真人, 中村昭子 (神戸大理)

P3-27 玄武岩標的クレーター形成実験から求められたスケーリング則

*高木靖彦 (愛知東邦大), 長谷川直, 鈴木絢子 (JAXA)

P3-28 イジェクタカーテン観測からイジェクタの放出角度と速さを推定する方法

*和田浩二 (千葉工大), 辻堂さやか, 荒川政彦 (神戸大理)

P3-29 CReSS を用いた火星気象予測実験

*杉山耕一朗 (JAXA), 小高正嗣 (北大理), 中島健介 (九大理), 高橋芳幸 (神戸大理/CPS), 西澤誠也 (理研), 乙部直人 (福岡大理), はしもとじょーじ (岡山大自然), 長谷川晃一 (中電 CTI), 榊原篤志 (中電 CTI), 坪木和久 (名大 HyARC)

P3-30 ピリカ望遠鏡と VMC による金星の同時紫外測光の手法開発とスーパーローテーション周期の持つ寿命推定

*今井正堯, 高橋幸弘, 渡部重十, 渡邊誠 (北大理)

※ 遊星人掲載のプログラムに一部、誤りがございましたため、変更しております。

(a) 講演者の所属の訂正

P3-29 杉山耕一朗（北大理）→（JAXA）

(b) ポスター著者の修正

P2-05 阿部新助（日大理工）→ 大島雅英（日大理工）

P2-17 小林憲正（横浜国立大）→ 江藤碧（横浜国立大）

P2-18 小林憲正（横浜国立大）→ 時村隼人（横浜国立大）

P3-04 北里宏平（会津大）→ 松浦隆裕（会津大）

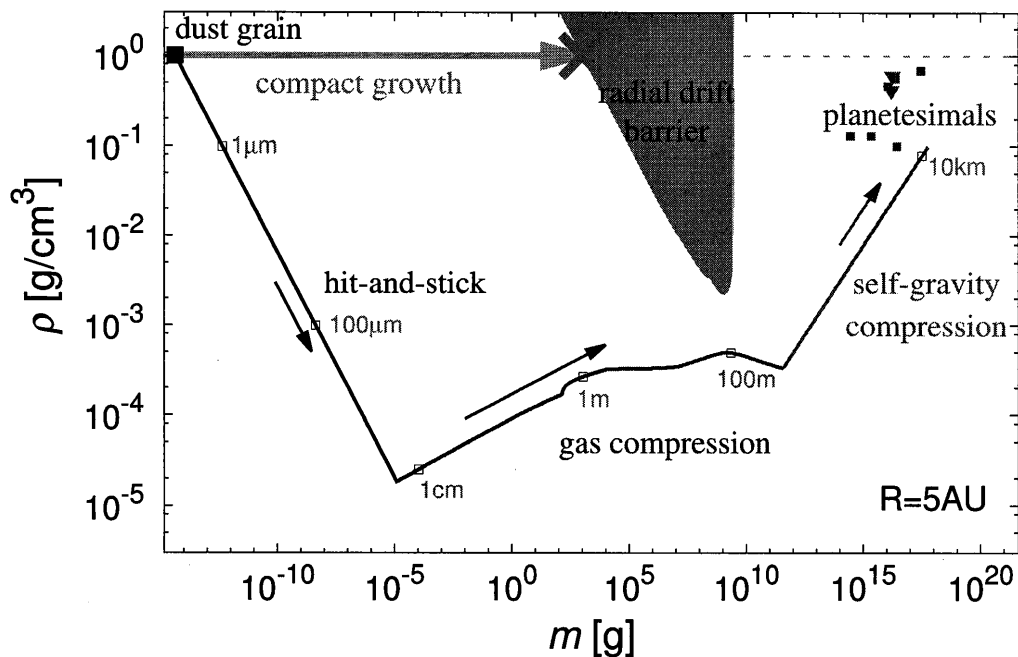
S01

高空隙ダストの静的圧縮を考慮した微惑星形成

○片岡章雅(1)、田中秀和(2)、奥住聡(3)、和田浩二(4)

1.総合研究大学院大学 / 国立天文台, 2.北海道大学, 3.東京工業大学, 4.千葉工業大学

原始惑星系円盤において、メートルサイズダストの中心星落下問題は未解決である。解決策として衝突圧縮によるダスト内部密度進化が提案されてきたが(奥住他2012)、ガス抵抗による圧縮や自己重力による圧縮は考慮されてこなかった。我々はN体計算で求めた空隙ダストの圧縮強度公式(片岡他2013)を用いて、このような圧縮過程を調べた。それにより、ダストから微惑星までの内部密度進化を明らかにした。その際、中心星落下を回避し、かつ彗星などで示唆される内部密度が実現されていることを示した。



遠赤外スタッキング解析による太陽系外オールト雲ダスト輻射の発見

Extra-solar Dusty Oort Cloud Discovered by Far-infrared Stacking Analysis

○有松 亘^{1,2}, 和田 武彦¹, 土井 靖生³¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ²東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻,³東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻

太陽系の最外縁部、太陽からおおよそ1000-50000AUの距離に、長周期彗星の供給源として未知の天体集団が仮定されている。Oort (1951) によって提唱され、現在『オールト雲』と呼ばれるこの仮想天体群には、原始惑星系円盤内の氷小天体の生き残りが多数存在していることが予想される。オールト雲が系外惑星系で存在するか否かは、太陽系の普遍性を解明する上で決定的な証拠のひとつとなり、惑星系形成及び進化の標準シナリオの理解を飛躍的に加速させうる。しかし、系外惑星系でのオールト雲に対する観測的制約はこれまでのところ全く得られていない。

本研究は系外惑星系におけるオールト雲の存在可能性について観測的制約を得るため、赤外線天文衛星『あかり』によって得られた全天遠赤外搜索データを利用し、太陽系外の近傍主系列星の遠赤外域 (波長 60 - 180 μm) での輻射傾向を調査した。オールト雲天体から供給されるダストは中心の恒星や星間輻射によって加熱され、遠赤外域で熱輻射を行っていることが予想される。主系列星に付随する遠赤外熱輻射に対する高感度、高分解能な搜索をおこなった。個々の恒星付近の遠赤外輻射分布は背景の星間ダスト輻射の混入が顕著である。よって、本研究では遠方宇宙の研究で用いられるスタッキング解析の手法を採用し、恒星に付随する輻射の分離を試みた。合計約 15000 個の A, F, G, K型主系列星領域の輻射分布を距離、タイプ別に重ね合わせ、近傍主系列星に付随する典型的な遠赤外線輻射の傾向を調べた。このうちA型星周囲にはデブリ円盤起因の輻射成分に加え、より低温 (~20 K) で、点光源を仮定した場合に対して有意に拡がった超過成分が発見された。輻射の拡がりを中心星からの実距離でおおよそ 3000 - 5000 AU に相当し、我々の太陽系で予想されている内オールト雲 (Inner Oort cloud) の距離 (~1000 - 10000 AU) に対応する。また、観測された温度も、観測されている領域でのダストの輻射平衡温度と一致する。典型的な星間環境を仮定すると、こうした領域に存在するダストはたちどころに星間風によって拡散すると予想されるため、観測された成分が原始惑星系円盤内のダストの生き残りであるとは考えにくい。また、より内側に位置するデブリ円盤から放出されたダストは、中心星からの輻射圧によって加速されながら拡散することから、発見された熱輻射成分を説明することは困難である。よって、本研究で発見された赤外超過成分は、A型主系列星周囲に存在する系外オールト雲天体から供給されたダスト由来であることが強く示唆される。

本発表では、観測された遠赤外超過成分の特性からオールト雲ダストの供給メカニズムについて推定する。また、本研究結果が、惑星系外縁部の描像や、太陽系の普遍性、惑星系形成の標準シナリオに対してどのような影響を与えるかについて議論する。

- ◎ 応募者氏名：今枝隆之介
- ◎ 学年：修士二年
- ◎ 指導教官名：春山純一助教
- ◎ 連絡先：imaeda@planeta.sci.isas.jaxa.jp（今枝），haruyama.junichi@jaxa.jp（春山）
- ◎ 講演タイトル：月面マリウス丘における玄武岩質溶岩噴出の時間推移に関する研究
- ◎ 著者一覧：今枝隆之介^{1,2}，春山純一²，大竹真紀子²，岩田隆浩²
- ◎ 所属一覧：1. 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻, 2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

<講演概要>

はじめに：

マリウス丘は、月面最大の海である嵐の大洋中央部で最も若い火成活動を示す領域に近接する、月最大の火山複合体である。したがって、マリウス丘と周辺の海の火成活動時期の前後関係を解明する事は、月の熱史を理解する上で重要なテーマの一つと言える。

研究動機と目的：

マリウス丘に関する多くの先行研究があるにも関わらず、その形成時期の議論は分かれており未だ不明確である。そこで、本研究ではマリウス丘上に見られる地質ユニット別の形成年代を高精度で推定する事を目的とする。

手法：

マリウス丘を物質・表層状態別に分類する為に、最初に月周回衛星かぐやのマルチバンドイメージャ（MI）による分光観測に基いた地質分類を行った。次に地形カメラ（TC）の画像に基づきクレーター年代学的手法を適用する事で、各地質ユニット毎の形成年代を推定した。

結果：

マリウス丘は100以上の地質ユニットに分類された。地質ユニット全体では約22～38億年の形成年代を示し、多くの地点において断続的に玄武岩質溶岩が噴出し、さらに噴出年代に応じて組成が複雑に変化した事が明らかになった。

議論：

マリウス丘周囲の海の形成年代とマリウス丘の形成年代の前後関係及び、マリウス丘上で見られる玄武岩質溶岩噴出の時間推移が持つ意味に対し議論を行う。さらに、マリウス丘と複数の共通点をもつリュンカー丘（嵐の大洋）に対する最新の解析結果も合わせた議論を行う。

周惑星円盤との相互作用による不規則衛星の捕獲

○末次竜、藤田哲也、大槻圭史

神戸大学

巨大惑星の周りに数多くある不規則衛星は、それらの軌道の特徴から捕獲された微惑星が起源だと考えられている。不規則衛星の捕獲過程として、巨大惑星同士が近接遭遇した時に周囲の微惑星を捕獲するモデル (Nesvorny et al. 2007) が有力とされている。しかし、この捕獲モデルでは、木星は他の巨大惑星と近接遭遇しにくいため、木星の不規則衛星の形成を説明するのが難しい。一方で古くから提案されている周惑星円盤のガス抵抗による捕獲モデルは、微惑星を捕獲できるようなガス密度だと、捕獲後、惑星に落下してしまうという問題点があった。しかしながら Cuk & Burns (2004) によって木星の特定の不規則衛星はガスによって捕獲された可能性が示唆された。このガスによる捕獲モデルは惑星に接近した微惑星を一回の近接遭遇で捕獲する従来のモデルではなく、惑星に一時的に捕獲された微惑星が複数回、惑星に接近することによって、何度も円盤ガスと相互作用することで捕獲されるというものであった。この一時捕獲を考慮したガスによる捕獲モデルは、円盤のガス密度が低い場合でも、少しずつエネルギーが減少することで捕獲できることを意味し、捕獲後の惑星への落下を緩やかにできる可能性がある。しかしながら、一時捕獲過程を考慮した周惑星円盤によるガス捕獲モデルは、一時捕獲の過程自体が不明な点が多く、これまで詳しく調べられていなかった。これまで我々は一時捕獲過程を詳しく研究し、典型的な一時捕獲軌道が四つに分類できることなどを明らかにした (Suetsugu et al. 2011, Suetsugu & Ohtsuki 2013)。そこで本研究では、これらの典型的な一時捕獲軌道となった微惑星が周惑星円盤からのガス抵抗によってエネルギーを失い捕獲される過程について三体問題軌道計算を用いて調べた。

その結果、典型的な四つの一時捕獲軌道のすべてがガス抵抗によってエネルギーを失い捕獲されることが明らかになった。特にこれらの一時捕獲軌道のうちの二つはガス抵抗が非常に弱い場合でも捕獲可能だった。これらの一時捕獲軌道で惑星の周りを公転していた微惑星が、ガスに捕獲された直後の軌道要素なども調べた。その結果、非常に軌道長半径が大きい不規則衛星以外は一時捕獲を考慮した周惑星円盤による捕獲モデルでも説明可能であることが明らかとなった。

粉体物質の熱伝導率測定実験と月惑星表層の熱伝導率構造

○坂谷 尚哉¹, 小川 和律², 飯島 祐一³, 津田 彰子²,

本田 理恵⁴, 荒川 政彦⁵, 田中 智³

¹総合研究大学院大学, ²東京大学, ³宇宙航空研究開発機構, ⁴高知大学, ⁵神戸大学

粉体は太陽系初期から現在に至るまで普遍的に存在する。例えば、微惑星はダストの集積によって形成され、固体惑星表層は一般的にレゴリスで覆われている。真空中ではこのような粉体物質の熱伝導率は通常の岩石に比べて 2 桁以上低く、天体の熱的状態および熱進化を考える上で粉体物質の熱伝導率構造を知ることは重要である。しかし、真空下での粉体熱伝導率には、粒子接触面での熱伝導に加えて粒子表面間の熱輻射も寄与しており、それぞれが様々なパラメータに依存するため、現状の実験データだけでは実際の天体上での粉体熱伝導率を制約することが困難であった。我々はパラメータを正確にコントロールした状況下で真空中の粉体の熱伝導率を測定することにより、一つ一つのパラメータ依存性の理解と粉体中の熱輸送メカニズムの解明を目指している。特に、圧縮応力はこれまで調査されていなかったパラメータの一つであり、粉体熱伝導率の圧縮応力依存性は鉛直構造を決定する上で不可欠な情報である。本研究ではこの圧縮応力依存性を初めて測定した。

我々は真空下において粉体物質に加わる力を、錘りとモーターによって自動的に制御しつつ、熱伝導率を測定することのできる装置を開発した。最大圧縮応力は 20 kPa 程度であり、この応力は月面の深さ 5 m、直径 10 km のダスト集合体微惑星の中心部に相当する。粉体サンプルは粒径の異なる 2 種類の球形ガラスビーズと月レゴリスと同等の粒径分布を持つレゴリス模擬物質を用いた。

実験の結果、どのサンプルに対しても圧縮応力の増加によって粉体物質の熱伝導率は上昇した (図 1)。これは、粒子の弾性変形により粒子間の接触面が拡大し、伝導寄与が増加したことが原因だと考えられる。別途、熱伝導率の温度依存性を測定することにより (図 2) 決定した輻射寄与の値を用いて、伝導寄与を定式化した結果、大小のガラスビーズの熱伝導率はそれぞれ応力の 0.36, 0.28 乗に比例し、レゴリス模擬物質の値は応力の 0.17 乗に比例することが実験的に初めて明らかとなった。弾性球の接触理論によると、粒子間の接触半径は応力の 0.33 乗に比例するため、ガラスビーズに対する結果は応力の弾性変形が原因であること、また、伝導寄与が接触半径に比例することを強く裏付けている。一方、レゴリス模擬物質はガラスビーズとは異なる応力依存性を示しており、この違いは粒径分布や粒子形状の影響によるものと考えられる。

本結果を用いて、天体の重力を考慮した上で自重による圧縮応力を計算すれば、微惑星内部や表層レゴリス層内のより確からしい熱伝導率構造を推定でき、天体熱進化計算のための重要な情報となる。

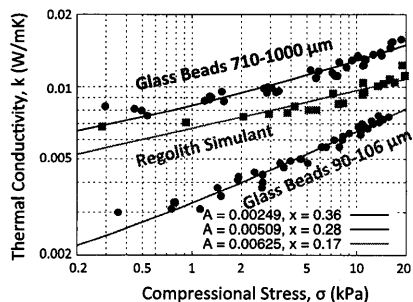


図 1: 熱伝導率の圧縮応力依存性 (両対数)。曲線は $k = A\sigma^x + k_{rad}$ でのフィッティング。

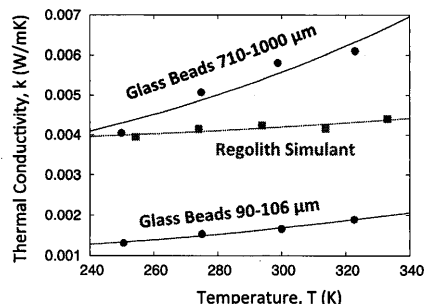


図 2: 熱伝導率の温度依存性。曲線は $k = A' + BT^3$ でのフィッティング結果。

地殻のリサイクリングと地球型惑星の進化

小河正基

(東京大学教養学部宇宙地球科学科)

地球型惑星の内部進化を支配する二大要因であるマントル対流と火成活動の数値シミュレーションの結果に基づき、マントル進化のパターンがどのような素過程によって決まっているのかを論ずる。火星のようなプレートテクトニクスが働かず、かつ下部マントルも存在しないかしても無視できる程度に薄い惑星では、マントル進化は火成活動による「サーモスタット効果」と「放射性元素の地殻への濃集」によってその大枠が決まる。リソスフェアが固い不動の蓋として働くため、対流によるマントルの冷却は不十分にしか機能しないが、マントルの温度がソリダス温度を超えたときは、プルーム型の火成活動により効率よく内部から熱が奪われるため、マントルの温度は常にソリダス温度以下に抑えられる。さらに、このプルーム型火成活動には、マントルの熱源である放射性元素を地殻に濃集する働きがあり、この機能は、マントルが放射性元素に欠乏し、プルーム型火成活動をもはや維持できなくなるまで働き続ける。このため、火星のような惑星では火成活動は短命に終わる。これに対して、火星と同様プレートテクトニクスは起きていないが、下部マントルは存在する金星では、ポストスピネル転移とガーネットペロフスカイト転移の効果により、火成活動はより長続きする。放射性元素が豊富に有り活発な火成活動が起こっていた初期の金星では、火成活動により生じた玄武岩の一部がマントルにリサイクルし相転移境界上に蓄積する。この玄武岩バリアのため、マントル対流は脈動し、特にその活動がパルス的に強くなったとき（以下バーストと呼ぶ）、大規模な火成活動が発生し、放射性元素を多く含む地殻は大規模にマントルに崩落する。このバーストの繰り返しは、やがて放射性元素が壊変し内部加熱が弱まると終息し、玄武岩バリアは消滅し、マントル対流は定常的全マントル対流となる。地球は、プレートテクトニクスにより海洋地殻が効率よくマントルにリサイクルするため、サイズの的には金星と似ているにもかかわらず、そのマントル進化の経路は金星とは大きく異なる。初期の放射性元素が豊富に有った時期には、リサイクルした地殻が短時間のうちに高温となり、浮力を獲得しバーストを頻発させる。このためプレート運動もカオティックとなる。しかし、やがて放射性元素が崩壊するにつれ、バーストは終息し、プレート運動はより定常的になる。この定常的プレート運動によりリサイクルした海洋地殻はコア・マントル境界上に蓄積し、高温の玄武岩パイルを形成し、その後のプルーム型火成活動の源となる。

水の散逸を伴う地球型惑星の進化

○小玉 貴則¹, 玄田 英典², 阿部 豊¹, Kevin Zahnle³

¹ 東京大学大学院地球惑星科学専攻, ² 東工大・地球生命研究所 (ELSI), ³ NASA Ames

惑星表面での液体の水の存在は、生命の起源と進化において重要であると考えられている。惑星表面に液体の水を保持する惑星は、海惑星と陸惑星に分類することができる。海惑星は、陸水の分布が地表面での水輸送に支配された、ほぼ全球を海で覆われている惑星である。一方陸惑星は、陸水の分布が大気の循環で支配されている惑星であり、その分布は、降雨と蒸発のバランスによって決まっている。一般に赤道域が乾燥し、極域に液体の水が局在化している。陸水の分布により、陸惑星は、乾燥領域から射出限界を超える惑星放射を出すことができるため、海惑星に比べ、大きな太陽放射を受け取っても、表面に液体の水を保持することができる[Abe et al., 2011]。

従来、海惑星の進化においては、中心星の光度の増大による水蒸気の散逸と暴走温室効果の発生がハビタブルな環境の終焉と考えられてきた[Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013]。しかし、海惑星が暴走温室効果の発生の前に大規模な水の散逸を経験した場合、陸惑星へと進化することができる可能性があることが提案された[Abe et al., 2011]。海惑星の進化の分岐は、中心星の光度増大による暴走温室効果の発生と大規模な水の散逸の間の競合で決まるはずである。

この競合は、恒星進化と初期水量などに依存している。従って、我々は、水の散逸による水量変化と恒星進化に着目し、海惑星の進化経路を、数値モデルを用いて検討した。本発表では、近年数多く検出されている系外惑星に適用することを目的に、様々なスペクトル型の恒星の進化と惑星サイズを考慮した海惑星の進化を議論し、ハビタブルゾーンの内側境界を再検討する。

海惑星がどの進化経路をとるかは、大規模な水の散逸が起こる湿潤温室状態に入ってから暴走温室効果が発生するまでの水の散逸量で決定される。太陽より重い恒星は、太陽に比べ進化は速い。大規模な水の散逸の開始から暴走温室効果発生までの期間が短いため、そのような恒星を公転する海惑星は陸惑星へと進化しにくい。太陽より軽い恒星は、太陽に比べ進化は遅い。大規模な水の散逸の開始から暴走温室効果発生までの期間は長いため、太陽より重い恒星に比べ、多くの水を失う。その結果、軽い恒星を公転する海惑星は、陸惑星へ進化しやすい傾向がある。しかしながら、軽い恒星の場合、惑星が湿潤温室状態になる光度を受け取るとき、すでに恒星からの極紫外線が弱まっている。そのため、太陽質量の恒星と比べると、陸惑星へと進化する経路をとる海惑星の初期水量は、小さくなることがわかった。従って、太陽型の恒星周りの惑星が最も海惑星から陸惑星へと進化しやすいことがわかった。

ハビタブルゾーンにおける 地球型水惑星表層環境に対する 炭素循環の影響

○門屋辰太郎¹, 田近英一²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

従来、惑星気候の推定は、主に軌道要素や中心星の光度などから議論されてきた。先行研究の一例として、Kasting et al. (1993)は、惑星表層に液体の水が存在しうるような領域(ハビタブルゾーン)を軌道長半径から制約し、また中心星の質量に応じた光度の違いやその時間変化の影響を検討した。その他にも軌道離心率(Williams and Pollard, 2002; Dressing et al. 2011 など)や自転軸傾斜(Williams and Kasting, 1997; Williams and Pollard, 2003 など)の影響を議論した先行研究がある。

これらの研究では、大気の組成(主としてCO₂濃度)を仮定することで温室効果(気候状態)を推定している。しかし、CO₂濃度が低下すると地球も全球凍結してしまうことが知られているように、大気組成は惑星気候に大きな影響を与える。Kasting et al. (1993)では、炭素循環に起因する負のフィードバック機構(Walker et al. 1981)によって大気中の温室効果気体変動し、惑星気候は常に温暖に保たれると仮定していた。しかし、炭素循環を構成する重要なプロセスであるCO₂脱ガス率によっては地球も全球凍結に陥るため(Tajika, 2003)、このような仮定は必ずしも妥当ではない。このように、惑星気候を考える上では、軌道要素や中心星の光度といった要因に加え、物質循環に伴う大気組成の変動を考慮することが重要である。また、これらのプロセスの時間変化を考えることで、惑星気候の進化に関する理解にもつながる。

本研究では、地球のように炭素循環が機能している水惑星(地球型水惑星)を仮定し、CO₂脱ガス率と惑星が受け取る中心星放射量の違いがこのような惑星の気候に与える影響と、これらの中心星や惑星内部の進化に由来する惑星気候進化について検討を行った。惑星気候の指標として惑星表面の温度分布に注目し、南北1次元エネルギーバランスモデルを用いて推定した。また、CO₂脱ガスによるCO₂の供給と風化によるCO₂の除去のバランスから大気中のCO₂量求め、温度の計算に使用した。また、中心星放射量及びCO₂脱ガス率の進化は、それぞれGough(1981)、Tajika and Matsui(1992)のモデルを用いて推定した。

その結果、以下のような知見が得られた。惑星が受けとる日射量が小さい場合、CO₂脱ガスによるCO₂の供給と風化による除去のバランスを満たすために大気中のCO₂量は増加する。その結果、日射量が小さいほど、全球的に一樣な温度分布に近づく。一方、日射量が現在の太陽定数の1.15倍を越える場合には、CO₂脱ガス率が珪酸塩風化率と等しいという制約条件を満たすために、極冠が形成される解と形成されない解が存在しうることがわかった。極冠が形成されない解は、全球平均地表面温度が400 Kを越えているため、Kasting et al. (1993)の言う湿潤温室状態に相当すると考えられる。また、この結果と中心星放射量及びCO₂脱ガス率の進化を併せて考えると、湿潤温室状態への遷移は、従来想定されていたよりも時間的に遅くなることが示唆される。

O1-04

系外惑星の直接撮像へ向けた系内天体の測光特性モデリング

Modeling of photometric properties of Solar System objects for future direct imaging observations of exoplanets

○藤井友香¹、木村淳¹、James Dohm¹、大竹真紀子²

¹東京工業大学地球生命研究所、²独立行政法人宇宙航空研究開発機構

今後の系外惑星観測の一つのマイルストーンは系外固体惑星の直接撮像観測であり、これらの大気や表層環境の詳細を探り生命居住可能性を見出すことが期待されている。将来の直接撮像観測のゴールを明確にするために、これまで地球をベースにしたモデルを中心に点源としての惑星光の観測的特徴が調べられてきた。しかし、系外惑星には、質量・組成・大気量などさまざまな物理量について幅広い多様性が想定される。そのため、現実的な範囲でさまざまなバリエーションを持つ固体惑星の観測的兆候を明らかにしておくことは重要である。

そこで私たちは、月や火星、ガリレオ衛星など既知の太陽系内固体惑星・衛星のデータを用いて、これらの点源としての惑星光の特徴を調べる。特に、表面の非一様性に起因する自転変動に注目する。太陽系内固体惑星は、組成の違いやダスト分布などさまざまな原因による表面の非一様性が見られ、これらによって惑星光に 20-30%程度の自転変動が生じることが分かった。講演では、このような日周変動を用いた惑星の自転周期の検出可能性、そして衛星系の検出可能性についても議論する。

One of the milestones in exoplanet research is direct imaging observations of rocky exoplanets, which are expected to reveal their detailed properties including surface geology and habitability. As a benchmark of future reconnaissance of rocky exoplanets, it is essential to survey observable signatures of a wide variety of realistic planets. Here we study photometric properties of solar rocky/icy planets/satellites (Moon, Mars, Galilean satellites) as point sources with arbitrary geometry using publicly available observed data. We discuss variability due to spin rotation as a probe of surface inhomogeneity and spin rate, and as a potential tool to identify companions (e.g., moons).

星雲遭遇による K-Pg 境界の大量絶滅

○二村徳宏¹、戎崎俊一²、丸山茂徳³¹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

顕生代には 5 回の大量絶滅があり、本研究ではこの原因およびこれにより生じた地球環境変動を解明する。はじめに、この中で最も新しく地質学的・古生物学的に豊富な情報を含む K-Pg 境界の調査を行った。この大量絶滅はイリジウム (Ir) 異常濃集等から巨大隕石衝突により引き起こされたという説が有力とされている (e.g., Schulte *et al.*, 2010)。しかし、巨大隕石衝突による寒冷化・日射遮蔽は数年で終わり、その後はもとの環境に戻るため、大量絶滅を引き起こすことは困難なのではないかとの指摘もある。確かにこの数年の期間で生物の個体数は大きく減少はするが、数パーセントの個体が生存すれば、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。さらに科や属レベルの減少は困難と考えられる。また、地球には、現在クレータは約 180 個発見されており、そのうち Chicxulub crater と同規模のものは数十個存在する (e.g., Johnson and Melosh, 2012) にもかかわらず、この時期に大量絶滅はない。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。さらに、恐竜の生存率は、巨大隕石衝突の約 10 Ma 前から減少しているという報告があり (Sloan *et al.*, 1986; Cowen, 1996)、アンモナイトおよ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 (e.g., House, 1989; 1993; Thomas, 1990)。大量絶滅には、巨大隕石衝突が及ぼす期間より長期間の寒冷化・日射遮蔽が必要だと考えられる。そこで、Kataoka *et al.*, (2013) の「星雲の冬仮説」をもとに太陽系が星雲に遭遇し、その結果、長期間の寒冷化・日射遮蔽が生じ、大量絶滅が起きたという仮定を立てて検証を行った。

星雲遭遇により、この時代の地層は宇宙塵が長期間地球に供給される。この証拠が地球の堆積物の中に発見できることが期待される。これを検出するためには堆積速度の遅い深海底掘削コア試料が適している。本研究では Ocean drilling program の分析結果を用い、深海底掘削コア試料 (886C) の中に、巨大隕石衝突による Ir ピークの他に、星雲遭遇による幅広の (長期にわたる) Ir 分布の超過を発見した。この分布から星雲遭遇による宇宙塵の効果で地球は 76-77 Ma 前から 13-20 Ma の間、放射強制力がスノーボールアースレベル ($-9.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下) であったと推定した。また、酸素同位体比 (古水温) 変化、炭素同位体比 (植物プランクトンの生産性および光合成の量) 変化、ストロンチウム同位体比 (陸の薄削量) 変化、海水面の高さ、大気の大気炭素量、そして前述の古生物学的データ等から星雲遭遇による地球環境変動を考察した。これらの結果は星雲遭遇を考えることで説明することができる。

一方、星雲遭遇により小惑星の軌道が乱され、この一部が地球に衝突した可能性がある。この一つが Chicxulub crater であると考えられる。また宇宙線照射による火山噴火の可能性も考えられるかもしれない。これは Keller (2005) の主張する複数回の隕石衝突および火山噴火の研究と整合的である。

今後は地球全球の深海底掘削コア試料に 886C に似た Ir 分布、またはその他の宇宙塵由来の元素 (Os 等)、および宇宙塵スフェリュールの分布や氷河堆積物 (ドロップストーン等) の証拠も期待されるのでこれらの調査を進める。

火星表層水の水素同位体組成

○臼井寛裕^{1,2}, C. M.O'D. Alexander³, J. Wang³, J. I. Simon⁴, and J. H. Jones⁴

¹東工大地惑、²LPI (USRA)、³DTM (CIW)、⁴JSC (NASA)、

火星は、現在の寒冷・乾燥した気候とは異なり、かつては液体の水が海として存在するほど温暖・湿潤な環境であったことが示唆されている。このような火星気候・表層環境の変遷は、地球化学的な情報として火星隕石を代表とする岩石試料に記録されている。本研究では、他天体の衝突により火星隕石が放出される際に形成された衝撃ガラスに着目した。火星隕石の衝撃ガラスは、衝突の影響により火星大気・表土成分が混入していることが示唆されており、過去の火星表層環境に重要な知見を与えることが期待される。

本研究では、揮発成元素分析のために改良・最適化されたカーネギー研究所の二次イオン質量分析計 (SIMS, CAMECA ims-6f, [1]) を用い、衝撃ガラスの揮発性元素濃度 (H, C, F, Cl, S) および水素同位体比 (D/H) の高精度分析を行った。試料は、異なるマグマを起源とする3種類のシャーゴットイト隕石 (LAR 06319, EETA79001, Y-980459) を用いた。SIMS 分析の結果、これら地球化学的に異なる3つの隕石の衝撃ガラスから得られた表層水成分が、水素同位体に関してはすべて同様な値 (D/H 比で地球海水 [SMOW] の約 2~3 倍) を持つことが明らかとなった。この値は、現在の火星大気の水素同位体 (D/H = $\sim 6 \times \text{SMOW}$) よりは低く、一方で火星マントルに含まれている初生水 (D/H = $\sim 1 \times \text{SMOW}$, [1]) よりは高いという中間的な特徴を持つ。本研究結果は、近過去 (= 衝撃ガラスの形成年代、1–3Ma) において、火星表層水が現在の大気とは明らかに異なる中間的な水素同位体組成を保持していたことを示している。このことは、大気と化学平衡に達していない水・氷が、現在においても地下に大量に存在していることを強く示唆している。

[1] T. Usui, C. M.O'D. Alexander, J. Wang, J. I. Simon, and J. H. Jones (2012) *Earth Planet. Sci. Lett.* 357-358, 119-129

火星着陸生命探査計画 MELOS1

○佐藤毅彦¹、久保田孝¹、藤田和央¹、岡田達明¹、岩田隆浩¹、今村剛¹、
大山聖¹、尾川順子¹、山田和彦¹、宮本英昭²、山岸明彦³、小松吾郎⁴、
臼井寛裕⁵、はしもとじょーじ⁶、出村裕英⁷、千秋博紀⁴、
佐々木晶⁸、石上玄也⁹

¹宇宙航空研究開発機構、²東京大学、³東京薬科大学、⁴千葉工業大学、
⁵東京工業大学、⁶岡山大学、⁷会津大学、⁸大阪大学、⁹慶應義塾大学

火星着陸生命探査計画 MELOS1 は「来たる 10 年」フラグシップミッション・コンセプトの一つである。諸外国の探査が「土壌を加熱し出てくるガス分析により有機物を探す」と異なり、我々は「微生物細胞の直接検出」を目指す。MELOS1 ミッションは、火星地表ローバとそれを安全に着陸させるシステム、それらを包含する大気突入・降下システム、そして惑星間航行用クルーズステージから構成される。これにより火星地表で自在に動き回り、生命の存在しそうな場所において「生命検出」実験を行おうとする計画である。

2013 年 8 月の ISAS 月惑星シンポジウムでは、生命探査装置以外に提案・検討されている搭載機器を紹介し、その時点でのミッション提案書ドラフトを公開した。もちろん重量・電力などのリソース制限がありそれらすべてを搭載できるわけではなく、そのための検討・選定プロセスが進められている。本講演は、その選定（10 月に行われる）の結果を初めて報告するものと位置づけている。

提案機器をフルに組み合わせた場合の戦略は、次のようなものである。まず環境モニターカメラによるカラー撮像で興味深いと思われる場所を見つけ、そこへ近づき LIBS で多数の点を測定する。ここでは LIBS の測定時間の短さや、遠隔からの測定、そして空間分解能の高い撮像（対象表面で～30 □ m/pix）の利点が活かることになる。現在活動中の生命があれば、それに含まれる有機物を D/H 比のホットスポットとして捉え、より生命がいそうな場所を特定できる可能性がある。次にガス検出器でその場所のメタンの有無を調べる。

ローバー移動中は GPR で地下構造を見て、水や氷の有無を調べる。そしてここぞという場所・ターゲットから試料を取得し、生命探査実験を行うことになるであろう。地震波計測も地下構造を調べられるという点では GPR と同じであるが、これは固定ステーションへの装備を想定している。したがって運用初期、まだローバーが固定ステーション近くにいる間に互いの測定結果を比較し、GPR の精度検証を支援することとなる。

秋季講演会では、機器選定の結果と、それによって火星地表で行うことのできるサイエンスについて紹介する。

MELOS 火星着陸探査システムの概念設計現状

○藤田和央¹, 石上玄也², 尾川順子¹, 畠中龍太¹, 佐藤毅彦¹, 山岸明彦³, 宮本英昭⁴,
鈴木俊之¹, 山田和彦¹, 松本秀一¹, 豊田裕之¹, 中塚潤一¹, 竹内央¹, 大山聖¹, 久保田孝¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²慶応大学, ³東京薬科大学, ⁴東京大学

火星は特に関心の高い惑星の一つであり、欧米露では精力的に探査が行われてきた。日本でも現在 JAXA および国内の研究者から構成されるグループによって火星地上探査（MELOS）の検討が進められている。本公演では MELOS 火星着陸探査システムの概念設計現状を紹介する。システム検討の基本的な戦略は、我が国の宇宙活動の自在性を獲得するために必要な、有大気重力天体へ着陸し表面探査を行う技術を実証し、独自の成果を狙って生命探査を核とするサイエンスをバランス良く実現する探査機を、中～小型の規模で開発リスクとコストを押さえて実現すること、である。図1は、モデルサイエンススコープとして生命探査と気象観測を設定し、これに基づいたミッションシナリオと探査機的设计ベースラインを設定した一例であり、ローバは 58.4 kg, 探査機の地球出発時 WET 重量は約 800kg である。現在、サイエンス機器選定の進捗に合わせて設計ベースラインを拡張・修正し、最終的なミッション定義を行うという計画を進めている。

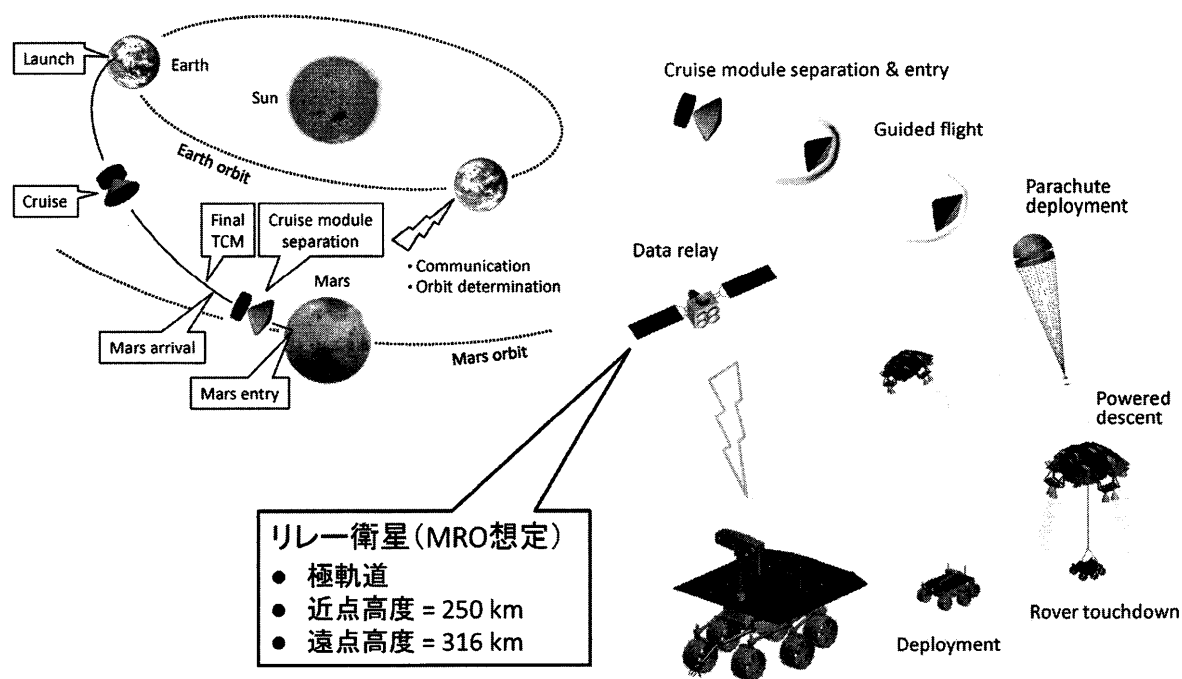


図1 ミッションシナリオ・ベースライン

MELOS 1 生命探査装置：火星表面用自動蛍光顕微鏡の開発状況

MELOS 1 Life Search System: Current Status of the Automated Fluorescence Microscope for Mars Surface

○山岸明彦¹、宮川厚夫¹、佐藤毅彦²、佐々木聰³、今井栄一⁴、本多 元⁴、吉村義隆⁵

¹東京薬科大学、²宇宙科学研究所、³東京工科大学、⁴長岡技術科学大学、⁵玉川大学

MELOS 1 では火星表面で蛍光顕微鏡を用いて現在も火星表面に生存する可能性のある「細胞」、隕石等によって宇宙よりもたらされる可能性のある有機物、ダストを観察する計画を準備している[1]。蛍光顕微鏡は生物学で広く用いられている。また、数千種類の蛍光色素が開発されている。これらの色素は、例えば核酸を特異的に染色する色素、細胞内器官を染色する色素、アミノ酸を染色する色素など、多数の特異的物質を染色することができる。これらの色素の中から、微生物学や生物学で高頻度に使われており、蛍光強度が高いものを優先して、大腸菌細胞や多種の有機物に対する染色性を検討した。また、色素が誤って粘土鉱物等を染色する可能性もあるので、鉱物と有機物の判別可能性も検討した。ついで、火星で生物細胞らしき構造体を検出する方法を検討した。地球生物細胞はすべて脂質膜で囲まれている。脂質膜は細胞が活着している間は内容物を濃縮維持するために透過性が低い、死ぬと透過性が高まる。この性質を利用して、透過性に依存して染色度の変化する色素の選定を行っている。適切な色素を選定することで、こうした探査対象を高感度で検出し、鉱物等と識別し、さらに「生細胞」と「死細胞」を識別することのできる色素の選定を進めている。

また、こうした観察は自動的に火星環境条件で実現する必要がある。光源として低電力消費のレーザーダイオードを用い、出来る限り単純な構造で振動耐性を持ち、高画像分解能（1 μm /ピクセル）の顕微鏡を検討している。また、サンプル処理部は火星土壌を外部から受け入れ、色素液を添加し、色素液の乾燥を防ぐ密閉構造を実現し、シャーレの移動を実現する構造として検討を進めている。また、顕微鏡は光路を分割して、表面に降り積もるダスト計測にも兼用する予定である。現在開発中のローバー上で実現可能な装置開発の現状を報告する。

文献

- 1) Yamagishi A. et al. *Biol. Scie. Space* 24, 67-82 (2010)

小型飛行機を用いた火星上空での風速観測 Observation of the Wind Velocity of the Mars Sky via Small Airplane

○平栗弘貴¹、得竹浩¹

¹金沢大学

Hiroataka Hiraguri¹, Hiroshi Tokutake¹

¹Kanazawa University

火星の大気密度や風速などの知見を獲得する事は、将来の EDL フェーズにおける誘導制御の信頼性向上のために有用であると考えられる。また、理学的な観点からも火星特有のダストを伴う気象現象を解明するために重要であると考えられる。

これまでの火星の風速観測には、ダストや雲などをトレーサーとして探査衛星から風速を推定する手法や、着陸機に搭載された風速計を用いて地表付近の風速を観測する手法が用いられてきた。衛星を用いた観測は下層大気風速の測定が困難である事や空間分解能が直接観測に比べて低い事、着陸機を用いた観測は、観測範囲が地表付近に限られる事や広範囲の測定が困難である事が短所としてあげられる。下層大気の風速は、過去に Viking 着陸機の減速フェーズでの運動センサ出力を用いて推定されている。

本発表では、小型飛行機を用いた下層大気での風速観測と塵旋風検出の可能性検討を行う。まず搭載センサ出力から機体が遭遇した風速のオンライン推定を行い、推定した風速履歴と塵旋風のモデルを比較する事で塵旋風の有無と相対位置を検出する。さらに検出結果を飛行制御と組み合わせる事で塵旋風内部を飛行させ塵旋風の直接観測を目指す。一方、最適計算による正確な風速や遭遇した塵旋風規模などのオフライン推定を行う。他手法と比較して、長時間下層大気の風速観測が可能である。また風の影響を受けやすい小型飛行機を用いれば観測風速の SN 比が高くなることが期待される。そこで火星での運用を想定した小型飛行機的设计を行い、飛行シミュレーションを用いた提案手法の可能性検討を行った。

フォボスにみられるグループの形態的特徴と分布

○菊地 紘¹, 宮本 英昭¹

¹東京大学総合研究博物館

火星の衛星であるフォボスは、現時点においても約 3000 枚の高解像度画像が取得され、最も多くの高解像度画像が取得されている小天体の一つとなった。本研究はそれらの画像解析を行うことで、小天体上に見られるさまざまな地形の形成過程について明らかにしようとするものである。

フォボスの表層に見られる顕著な特徴のひとつとして、グループと呼ばれる直線状の溝のような構造が挙げられる。グループは他の多くの小天体にも見られる地形であるにも関わらず、成因はよくわかっていない。そのため最も多くの情報が得られているフォボスを例にグループの形成過程を明らかにすれば、小天体全体の表層進化過程の理解に大きく貢献するものと考えられる。

フォボスのグループの形成過程として、主に次の 2 つが提案されていた。まず 1 つ目はフォボス内部になんらかの作用で断層が生じることで形成されるというもの、2 つ目はフォボスや火星への衝突で生じたイジェクタによる二次衝突を生じて形成されたというものである。しかし前者は、観測されるグループの分布が説明できず、後者は火星から放出されたイジェクタが直線状に並ばないことが数値シミュレーションによって示されているなどの理由から、議論が続いている。

そこで私たちは高解像度画像(図 1)を丁寧に分析することで、488 本のグループの位置や大きさを確認し、これらをフォボスの 3 次元数値形状モデル上に投影した。その結果、一見複雑な形状にみえるグループであっても、それぞれ実際は 1 つの平面上に存在していることを見出した。これにグループがリムを有すること、グループの長さの範囲には制限があることなどもあわせて考えると、グループが衝突由来であると考えられる。本講演では、こうした視点からグループの形成過程を説明すると共に、フォボスの起源についても新しい視点から議論する。

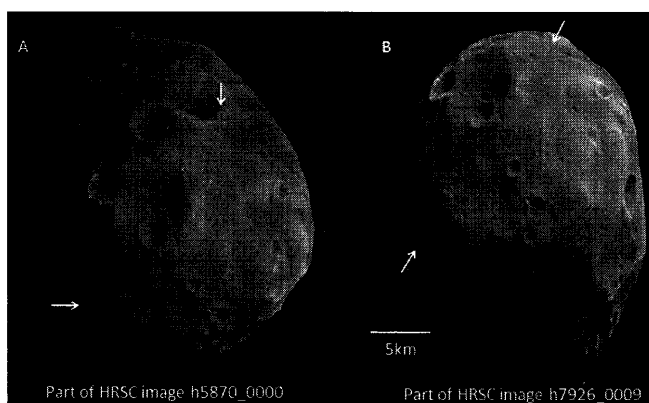


図 1 撮像方向の異なるフォボスの表層画像。撮像方向の変化に伴いフォボス上のグループは見かけ上変化する。矢印は同一のグループを指す。

短周期低質量系外惑星の内部組成と起源： 大気スペクトル観測の重要性

○生駒大洋¹，成田憲保²，福井暁彦³，堀安範⁴，黒崎健二¹，川島由依¹

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 太陽系外惑星探査プロジェクト室，³ 国立天文台 岡山天体物理観測所，⁴ 国立天文台 理論研究部

2000年に系外惑星の初トランジット観測が報告されて以来、その数はすでに300に届こうとしている。初めの10年は、ホットジュピターとよばれる巨大ガス惑星（質量が地球の100倍程度以上、半径が地球の約10倍）が主なターゲットであったが、最近では、地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いて、地球や海王星程度の小さな惑星のトランジットも観測されるようになった。このような地球質量の20倍程度以下（半径が地球の4倍程度以下）の惑星に対しては“super-Earth”や“exo-Neptune”など様々な呼称があるが、ここでは「低質量系外惑星」と総称する。

トランジット観測は、惑星が主星の前を通過する際に生じる主星光度の見かけの減少を捉える。その最大の利点は、惑星半径が測定されることにある。もし惑星の質量も測定されていれば、内部構造モデルから得られる質量と半径の理論的関係と比較することで、その惑星の内部組成に制約を与えることができる。これまでに質量と半径が測定されている低質量系外惑星は約20個程度であるが、それらの質量と半径の関係は非常に多様である。このことは、太陽系外では、中心星に近い（すなわち、公転が短周期である）領域に様々な組成の惑星が存在することを示唆している。

我々はまず、内部構造モデリングによって、観測されている質量と半径の関係を満たす惑星の内部組成を理論的に限定した。さらに、惑星の集積および質量散逸、熱進化の結果として現れる惑星の質量と半径の多様性を示し、現在の状態と起源との関連性に制約を与えた。これにより、短周期の低質量系外惑星の組成を明らかにすることで、惑星の集積や移動などの形成プロセスに有益な制約を与えうることが示される。しかし、低質量系外惑星の組成推定には大きな難点がある。ほとんどが水素からなるホットジュピターとは対照的に、低質量系外惑星の主要成分の候補は複数考えられる。いくつかの異なる組成の組み合わせが同じ質量と半径の関係を示すため、その2つの観測量だけから惑星の組成を一意に決めることができない。

そこで、その問題を軽減する有益な手段として、我々は、多波長トランジット観測と大気透過スペクトル理論モデリングによる大気組成の特定に力を注いでいる。低質量惑星の大気には様々な分子が含まれる。それらは、それぞれ異なる波長で特有の強い吸収・散乱を起こす。トランジット観測においては、結果として惑星半径の波長依存性として現れる。例えば、可視光領域のスペクトルから水素量の上限に制約が与えられ、近赤外領域では形成時に氷に含まれていたと考えられる分子の兆候を見ることができる。これらは、惑星の内部組成を制限するために決定的に重要な情報となりうる。このように我々は、短周期の低質量系外惑星の起源を明らかにするために、形成過程から進化過程、また惑星内部から大気までを、総合的に、かつ観測と理論の共同によって多角的に検討を行っている。本講演では、我々のグループの研究現状について報告する。

O3-02

スーパーアース GJ1214b の多波長トランジット観測とその惑星大気組成

○成田憲保(国立天文台／総研大), 福井暁彦(国立天文台), 生駒大洋(東大理), 堀安範(国立天文台), 黒崎健二, 川島由依(東大理), 永山貴宏(名大理), 鬼塚昌宏(国立天文台／総研大), ほか

2009 年に発見が報告されたトランジット惑星 GJ1214b は、公転周期が約 1.58 日で地球の約 2.7 倍の半径と約 6.55 倍の質量を持つ惑星であり、太陽系には存在しないタイプの系外惑星「スーパーアース」に分類されている。主星である GJ1214 は太陽系近傍の 13pc の距離にあって、比較的明るいため中口径望遠鏡を用いた地上からの観測にも適している。さらにトランジット惑星に対しては、大気組成によって波長ごとにトランジットの深さが異なるため、その惑星大気モデルに制限を加えることが可能となる。GJ1214b は世界で初めて発見されたトランジットを起こすスーパーアースであり、その減光率も大きい。そのため、GJ1214b はスーパーアースがどのような大気を持っているのかを調べることができる最初の研究対象である。

我々のチームは、2011 年からこの惑星のトランジットの多波長測光観測を実施してきた。昨年度は、その最初の結果として南アフリカ・サザーランドに設置された IRSF1.4m 望遠鏡 SIRIUS カメラによる近赤外線 JHKs バンドの 3 色同時測光観測の結果を報告した。この結果は先行研究 (Croll et al. 2011) で報告されたような Ks バンドでの深いトランジットが観測されなかったというもので、この観測結果は水素を主成分とする晴れた大気に対して疑問を投げかけるものであった。

今回は 2012 年に新たに観測した結果として、ハワイ・マウナケアのすばる望遠鏡に搭載された 2 つの可視光カメラ (Suprime-Cam と FOCAS) を用いた可視 B バンドの観測結果と、IRSF 望遠鏡 SIRIUS で再度観測した結果を報告する。2012 年の観測からは、2011 年の観測と同様に、IRSF での観測で Ks バンドの深いトランジットは観測されず、JHKs でトランジットがほぼ同じ深さであるという結果が得られた。それに加えてすばる望遠鏡による B バンドの観測でも、有意に深いトランジットは観測されず、JHKs バンドとほぼ同じ深さであるという結果を得た。これはこの惑星の大気で強いレイリー散乱の兆候が見られないということを示している。

我々の観測結果から、この惑星では水素を主成分とする晴れた空を持つという大気モデルは却下され、この惑星は水蒸気に富んだ大気を持つか、水素主体の大気であっても空が厚い雲に覆われていることを示唆している。我々の結果に加えて先行研究のさまざまな波長での観測結果と、Howe & Burrows (2012) の理論的な大気モデルとを比較すると、統計的にこの透過光スペクトルをもっとも良く説明できるのは水蒸気を主体とした高分子量大気であった。ただし、厚い雲に覆われた水素主体の低分子量大気もまだ完全には排除されていない。

本講演では以上の観測結果について報告するとともに、さらに統計的に確実なレベルで大気モデルをどう判別するかについての展望についてと、今後のスーパーアースの大気観測の展望について紹介する。

可視近赤外同時観測による hot Uranus GJ3470b の大気調査

○ 福井暁彦¹, 成田憲保¹, 黒崎健二², 生駒大洋², 柳澤顕史¹,
黒田大介¹, 清水康廣¹, 高橋安大^{1,2}

¹ 国立天文台, ² 東京大学

近年、地上の視線速度探索や宇宙望遠鏡を用いたトランジット探索によって、主星の近傍を短周期で公転する低質量惑星が豊富に存在することが明らかとなってきた。しかしそのような短周期低質量惑星は太陽系には存在しておらず、それらがどのように形成されたのかはまだ良く分かっていない。一方、トランジット惑星に対する質量と半径の測定を通して、短周期低質量惑星の多くは非常に低密度であることが分かってきた。これらの低密度・低質量惑星は比較的多量のガス大気を纏っていると考えられており、惑星の形成機構に応じてその大気の組成が異なる事が理論的に予想されている。そのため、これらの惑星の大気組成を調べることで、短周期低質量惑星の形成起源を知る手がかりを得る事が出来る。

惑星の大気組成は、トランジット惑星が起こす主星の減光率の波長依存性を調べることで調査可能である（透過分光法）。この手法は非常に高いシグナルノイズ比の観測を必要とするが、主星が明るく（つまり太陽系近傍にあり）、さらに主星のサイズが小さく相対的に大きな減光が観測出来る場合であれば、サイズの小さな低質量惑星でも透過分光の観測が可能になる。

GJ3470b は、2012 年に発見された、太陽系近傍（約 30pc）の低質量星を周期 3.3 日で公転する約 14 地球質量のトランジット惑星である（Bonfils et al. 2012）。この惑星は透過分光観測が可能なトランジット惑星として GJ1214b に次いで 2 番目に軽い惑星であり、さらに非常に低い密度（ $< 1\text{g/cm}^3$ ）をもつことも報告されている。そのため、短周期低質量惑星の大気調査を行う上で恰好のターゲットである。

我々はこの惑星に対して、岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡と口径 50cm MITSuME 望遠鏡を用いて可視 3 色+近赤外 1 色の合計 4 色同時トランジット観測を行い、減光率（主星-惑星半径比として測定）の波長依存性を調査した。その結果、近赤外での主星-惑星半径比が可視と赤外に比べて小さくなることを発見した。この結果は、水素を主体とする大気にヘイズを含む大気モデルを仮定すると自然に説明が可能である。一方、仮にこの惑星が厚い雲で覆われていたとすると、このような減光率の波長依存性は見られないはずである。つまり、我々の観測結果はこの惑星が厚い雲には覆われていない事を示唆している。惑星に厚い雲が存在していないと、今後より詳細な透過分光観測を行うことで、具体的な大気成分を検出することが出来ると期待される。

本講演では、GJ3470b に対する我々の観測結果を紹介し、さらに今後の研究の展望について述べる。

M 型星まわりの短周期低質量惑星の熱進化： GJ3470b の場合

○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

地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡の成果により、現在までに 732 個の系外惑星が確認されており、地球質量の 20 倍程度以下（半径が地球の 4 倍程度以下）の惑星（以降「低質量系外惑星」と表記する）も複数報告されている（2013 年 9 月 18 日現在，exoplanets.org より）。また、観測された惑星の質量と半径の関係から、惑星の組成について議論することも可能となった（e.g. Fortney et al. 2007）。さらに、トランジット時の大気透過光を分光観測することで、いくつかの惑星については大気組成が推定されている。

そのなかで、日本の観測グループによって透過分光観測された（Fukui et al. 2013）M 型星まわりの低質量系外惑星 GJ3470b は、水素を主成分とする大気を惑星質量の 10%程度持つと推定されている。この大気量は、中心星近傍にある固体コアがその場で円盤ガスを獲得した場合の大気量と整合的だと考えられる（Ikoma & Hori 2012）。しかし、原始惑星系円盤が散逸した後、惑星は熱進化による半径の収縮と中心星からの強烈な XUV 照射による質量散逸を同時に経験すると考えられており、形成直後に保持していた大気量と現在の大気量は一致しない。この事実は、太陽型（G 型星）まわりの短周期惑星についてはすでによく調べられている（Lopez et al. 2013; Kurosaki et al. 2013）。惑星の組成は惑星の進化・起源を知る上で重要な情報を持っており、惑星が保持する水素-ヘリウム大気量を知ることは、低質量系外惑星の観測結果を惑星形成論と合わせて起源・進化を議論する上で重要である。

本講演では、M 型星まわりの短周期低質量系外惑星として GJ3470b に注目し、熱進化と質量散逸計算を同時に行うことで、惑星が形成した直後の水素大気量を定量的に評価した結果について述べる。惑星の構造は、岩石と水エンベロープからなる固体コアを、水素-ヘリウム大気が覆っているものとし、固体コアの水/岩石比および現在の惑星放射強度はパラメータとして与える。また、中心星の GJ3470 から放射される XUV モデルは Lammer et al. (2009) を用いて計算を行った。その結果、(i) 初期の水素大気量は、惑星質量の 20-50%程度となることがわかった。また、(ii) 水素大気量は惑星の固体コアの水/岩石比によって保持する大気量が変わり、水量が多いほど水素-ヘリウム大気量が減り、熱進化も遅くなる傾向にあることもわかった。これらの結果は、惑星形成過程における惑星の大気獲得、惑星移動に対して制約を与えることが期待される。

Characterizing ExoEarths Orbiting Cool Stars : Water Content and Hydrogen-rich Atmospheres

○Yasunori Hori¹, Shigeru Ida², and D.N.C. Lin³

¹ Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan

² Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

³ UCO/Lick Observatory, University of California, Santa Cruz

Over the past five years, close-in low-mass exoplanets orbiting cool stars increase in number rapidly. Recently, transmission spectra in a planetary atmosphere during a primary eclipse have enabled us to explore atmospheric compositions of super-Earths. Habitat environment and formation histories of close-in planets are closely related to volatile inventories in their atmospheres such as water and hydrogen. We have examined water content and the amount of hydrogen-rich atmospheres of sub-/super-Earths around cool stars, performing 1,000 Monte Carlo simulations of planet formation. We have found that super-Earths with 1-30 times Earth-mass are likely to possess more than 20-30wt% water mantles surrounded by thick H₂-rich blankets: 0.1-20wt% H-He atmospheres for 1-10 times Earth-mass planets inside 0.1AU such as GJ1214b and more than 50wt% for larger planets inside 1AU like GJ436b. We have also shown that dry/wet sub-Earths with 0.1-1 times Earth-mass inside 1AU end in naked ones with less than 1wt% H-He atmospheres. Our results predict that sub-Earths in a habitable zone are wet but have almost no primitive atmosphere, while super-Earths near/in the zone, for example, GJ581d and GJ667Cc, contain abundant water and sufficient H₂-rich atmospheres. Moderately-wet planets with 0.001-1wt% water similar to the Earth, i.e., land planets, are either a small fraction of sub-Earths near the inner edge or non-migrating planets near 1AU. In any case, water worlds of sub-/super-Earths in a multiple-planet system are common around cool stars.

低温度星周りでの低質量惑星の特徴付け：水の存在量と大気量

○堀 安範 (国立天文台), 井田茂 (東工大), D.N.C. Lin (カリフォルニア大学サンタクルーズ校)

NASAが打ち上げたKepler宇宙望遠鏡の活躍により、地球サイズの惑星分布まで統計的に議論出来る時代になって来た。次はいよいよ、惑星の形成環境および形成過程を知る直接的な手掛かりになる、系外惑星本体の姿 (例えば、大気や全体組成)へ迫る段階に来ている。とりわけ、多様な全体組成を有する地球型惑星の形成を理解する上で、大気および内部組成(惑星の特徴付け)が重要となる。

現在の観測精度では、太陽よりも小さな低温度星(M型星)周りの地球型惑星が現実的なターゲットとなっている。これまでに、トランジット観測(一次食)で、惑星大気の透過光から大気スペクトルが得られた 低温度星周りのsuper-Earthは 3例ある。こうした惑星は、水素リッチな大気を保持する、あるいは水に富む惑星である可能性が示唆されている。今後の観測でも次々に見えて来る情報である、大気組成および水の存在は、太陽系外の地球型惑星の起源を探る指標となって来ている。

そこで、本研究では、低温度星周りの低質量惑星に注目し、惑星形成理論から予想される 原始大気および水の存在量を調べた。Super-Earthは分厚い水素リッチ大気(0.1AU以内の1-10倍の地球質量 : 0.1-20wt%, 1AU以内の10-30倍の地球質量 : 50wt%以上) に覆われた20-30wt%以上の水マントルを持つ可能性が高い。一方、水の存在量に依らず、1AU以内のsub-Earthはほとんど原始大気を保持出来ない。また、地球のように適度な水(0.001-1wt%)を有する惑星は、1AU付近 or 円盤内縁近傍に存在する sub-Earthであった。こうした結果をもとに、4例のsuper-Earth (GJ1214b, GJ436b, GJ3470b, GJ163c)および"ハビタブル惑星候補"とされる GJ581d, GJ667Ccについて議論したいと考えている。

水素大気を持つ Super-Earth の大気散逸が惑星組成に与える影響

○ 黒川宏之¹ 中本泰史²

¹ 名古屋大学 ² 東京工業大学

系外惑星の紫外線トランジット観測での大きな減光率(～10%)により、HD209458bをはじめとする複数の Hot-Jupiter から大気散逸の兆候が観測されている (Videl-Madjar et al., 2003 など)。この大気散逸を引き起こすメカニズムの一つとして中心星からの XUV(X線+EUV)による大気加熱駆動の大気散逸が考えられている (Lammer et al., 2003 など)。観測から見積もられた現在(年齢数十億年)での大気散逸量は惑星質量と比較して小さい (Bourrier and Lecavelier des Etangs, 2013 など)が、若い時代の中心星からのより強力な XUV が引き起こす大規模な大気散逸により、数十億年間の進化を通じて大気散逸が Hot-Jupiter の質量に影響を及ぼしてきた可能性が指摘されている (Kurokawa and Kaltenegger, 2013 など)。

近年の系外惑星観測では、数十地球質量以下の Super-Earth と呼ばれる天体が多数発見されているが、このうち質量・半径がともに測定されている Super-Earth の大部分が水素主体の大気を持っていると考えられる低密度の Super-Earth である。この水素大気の実在は多波長でのトランジット観測による Super-Earth 大気の観測でも示唆されている (Fukui et al., 2013)。Super-Earth からの大気散逸の観測はまだないが、Hot-Jupiter の場合と同様に、水素大気の大気散逸が Super-Earth の惑星質量や組成に影響を及ぼしている可能性がある (Lopez et al., 2012)。

本研究では、惑星の構造計算と熱進化・大気散逸を考慮した時間進化の計算を行うことで、XUV 加熱駆動の大気散逸が長時間進化の中で Super-Earth の質量や組成に与える影響を調べた。特に今回の発表では、中心星のスペクトルタイプの違いによる XUV 放射量の違いの影響に着目した。中心星スペクトルタイプにより XUV 放射量や時間進化は大きく異なる (Jackson et al., 2012) ため、惑星の大気散逸進化に大きく影響することがわかった。Super-Earth の観測結果と比較することで、大気散逸の影響や、形成過程で決まる初期大気量について議論する。

ホットスーパーアースの 大気の放射特性と検出可能性

○伊藤祐一^{1,2}、生駒大洋²、河原創²、中本泰史¹

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 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

現在までに 900 個以上の系外惑星が検出されている。最近では、地球よりは大きい地球の 10 倍以下の質量を持つ、あるいは地球の 2 倍以下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発見されている (CoRoT-7b や Kepler-10b、55 Cnc e など)。それらは中心星に非常に近いため、強烈な恒星放射によって表面が蒸発し、シリケート大気をまとっていると推測される。このような惑星は特に「ホットスーパーアース」と呼ばれる。こうしたシリケート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が得られる。さらに、大気成分を特定することによって、ホットスーパーアース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できる。これまでに、化学平衡計算に基づいた大気組成に関する先行研究はある。しかし、シリケート大気の温度構造や放射特性が理解されていないため、観測可能性を評価することができない。そこで本研究では、先行研究によって得られた化学平衡大気の主成分 Na, O₂, SiO 等からなる混合大気について、吸収断面積・温度構造・理論的な放射スペクトルを求め、観測可能性を評価する。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た手法 (Piskunov & Kupka(2001)) を用いて吸収断面積を計算した。この吸収断面積を基に、放射平衡状態の温度構造を計算した。結果から得られた吸収断面積、温度構造を持つ大気の二次食スペクトルを計算した。今回の結果から、このシリケート大気は、Na の D 線の影響により、長波長領域よりも中心星放射のピーク波長付近の短波長領域で吸収しやすいことが判明した。また、この大気は放射平衡温度が 1800K 以下では、光学的に薄く、等温構造を持つことが分かった。一方、それ以上に放射平衡温度が高い場合には、大気は光学的により厚い構造となり、温度の逆転層が形成されることが分かった。計算された大気構造を基に、二次食観測によるホットスーパーアースのシリケート大気の検出可能性とその際に得られる大気特性を定量的に評価した。

水蒸気大気とマグマ・オーシャンに覆われた惑星のスペクトル：系外惑星系での検出可能性

○濱野景子¹，阿部豊¹，河原創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

現在の太陽系内の地球型惑星の表面は固体岩石からなるが、惑星形成論によれば地球型惑星は巨大衝突を経験し、形成直後は溶融し全球的にマグマに覆われていたと推測されている。また、月の斜長岩地殻や地球マントルの親鉄元素量などの地質学的・地球化学的証拠もこうしたシナリオを支持している。太陽系は形成後すでに約46億年経過しているが、系外惑星系には様々な年齢のものが存在する。その中でも、特に若い惑星系で溶けた惑星を直接検出できれば、惑星が形成初期に溶融しうることが確かめられる。

これまでの水蒸気大気の形成・散逸と惑星の固化の検討の結果、正味中心星放射が水蒸気大気の射出限界を超えるような、恒星に十分近い軌道では、水蒸気の強い温室効果によって、惑星が非常に長い間溶けたままである可能性があることがわかった。この軌道では初期に惑星が獲得した水量が多ければ多いほど、マグマ・オーシャンの継続時間が長くなるため、より高い観測頻度が期待される。

この条件下で、赤外領域の光は厚い水蒸気大気に強く吸収されてしまい、高温の地表付近の情報を得ることは難しいと推測される。一方で、高温（ $>1500\text{K}$ ）の地表からは近赤外～可視領域の光も放射され、この領域では散乱は大きい吸収は小さく、残った放射の一部を惑星外から観測できる可能性がある。本発表では、マグマ・オーシャンに覆われた高温の地表からの放射が厚い水蒸気大気を通してどのように見えるか、その放射スペクトルを計算する。またその特徴から系外惑星系の観測によって溶融した惑星の検出が将来的に可能かどうか議論を行う予定である。

月食データを用いた地球大気の 透過光高分散分光観測

○川内 紀代恵¹ 佐藤文衛¹ 成田憲保² 平野照幸¹ 三澤 瑠花³

¹ 東京工業大学 ² 国立天文台 ³ CNRS/Universite Paul Sabatier

Kepler 宇宙望遠鏡などの観測により、系外惑星の発見数がめざましく増加している一方で、今まで発見された系外惑星の性質を知る為に惑星大気成分を調べるという研究も行われている。惑星大気を調べる方法の一つとして透過光分光観測というのがある。透過光分光観測とは、トランジット中に惑星大気を透過してくる光を分光し、惑星大気での超過吸収をみることにより惑星大気成分を調べるという方法である。この方法により現在ホットジュピター大気中（HD209458b や HD189733b など）では、様々な物質（Na, Ca, H α など）が検出されており、ホットジュピターにおける多様な大気構造の存在が明らかになって来ている。今はまだ地球サイズの惑星大気成分を検出することはできないが、より集光力のある TMT や次世代の望遠鏡による観測が始まった時、地球型惑星大気成分を検出する事が可能となるだろうと考えられている。

よって、このような地球型惑星大気中からどのような成分が検出されれば生命が居住可能であるといえるかを知る為に、唯一生命が存在可能であると分かっている地球大気の透過光スペクトルを、系外惑星大気の透過光分光観測と同じ位置関係で高分散分光観測し、テンプレートとなるスペクトルを作成する必要がある。その方法として、月食中の月から反射された太陽光を分光観測するというのがある。なぜなら、月食中の月に届く光は地球大気を透過した光なので、この成分だけをとりだす事が出来た場合、地球大気の透過光分光スペクトルを手に入れる事が出来るからである。

今まで月食中の月のスペクトルから地球大気の透過スペクトルを検出するという試みは2度行われているが、一つは低分散分光であったため、細かく吸収線を識別する事が出来ておらず、またもう一つは波長分解能 75000 と高分散に観測されたが、天候があまり良くなかったため S/N 比が悪く、ナトリウムや 6880Å での酸素しか個々の超過吸収をみることは出来なかった。

そこで我々は、2011 年に先行研究より波長分解能の高い ($R \sim 160000$) すばる望遠鏡の高分散分光器 (HDS) で観測された皆既月食のデータを使い、地球大気の透過スペクトルの解析を行った。その結果、先行研究で検出された 6880Å 以外の酸素や水などで透過した地球大気による超過吸収がみられた。

本講演では、これらの解析方法と地球大気の透過光スペクトルによる超過吸収について議論する。

HD 209458b 大気の 流体力学的散逸の数値モデリング

○渡辺 健介¹, 倉本 圭¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

HD 209458b は太陽によく似た恒星の周りを公転する系外惑星である．その軌道半径は 0.045 AU と、恒星に近接したホットジュピターの一つであり、半径が 1.35 木星半径、質量が 0.69 木星質量と推定されている．HD 209458b の食により中心星からの Ly- α 線は約 15 % 吸収されることが観測的に知られている．これは HD 209458b の水素に富む上層大気が ~ 4 惑星半径 (R_p) まで広がっていることを示す．また水素の流出が確認されておりロッシュ半径 ($\sim 2.7 R_p$) における温度は $10^4 - 10^5$ K、水素密度は $> 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 、流速は 10^4 m s^{-1} と推定されている．HD 209458b は中心星に近接しているため、強い恒星放射により大気が高温に加熱され、水素の流体力学的散逸が起きていると考えられる．

Tian et al. (2005) は、HD 209458b 大気の流れ力学的散逸について数値シミュレーションを行った．彼らは簡便な差分法である Lax-Friedrichs 法を球対称一次元を仮定した一成分時間発展非粘性流体方程式に適用し数値計算を行った．しかしこの数値計算手法は下部境界付近の数値拡散によって質量保存を満たしておらず、質量保存が崩れている領域においても恒星の EUV 放射の吸収が起きているために、散逸率の評価に著しい誤差を含む可能性がある．

そこで本研究では、CIP 法を用いることにより質量保存を保証した流体力学的散逸の数値モデル (Kuramoto et al. 2013) を HD 209458b に適用し、より確度の高い数値シミュレーションを行った．下部境界における温度を 750 K (Goukenleuque et al. 2000)、 H_2 数密度を $3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ と与え、計算領域を $1R_p \sim 10 R_p$ の範囲とした．また中心星の放射フラックスは太陽と似ているため、太陽の EUV フラックスを用いて計算を行った (Wood and Rottman 2002)．

現時点で得られた計算結果を表 1 にまとめる．いずれの加熱効率においても、観測結果をほぼ満たす計算結果が得られた．また流出フラックスはいずれの加熱効率においても Tian et al. (2005) よりも大きくなった．本発表では、この数値モデルによって得られた結果について詳細な議論を行う．

表 1: ロッシュ半径 ($\sim 2.7 R_p$) における観測値と計算値の比較．

Requirements and Simulations	Temperature (K)	Gas Flow Velocity (m s^{-1})	Hydrogen Density (m^{-3})
Observation requirements	$10^4 - 10^5$	$\geq 10^4$	$> 10^{12}$
$\eta = 60\%$	6.01×10^4	1.19×10^4	3.03×10^{12}
$\eta = 30\%$	4.95×10^4	1.06×10^4	1.87×10^{12}
$\eta = 10\%$	3.51×10^4	7.98×10^3	9.47×10^{11}

O3-11

極めて若いホットジュピター CVSO30b の赤外トランジット観測

○ 鬼塚昌宏^{1,2}, 成田憲保^{1,2}, 福井暁彦¹, 永山貴宏³, 鈴木大介⁴, 平野照幸⁵, 高橋安大⁶, 大貫裕史⁵,
川内紀代恵⁵, 田村元秀^{1,6}

¹ 国立天文台, ² 総合研究大学院大学, ³ 名古屋大学, ⁴ 大阪大学, ⁵ 東京工業大学, ⁶ 東京大学

CVSO30(PTFO 8-8695) はオリオン座 OB1a 領域に存在する M3 型 weak-lined T-Tauri star である。van Eyken et al. (2012) によってこの星のまわりを回る質量 $< 5.5 \pm 1.4 M_{\text{Jup}}$, 半径 $1.91 \pm 0.21 R_{\text{Jup}}$ のホットジュピターによるものと思われるトランジット現象が報告された。これは Palomar Transient Factory (PTF) Orion project によって周期 0.448413 ± 0.000040 日のトランジットとして発見されたものである。特徴的な点として主星の年齢が非常に若いという点があり、2.6 Myr という年齢はこれまでに発見されたトランジット惑星候補としては最も若いものの一つである。この惑星候補の軌道長半径は ~ 0.008 AU, $1.8 R_{\odot}$ と通常のホットジュピター (軌道長半径 ~ 0.05 AU, $10 R_{\odot}$) よりもさらに主星に近く、見積もられたロシュ半径は $< 1.92 \pm 0.16 R_{\text{Jup}}$ で惑星半径とほぼ一致している (van Eyken et al., 2012)。

この惑星候補は、トランジット減光時のライトカーブの形状が観測によって変化するという現象も確認されている。原因については van Eyken et al. (2012) 内でトランジット中に黒点や白斑の前を惑星が通過した可能性が示唆されたほか、最近では Barnes et al. (2013) によって主星の重力減光による主星表面の光度ムラと惑星の歳差運動で説明できるとする説も提唱されている。重力減光は高速自転星の赤道付近は極に比べて表面重力が小さくなるために圧力が下がり、温度が低く光度も暗くなる現象であり、この主星表面での光度の違いと軌道傾斜角の変化の組み合わせによってライトカーブの形状が変化する。

発見論文の観測は全て可視光で行われているため黒点やフレアなどの要因による変光が大きく、これ以外の独立した観測が行われていないために偽検出である可能性があり、追観測が求められていた。そこで我々は岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡と南アフリカ IRSF1.4m 望遠鏡を用い、CVSO30b のトランジットを黒点やフレアの影響を受けにくい近赤外波長で確認観測を実施した。この観測により、実際に周期的なトランジット減光の発生を確認することができ、公転周期の精度を 1 桁向上させることに成功した (Onitsuka et al. in prep.)。観測ごとのライトカーブの形状変化も確認されたが、フィッティング結果から得られた軌道傾斜角の変化は約 1σ であり、この変化が誤差によるものなのか、実際に歳差運動によって軌道傾斜角の変化が起きているかは今後の継続観測が待たれる。

本講演では以上の観測結果について報告するとともに、今後の CVSO30b の観測についての展望と課題を紹介する。

原始惑星の自転特性

○柴田 雄 小久保 英一郎

東京大学/国立天文台理論研究部

現在の標準的な地球型惑星形成シナリオでは、地球型惑星は微惑星集積による原始惑星の形成と、それに続く原始惑星どうしの巨大衝突によって形成される。地球型惑星の自転はこの巨大衝突段階で得られた角運動量で決まると考えられている。原始惑星の合体条件や地球型惑星の自転特性を考えるには、原始惑星の自転特性を知ることが必要になる。これまでに原始惑星の合体により得られる地球型惑星の自転を調べた研究として、Kokubo & Ida (2007) と Kokubo & Genda (2010) がある。原始惑星の合体条件は本来自転にも依存するが、Kokubo & Genda (2010) で用いられた合体条件 (Genda et al. 2012) では、衝突する原始惑星の自転を 0 としていた。自転を考慮することで、より現実的な合体条件を得ることができる。また、原始惑星の生き残りと考えられる火星の自転の起源についても議論できることになる。

過去に原始惑星の自転を調べた研究として Dones & Tremaine (1993) がある。この論文では太陽、原始惑星、微惑星の三体問題を数値計算することで自転角運動量の集積を調べているが、微惑星円盤の空間構造や時間進化を考慮していない。現実的な原始惑星の自転を知るためには、これらを考慮した現実的な微惑星円盤中で集積される角運動量を計算する必要がある。本研究では N 体計算を用いて、現実的な微惑星円盤中での微惑星の集積とそれに伴う角運動量の集積を計算し、原始惑星が獲得する自転特性を調べた。

原始惑星の合体による地球型惑星の自転の研究では、自転軸傾斜角は等方的に分布した (Kokubo & Ida 2007)。本研究においても微惑星の自転軸傾斜角について同様の分布が得られている。これは微惑星のランダム運動が卓越していることと円盤の厚みが微惑星半径に比べて遥かに厚いことで衝突が等方的に起こることによる。また、自転角速度については、質量に対して小さくなる傾向が得られた。これは以下のように理解できる。Dones & Tremaine (1993) によると、系の速度分散が大きい場合、原始惑星に集積する小微惑星が運ぶ角運動量は平均がほぼ 0 になることが分かっている。これによって原始惑星に集積する小微惑星は正味の角運動量を運ばず、原始惑星の質量の増加にのみ寄与すると考えることができる。また、計算結果から原始惑星の角運動量は数回の大きな微惑星の衝突によってもたらされていることがわかっている。そのため小微惑星集積では角運動量が変わらずに原始惑星質量のみが増加することで角速度は減少する。これは定性的な理解であるが、定量的な議論をするため、現在パラメータを増やして計算を行っている。講演ではこれらの計算で得られた結果を示し、その物理的理由について議論する。

火星は重い原始惑星系円盤中で 小さい微惑星から形成された

○ 小林 浩¹、Nicolas Dauphas²

¹ 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙科学専攻

² Department of the Geophysical Sciences and Enrico Fermi Institute, The University of Chicago

火星は微惑星を集積して形成される原始惑星の一つだと考えると、Hf-W 年代測定により得られる早い形成時間を説明できる。古典的な惑星形成のモデルだと、原始惑星の最終的な質量は孤立質量と呼ばれる微惑星円盤の面密度だけで決められる。しかし、原始惑星は成長すると周りを取りまく微惑星の軌道を乱し、その衝突速度を上げ破壊が起こる。生成される破片はガス抵抗を強く受けており、原始惑星はガス抵抗によりランダム運動が小さくなった破片を集積すると早く成長できるが、一方で、破片はガス抵抗により角運動量を抜かれ中心星に落下をするため消失していき、それを食べて成長していた原始惑星の成長を止めてしまう。微惑星の大きさにより壊れやすさが違うため、原始惑星の最終的な質量は微惑星円盤の面密度だけでなく、微惑星の大きさにも依存する。そのため、火星の大きさの原始惑星ができる微惑星円盤の面密度と微惑星サイズは限られている。また、Hf-W 年代測定により与えられる火星の形成年代を説明できる微惑星円盤の面密度と微惑星サイズも制限される。これらの制限をシミュレーションから求めた。その結果、火星形成条件は、微惑星円盤の面密度は現在の惑星の質量を再現する量の 3 倍以上で、微惑星半径は 10km 以下と小さい方が良いことが分かった。一方、私のこれまでの研究では木星土星は同様に大きな微惑星円盤面密度が好ましかったが、微惑星半径は 30-100km 程度と大きい方が良い。つまり、微惑星のサイズは太陽からの距離に応じて違ったことを示唆しており、この結果は未解決大問題の微惑星形成に対して大きなヒントとなるだろう。

Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics の非理想気体への拡張

○ 細野 七月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、² 東京工業大学 地球生命研究所、³ 理化学研究所 計算機科学研究機構

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法とは、粒子法的な数値流体計算手法の一つである。SPH 法は、大きな変形が起きる計算や、空隙が多い系などを扱うのに適しているため、これまで惑星科学や天文学などの分野で広く使われてきた。しかしながら、最近になって標準的な SPH 法の定式化には、流体不安定の取り扱いに弱点があると指摘された。これは、標準的な SPH 法の定式化が、密度の微分可能性を要請している事に起因する。接触不連続面の前後では、実際の流体では密度は不連続である。しかしながら、標準 SPH 法では密度は連続的になまされて表現される。そのため、接触不連続面の付近において、高密度側の密度は過小評価され、低密度側の密度は過大評価される事となる。この密度の推定誤差が圧力に波及し、接触不連続面付近において、圧力にも大きな推定誤差が発生する。この圧力の推定誤差が、接触不連続面において表面張力の様に働き、流体不安定の成長を阻害する。

そこで、我々はこの問題を解決した SPH 法、通称 Density Independent SPH (DISPH) を開発した。DISPH は、密度ではなく圧力の連続性を要請する事により、上記の問題点を自然に解決する事に成功した。状態方程式が理想気体の場合、圧力は内部エネルギーに比例する。そこで、DISPH では密度ではなく、内部エネルギーを定式化の基礎として用いて、定式化を行った。

しかしながら、DISPH はこれまでのところ理想気体の状態方程式に対してしか適用されていなかった。惑星科学の分野においては、例えば巨大衝突などでは、状態方程式は非理想気体のため、このままでは DISPH は適用できない。そこで、本研究では DISPH を一般の状態方程式に拡張する事を試みた。具体的には、内部エネルギーではなく、圧力そのものを定式化の基礎として用い、定式化を行った。いくつかの非理想気体を用いたテスト計算を行った結果、我々の拡張した DISPH は、非理想気体に対しても正しく流体不安定が表現できる事が確認された。

O4-04

ジャイアントインパクトは見えるのか？

○玄田英典（東工大・ELSI），小林浩（名大），河原創（東大），松尾太郎（京大），小谷隆行（国立天文台），村上尚史（北大），藤井友香（東工大・ELSI），小久保英一郎（国立天文台），SEIT メンバー

巨大天体衝突ステージと呼ばれる地球型惑星形成の最終ステージでは、火星サイズの原始惑星が互い衝突し地球型惑星が成長していく。これら巨大天体衝突で大量の破片が継続的に地球型惑星形成領域に供給されることがこれまでの我々の研究で分かってきた。実際に、太陽系外の比較的若い星（1千万～1億歳）の観測で、地球型惑星形成領域（～1 AU）に相当する高温のデブリ円盤の存在を示唆する赤外超過が多数報告されており、地球型惑星形成領域における高温デブリ円盤と巨大天体衝突との関連が議論されはじめてきた。

本講演では、巨大天体衝突ステージを通じて常時大量にばらまかれるデブリ円盤による赤外超過および、中心星からの散乱光を理論モデルを用いて計算し、次世代の望遠鏡および観測装置で観測可能かどうか、およびどのように観測されるのかについて検討する。具体的には、赤外超過に関しては、チリに建設される 6.5m 望遠鏡（TAO Project）およびその中間赤外観測装置（MIMIZUKU：2017 年より観測スタート予定）、散乱光に関しては、30m 望遠鏡（TMT：2019 年～）とその観測装置（SEIT）でどのように観測されるのかについて検討する。巨大天体衝突デブリ円盤のどのような観測から惑星形成理論へどのような制約条件を与えることができるのかについても議論を行う。

中心星加熱円盤における

惑星のタイプ I 軌道移動の数値計算と解析的見積もり

○前島直彦¹、渡邊誠一郎¹¹名古屋大学大学院環境学研究科

軌道長半径約 1AU の系外ガス惑星が多数発見されているが、数値計算[1]ではこの分布を再現できていない。ガス惑星形成には、円盤ガス残留中に固体物質が集積して臨界コア質量($m_{p,crit} = 5 \sim 10 M_{\oplus}$)まで達する必要があるが、[1]ではこの質量に達するまでに円盤ガスとの重力的相互作用により惑星は中心星方向へ移動してしまう(タイプ I 軌道移動)。

従来の研究の問題は、惑星はガスから常に負のトルクを受け中心星方向にのみ移動してしまうことにあった[2]。しかし最近の研究では惑星質量に応じてホースシュー軌道にあるガスが及ぼす「共回転トルク」によりネットで正のトルクが生じることが分かっている。

惑星質量が小さい($m_p < m_{p,min}$)とき、ホースシュー軌道のガスは惑星近傍で U ターンする際に等温的に圧縮・膨張し、惑星の前方と後方の密度状態は等しくなり共回転トルクはゼロになる。惑星には負のリンドブラッドトルクのみが働き、惑星は内向きに移動する[2]。

惑星質量が比較的大さい($m_{p,min} < m_p < m_{p,max}$)と、エントロピー勾配が負の場所で共回転トルクは正になる[3]。なぜなら惑星質量が大さいとガスが U ターンするタイムスケールが短くなり、ガスは惑星前方で断熱的に圧縮して密度が上昇、拡散によって元の密度状態に戻ったガスが惑星後方で膨張し密度が減少、結果として前方からの重力の方が強くなるためである。この正のトルクによって惑星が外向きに移動できれば、1AU 付近のガス惑星の分布が説明できる可能性が示唆される。

ただし更に重い惑星($m_p > m_{p,max}$)の場合、共回転トルクは再びゼロになる[4]。惑星が非常に重い場合、ホースシュー軌道上をガスが移動するタイムスケールが非常に短くなるため、惑星近傍で断熱・圧縮されたガスはその密度状態を保ったまま再び惑星と会合する。従って惑星の前後の密度状態は等しくなり、共回転トルクはゼロになる。惑星はリンドブラッドトルクによって内側に移動してしまう。

本研究では中心星に加熱された円盤でタイプ I 軌道移動の数値計算を行った。中心星放射は円盤の温度分布に影響を与え、トルクの強さなどに関わる。特に知りたいのは、(1) 正のトルクを受ける惑星質量の上限($m_{p,max}$)と下限($m_{p,min}$)、(2) 臨界コア質量($m_{p,crit}$)がこの範囲に収まっているかどうかである。結果、 $m_{p,min} < m_{p,crit} < m_{p,max}$ は満たされており、中心星に落下することなくガスを捕獲してガス惑星に成長できる可能性が示された。また、惑星が $m_{p,crit}$ まで成長するのに時間(数 Myr)を要することを考慮しても、1AU 付近にガス惑星は作りうる事が分かった。

[1] Ida & Lin, 2008, ApJ, 673, 487 [2] Tanaka et al., 2002, ApJ, 565, 1257 [3] Baruteau & Masset, 2008, ApJ, 672, 1054 [4] Quinn & Goodman, 1986, ApJ, 309, 472

Effect of dust particles on type I planetary migration

Type I 惑星移動に対するダストの影響について

○山田耕¹, 稲葉知士²¹ 早稲田大学政治学研究科, ² 早稲田大学国際教養学部

系外惑星の発見は従来の惑星系形成理論を見直す契機となり、様々な物理過程を再度しっかりと理解する必要が出てきた。その中の一つとして、地球質量程度まで成長した惑星とガス円盤との重力相互作用による軌道変化がある。この現象は、Type I 惑星移動と呼ばれ、ガスが散逸する典型的なライフタイムに比べ十分短いタイムスケール(数十万年程度)で起きると考えられている。惑星移動の方向についてはまだ議論のあるところだが、このような短いタイムスケールで惑星が移動するならば、系外惑星系で観測されている軌道の多様性を生み出す重要なメカニズムになり得る。

Type I 惑星移動はガス円盤との角運動量(トルク)とのやり取りによって決まる。このトルクのやり取りは基本的に惑星軌道と共回転運動しているガスとリンドブラッド共鳴点にあるガスとで行われ、これらの位置で交換させられるトルク量で移動の速度および方向が決まる。エネルギー方程式を考慮した最近の研究(e. g., Yamada & Inaba 2012)は惑星移動が円盤の熱的な構造に依存する可能性を示している。

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ち込むと予想されている。Birnstiel et al. (2010) ではダスト粒子の衝突合体と破壊を考慮して、円盤全体でのダスト密度の時間進化を解いた。その結果によると、円盤内の乱流が激しくないような時に外側のダストが内側に集まることができ、内領域のダスト密度が最大で初期の10倍以上に達する(その後減少する)ことが指摘されている。円盤全体でのダストのダイナミックな運動を考えると、惑星誕生時にダストが惑星周辺もしくは(惑星移動した先に)ダストリッチな領域がないとは言えない。ダストの惑星移動の影響は、ダスト自身がトルクを惑星にかけるということとガス流れを変えることによってガス円盤からかかるトルクを変えるという2つの効果が考えられ、従来のガスと惑星との間の相互作用の描像を変える可能性がある。本研究で、我々はダストとType I 惑星移動との間の相互作用に注目し、ダスト密度(ガスダスト比で0.01~0.1)やダストサイズ(mm~cmサイズ)、また惑星質量、円盤構造など様々なパラメータ空間で、惑星移動の様子を調べた。その結果、ダスト量やダストサイズが大きくなると、惑星が得る全トルクが増加する、つまり、外移動になりやすいことを発見した。このことは、惑星がダストリッチな領域に入った時に移動の速度および方向が大きく変わる可能性があることを示唆している。

O4-07

高精度測光と高分散分光観測を用いた星の自転軸 傾斜角測定

○平野照幸¹, Roberto Sanchis-Ojeda², 竹田洋一³, 成田憲保³, Joshua N. Winn², 須藤靖⁴

¹ 東京工業大学, ² マサチューセッツ工科大学, ³ 国立天文台, ⁴ 東京大学

現在 100 個以上見つかった中心星近傍 (< 0.1 天文単位) を公転する太陽系外の巨大ガス惑星 (ホット・ジュピター) は、氷などの固体材料が豊富に存在するスノーラインの外側の領域で形成され、その後何らかのメカニズムで中心星近傍に移動して来たと考えられている。この「惑星移動」のメカニズムとしていくつかモデルが提案されているが、どのメカニズムがホット・ジュピターの形成にとって本質的に重要であるのかはまだ未解決の問題である。

この惑星移動を観測的に調べる手法として、中心星の自転軸と惑星の公転軸の関係 (軌道傾斜角) の測定が以前から注目されている。これは異なる惑星移動モデルが軌道傾斜角に対して異なる帰結 (分布) を予言するため、これらを観測的に調べる事によって惑星移動シナリオに対して制限を加える事が出来るためである。

我々は、ケプラー宇宙望遠鏡で得られた高精度測光観測から求めた星の自転周期と、高分散分光観測によって求めた射影自転速度から星の自転軸傾斜角 (我々の視線方向と星の自転軸のなす角度) を測定する方法論に着目した。惑星の軌道公転軸が我々の視線方向に対してほぼ直角となるトランジット惑星系では、星の自転軸傾斜角を調べる事で中心星自転軸と惑星公転軸の関係を制限する事が出来る。

2011 年から始めた我々のこれまでの研究では、黒点による周期的な明るさの変動を示す約 30 個の天体に対してすばる望遠鏡を用いて高分散分光観測を実施し、射影自転速度から星の自転軸傾斜角を測定した。その結果、いくつかの系では星の自転軸と惑星公転軸がずれている可能性がある事が分かった。一方観測された自転傾斜角の統計的な分布は、星の自転軸が宇宙空間で完全に等方向に分布している場合とは明らかに異なっており、星の自転軸と惑星の公転軸の向きは強い相関を持つ事も明らかとなった。

本講演ではこの方法論について概観し、これまで観測で得られた成果について報告する。

巨大惑星まわりの原始惑星系円盤ギャップ構造

○金川和弘¹、武藤恭之²、田中秀和¹、谷川享行¹、竹内拓³

¹北海道大学低温科学研究所、²工学院大学、³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。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、「遷移円盤」や「前遷移円盤」の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。

我々は、一次元粘性円盤モデルを用いて円盤ギャップの定常面密度構造について詳細に調べた。我々のモデルでは、従来のギャップ形成モデルでは無視されてきた動径方向のガス圧力勾配による円盤回転則の変化を取り入れ、円盤の角運動量分布と面密度の分布を矛盾なく求めた。その結果、ギャップ形成に伴う円盤回転の変化によって回転円盤構造の安定条件であるレイリー条件を破ることが分かった。さらに我々は、レイリー条件に破れによる構造の変化を考慮してギャップの面密度構造を調べた。

また、円盤回転速度の変化・レイリー条件による構造変化は円盤が受け取る惑星トルクに分布に依存する。しかしながら、円盤が受け取る惑星トルク分布は理論的に不定性が大きく有力なモデルはない。そのため、本研究では、さまざまなトルク分布に対しギャップの構造がどのように変わるかを調べた。

従来、ギャップの深さは惑星が円盤に与える角運動量の総量によって決まっていると考えられてきたが、木星サイズの惑星の場合は、レイリー条件によって面密度勾配が急になることが制限されるため、トルクの分布によってもギャップの深さが大きく変わることが分かった。例えば、惑星が円盤に与えるトルクが同じでも、トルクが一か所に局在した分布をとった場合、トルクが広範囲に広がった分布をとった場合より、ギャップは大幅に浅くなる。実際、2次元流体計算はこのような局在したトルク分布を示唆している。今後、円盤が受け取る惑星トルクの分布をより詳細に調べる必要がある。

04-09

巨大ガス惑星の影響下での微惑星集積の N 体計算

○押野翔一¹, 堀安範¹

¹ 国立天文台

近年、観測技術の向上により多数の系外惑星が発見されている。ケプラー宇宙望遠鏡の惑星候補も含めると既に 3000 個以上の系外惑星が検出されている。また、一つの恒星に複数の惑星を持つ系外惑星系の観測が増えている。このように、次々と発見されている系外惑星系では内側領域に巨大ガス惑星を持つような系 (ホットジュピター) や太陽系と異なる惑星配置の系外惑星系が多数発見されている。これらの惑星系は従来、太陽系の惑星形成論で考えられてきたその場形成では説明できず、惑星移動などの効果を考える必要がある。太陽系と異なる惑星系での形成過程を明らかにするためにここではホットジュピターが存在する系を仮定し、この系における微惑星集積過程を N 体計算を用いて調べる。

ホットジュピター存在下での多重惑星系の形成

○荻原正博 犬塚修一郎 小林浩

名古屋大学・素粒子宇宙物理学

近年の系外惑星探査によって、一つの恒星の周りに複数の惑星の存在が確認された惑星系（多重惑星系）の発見数が増加しており、それらが有する特徴（例：軌道配置）が明らかになってきた。例えば顕著な特徴の一つに、ホットジュピターの近傍で発見される惑星数が非常に少ないこと（「ホットジュピター近傍での惑星の欠乏」）が挙げられる。惑星形成理論モデルの構築の際には、これらの観測結果を再現することが必要となる。一方、惑星形成理論において、巨大惑星存在下での惑星形成プロセスを詳細に検討することの重要性が認識され始めている（例：Inutsuka 2012; Oshino et al.）。本研究では、ホットジュピター存在下での多重惑星系の形成を、重力N体シミュレーションによって調べた。

具体的なシミュレーションとして、初期条件に木星質量を持つホットジュピターとその周辺に微惑星ないし原始惑星を配置し、それらの軌道進化・衝突・合体を数千万年程度計算した。N体計算コードには、惑星と原始惑星系円盤ガスとの重力相互作用や中心星との潮汐相互作用などにより惑星の軌道要素が減少する効果（例：タイプI移動）を組み込み、現実的な惑星形成環境を模擬した。

シミュレーションの結果、以下の惑星形成プロセスを確認した。原始惑星系円盤中で微惑星は原始惑星サイズまで成長し、その後タイプI移動により中心星方向へ軌道移動する。円盤ガス散逸までに約50個の原始惑星がホットジュピター近傍まで移動するが、それらはホットジュピターとの2:1の平均運動共鳴もしくは原始惑星同士の平均運動共鳴に捕捉されて軌道移動を停止する。これらの惑星は平均運動共鳴を通じてホットジュピターと重力的に相互作用を起こし、ホットジュピターの軌道を中心星方向へ押し込む。長時間進化を追った最終結果として、ホットジュピターは中心星と衝突し、数個の地球型惑星のみが形成することがわかった。この結果は、多重惑星系の特徴である「ホットジュピター近傍での惑星の欠乏」の起源を説明し得る。つまり、ホットジュピターが存在する系に地球型惑星が形成した場合、地球型惑星に軌道が押し込まれることでホットジュピターは中心星に落下し、地球型惑星のみが観測される。

上記の数値シミュレーションに加え、計算パラメータ（例：円盤質量、円盤粘性）を変えたシミュレーションも実行した。一連のシミュレーションの結果、軌道進化の最終結果はホットジュピター周辺のガス円盤構造に依存することがわかった。一例として、円盤粘性が小さい場合にはホットジュピターが周囲のガス円盤中に形成する密度ギャップの幅が拡大し、タイプI移動する原始惑星はホットジュピターとの2:1平均運動共鳴ではなく、密度ギャップの外側でその移動を停止する。このとき、地球型惑星とホットジュピターとの重力的相互作用は生じにくく、ホットジュピターの軌道は円盤ガス散逸後まで殆ど変化しないことがわかった。これは「ホットジュピター近傍での惑星の欠乏」が真だと認めると、中心星近傍ではガス円盤の粘性が大きいことを理論的に示唆していることになる。

太陽系外における木星型連惑星の形成

○落合 裕道, 長沢 真樹子, 井田 茂

東京工業大学 理工学研究科 地球惑星科学専攻

連惑星とは、2 個の惑星がお互いの共通重心の周りを回りながら、中心星の周りを公転する(つまり、2 個の惑星が地球と月のような関係にある)系のことである。これまでの系外惑星の観測では連惑星はまだ発見されていないが、今後の系外惑星観測で見つかることが期待できる。

本研究では、惑星散乱過程で惑星同士が近づくときに潮汐力が働くことで連惑星が形成できるかどうかを数値計算によって調べた。近くに並べて置いた 2 個の木星型惑星から、連惑星が 2 割程度の確率で形成され得ることを示した先行研究(Podsiadlowski et al. 2010)の再現を行い、次に 3 個の惑星を置いて、実際の散乱過程で惑星が近接する場合について軌道計算を行い連惑星の形成率を調べた。

結果はモデル的な先行研究とは異なり、現実的な散乱過程では連惑星の形成確率は初期軌道長半径によらず約 1 割とやや低いことが判明した。これは実際の散乱過程では、惑星が潮汐力が働くほどに近づいたまま長い時間を過ごせるような状態にはなりにくいいためである。

連惑星の特徴として、軌道不安定が生じ始めたごく初期の段階で形成されるために初期位置近くに形成されること、木星質量連惑星の軌道分離は太陽半径に近いことがわかった。また、形成された連惑星の潮汐進化を考えると、中心星から遠いほど安定であり、おおよそ 0.4AU より遠ければ太陽系の年齢よりも長く安定でいられる。

系外連惑星を観測する手法としては視線速度法、トランジット法、重力レンズ法などが考えられる。このうち連惑星同士の回転によって生じる短周期の中心星視線速度のずれは mm/s のオーダーであるため、視線速度法による系外連惑星の観測は難しい。連惑星間の距離は 1 太陽半径程度であり、重力レンズで生じる caustic は小さいため、重力レンズ法で連惑星を分離発見できる可能性も低い。現時点で系外連惑星を発見する手段としてはトランジット法が最も有力である。特に連惑星がトランジットする際に相互食を起こすと単独惑星と区別しやすい。たとえ相互食が起きなくとも光度曲線は単独惑星のものとは異なる。視線速度法との組み合わせで惑星の質量、物理半径が求まれば惑星の密度が求まる。本来は連惑星であるはずの天体を単独の惑星と考えてフィッティングすると本来よりも軽い密度が求まることから、非常に平均密度の小さい系外惑星を詳細に観測すれば連惑星だと分かる可能性もある。

原始惑星のガス捕獲による軌道進化 ～円軌道長周期巨大ガス惑星の形成～

○菊地章宏¹、樋口有理可¹、井田茂¹

¹東京工業大学大学院 地球惑星科学専攻

近年の直接撮像観測により、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が発見されているが、それらがその場で形成されたとは考えにくい。なぜなら、中心星から遠い場所では巨大ガス惑星のコアとなる原始惑星が形成されるのに時間がかかり、原始惑星がガス捕獲できる質量に達する前に円盤ガスが散逸してしまうからである。

この問題を回避できるかもしれない形成シナリオの1つに以下のものがある。まず、中心星から数AUのところでガス捕獲に十分な質量をもつ原始惑星が形成される。原始惑星は近傍の巨大ガス惑星によって散乱され、離心率の大きな楕円軌道に進化し、その後、まわりのガスを捕獲することでさらに軌道が進化するというものである。原始惑星はガスを捕獲して角運動量をもらう一方でエネルギーを失うので、ガスを捕獲することによって軌道がどのように変化するかは自明ではないが、それを調べた研究はこれまでにない。

そこで本研究では、大きな離心率の原始惑星が円盤ガスの捕獲によりどのように軌道進化するかを定量的に表し、この軌道進化によって円軌道長周期巨大ガス惑星が形成されるか調べた。手法としては、まずガス円盤は有限の大きさを持ち、原始惑星は円盤内でガスを捕獲できると仮定した。そして、ガス捕獲を非弾性衝突と仮定し、原始惑星のエネルギーと角運動量の進化を解くことで、1周期での軌道の変化を定式化した。さらに、定式化した軌道の変化を数値的に解くことで、長期の軌道進化を求めた。その結果、原始惑星の軌道長半径はガス捕獲によってあまり減少しない一方で、離心率は大きく減少することがわかった。つまり、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星はこのガス捕獲による軌道進化で形成可能と言える。ただし、ガス捕獲過程での仮定の妥当性については議論の余地があり、流体計算などで検証する必要がある。

O5-01

新学術領域研究「宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ」

○香内 晃¹

¹北海道大学 低温科学研究所

本年度から新たに発足した新学術領域研究「宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ」の概要を紹介する。

宇宙で最も大量に存在する元素(H, O, C, N)からなる固体物質（氷および有機物）の形成・進化に着目し、実験、観測、理論、分析等の多様な手法で、分子進化の全体像を描き、これらを通して、惑星系形成の物理過程の解明に化学的視点を加えることをめざしている。そのために、以下の研究をおこなう。

- 1) 星間分子雲での星間塵表面における原子反応および光化学反応の反応速度定数を測定する。また、反応機構による同位体濃集の官能基依存性を明らかにし、官能基別同位体濃集度を分子雲内で生じる複数の反応機構の影響を紐解くトレーサーとする方法を確立する。
- 2) 原始惑星系における(a) 氷・分子雲有機物の加熱による組成変化および蒸発ガスの化学組成の測定、(b) 非晶質ケイ酸塩を含む多様な表面への分子の化学吸着の官能基別同位体依存性の決定、表面触媒反応の生成物中の官能基別同位体濃集度の変化の測定、表面触媒反応による有機物生成率の測定。(a)、(b)の結果から、原始惑星系での反応で生成される有機物の官能基別同位体濃集度を、原始惑星系での有機物反応を見積もるトレーサーとして確立する。
- 3) 電波望遠鏡（ALMA, ASTE 等）を用いて、有機分子の進化とその多様性を系統的に観測する。また、異なる進化段階の天体において同位体濃集した分子の観測を行い、官能基別同位体濃集度を決定する。
- 4) 上記 1) ~ 3)で得られる実験・観測データを用い、分子雲から原始惑星系に至るまでの氷・有機物の起源・進化（分子進化）のシナリオを構築する。特に、分子進化の多様性を生む原因となる物理条件の解明に重点を置く。
- 5) 隕石や彗星塵中の有機分子の化学・同位体組成の分析から、分子雲や原始太陽系起源の有機物を見出し、その特徴を明らかにし、1) ~ 4)と合わせ、太陽系でおきた分子進化を明らかにする。

本研究の成果は、惑星系形成論、「はやぶさ2」等のサンプルリターン計画、分析化学、表面科学など様々な分野に多くの波及効果を持つ。したがって、研究の推進にあたっては、関連する大型プロジェクトと連携することにより相乗効果を発揮していきたい。

惑星間塵中の有機物と生命の起源： 地上および宇宙実験による検証

Organic compounds in interplanetary dust particle and their relevance to
origins of life: Verification by ground and space experiments

○小林 憲正^{1,2}, 古川 天¹, 川本 幸徳¹, 金子 竹男¹, 大林 由美子¹, 三田 肇³,
奥平 恭子⁴, 矢野 創⁵, 田端 誠^{5,6}, 橋本博文⁵, 横堀伸一⁷, 山岸明彦⁷, たんぽぽ WG⁵

¹横浜国大, ²自然科学機構, ³福岡工大, ⁴会津大, ⁵JAXA/ISAS, ⁶千葉大, ⁷東薬大

炭素質コンドライトや彗星中に多様な有機物が検出されており、それらの地球上での生命誕生との関連が議論されている。地球外有機物の地球への供給媒体として、彗星や隕石は地球との衝突時の分解の可能性が高いのに対し、惑星間塵は地球大気への進入時の分解の恐れが少なく、隕石・彗星より多くの有機物を運び込んだと考えられる。しかし、これまで、惑星間塵は地球生物圏内でしか捕集されておらず、地球環境下でのコンタミが懸念されてきた。また、微小なダスト中の有機物は、太陽からの輻射や、宇宙線の影響を直接受ける。

われわれは、宇宙ステーション日本実験モジュール(JEM)曝露部において、惑星間塵を含むダストの捕集、および有機物や微生物の宇宙曝露を計画している(たんぽぽ計画)。ダスト捕集は、新開発の超低密度シリカゲル(エアロゲル)により、高速(数 km/s)で飛来するダストの捕集をめざす。有機物曝露実験においては、隕石や惑星間塵中での存在が考えられるアミノ酸(グリシン・イソバリン)およびアミノ酸前駆体(ヒダントイン類, CAW = CO, NH₃, H₂O への陽子線照射生成物)を、線量測定のためのアラニン線量計とともに曝露する。

2014 年の開始をめざして、地上予備実験を行っている。捕集実験の準備として、アミノ酸を添加した PSG(多孔質シリカゲル)を、宇宙研の二段式軽ガス銃により 4-6km/s で射出し、エアロゲルで回収したものを用いてアミノ酸の分析可能性を評価している。想定されるサブ pmol のアミノ酸検出のため、フッ酸処理による抽出と、脱塩などの操作を必要としない分析法(逆相 HPLC 法など)が必要であることがわかった。

宇宙環境下での安定性を調べるため、対象化合物に重粒子線(HIMAC)、紫外線(エキシマランプ)、軟 X 線(NewSUBARU BL-6)、 γ 線(⁶⁰Co 線源)などの照射や、温度サイクル実験を行ったところ、(1)地球周回軌道では紫外線が有機物変成に最も大きく影響する、(2)遊離アミノ酸は 1 年間の宇宙曝露によりほぼ分解するが、アミノ酸前駆体はかなりの回収が期待できる、などがわかった。

地上予備実験において長谷川直博士(JAXA/ISAS)、吉田聡博士(放医研)、神田一浩博士(兵庫県立大)、鳴海一成教授(東洋大)にお世話になったので、感謝する。

O5-03

原始惑星系円盤における有機分子生成

○古家健次¹、相川祐理¹

¹神戸大学

隕石や彗星には有機分子が普遍的に含まれる。一方、近年の観測技術の発達により原始惑星系円盤における比較的単純な有機分子(H_2CO など)の検出、及びその空間分布の導出が可能となってきた。今後の ALMA の本格稼働により、星・惑星系形成の各進化段階における、メタノールやアミノ酸(前駆体)などのより複雑な有機分子の観測的研究が進展し、太陽系物質中の有機分子の起源についての理解も進むと期待される。それと平行して、各進化段階における有機分子の生成量や生成プロセスを理論的に明らかにすることは重要である。

このような背景のもと、我々は T Tauri 型星周りの原始惑星系円盤における有機分子生成の数値計算を行った。その結果、円盤外側($r > 50$ AU)において円盤乱流により有機分子生成が促進されることを明らかにした。これは、紫外線が強くダストが暖かい円盤表面において、ラジカル-ラジカル反応により有機分子が生成され、紫外線から遮蔽された赤道面に生成された有機分子が貯蔵されるためである。講演では有機分子生成に対する乱流強度の影響や、天文観測との比較、及びその解釈について議論を行いたい。

原始惑星系円盤の水氷に対する 光脱離反応の検出における理論的示唆

○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。円盤表層における水氷の安定性について、早期のHerbig Ae/Be 型星では光脱離反応が効き氷微粒子が円盤表層において安定に存在できないことがわかった(Oka et al. (2012))。しかし、早期のHerbig Ae/Be 型星周りの原始惑星系円盤の観測において水氷の光脱離反応の検出はできていない。これは水氷の光脱離反応の検出手法が確立されていないためである。

現在、原始惑星系円盤の水氷観測は可能となってきたが、その1つにHonda et al. (2009)がある。Honda et al. (2009)ではK バンド($2.2\mu\text{m}$)、H2O バンド($3.1\mu\text{m}$)、L' バンド($3.8\mu\text{m}$)の3波長を用いる手法が使われている。波長 $3\mu\text{m}$ には水氷の吸収帯があり円盤表層に水氷が存在する場合はH2O バンドの散乱光は減光して届く。このH2O バンドの減光から水氷の存在を判断するという手法である(Inoue et al. (2008))。

そこで、本研究では光脱離反応の検出手法としてH2O バンドの減光量に注目した。まず、円盤内の温度分布は中心星からの輻射を加熱源として輻射平衡を基に求められる。これにより、水氷が凝縮する領域が定まる。次に中心星からのUV 光を考慮すると、円盤表層付近で氷微粒子が光脱離反応のためになくなる領域がわかる。円盤表層の氷微粒子がなくなると、水氷の吸収帯であるH2O バンドにおける減光が弱くなることが予想される。ここで、K バンドとL' バンドの輝度を基線とし、それに対するH2O バンドの輝度の減光等級[H2O depth]を導入する。[H2O depth]はH2O バンドにおける水氷の吸収量を定量化したものであり、円盤表層の水氷量を議論することができる。

本研究ではHerbig Be 型星であるHD100546周りの原始惑星系円盤を仮定し(Mulders et al. (2012))、水氷の光脱離反応の効果を入れたモデルと入れないモデルについて、ダストサイズを変えて[H2O depth]を求めた。ダストサイズに関わらず、光脱離を入れないモデルは入れたモデルよりも[H2O depth]が深くなることがわかった。しかし、[H2O depth]の値には光脱離反応の有無とダストサイズの情報が縮退していた。したがって、[H2O depth]のみでは光脱離反応の検出は困難であろう。その一方で、ダストサイズの大まかな絞り込みは可能であろうと考える。

焼結ダスト アグリゲイトの 衝突数値シミュレーション

○城野信一¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

惑星形成過程の第一ステップは、ミクロンサイズの微小なダストグレインの付着成長である。ダストグレインの集合体はダストアグリゲイトと呼ばれている。微惑星の形成モデルには様々なものが提案されているが、どのモデルにしろダストアグリゲイトはある程度のサイズ（～1m）までは成長する必要があると考えられている。ただし、ダストアグリゲイトの相互衝突の速度はサイズと共に増大し、メートルサイズでは 50m/s 程になる。数値シミュレーションによると、グレインが H₂O 氷で形成されている場合は、この速度でも合体成長が可能であることが示されている (Wada *et al.* 2009, ApJ **702**,1490)。

H₂O 氷のような揮発性の高い物質で形成されるダストアグリゲイトでは、原始惑星系円盤の広い範囲において「焼結」が進行し、グレイン間の結合様式が大きく変化するることが示されている (Sirono 2013, ApJ **765**, 50)。グレイン間の結合が変化すると、衝突の結果も影響を受けることが予想される。そこで本研究では、ダストアグリゲイトの二次元衝突シミュレーションを行い、焼結の影響を調べた。

まず、グレインを規則的に配置した模擬ダストアグリゲイトの変形シミュレーションを行った (図 1 参照)。その結果、焼結ダストアグリゲイトでは脆性破壊が起こり、一方で焼結していないダストアグリゲイトでは塑性変形が進行することがわかった。焼結している結合を転がりによって破壊するために必要な力が、焼結していない結合を引き延ばしによって切断する力よりも大きくなると脆性破壊が起こる。この条件は、グレイン間結合のネック半径がグレイン半径の 0.5 倍よりも大きくなることに対応する。ダストアグリゲイトの衝突シミュレーションの結果、焼結が進行している場合では成長できる衝突速度が 20m/s 程度まで低下することが明らかとなった。

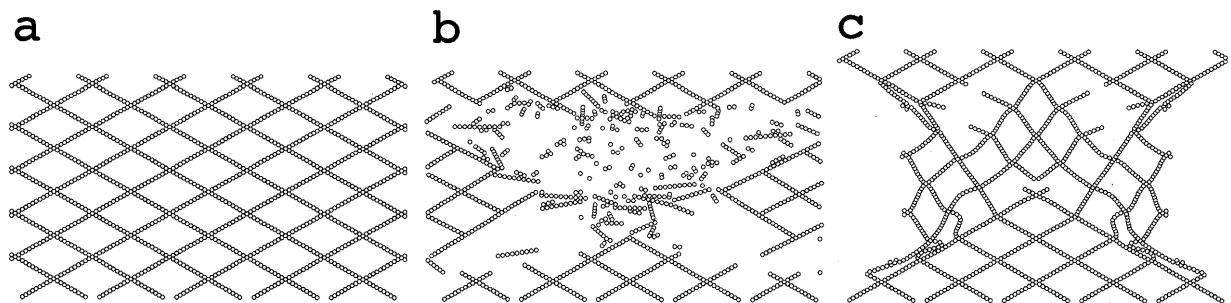


図 1: 二次元模擬ダストアグリゲイトを上下方向に伸長させたシミュレーション結果。グレイン半径 0.1 ミクロン、H₂O 氷の物性値を使用。a: ダストグレインの初期配置。b: 焼結アグリゲイトに対する結果。中心から X の形に亀裂が発生し破壊が起こる。c: 焼結していないアグリゲイトに対する結果。一部の結合が切断するものの、全体としては塑性変形をして破壊は起こらない。

原始惑星系円盤における大局磁場の輸送と進化

○奥住 聡¹, 竹内 拓¹, 武藤 恭之²¹東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻²工学院大学 基礎・教養教育部門

磁気回転不安定性や磁気遠心力風などの磁気流体力学現象は、原始惑星系円盤の質量進化に対して決定的影響を与える。近年の理論研究によると、これらの現象がもたらす質量降着率は、円盤を貫く大局的な磁束の強度に依存する (e.g., Suzuki et al. 2010; Okuzumi & Hirose 2011; Bai & Stone 2013; Simon et al. 2013)。このことは、円盤の質量進化を知るためには、円盤磁束の強度分布を知ることが必須であることを意味する。しかしながら、円盤の磁束強度に対する現実的な値は、理論的にも観測的にも強い制約がついていないのが現状である。

我々の研究の目的は、原始惑星系円盤の質量輸送と磁束輸送を統一的に解明することである。本講演では、その第一ステップとして、磁束輸送を質量輸送と切り離して解析し、磁束強度のとりうる値の範囲に対して制約を与えることを試みる。我々の解析では、Lubow et al. (1994) によって提唱された、降着円盤上での磁束輸送の平均場モデル (図1) を採用する。この平均場モデルによると、大局磁場の平衡形状は、降着に伴う磁束の円盤内側方向への輸送と、磁気拡散 (乱流拡散を含む) による磁束の外側方向への輸送の釣り合いから得られる。

我々は、平衡解の構造を一般的に調べ、その結果、平衡状態における各軌道半径での磁束強度には上限値が存在することを明らかにした。この上限値は、円盤外縁半径と、外部磁場強度によって決まる。具体的には、円盤半径を約100 AU、外部磁場を約10 μG とすると、原始惑星系円盤における大局磁束の最大強度は惑星形成領域(1–10 AU付近)で1–100 mG程度、円盤が中心星と接する最内縁領域 (0.01 AU付近) で1 kG程度である (図2 実線)。

さらに、近年の磁気流体計算の結果 (Simon et al. 2013; Bai 2013) を用いて、磁気流体力学起源の質量降着率の上限値を、我々の得た磁束上限値から算出した。得られた上限降着率は約 $10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ であり (図2 破線、点線)、観測から示唆される質量降着率 (Hartmann et al. 1998) の上限値と調和的である。

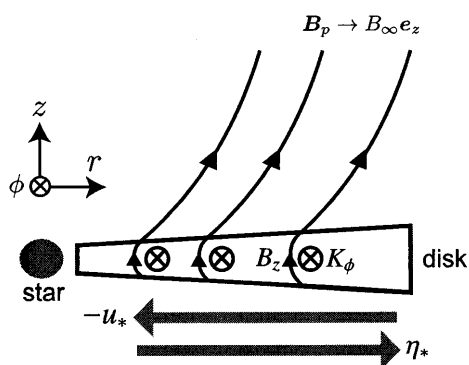


図1: 円盤磁束輸送の平均場モデル (Lubow et al. 1994) の模式図。

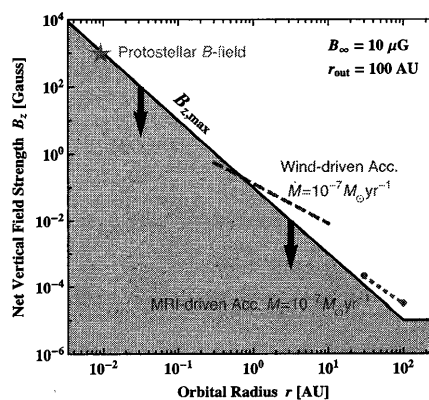


図2: 平衡状態における最大磁束強度分布の例。

HD142527 に付随する非対称ギャップ円盤の ALMA 観測

○ 百瀬宗武¹, 深川美里², 塚越崇¹, 西合一矢³, 大橋永芳³, 北村良実⁴,
 犬塚修一郎⁵, 武藤恭之⁶, 野村英子⁷, 竹内拓⁸, 小林浩⁵, 花輪知幸⁹, 秋山永治³,
 本田充彦¹⁰, 藤原英明³, 片岡章雅^{3,11}, 高橋実道^{5,7}, 芝井広²

¹ 茨城大・理, ² 阪大・理, ³ 国立天文台, ⁴ JAXA 宇宙研, ⁵ 名大・理, ⁶ 工学院大・基礎,
⁷ 京大・理, ⁸ 東工大・理, ⁹ 千葉大・先進科学セ, ¹⁰ 神奈川大・理, ¹¹ 総研大・物理

HD142527 に付随する原始惑星系円盤に対する ALMA 観測の成果を発表する。HD142527 は、距離 140pc にある約 $2.2M_{\odot}$ の前主系列星である。赤外線での高解像度撮像^[1,2] やエネルギースペクトルのモデル解析^[3] から、その円盤構造は (i) 半径 30AU の内域円盤と (ii) 内径 130AU の外域円盤の 2 成分からなり、両者の間にはギャップがあることが知られていた。また、ALMA を用いた他チームによる研究では、外域円盤からのサブミリ波ダスト熱放射の著しい非対称分布が明らかになっただけでなく、ダスト熱放射と HCO⁺ 輝線の両方で外域円盤と内域円盤とを繋ぐブリッジ構造が認められると主張された^[4]。我々は ALMA を用いて、より高い感度・空間分解能でダスト熱放射 (波長 0.89 μ m) のデータを得るとともに、外域円盤中のガス成分を捉えるのに適した ¹³CO と C¹⁸O の $J = 3 - 2$ 回転遷移輝線データも同時に取得した。その結果は以下の通りである。

まずダスト熱放射では、点源応答関数 = $0.39'' \times 0.34''$ (半値全幅: 55AU $\times$ 48AU に相当) の画像を得て、外域円盤だけでなく内域円盤も明瞭に捉えた。ただし、内域円盤と外域円盤を繋ぐブリッジ構造^[4] は確認されなかった。外域円盤は非対称なリング状分布を示し、各方位角での動径輝度分布の極大を繋いだリッジ上にある輝度のピークは、中心星を挟んでほぼ反対側にある極小地点の約 30 倍だった。このピーク地点は中心星から 156AU (傾き角補正後) の距離に存在し、その輝度温度は 24K だった。内域円盤からは 2.3×10^{-29} [W m⁻² Hz⁻¹] の空間分解されない放射を検出した。この放射量は、ダストに対するガスの質量比 (g/d) を 100、温度を 50K と仮定したとき、 $4.3 \times 10^{-5}M_{\odot}$ の総質量に相当する。一方 ¹³CO と C¹⁸O の輝線では、外域円盤領域においてダスト熱放射より軸対称に近い放射分布を示した。この振る舞いは、輝線が光学的に厚く、ピーク輝度がほぼ円盤温度のみに依存して決まっている状況で良く説明できる。

ダスト熱放射のリッジにおける ¹³CO 輝度温度から、外域円盤ダストの典型的温度の上限値は 36K と見積もられた。これを用いて、外域円盤中の全ダスト質量と輝度ピークにおけるダスト柱密度についてそれぞれ下限値を求めると、 $9 \times 10^{-4}M_{\odot}$, 0.28 [g cm⁻²] となった。もし円盤内の g/d が星間物質と同程度 (≈ 100) であれば、ピーク付近は自己重力に対して不安定であり、3 木星質量程度のガス惑星が重力分裂により形成されている可能性がある。g/d $\lesssim 10$ に低下していれば重力的には安定だが、一方でダストの著しい濃集を意味し、ここで岩石コアの急速な成長が起こる可能性がある。いずれにせよこれらは標準的太陽系形成シナリオでは想定されていなかった状況で、系外惑星の多様な形成過程を暗示する観測事実と位置づけられる。

- [1] Fukagawa, M. et al. (2006) ApJL, **636**, L53 [3] Verhoeff, A. P. et al. (2011) A&A, **528**, A91
 [2] Fujiwara, H. et al. (2006) ApJL, **644**, L133 [4] Casassus, S. et al. (2013) Nature, **493**, 191

波構造を考慮にいたした土星 A リングの温度モデル

○森島龍司^{1,2}、Linda Spilker²、Neal Turner²¹カリフォルニア大学、²ジェット推進研究所、

土星の A リングを可視光で見ると、その明るさが土星周りの経度によって異なり、四重極で表されることが知られている。これは、リング粒子の自己重力により波構造が形成され、観測者の視線方向が波と平行の場合、波と波の間の空隙が見えやすくなり相対的にリングが暗くなるためと解釈されている。カッシーニの赤外観測により、リングの温度も経度方向に四重極変化することが分かっている。ここで言う温度は輝度温度ではなく、プランクフィットにより得られたリングの物理温度に相当するものである。つまり、リングの見かけ上の断面積の経度変化の補正はされており、可視光観測の解釈はそのまま当てはめられない。本研究では、観測された温度変化を理解し、波の構造やアルベドや熱慣性などのリング粒子の性質を見積もるために、新たなリングの熱輻射モデルを構築した。

モデルにおいて、波は等間隔に置かれた無限に長い楕円柱の集まりで表されるものとした。外部の熱源として、直接および土星に反射された太陽光と土星からの赤外放射を考慮した。それらの放射フラックスに合わせて、波同士が暖め合うことによる熱フラックスと、波と波の間の散乱光による放射フラックスを反復法で求めることにより、波上のある表面要素が受け取る全フラックスを計算した。このフラックスは経度変化するものであり、リングが土星の周りを公転することを考慮に入れた熱伝導方程式を解くことにより、リング温度の経度変化が求まる。

計算の結果、波構造による温度の経度変化は太陽からみたリングの断面積の経度変化によるものと解釈できることが分かった。つまり、波が太陽からの視線方向と平行だと、リングの実効的な断面積が下がり、受け取る太陽光フラックスが減り、温度が下がるということである。温度の経度変化の振幅は波の厚み／幅比とリングの熱慣性に依存する。リング断面積の経度変化から見積もられた波の厚み／幅比(0.16)と、土星の影での温度降下から求められた熱慣性の値 ($\sim 10 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$) を用いると、モデルの温度振幅は観測されたものと比べて、大きくなることが分かった。これはモデルでは簡略化のために波と波の間にわずかながらにあると思われるリング粒子を無視したためと考えられる。またリングのアルベドは 0.35-0.4 と求まった。

講演では、温度の経度変化以外に、リング面に対する太陽緯度が 0 になるときの A リングの温度異常についても説明する。

周惑星円盤中の固体分布

○谷川 享行¹、丸田有希人²、町田 正博²¹ 北大低温研、² 九大理

巨大ガス惑星の規則衛星は、惑星形成時に存在していたと考えられている周惑星円盤の中で形成されたと考えられている。近年の高解像度数値流体計算により、周惑星円盤のガスの構造についてはかなり詳しく明らかにされている。しかし、衛星の形成に不可欠な固体がどのように周惑星円盤へ降着するかは明らかになっていない。

そこで本研究では、原始惑星系円盤中を回転する固体が周惑星円盤へどのように降着するかを理解するために、惑星軌道付近を中心星周りに回転している粒子が、周囲のガス運動の影響を受けながらどのように降着するかを、ガス抵抗を考慮した軌道計算により調べた。ガス抵抗力の計算を行うには、ガスの密度・速度情報が必要となるが、それには3次元高精度数値流体シミュレーションにより得られた流れ場データを用いた。計算の結果、典型的な原始惑星系円盤モデルで、惑星が5AUにある場合、10mサイズの天体が最も降着効率が高い事が分かった。定性的には10mを境にサイズ小さくなるにつれて天体はガスとよくカップルして周惑星円盤への降着が妨げられ、サイズが大きくなるにつれてガス抵抗の効果が弱まり捕獲効率が下がる。1cm以下のサイズのダストは、ガスの流れに強く影響を受けるため、周惑星円盤へは降着できないことも分かった。また、固体のサイズが大きくなるにつれて、周惑星円盤中に捕獲される位置が惑星に近づくことが分かった。この結果を用いて周惑星円盤内における衛星形成プロセスについて議論する予定である。

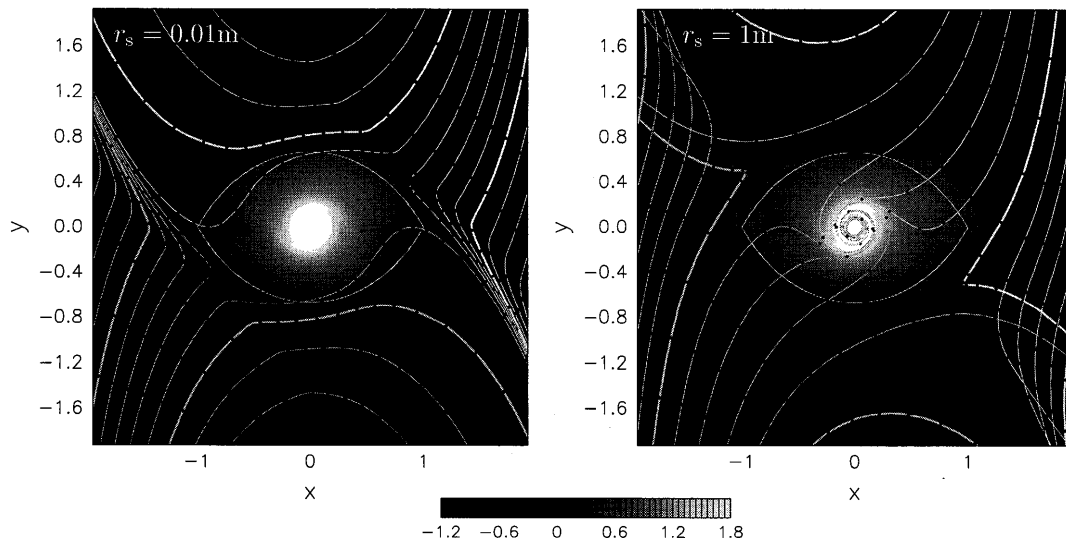


図1：原始惑星系円盤から周惑星円盤へ接近する粒子の軌道（線）とガス密度。線上の点は時間等間隔（0.2 無次元時間）。縦軸横軸は円盤スケールハイトで無次元化。

周惑星円盤の形成・進化についての理論的解析

○藤井悠里¹、高橋実道¹²¹名古屋大学、²京都大学

本研究では円盤の自己重力による角運動量輸送に着目し、周惑星円盤の面密度と温度構造を調べた。

巨大ガス惑星形成期にはガスが惑星の周囲に円盤を形成しながら降着する。ガリレオ衛星などの衛星系は、この周惑星円盤と呼ばれるガス円盤で形成されたと考えられており、衛星形成を理解するにはその形成環境である周惑星円盤の構造や進化についての理解が不可欠である。我々のこれまでの研究により、周惑星円盤ガスは宇宙線などによる非熱的電離ではガス降着メカニズムの最有力候補である磁気回転不安定性 (MRI) の駆動に十分な電離度が得られないことが分かった (Fujii et al, 2011, to be submitted)。よって、外部からの流入に比べ惑星へのガス降着が少ないために周惑星円盤の面密度は大きくなることが期待される。

もしMRI以外に重力的に安定な円盤の質量降着メカニズムがなければ、周惑星円盤には重力不安定が起こるまでガスが降り積もることになる。そして、重力不安定になるとスパイラル密度波によって角運動量が輸送される。我々はこの円盤の重力不安定に着目し、周惑星円盤の形成及び進化について研究した。重力不安定による角運動量輸送率の評価には Takahashi et al. (2013) で求められた実効的な粘性定数の表式を用いた。そして、重力乱流によって円盤が局所的に加熱されると仮定し、円盤ガスの温度を求めた。赤道面の温度が1000Kを越えると熱電離によってMRIが駆動されるので、その効果も考慮して面密度進化について議論する。

References

- Fujii, Y. I., Okuzumi, S., & Inutsuka, S., 2011, ApJ, 743, 53
Fujii, Y. I., Okuzumi, S., Tanigawa, T., & Inutsuka, S., to be submitted
Tanigawa, T., Ohtsuki, K., & Machida, M. N., 2012, ApJ, 747, 47
Takahashi, S. Z., Inutsuka, S., & Machida, M. N., 2013, ApJ, 770, 71

惑星周りの粒子円盤の進化と衛星形成

○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) をパラメーターとして、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つ目の衛星が形成されることを確認した。

周惑星ガス円盤中で集積する巨大氷衛星の原始大気

○三上 峻¹ 倉本 圭¹¹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非常に似ているにも関わらず、大気の有無や内部の分化度などに著しい差異があることが知られている。これらの差異が形成期に得られたのか、後天的に得られたのかは未だに議論となっている。これは、集積期の巨大氷衛星の熱史と、それに伴う大気形成や内部分化について不明な点が多いことに起因している。

Lunine and Stevenson (1982) は、現在の衛星系質量から単純に復元された厚い周惑星円盤内で巨大氷衛星が集積したと仮定し、円盤ガスの保温効果による氷の融解によって内部分化構造の説明を試みた。一方、Kuramoto and Matsui (1994) は真空中での衛星の形成を仮定し、材料物質の蒸発により形成される原始水蒸気大気の保温効果により、集積期に H_2O 氷の融点を大きく超える高温環境が達成される可能性を示した。しかし、最近有力視されている衛星形成論によると、これら巨大氷衛星は薄い周惑星円盤中で比較的ゆっくり集積する。Barr et al. (2010) は、そのような形成条件では、集積期に厚い原始大気は生じず衛星の分化はほとんど起こらない、そして後期重爆撃による衝突加熱により氷成分の融解と衛星の分化が引き起こされたと主張している。しかし、原始大気の保温効果についてきちんとした評価は行っていない。

そこで本研究では、円盤ガスと衛星材料物質の蒸発成分からなる混合大気の保温効果を考慮した再検討を行った。

衛星ヒル半径において薄い周惑星円盤ガスに静力学的に接続する衛星原始大気の保温効果を放射計算により見積もる。吸収源には円盤ガス成分である H_2 , He と材料物質中の氷の蒸発成分である H_2O を考慮し、衛星の表面温度の関数として放射対流平衡構造を求め、大気上端の熱放射フラックスを算出した。また、それぞれの衛星形成場領域の円盤条件は Canup and Ward (2002) をもとに与え、ガニメデ軌道では円盤温度を 120 K、タイタン軌道では円盤温度を 50 K として計算を行った。

予察的な結果を以下に示す。集積期のガニメデは円盤温度が比較的高温なために、重力的束縛が弱く、光学的に薄い大気をまとう。この場合、集積完了後の円盤ガスの散逸に伴って効率的な大気散逸が起き、大気をほぼ全て失う可能性がある。一方、集積期のタイタンは円盤温度が低温なために、重力的に強く束縛された光学的に厚い大気を保持する可能性がある。このような原始大気は、円盤ガスの散逸後も長期間残存することができる。したがって、巨大氷衛星の大気の有無は円盤温度の差異に起因する可能性がある。

タイタンでは、重力的に束縛された円盤ガス由来の大気量が多く、そのために高い地表面温度が円盤ガス散逸後も比較的長期間持続しうる。その際、材料物質から揮発した 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。

土星衛星エンセラダスにおける熱水活動

○関根康人¹、渋谷岳造²、鈴木勝彦²、桑谷立³、橘省吾⁴

¹ 東京大学 大学院新領域創成科学研究科

² 海洋研究開発機構 プレカンブリアンエコシステムラボラトリー

³ 東北大学 大学院環境科学研究科、⁴ 北海道大学 大学院理学院自然史科学専攻

近年のカッシーニ探査により、土星の衛星エンセラダスはプリュームに代表される活発な地質活動を有していることが明らかになった。また、プリューム中にナトリウム塩が見つかったことから、内部には岩石成分と反応を行う液体の内部海が存在することも明らかになっている。さらに近年、カッシーニ探査機は、プリュームに由来する土星 E リング粒子に、ほぼ純粋なシリカから成るナノ粒子が含まれていることを明らかにした。地球上においてシリカナノ粒子は、熱水噴出孔などの岩石と水が高温で反応する環境で生成されるため、E リングにおけるシリカナノ粒子の発見は、エンセラダス内部に温度勾配が存在することを示唆している。しかし、そのような化学反応の具体的な温度条件や岩石組成は不明である。

本研究では、エンセラダス内部を模擬した熱水反応実験を行い、溶液中の溶存シリカ濃度の決定要因とシリカナノ粒子が析出するための温度・鉱物条件を調べた。反応溶液には、アンモニアと炭酸水素ナトリウムの水溶液を用い、反応鉱物には、1) 輝石とオリビンの混合粉末、2) オリビンのみの粉末を用いた。温度条件は 120–300℃で変化させ、圧力条件は 400 気圧で一定とした。

実験の結果、熱水溶液中の溶存シリカ濃度は、反応鉱物から生成される二次鉱物の組成と温度に影響されることがわかった。生成した二次鉱物は、Mg/Si 比が 1.5 以下の輝石とオリビンの混合粉末を用いた実験では、蛇紋石とタルク、サポナイト、磁鉄鉱、炭酸塩となる。一方、Mg/Si 比が 1.5 以上のオリビンのみを用いた実験では、蛇紋石とブルーサイト、磁鉄鉱、炭酸塩であった。実験結果と化学平衡計算結果の比較により、このような二次鉱物組成の場合、溶液中のシリカ濃度は、蛇紋岩とタルク／サポナイト、あるいは蛇紋岩とブルーサイトという二次鉱物間の化学平衡で決定されることがわかった。

エンセラダス内部で、シリカが析出するほどの高い溶存シリカ濃度を実現するためには、二次鉱物組成は蛇紋岩とタルク／サポナイトからなる必要がある。このことは、エンセラダスの岩石コアが、炭素質コンドライト的組成であることを支持する。また、このような岩石コア組成のときに、シリカが析出するために必要な温度は 100℃以上となる。熱史計算の結果、現在のエンセラダスの岩石コアが 100℃以上になるためには、エンセラダスを始めとする土星系衛星が、CAI 形成後 200–400 万年以内に形成していることが必要となる。この土星系形成年代は、近年の原始惑星系円盤の天文観測による円盤の平均的寿命ともよく一致する。

木星の影におけるガニメデからの近赤外線放射

○津村 耕司¹, 新井 俊明^{2,1}, 有松 亘^{2,1}, 江上 英一³, 本田 親寿⁴, 木村 淳⁵, 倉本 圭⁶,
松浦 周二¹, 中島 健介⁷, 中本 泰史⁸, 白簾 麻衣¹, Jason Surace⁹, 和田 武彦¹

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 東京大学, ³ アリゾナ大学, ⁴ 会津大学, ⁵ 東京工業大学 ELSI, ⁶ 北海道大学, ⁷ 九州大学, ⁸ 東京工業大学, ⁹ カリフォルニア工科大学

ガリレオ衛星食とは木星の影の中にガリレオ衛星が入る現象であり、食中の衛星の明るさは急激に暗く観測される。我々はすばる望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡を用いて、完全に木星の影の中に入ったガニメデ及びエウロパの近赤外線観測を行った。その結果、 $1.5\mu\text{m}$ 付近の観測では、食中のガニメデが一様に明るく ($\sim 50\mu\text{Jy}$) 観測された (図 1)。その一方で、食中のエウロパは検出限界以下の明るさ ($< 6\mu\text{Jy}$) であり、 $3.6\mu\text{m}$ の観測では食中のガニメデも検出限界以下の明るさ ($< 4\mu\text{Jy}$) であった。太陽光が直接は当たらない木星の影の中で、ガニメデから $1.5\mu\text{m}$ 付近でこれほどの輝度が検出されたのは、予想外の結果である。ガニメデの表面温度は 120K 程度であるため、その熱放射は無視できる。また、食中のガニメデ全体が一様に明るく観測されたことから、極付近でのみ輝くオーロラでもこの現象は説明できない。

我々はガニメデ食が $1.5\mu\text{m}$ 付近で明るく観測された理由として、(1) 木星上層大気による散乱、および、(2) ガニメデ希薄大気による発光、を考えている。(1) では、木星上層大気によって散乱された太陽光が食中のガニメデを照らしているという仮説であり、我々のモデル計算によると、木星大気中の気圧高度 10mbar 付近を通過した太陽光が主に寄与していると考えられる。この気圧高度 (10mbar) は過去の探査機のプローブによる直接探査等による情報が少ない。もしこの仮説が正しければ、本ガニメデ食観測から木星の大気構造に新たな制限を加える事ができる。(2) では、ガニメデ周囲のプラズマ粒子によって励起されたガニメデ希薄大気中の OH 発光を主に考えている。もしこの仮説が正しいとすると、今までほとんど情報が得られていないガニメデ表面の氷とガニメデ軌道上のプラズマ粒子の反応について、本観測から制限を加える事ができる。

本講演では、我々が得た観測データとその惑星科学的な意義、および 2 つの原因を切り分けるために準備中の観測計画について述べる。

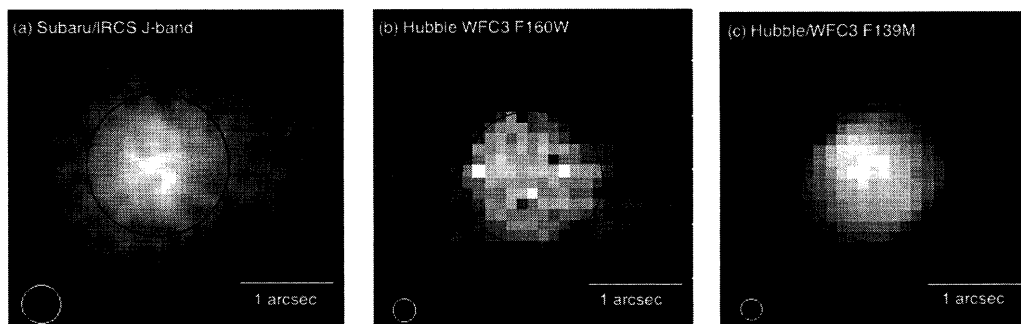


図 1: 木星の影中のガニメデのイメージ。左から (a) すばる IRCS(J-band, $1.25\mu\text{m}$) による画像 (2012 年 7 月 26 日)、(b) ハッブル宇宙望遠鏡 WFC3(F160W バンド, $1.60\mu\text{m}$) による画像 (2013 年 2 月 5 日)、(c) ハッブル宇宙望遠鏡 WFC3(F139M バンド, $1.39\mu\text{m}$) による画像 (2013 年 3 月 5 日) が示されている。各図の左下の $\circ$ は各観測での PSF サイズを表す。

JUICE 搭載レーザ高度計 (GALA) のサイエンス目標

Science targets of the Ganymede laser altimeter (GALA) aboard Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE)

○木村 淳¹, Hauke Hussmann², 並木 則行³, 鎌田 俊一⁴, 松本 晃治⁶, 倉本 圭⁴, 佐々木 晶⁵, 平田 成⁷

¹東工大地球生命研究所, ²ドイツ航空宇宙センター, ³千葉工大惑星探査研究センター, ⁴北海道大学, ⁵大阪大学, ⁶国立天文台, ⁷会津大学

A new mission to Jupiter system, JUICE, has started by European Space Agency. The GALA, which will be developed by international collaboration of scientists and engineers in Germany, Switzerland, and Japan, has been selected by ESA for JUICE mission payload and measures distance between the spacecraft and the surface of the satellite from time of flight of a laser pulse. GALA will focus on geodetic and geophysical investigations of the icy satellites Europa, Ganymede and Callisto. Here, we describe the scientific objectives.

欧州宇宙機構の次期大型計画である木星系探査衛星 JUICE (2022 年打上, 2030 年木星系到着, 2032 年ガニメデ周回軌道投入) が始動し, 我々はドイツ航空宇宙センター (DLR) 主導のもとレーザ高度計 GALA の開発を開始した. JUICE は, 衛星に対してはエウロパとカリストのフライバイおよびガニメデの周回観測を行い, GALA は探査機と天体間の距離を測定する. それにより以下の 5 種の情報を主に取得し, 「生命居住可能領域の候補としての氷衛星の理解」という JUICE ミッションのテーマに対して本質的な寄与を果たす.

- i) 地形・地質: 対象の 3 衛星は表層を水の氷に覆われ, 伸張性テクトニクス (エウロパ・ガニメデ) や局所融解地形 “カオス” (エウロパ), 緩和の強い衝突クレータ (全衛星) など, 岩石天体にはない特徴を持つ. その詳細な地形情報を得て内部状態とその進化を見通す.
- ii) 潮汐変形: 従来の探査により, 3 衛星は内部に全球的な海 (内部海) を持つ可能性が示された. 海の有無は潮汐力に伴う表面の変位を強める (海有り: 最大 7m, 海無し: 数十 cm) と予想されており, ガニメデとカリストでその変位をモニタして内部海の有無を判定する.
- iii) 回転状態: 内部海などの液体層があると固体層と液体層は異なる回転変動を生じ, 両者は圧力や重力トルクなどを通してカップリングする. その結果, 内部構造に依存した振幅の秤動が発生し, 秤動を正確に計測することで氷地殻厚さ (海の有無) 等の情報が得られる.
- iv) 重力場: 高度計データを探査機の詳細軌道決定に用いることで, 重力場の精度向上が見込める. 特に潮汐応答による重力の変動を表すパラメタである潮汐ラブ数の精度が上がることで, 内部海の存否やその深さの制約が可能となる (海有り: $k_2 > 0.4$, 海無し: $k_2 < 0.1$).
- v) 表面特性: レーザフットプリント中に数 m サイズの粗さがあると反射パルスの幅が広がりピーク強度が下がることから, 表面の凹凸を明らかにできる. また入射パルスと反射パルスの比を測定し, 高度や表面の傾斜補正や近赤外分光による観測結果と合わせることで, レーザ波長での天体の反射率マップを求めることができる.

20 年以上の長期計画を支え続けるために, GALA チームでは惑星科学界に固定せず地球の極域観測などのグループも巻き込んだオープンで進化する体制を整え, 検討を進めている.

ケンタウルスの軌道進化と彗星活動 2

○樋口有理可¹, 井田茂²

¹東京工業大学理学部, ²東京工業大学/地球生命研究所 (ELSI)

ケンタウルスとは巨大惑星領域にある太陽系内小天体で、カイパーベルト領域に起源があると考えられている。巨大惑星の重力を受けるために力学的寿命が短く、ケンタウルスの大部分は数千万年以内に太陽系外に放出される、もしくは木星族彗星へ進化するということがこれまでの数値計算によって示されている。ケンタウルスの中には一酸化炭素のコマを持つ、すなわち彗星活動をするものが存在することが知られている。ケンタウルスの領域は大量の一酸化炭素氷を保持するには高温すぎる。また、水氷の昇華には低温すぎるので一般の彗星活動のメカニズムでもこの彗星活動は説明はできない。これまでに考えられている彗星活動メカニズムのひとつに、このコマは非結晶水氷が加熱により結晶化する際に放出された一酸化炭素であるとするものがある。非結晶氷には多くの空隙があり、そこに大量の一酸化炭素を保持していることは十分に考えられる。

本研究ではこのメカニズムがケンタウルスの彗星活動の起源であると仮定し、彗星活動と軌道進化の関係を調べた。具体的には、(1) 非結晶氷を持つ天体の軌道要素と存在確率の関係、(2) 彗星活動の有無と軌道要素の関係、(3) 彗星活動の継続時期と継続時間を求めるため、巨大惑星の重力を入れた軌道計算と、非結晶氷の結晶化率の進化の計算を同時に行った。その結果、ケンタウルスは活動の有無に関わらず長期にわたり非結晶氷を保持していること、ケンタウルスの定義を満たす天体のみが彗星活動を持ちうること、主に軌道進化の比較的初期の段階で彗星活動を持つことなどがわかった。これらの結果と観測結果を比較することで、カイパーベルト領域からケンタウルス領域への流入量を見積もることができる。

トロヤ群小惑星の力学進化

○ 岡山博明, 大槻圭史

神戸大学大学院理学研究科

木星のラグランジュ点 L_4, L_5 近傍にはトロヤ群と呼ばれる小惑星群が存在する。2013 年 9 月 18 日現在では L_4 に 3894 体、 L_5 に 1997 体、計 5891 体が確認されている。トロヤ群の起源としてはガス抵抗による捕獲、木星の質量増加や軌道移動の効果による捕獲等が提案されてきたが、シミュレーションで得られたトロヤ群の数や軌道要素は実際の観測値と一致しなかった。しかし近年、「ニースモデル」と呼ばれるモデルを用いることでトロヤ群の捕獲が説明可能であり、有力であると考えられる。

ニースモデルでは巨大惑星（木星、土星、天王星、海王星）が形成された当時は現在よりも相互に近い軌道で外縁に微惑星が多数存在し、原始太陽系星雲は既に散逸しておりガス抵抗は考慮しない状況を考える。計算を始めると微惑星との相互作用により巨大惑星の軌道が移動していき、やがて木星と土星が 2:1 の共鳴軌道となる。その結果天王星や海王星の軌道が大きく乱れ、それに伴い微惑星も大きく散乱される。やがて巨大惑星は微惑星との力学的摩擦により現在の軌道付近に落ち着く。このプロセスで巨大惑星の軌道や、微惑星の散乱による月への後期重爆撃期（LHB）が説明が可能である。（Tsiganis et al. (2005), Gomes et al. (2005)）

Morbidelli et al. (2005) では、ニースモデルに従い軌道進化した木星と土星が 2:1 の共鳴軌道に入った際に不安定になったラグランジュ点付近に存在する微惑星がトロヤ群小惑星として捕獲されると考えている。木星と土星が共鳴から外れると、これらの微惑星は完全に捕獲され、現在のトロヤ群の総質量の見積もりや、離心率と軌道傾斜角の分布が観測値と一致することが確認されている。

しかし捕獲された小惑星同士の相互重力は考慮されておらず、小惑星の質量や軌道安定性などは議論されていない。そこで本研究では、比較的質量の大きな天体が捕獲されたと仮定し、それがトロヤ群小惑星に及ぼす影響を軌道数値シミュレーションを用いて研究を行った。また、トロヤ群の軌道進化のみでなく、原始惑星へ衝突した小惑星や散乱時間についても調べた。それらの結果について報告する。

原始惑星系円盤内で高速になる 微小天体の軌道進化

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

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

惑星が形成される過程では、原始惑星系円盤中で木星型惑星などの大きい天体と、原始惑星や微惑星といった小天体が同時に存在する時期があり得る。このような状況では、小天体の離心率や軌道傾斜角は、大きな天体からの重力摂動によって跳ね上げられる一方、原始惑星系円盤からの抵抗によって減衰させられる。

木星が形成されていると、小惑星帯付近には、平均運動共鳴や永年共鳴といった、ローカルに離心率や軌道傾斜角が上昇する場所が存在する。小惑星帯から木星にかけては、4AU あたりに 3:2, 3.3AU のあたりに 2:1 の平均運動共鳴がある他、最小質量円盤の自己重力を加味した場合には、3AU あたりに離心率にかかわる永年共鳴が生じている。また、その永年摂動に伴い、3AU から 4AU のあたりでは天体の離心率が 0.1 以上に大きくなっている。天体の円盤ガスとの相対速度が大きくなり、秒速 1km/s 程度を超えると小惑星帯のあたりにある天体は、弧状衝撃波を生じる。秒速 5km/s, つまり小惑星帯における離心率で 0.15 程度を超えると、この衝撃波後面のガスは、氷微惑星を溶かすほどの高温となる。この高温ガスによって、100km の氷微惑星であった場合、 10^6 年程度のタイムスケールで蒸発してしまうことになる。

ガス円盤からの抵抗によって、落下してきた氷微惑星がどの程度蒸発してしまうかを見積もるために、木星とガス円盤の中での微惑星の運動を数値計算した。初めに 2AU から 5AU 程度に置かれた天体は、木星による離心率上昇と円盤からの抵抗によって次第に落下し、共鳴の位置にかかると、大きな離心率を得てさらに落下することになる。この時上昇する離心率は、天体のサイズに依存しており、天体の半径が 1km 程度以下では、ガス抵抗が強く効くため、ほとんど 0.1 を超えることはない。しかしこうした小さい天体はもともとの落下速度が速いため、すぐにスノーラインを切ってしまう、 10^6 年程度で小惑星帯から失われてしまう。天体サイズが 100km, 1000km であれば、あまり落下をせずに、0.2 程度の離心率を得ることができ、小惑星帯付近で蒸発を経験することになる。円盤のガス密度が最小質量円盤の半分程度に減少している状況であれば、得られる離心率はさらに高くなり、0.5 程度にも達する。これ以上円盤が減少していると、衝撃波による蒸発の効果が弱まってしまう。これらのことから、小惑星帯近傍では、あまりガス円盤が散逸していない状況で 100km 程度以上の氷天体が形成されている状況が、最も蒸発に関与すると考えられる。

天体スケールにおける衝突破壊モデルの再検討

○藤田智明¹, 玄田英典², 小林浩³, 田中秀和⁴, 阿部豊¹

¹ 東京大学 ² 東京工業大学(ELSI) ³ 名古屋大学 ⁴ 北海道大学(低温研)

惑星形成過程において、微惑星同士または微惑星と原始惑星の衝突はかなり頻繁に起こる。惑星はその様な衝突を繰り返しながら成長し、現在の惑星系を形成すると考えられているが、最近の研究(例えば、Kobayashi and Tanaka 2009)によると、天体衝突によってばら撒かれる小破片の量やサイズ等により、形成される惑星のサイズの上限が変わることが示唆されている。すなわち、衝突によって天体がどの程度破壊もしくは削られるのかを詳細に調べることは、より正確な惑星形成論を構築する上で重要な課題となっている。これまでに、衝突前の質量の半分が飛び散ってしまう様な破壊的な衝突を引き起こす単位質量あたりの衝突エネルギー値 Q_0^* は、様々な条件で調べられており(例えば、Benz and Asphaug 1999)、惑星形成を論じる際にはそのエネルギー値以上の衝突のみが重要視されてきた(例えば、Wyatt et al. 2007)。しかし、解像度の悪さや解析手法の不明確さから、 Q_0^* の値の正確さには疑問が残る。また実際に惑星形成を考える上では、破壊ほどエネルギーが大きいような小規模な衝突も重要な影響を及ぼすことがわかっている(Kobayashi and Tanaka 2009)。先行研究では、破片総質量が衝突エネルギーに対して線形に変化することを仮定しているのだが、そのようなエネルギー範囲での衝突については、実際には詳しく調べられていない。

そこで本研究では、SPH 法を用いて重力支配域における天体衝突シミュレーションを様々な衝突パラメータで行い、 Q_0^* の値の再確認、並びに衝突エネルギーに対する破片総質量の系統的調査を行った。具体的には、直径 100km, 10km サイズの天体に対して様々な質量の天体を様々な衝突速度で衝突させ、それぞれ飛び散る破片の総質量を求めることで、破片総質量と衝突エネルギーの関係を定式化した。この際、結果の解像度依存性を詳細に調べた上で、十分に認められる解像度をもって検証した。また、先行研究では不明確であった破片総質量の解析に関しては、客観的評価が可能となる独自の解析手法を確立し、それを用いて解析を行った。

Q_0^* の値を再評価した結果だが、先行研究(Benz and Asphaug 1999)の結果よりも 1 桁近く小さくなることがわかった。傾向としては、衝突破壊の際天体はこれまで考えられてきたよりも破壊されやすい結果となった、と言える。これは、これまで考えられてきたよりも相当な高解像度計算が必要であることが大きな要因とされる。また破片総質量と衝突エネルギーの関係に関しては、水平面衝突で近似可能な領域と、ターゲット天体の曲率が影響する領域の 2 つの領域の存在が明らかになった。またこの関係式は、衝突角度にも大きく依存することも分かった。

普通コンドライト母天体を形成した微惑星の低速度衝突実験： 同サイズ試料の衝突破壊に対する斜め衝突の影響

○河本 泰成¹, 荒川 政彦¹, 保井 みなみ²

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

はじめに：天体の衝突破壊は、微惑星の衝突集積による天体成長において重要な物理過程である。そこでこれまで様々な惑星形成物質に対して衝突破壊強度 (Q^*) が計測されてきたが、多くの場合、弾丸質量が標的質量に比べて遙かに小さかった。一方、微惑星の初期衝突進化においてはその相互衝突速度は小さく 100m/s 以下と言われているが、このような低速度で衝突破壊が起こるかどうかを知るためには、衝突破壊強度よりも衝突破壊が起こる最低速度を知る必要がある。衝突破壊が起こる最低速度は、同サイズ衝突により実現されると考えられる。したがって、これまでほとんど行われていなかった弾丸と標的の質量比が 1 となる衝突実験を行う必要がある。そこで我々は岩石微惑星や氷微惑星を模擬した石膏や氷の同サイズ試料を用いた衝突実験を行ってきた。そして、それぞれの試料の最低破壊速度やその衝突角度依存性を調べてきた。

本研究では、より現実的な微惑星の強度を調べるために、普通コンドライト隕石母天体の模擬物質を用いた実験を行った。普通コンドライト隕石母天体には、コンドリュールと呼ばれるサブミリメートルサイズの球状粒子が含まれていたと考えられる。そこで本研究ではコンドリュールを含む普通コンドライト隕石母天体を模擬するために、石膏・ガラスビーズ混合試料を用いて、この試料の同サイズ試料の衝突実験を行った。

実験方法：衝突実験は一段式軽ガス銃とばね銃を用いて行った。弾丸・標的試料は直径 25mm、もしくは 30mm の球で、コンドリュールを模擬した直径 1mm のガラスビーズを混ぜた石膏試料（空隙率 20%）と比較のための石膏だけの試料（空隙率 55%）を用意した。ビーズ入り石膏試料中のビーズの体積比率は約 60% である。衝突速度 (v_i) は 4~160m/s、衝突角度 (θ) は 0~75° と変化させた。衝突の様子は高速度ビデオカメラで每秒 3000~10000 コマの速度で撮影した。

実験結果：高速度カメラで撮影した映像から、石膏が正面衝突する場合、 v_i が 60m/s を超えると、両球が破壊された。衝突直後に衝突点付近が圧縮され、引き続き衝突方向に亀裂が生じ、数個の破片ができる様子が観測された。さらに v_i が 140m/s を超えると出来た破片が絡み合うように両球が潰れていった。ビーズ入り石膏の場合、 $v_i=13\sim17\text{m/s}$ を境に両球破壊が始まる。衝突直後に衝突点付近が細かく破壊され、その後両球が潰れながら破壊されていく。衝突破壊が起こる最低速度は、ビーズ入り石膏試料が石膏試料の 1/3 以下であることがわかった。

正面衝突の場合、石膏試料では $Q^*=390\text{J/kg}$ となり、1mm ビーズ入り石膏試料では $Q^*=13.6\text{J/kg}$ となった。Yasui & Arakawa, 2011 は、石膏試料では弾丸・標的質量比 0.027~0.56 で $Q^*=446\text{J/kg}$ を、1mm ビーズ入り石膏試料では弾丸・標的質量比 0.014~0.1 で $Q^*=116\text{J/kg}$ を得ており、ビーズ入り試料では同サイズ試料の場合、 Q^* がかなり小さくなることがわかった。ビーズ入り石膏でこの様なはっきりとした差が生じた理由は、今後さらに研究する必要がある。一方、斜め衝突の場合、衝突角度の増加に伴い最大破片は大きくなった。最大破片と標的の質量比 m_f/M は、正面衝突時の m_i/M が約 0.5 の時、石膏では $m_f/M=0.44(\cos\theta)^{-0.62}$ 、ビーズ入り石膏では $m_f/M=0.48(\cos\theta)^{-1.43}$ となった。この結果、ビーズ入り石膏では、衝突角度が 50° より大きくなると、ほとんど破壊されなくなることがわかった。

C 型小惑星模擬物質への衝突実験

○岡本千里¹, 池崎 克俊², 今栄 直也³, 矢野 創¹, 橘 省吾⁴, 土山 明⁵,

澤田 弘崇¹, 長谷川直¹, 中村 昭子⁶, 富山 隆将⁷

¹宇宙航空研究開発機構, ²大阪大学, ³国立極地研究所, ⁴北海道大学, ⁵京都大学, ⁶神戸大学,
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, あまり変成作用を経験していない始原的な物質と考えられている. そのため, C 型小惑星からのサンプルリターンは, 太陽系形成初期や生命の起源についての重要な情報が得られることが期待される. はやぶさ 2 計画では, サンプラーと呼ばれる試料採取機構が搭載されており, C 型小惑星 1999JU3 からのサンプルリターンを目指している. 試料採取の方法は, はやぶさ 1 号機と同様, 火薬銃を用いた弾丸射出法と呼ばれる手法である. これは, 小惑星表面に金属製弾丸を加速して打ち込み, 小惑星表面にクレータを作ることで, 破壊, 放出された小惑星破片を回収する方法である. 小惑星からの試料採取効率を明らかにするためには, 小惑星上でのクレータ形成過程の解明が重要となる. また, 太陽系初期には C 型小惑星が多く存在し, 互いに衝突を繰り返すことで, 惑星系を形成していったと考えられている. そのため, C 型小惑星の衝突破壊過程を明らかにすることは惑星形成過程を考える上で重要となる. そこで, 本研究では, C 型小惑星の衝突現象を解明するために, C 型小惑星模擬物質への衝突実験を実施した.

1999JU3の表面反射スペクトルはCMコンドライトに類似しており, 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と考えられる. 実験では, 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するため, それぞれのサイズに近い $\phi 250\text{-}355$ ミクロンと $\phi 20$ ミクロン以下のガラスビーズを用いた. ここで, 隕石中にコンドリュールは体積比20vol%~50vol%を占める. そこで, C型小惑星模擬試料として, $\phi 250\text{-}355$ ミクロンガラスビーズを試料中に20vol%, 50vol% (マトリックスとして $\phi 20$ ミクロン以下のガラスビーズをそれぞれ80vol%, 50vol%) 含有した2種類のガラスビーズ混合物を温度610℃~635℃で焼結させ, 試料の引張強度は0.1MPa~1.0MPaとなるように試料を作製した. これらの模擬試料を用い, 火薬銃を用いた衝突実験を実施した. 弾丸としてステンレス製の直径8mm, 質量5 g のものを用い, 衝突速度100~250m/sで実験を実施した. チャンバー内は~10Paに維持された. 本研究でのターゲットを特徴づけるパラメータは, コンドリュール比 (20%-50%), 引張強度 (0.1MPa-1.0MPa) であるが, 引張強度が強い試料の方がクレータ体積は小さくなり, 破片の総質量も少なかった. これは, 引張強度1.0MPaの方が焼結によるネック密度やネックの成長などにより, ネックを破壊するのに必要なエネルギーが大きくなるためと考えられる.

事前衝突を経験した多結晶氷の衝突破壊条件に関する 実験的研究：氷天体の蓄積ダメージの見積もり

○保井みなみ¹, 羽山遼², 荒川政彦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

はじめに：氷衛星等の氷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おり、そのため天体内部には多くのクラックが存在する．事前衝突を受けた氷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、その後の氷天体の進化過程に大きな変化をもたらすと考えられる．よって、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するため、氷の複数回衝突破壊実験を行い、衝突破壊強度、破片分布、破片速度に対する衝突回数の依存性を定量的に調べた．

実験方法：弾丸は直径 15mm の氷円筒、標的は 0.6~2.5kg の立方体の多結晶氷を用いた．衝突実験は北大低温研の低温室内で行った．温度は-10℃または-15℃とした．氷弾丸を同標的に 2~10 回衝突させ、衝突面は衝突回毎に変化させた．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、実験後は標的を回収し、その破片質量を計測した．

結果：各衝突回で標的に与えたエネルギー密度の積算値 ΣQ と衝突前の標的質量で規格化した最大破片質量 m_l/M の関係を図 1 に示す．エネルギー密度とは、弾丸の運動エネルギーを衝突前の標的質量で割った値である．実験の結果、単一衝突 (1 shot) と複数回衝突 (2-10 shot) の結果はほぼ一致することがわかった．つまり、標的の破壊が始まる (m_l/M が 1 以下になる) のに必要なエネルギー密度と破壊後の最大破片の質量は衝突回数に依存せず、各衝突回で与えられるエネルギー密度の積算値で決まることがわかった．さらに Kato *et al.* (1995) の多結晶氷の単一衝突の結果ともほぼ一致した． m_l/M が 0.95 以下のデータをベキ乗則で表すと、 $m_l/M = 7.6 \times 10^3 \Sigma Q^{-2.2}$ となった．単一衝突の場合、 m_l/M が 0.5 になる時のエネルギー密度を衝突破壊強度 Q^* と定義する．本研究の複数回衝突の場合は、積算エネルギー密度 ΣQ^* で示すこととした． ΣQ^* を上記の式から求めると 73.8 J/kg となり、Kato *et al.* (1995) の単一衝突の衝突破壊強度 Q^* (~70J/kg) とほぼ一致した．

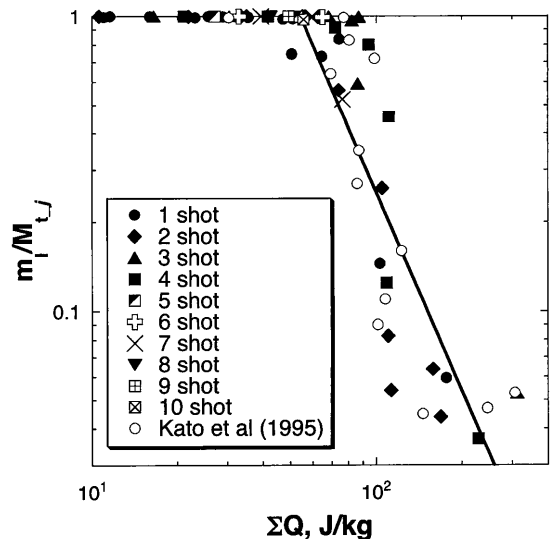


図1 積算エネルギー密度と規格化最大破片質量の関係．プロットは衝突回数の違いを示す．

※ Kato M. *et al.*, Icarus 113, 423-441, 1995.

高空隙な始原天体の衝突進化： 衝突キャビティ形成の実験的研究

○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,

近年の探査計画や地上観測装置の発展により小惑星や彗星といった小天体は非常に空隙率が高く、86%を持つ天体も存在していることが分かってきた。小天体表面の衝突地形は空隙率や天体強度によって変わることが考えられる。これまで石膏、ガラスビーズ焼結体、雪を使った空隙率 0-60%を持つ標的への衝突実験が行われ、クレーターの直径や深さが調べられている。それぞれの物質にできるクレーター直径や深さが空隙率の違いによって変わることは分かっているが、これら物質間の違いの比較は十分に行われていない。そこで我々はこれまでよりもさらに高い空隙率を持つ標的を用いて衝突実験を行い、このデータと様々な先行研究のデータを用いることで幅広い範囲の空隙率を持つ標的にできるクレーター形状(最大径、深さ)の整理を試みた。合わせてクレーター形成メカニズムを理解するために我々の実験では弾丸貫入中の標的の観察も行った。

標的は 80, 87, 94%の空隙率を持つガラスビーズ焼結体を用意した。弾丸にはチタン、アルミニウム、ステンレススチールからなる直径 1.0, 3.2mm の金属球、そして直径 3.2mm, 高さ 2.0mm の円柱形の玄武岩弾丸を使用し、秒速数キロメートルで衝突させる実験を行った。このときの衝突痕(トラック)の形状は弾丸直径程度の径が広がる細長いニンジン型となるものと、衝突点側に大きなキャビティを持つ太短いカブ型となるものが観察されており、初期発生動圧が弾丸の引っ張り強度の 20 倍程度となるところを境に2つの型に分かれる(日本惑星科学会 2012 年秋期講演会)。このカブ型のキャビティをクレーターとみなし、この最大径と深さを従来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、キャビティの最大径と深さに関する半経験式をそれぞれ得た。また、フラッシュ X 線装置を用いてキャビティが成長する様子を観察し、得られたフラッシュ X 線画像からキャビティの体積と密度分布を求め、時間とともにキャビティがどのように成長するのかについて調べた。さらに、過去に提唱されているキャビティ成長の理論モデルとの比較についても報告を行う。

カンラン岩ターゲットへの高速度衝突により 放出される破片の3次元形状分布

○島田玲¹、土山明²、荒川政彦³、道上達広⁴、門野敏彦⁵、松島亘志⁶、中野司⁷

¹大阪大学理学研究科、²京都大学理学研究科、³神戸大学理学研究科、

⁴近畿大学工学部、⁵産業医科大学医学部、⁶筑波大学工学研究科、⁷産業総合研究所

小惑星表面に存在するレゴリスは、小天体や宇宙塵などの物体の衝突により生成したものである。小惑星探査機「はやぶさ」により持ち帰られた小惑星イトカワ表面のレゴリス粒子の初期分析により、マイクロX線CTを用いて粒子の3次元形状分布が明らかにされた [1]。この情報からはやぶさ粒子の形成と進化を議論するには、高速衝突実験破片との比較が重要であり、カタストロフィック破壊による破片 [2][3]との比較がなされている[1,4]。しかし、衝突破片の形状に関する研究例は少なく、特にクレータリングによる破片やはやぶさ粒子サイズ(~100 μm)の破片の形状に関する研究は未だないため、はやぶさ粒子との比較にはこれらの研究が必要である。

本研究では、宇宙科学研究所ならびに神戸大学の2段式軽ガス銃を用いてカンラン岩（長野県鹿塩産）への高速度衝突破壊実験を行った。直径7 mmのナイロン球の弾丸を用い、ターゲットのサイズを10 x 10 x 5 cm^3 とした実験1と、直径1.6 mm、長さ2.5 mmのナイロン円柱の弾丸を用い、ターゲットのサイズを10 x 10 x 3 cm^3 とした実験2の2種類の実験を行った。衝突速度はともに4.6 km/sとした。

実験1ではカタストロフィック破壊となったのに対し、実験2ではクレータリングとなったことが確認された。実験1では発泡スチロール、実験2ではシリカエアロゲル(110 mg/cc)材を、エジェクタの回収材として用いた。このうち、2次破壊がほとんどないと考えられる、発泡スチロール表面に付着した破片、およびシリカエアロゲルに貫入せず反射してチャンバー底面に落下した低速度の破片それぞれを回収し、SPRing-8の高分解能マイクロCTを用いて粒子形状を得た。画像解析により1粒子毎にBounding Box法による長軸、中軸、短軸を求めた。サンプル数は実験1が58粒子、実験2が57粒子であり、サイズはそれぞれ50-200 μm のものを測定した。

まず、実験1・先行研究[2]と[3]との間でKolmogorov-Smirnov (K-S) 検定を用いて形状分布を比較し、カタストロフィック破壊実験同士での比較を行ったところ、これらは有意に異なるという結果（ともに $P=0.00$ ）が得られた。その原因としては、2次破壊の程度の違いや破片のサイズ、放出された際の速度条件の違いなどの可能性が考えられる。一方、実験1と実験2の形状分布を同様に比較したところ、これらは有意に異なり($P=0.00$)、カタストロフィック破壊とクレータリングで異なる分布を持つことが分かった。

はやぶさ粒子（57粒子）の形状分布[4]を本実験の結果と比較すると、実験1とは有意に異なるが（ $P=0.01$ ）、実験2とは有意に異なるとはいえない（ $P=0.10$ ）との結果が得られた。従って、はやぶさ粒子の形成に関して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。

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

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

[3] Fujiwara, A., et al. (1978) Nature 272, 602-603.

[4] 土山 明 ら (2013) 日本鉱物科学会, abstract.

斜め衝突時の衝撃圧縮段階の超高速撮像計測

黒澤耕介¹, 門野敏彦², 長岡洋一¹, 長谷川直³, 松井孝典¹

¹千葉工大 惑星探査研, ²産業医大 医, ³ISAS/JAXA

太陽系の固体惑星/衛星上の支配的な地形は衝突クレーターである。その大部分が円形であるが、実際には 45 度を中心とする斜め衝突によって形成される。これまでの実験データの蓄積から、斜め衝突の場合でも、最終的に形成されるクレーターのサイズをある程度予測 [e.g., Schmidt & Housen, 1987] することは可能である。しかし、著しい非軸対称性を示す衝突後の衝突体の挙動は未解明である。斜め衝突後の衝突体は衝突方向下流側に志向性をもって運動するため、惑星大気との激しい相互作用 [e.g., Shuvalov, 2009; Kurosawa et al., 2013] を起こしたり、特異な地形を作り出したり [Sugita & Schultz, 2002] と、惑星科学上興味深い。高速度衝突で引き起こされる全ての現象は、衝突体の運動エネルギーによって駆動される。現象を理解するためには、衝突点で何が起こるかを明らかにし、エネルギー分配がどのような物理過程で引き起こされているかを調べるのが有効である。ところが、実験室で衝撃圧縮段階を直接撮像するのは技術的に困難であったこと、斜め衝突は本質的に 3 次元的な現象であるため数値流体計算による検討もあまり行われていないことから、実験、理論ともに理解が進んでいないのが現状である。

今回は千葉工業大学惑星探査研究センターに新設された二段式軽ガス銃と、高速度ビデオカメラを用いて斜め衝突時の衝撃圧縮段階の直接撮像を試みた。我々の実験システムは真空中で 4.6 mm ϕ のプラスチック球を ~ 8 km/s まで加速し、100 ns/frame で衝突前後の衝突体の運動の一部始終を観測することができる。今回は標的に銅板を用いた。実験の結果、弾丸が標的に貫入していく最中に、弾丸飛来方向の下流側に強い自発光を放ちつつ、衝突方向の 2-3 倍で弾丸物質が放出されることがわかった。弾丸貫入中(いわゆる接触&圧縮段階)に物質の放出が始まっていることから、この超高速成分は "Impact jetting" [e.g., Melosh, 1989] で生成されていることが確定的となった。実験的な困難から斜め衝突による Impact jetting の観測例はわずかな数点報告されている [Gault et al., 1968; Schultz, Unpublished data] にすぎず、また理論予測はこの実験値を再現しないこと [Vickery, 1993] も報告されている。今後は衝突速度、角度などを系統的に変化させた実験を行い、Impact jetting 理論の見直しと再構築を計画している。

衝突エネルギー密度と玄武岩衝突破片の形状分布

○道上達広¹、島田玲²、土山明³、吉田明史¹、濱田貴大¹、長谷川直⁴¹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、特徴的で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 の比が平均で $2:\sqrt{2}:1$ になっていることである。この分布は、衝突速度、標的の形状など実験条件に依らず成り立つことが示されている (Fujiwara et al., 1977 : Capaccioni et al., 1984)。また近年の研究で、この法則は大きさ 200m 以下の高速度回転（自転速度 1 時間以内）の小惑星の形状、小惑星エロスの一部の岩塊の形状、小惑星イトカワの岩塊の形状でも成り立っていることが示唆されている (Michikami et al., 2010)。しかしながら、過去の実験では、標的が単位質量あたりに受ける弾丸の衝突エネルギー（衝突エネルギー密度）が 4000J/kg 以上の衝突破片形状しか測定されていない。衝突エネルギー密度が小さいと、破壊の様式が変わるので、破片の形状分布が変わる可能性がある。そこで本研究では、衝突エネルギー密度を 200J/kg から 9000J/kg と広い範囲で変えて衝突実験を行い、衝突エネルギー密度と衝突破片の形状分布の関係について調べることにした。

実験はJAXA宇宙科学研究所にある2段式軽ガス銃を使用し、弾丸に直径7mm、質量0.218gのナイロン球を用いた。標的の材料として密度2950kg/m³の玄武岩を用い、一辺が5cmから15cmの立方体に対して衝突実験を11ショット行った。弾丸の衝突速度は1.6km/sから7.0km/sの範囲で行った。衝突の際の真空度は40Pa以下で、2台の高速度カメラ（共に2000コマ/秒）を互いに垂直な方向から撮影することによって、放出された破片の様子を調べた。衝突破壊によって生じた破片は、大きさが4mm以上のものをノギスで直接測定した。得られた破片形状分布は、衝突エネルギー密度が小さいほど、 $a:b:c = 2:\sqrt{2}:1$ の普遍的な分布と異なる傾向が見られる。この結果が小惑星に応用できる場合、小惑星表面の破片形状を調べれば、その小惑星の母天体の大きさや衝突履歴を予測できる可能性がある。より詳細な実験結果、考察について本学会で発表する。

参考文献

- Capaccioni, et al. (1984) Nature 308, 832-834.
Fujiwara, et al. (1978) Nature 272, 602-603.
Michikami, et al. (2010) Icarus 207, 277-284

クレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究： Wada's method の応用

○辻堂さやか¹, 荒川政彦¹, 和田浩二², 鈴木絢子³

¹神戸大学大学院理学研究科, 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

<はじめに>

衝突クレーター形成に伴うエジェクタの速度分布を理解することは、小惑星表層の衝突進化、微惑星の衝突集積過程を考える上で重要である。しかし、その実験・解析方法は非常に煩雑で手間がかかるか、高価な観測装置を必要とするため研究の妨げとなっている。そこで、本研究ではエジェクタ速度分布を比較的簡便に解析できる新しい手法を提案する。そして、この手法の精度や適応範囲について調べるため、様々な衝突条件の下で撮影したエジェクタカーテンの画像を、新しい手法を含めた3つの方法で解析し、その結果から、それぞれの解析方法の長所と短所を検討する。さらに、これらの解析手法を用いてエジェクタ速度分布のターゲット物質、弾丸物質依存性についても考察する。

<実験・解析方法>

標的粒子には、直径 $500\mu\text{m}$ の石英砂、直径 $500\mu\text{m}$ または $100\mu\text{m}$ のガラスビーズ球の3種類を用いた。それらの石英砂またはガラスビーズを用いて準備した標的試料の空隙率はそれぞれ、44.7%、41.4%、37.6%である。標的を設置する真空チャンバー内の圧力は、 $<10^3\text{Pa}$ とした。また、弾丸には密度の異なる5種類の弾丸（ナイロン、ガラス、アルミナ、ジルコニア、鉄）を用いた。弾丸直径はすべて 3mm であり、この弾丸を直径 10mm のサボを用いて、一段式軽ガス銃により加速した。標的への衝突速度(v_i)は、 $24\sim 217\text{m/s}$ とした。

まず、放出された個々の標的粒子の軌跡を計測することによってエジェクタ速度分布を求めた（個別粒子計測法）。そのために高速デジタルビデオカメラを使用して、撮影速度 $2000\sim 10000$ コマ/秒で粒子放出の様子を撮影した。取得したビデオから >30 個の粒子の軌跡を追ひ、それぞれの粒子の放出位置と放出速度、そして放出角度の関係を求めた。

次に、エジェクタカーテンの形状を観測することによって、エジェクタ速度分布を求めた。まず、エジェクタカーテンの成長初期におけるネック部分の形状を計測することにより速度分布を求めた（ネック計測法）。さらに、ある高さでの水平面におけるエジェクタカーテンの成長速度とエジェクタカーテン角度を計測することによって速度分布を求めた（和田の方法：Wada's method）。解析後、ネック計測法及び和田の方法で求めた速度分布を、個別粒子計測法により得られた速度分布と比較した。

<結果>

ネック計測法で得られた速度分布は、個別粒子計測法により得られた速度分布と衝突点からの距離が $0.3\sim 1$ クレーター半径規格化距離(x/R_c)において良い整合性を示した。一方、 $0.1\sim 0.3 x/R_c$ では、ネック計測法で求めた速度が2倍程度速くなった。ネック計測法では、個別粒子計測法で求めた速度分布よりも広い範囲での速度分布が連続的に求まり、クレーターリム付近までのデータを得ることができた。その結果、エジェクタ速度分布の経験式を次のように求めることができた。 $v_e/v_i = 1.4 \times 10^{-3} (x/R_c)^{-2.2}$ -式① クレーターリムでのエジェクタ速度は、約 28cm/s となった。一方、和田の方法で得られた速度分布は計測する水平面の高さによって求まる範囲が大きく異なり、適用できる範囲も高さによって異なることがわかった。高さ 7mm において和田の方法を適用すると、 $0.6\sim 0.7 x/R_c$ において式①と一致した。また高さ 1mm では高さ 7mm より広い範囲、 $0.5\sim 0.8 x/R_c$ で、式①とよい一致を示した。それ以外の衝突点距離では、式①とは大きくはずれる結果となった。今後、和田の方法の適用範囲について、さらに詳しく調べていく予定である。

C 型小惑星含有鉱物における太陽風プロトンの影響

○仲内悠祐^{1,2}、安部正真¹¹総合研究大学院大学、²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

近年の月探査において太陽風起源の -OH 基や、 H_2O の存在が明らかになった[Pieters et al. 2009]。このことは、水の蒸発や含水鉱物が変成する程度にまで高温になると考えられている地球近傍小惑星においても、-OH 基や H_2O が生成・保持されることを示唆している。しかし、小惑星において月面と同様に -OH 基や H_2O が生成するのかは分かっていない。

はやぶさ 2 が探査を計画している C 型小惑星では、スペクトル形状が宇宙風化作用により S 型小惑星とは逆の右下がり(青化)を示すことが観測から統計的に示されており、宇宙風化の原因が S 型小惑星と異なることが示唆されている[D. Nesvorný, 2005]。Murchison 隕石に対するマイクロインパクトの宇宙風化作用を模擬したレーザー照射実験では、反射スペクトルの暗化と青化(傾きの変化)が報告されている[Matsuoka, JPGU, 2013]。

マイクロインパクトによる宇宙風化作用では反射スペクトル全体の傾きを変化させる傾向がある。一方、反射スペクトルの形状は小惑星表面に存在する物質と関係しているため、太陽風による -OH 基や H_2O の生成では反射スペクトルの吸収特徴の形状を変化させる可能性がある。

はやぶさ 2 搭載近赤外分光計(NIRS3)は -OH 基や H_2O に由来する吸収特徴がある赤外波長領域 3 μm 付近に狙いを絞って観測し、小惑星の持つ水の量の推定や、小惑星表層鉱物を隕石タイプと対応づけることを目標としている。NIRS3 の目的を達成するために、NIRS3 の観測で得られる反射スペクトルから宇宙風化や太陽風起源の -OH 基や H_2O などの影響を受けていない情報へ変換することが重要である。

CI コンドライトの主成分である smectite グループの鉱物は結晶構造中に -OH 基を持ち、層間水として H_2O を持つ。CM コンドライトの主成分である serpentine グループの鉱物は、結晶構造中に -OH 基を持つが H_2O を持たない。smectite グループと serpentine グループの鉱物の反射スペクトルには 3 μm 帯の吸収特徴には H_2O に由来する大きな違いがある。この吸収形状は、鉱物の推定だけでなく小惑星の含水量の算出にも使用される。そのため、NIRS3 で得られる小惑星極表層のスペクトルを、実験から得られた鉱物ごとのスペクトル形状の変化量や、-OH 基や H_2O の生成量を用いて、風化以前のスペクトル形状へ補正し、風化を受けていない物質の含水量を算出できるようにする。

本研究では、C 型小惑星に存在すると考えられる鉱物に、太陽風のエネルギーを模擬した水素イオンビームを当て、-OH 基や H_2O 生成が生成されるのかを近赤外反射スペクトルの測定によって検証する。サンプルには、結晶構造中に -OH 基しか持たない serpentine グループの antigorite を用いる。イオン照射には、若狭湾エネルギー研究センターのマイクロ波イオン源イオン注入装置を用いた。10keV の H_2^+ を、約 10^{18} ion/cm² 照射した。この量は水素イオンの太陽風照射年代に換算すると約 600 年となった。

O8-11

炭素質隕石の衝突蒸発：室内実験の結果と引き起こされる環境変動

○大野 宗祐¹, 門野 敏彦², 境家 達弘³, 黒澤 耕介¹, 重森 啓介³, 弘中 陽一郎³, 藪田 ひかる³, 近藤 忠³, 山中 高光⁴, 杉田 精司⁵, 松井 孝典¹

¹千葉工業大学惑星探査研究センター²産業医科大学³大阪大学⁴カーネギー研究所⁵東京大学

K/Pg 衝突の衝突天体は炭素質コンドライト組成であったと推定されているが、その衝突蒸気が引き起こす環境変動はこれまで詳細に議論されてこなかった。本講演では、我々が阪大レーザー研で行った、世界初となる宇宙速度における炭素質隕石の衝突蒸発・ガス分析実験の結果を紹介し、放出ガスにより引き起こされる環境変動について議論を行う。

「ガラスビーズ焼結体の熱伝導率測定と 微惑星熱進化への応用」

○津田 彰子¹, 小川 和律¹, 坂谷 尚哉², 飯島 祐一³, 田中 智³,
荒川 政彦⁴, 本田 理恵⁵

¹ 東京大学, ² 総合研究大学院大学, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 神戸大学, ⁵ 高知大学

原始太陽系円盤内ではダストが集積して微惑星が形成されたと考えられている。隕石の母天体を微惑星の生き残りと考えたとき、微惑星のサイズや形成年代を探る方法の一つとして、隕石試料に残った熱変成の証拠(閉鎖年代や冷却速度)と微惑星熱進化モデル計算が合うように制約する方法がある。このように、微惑星の熱進化を知る事は重要であり、微惑星構成物質の熱伝導率はその熱進化を解明する上で最も重要パラメータの一つである。

しかし、熱進化過程を経て粒子同士がわずかに接着したダスト焼結体の熱伝導率は測定例が少なく、パラメータ依存性も分かっていない。例えば Henke ら (2012) は、微惑星内部の温度上昇によるダストの焼結を考慮した微惑星熱進化モデルを計算した。彼らの計算では、焼結による熱伝導率の変化を空隙率のみの関数としており、焼結体の熱伝導率の実測値は用いていない。一方で坂谷ら (2012) は粉体の熱伝導率と圧力の関係を測定している。その結果、空隙率が一定である条件で熱伝導率と圧力には正の相関があることが分かった。これは、圧力によって粉体間の接触面積が増加したためと考えられる。このように、空隙率ではなく接触面積に対する熱伝導率の変化を知る事が重要である。以上のことから、本研究では、微惑星の熱史の推定に焼結の効果を取り入れることを目的として、ダストの擬似物質としてガラスビーズを用いて、その焼結体の熱伝導率を真空中で測定した。特に、接触面積を反映するパラメータとして、焼結体のネックサイズの熱伝導率に対する依存性に注目した。

接触熱伝導率の測定にはヒーター線を加熱したときのその温度上昇率から熱伝導率を推定する line heat source 法を用いた。ヒーター線から熱が伝わりやすくするために、ヒーター線をガラスビーズ内に埋め込んだまま焼結させた。一方、焼結体のネックサイズは、ガラスビーズ焼結体を一粒ずつ分離し、割れ跡をデジタルマイクロスコープを用いて測定した。その際、傷跡とネック跡を区別するために、割れ跡のサイズ分布から焼結体表面で観察した傷跡の分布を差し引いた。

実験の結果、ネック半径の増加によってガラスビーズ焼結体の熱伝導率は直線的に上昇することがわかった。このときの空隙率は焼結度に寄らず、約 40% と一定であった。よって、焼結後の熱伝導率は空隙率ではなくネック半径に大きく依存することがわかった。つまり、少なくともネック半径/粒子半径が 0.22 より小さい焼結の初期段階では、微惑星の熱進化に焼結の効果を取り入れる際には空隙率の減少による熱伝導率の増加より、ネックの成長による熱伝導率の増加を考える方が本質的である。

参考文献

- Henke et al. (2012), *Astronomy & Astrophysics*, 537, A45
Sakatani et al. (2012), *ICARUS*, 221, 1180-1182

はやぶさ NIRS/LIDAR データの再解析で分かった 小惑星 Itokawa の宇宙風化と重力傾斜の相関

○阿部 新助¹, 北里 宏平², 平田 成², 安部 正真³, NIRS/LIDAR チーム

¹ 日本大学理工学部 航空宇宙工学科, ² 会津大学, ³ ISAS/JAXA

近年、NEAR-Shemake、Galileo や「はやぶさ」探査機により、小惑星表面の宇宙風化が確認され、S-type 小惑星の近赤外スペクトルは、Q-type 小惑星が宇宙風化を受けて進化したものとして理解できることが分かってきた。特に、「はやぶさ」が持ち帰った (25143) 小惑星イトカワのサンプルからは、ナノサイズの鉄・硫黄・マグネシウムがサンプル表層に偏析していることが明らかになった (Noguchi et al., 2011)。

地球上で見つかっている隕石の約 8 割は、普通コンドライトであり、その可視-近赤外線領域の反射スペクトルは、Q-type 小惑星のそれに対応する。一方、地球近傍小惑星 (NEO) は隕石の起源であると考えられているが、Q-type 小惑星は約 2 割に過ぎず、S-type 小惑星が多くを占めるという矛盾がある。この矛盾を解消する説として、地球に接近する S-type の NEA が、地球の潮汐力やバンアレン帯の影響などで風化した表面物質が移動することで、Q-type の NEA へリセットされる説が提唱された (Binzel et al. 2010; Nesvorn et al. 2010)。

小惑星イトカワ表面の宇宙風化の存在は、「はやぶさ」搭載・赤外線分光器 NIRS(波長 0.76-2.1 μm)(Hiroi et al. 2006; Kitazato et al. 2008), および地球帰還サンプルによって示されてきた。今回、レーザー高度計 LIDAR(波長 1.06 μm) で得られた未公表アルベドデータ (170 万点データ) も含め、2012 年に最終更新された探査機「はやぶさ」の位置とフット・プリント情報をもとに、赤外線分光器 NIRS(12 万個のスペクトル) の 0.95 μm の吸収から得られた宇宙風化度と、小惑星を密度一定と仮定して得られた局所重力傾斜 (Abe et al. 2006) の関係の再調査を行った。その結果、両者には明瞭な相関があることが分かった。つまり、傾斜が無いミューゼスの海や相模原領域の風化度が高く、急傾斜地域やクレーター周辺は風化度が弱いことを示す結果となった。これは、表層物質が剥がれて風化を受けていない、本来のフレッシュな物質が露出していると説明できる。表面物質の移動の原因としては、(1) 微小隕石衝突、(2) 惑星接近による潮汐力などによる振動・伸縮で、急傾斜面が地滑りを起こして、宇宙風化が部分的にリセットされたことが考えられる。小惑星イトカワ上に存在する衝突クレータの存在 (Hirata et al. 2009; Michel et al. 2009) や、イトカワを起源とする隕石火球の同定 (Ohtsuka et al. 2011) などからは、(1) の説が支持される。

JAXA/ISA 小惑星サンプルリターン・ミッション「はやぶさ 2」搭載の LIDAR は、探査機からターゲット小惑星 (162173) 1999 JU3 表面までの距離計測に使われるナビゲーション機器としてだけでなく、地形、アルベド、浮遊ダスト、重力、形状の計測などにも使われる。「はやぶさ 2」搭載の LIDAR には、「はやぶさ初号機」には無かった、送信・受信光の双方を同時にモニターする機能があり、波長 1.06 μm における LIDAR によるアルベド計測を精密に行うことができる。「はやぶさ 2」の衝突装置が形成する人工クレータの形成前後の風化度の違いにも注目したい。はやぶさ初号機で得た経験を生かし、「はやぶさ 2」で得られる C タイプ小惑星の宇宙風化と地形の関係の調査へ結びつけて行きたい。

多バンド画像を用いたイトカワ表面スペクトルの 高空間分解能解析

○古賀すみれ¹, 杉田精司¹, 鎌田俊一², 石黒正晃³

¹東京大学, ²北海道大学, ³ソウル大学

小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された可視分光カメラ AMICA は、イトカワの全面を可視 7 バンドで撮像した。近赤外分光計 NIRS や AMICA のデータに基づく先行研究から、イトカワ表面物質の宇宙風化度には大スケール (10m~100m 規模) での不均一性が存在することが示されているが [e. g., 1, 2]、小スケールでの物質不均一性は未解明である。はやぶさ探査においてはサンプルが採取され、その中に含まれる鉱物種や含有割合が分析されているが [e. g., 3]、小スケールの不均一性の評価は、サンプル分析結果の解釈に非常に重要である。本研究では高精度の画像校正と位置合わせをおこない、AMICA 画像の高い空間分解能を利用して小スケール (m 以下) での不均一性について解析した。

ほぼ同じ位置から撮像された多バンドの画像セットを複数用い、高度画像校正、立体形状モデルを用いた位置合わせをおこない高精度の表面反射 スペクトル分布を得た。多様なメインベルト小惑星はその反射スペクトルに対する主成分解析 (PCA) 結果の主成分 (PC) スコアをもとに PC1、PC2 平面上で分類されている [e. g., 4, 5]。そこで、イトカワ表面のスペクトルに PCA を行い、イトカワ上でのスペクトルの PC を抽出してその意味やメインベルト小惑星 PC との類似性を考察した。また、面的に得られたイトカワ表面スペクトルをメインベルト小惑星 (SMASS II、NIRS の地上観測データを使用) の PC 平面上にプロットすることでイトカワ上のスペクトル分布をメインベルト小惑星のそれと比較して分布の特徴を議論した。物質の議論に結びつけるために、隕石や鉱物のスペクトルを入れた PCA も行った。

表面スペクトル不均一性の第 1 主成分 (PC1) (図 1) は、スペクトルの形 [6] や宇宙風化の他の指標 [2] との比較から宇宙風化の度合いであることが強く示唆された。先行研究と調和的である。メインベルト小惑星との比較では、イトカワ上の広がり広義 S 型の広がりに対応した。本研究ではイトカワ全球及び近接画像の PC スコアマップを得た (図 2)。

隕石や鉱物との比較による主成分の物質的な解釈からサンプル採取地点を含む各地点での物質特性が評価される。

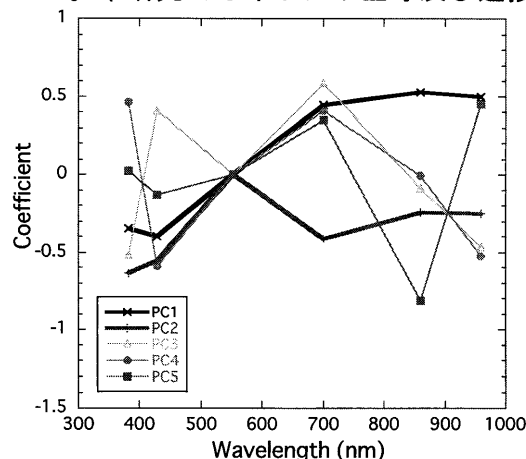


図 1 スペクトル主成分係数

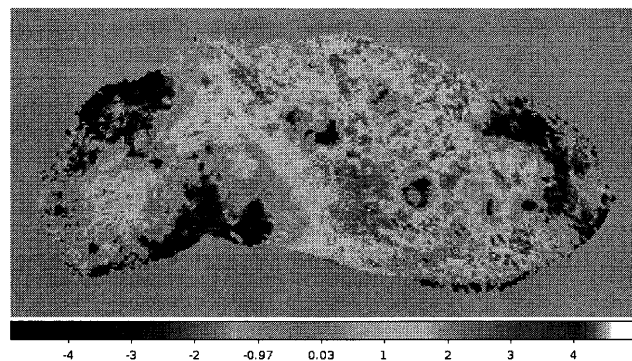


図 2 主成分 1 スコア

参考文献 : [1] Hiroi, T. et al. 2006. *Nature* 443, 56-58. [2] Ishiguro, M. et al. 2007. *MAPS* 46, 1791-1800.

[3] Tsuchiyama, A. et al. 2011. *Science* 333, 1125-1128. [4] Bus, S.J. and Binzel, R.P. 2002. *Icarus* 158, 106-145.

[5] Bus, S. J. and Binzel, R. P. 2002. *Icarus* 158, 146-177. [6] Sasaki, S. et al. 2001. *Nature* 410, 555-557.

イトカワ表面の礫の姿勢・サイズ・形状測定による 表層流動性の考察

○青木 隆修¹, 中村 昭子¹, 平田 成²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²会津大学コンピュータ理工学部

小惑星イトカワ表面には大小様々な礫が存在する。礫の中には表層付近の礫層に一部分が埋まっているものもある。このような礫の姿勢には礫層の摩擦特性が影響を与えていると考えられる。本研究では表面付近の礫層の流動性を推定するため表面の礫の形状を画像から測定し、礫層の内部摩擦角を推定した。また、アルミ板と粉粒体でイトカワ上に存在する、際立って細長く、地表から突き出た礫とその周囲の礫層を模擬した実験を行い、その礫が安定して立っていられる条件を推定した。

粒子層の内部摩擦角は粒子形状の指標である円形度に依存していると報告されている（吉村 2002 年）。そこで、はやぶさよるイトカワの近接画像から、表面の礫の形状を測定した。その結果、表面の礫の円形度は衝突実験で生じた玄武岩の破片とほぼ等しいかやや小さな値をとることが分かった。このことからこれらの礫は、イトカワが再集積後、摩耗をあまり受けていないことが推測される。また、粉粒体において円形度と内部摩擦角の間に相関関係があること、その関係は空隙率にも依存することが実験的に示されている（吉村 2002 年）。その結果と今回測定した礫の円形度から、イトカワの表面付近の空隙率が 50%であると仮定すると表層の礫層の内部摩擦角は、40~50 度と見積もられた。

また、十分大きな容器にイトカワ表面の礫層に見立てた粉粒体を満たし、アルミ板の一部を倒れない程度に傾けながら埋め、板が安定に立つ深さ・角度範囲を調べた。さらに、一部を埋めた板の上面をゆっくり水平に一定速度で引っ張り、板が倒れるときの深さと角度を計測する実験も行った。これらの結果は土圧の理論によって説明できることが確認できた。今後、重力の方向と斜面の方向が異なる場合についてさらに検討を行う。

これらの結果をもとにイトカワ表層の礫の流動性について議論する。

鉛直振動下の粉体層の対流構造とそのスケーリング

○山田智哉, 桂木洋光

名古屋大学 環境学研究科

小惑星イトカワの表面には, 天体衝突起因の振動により表面の砂礫が流動化・分級した痕跡が見つかっている[1]. このイトカワ表面の分級の原因として, 振動を加えた粉体のサイズ分離現象であるブラジルナッツ効果 (BNE; Brazil nut effect) の可能性が示唆されている. BNE の駆動力としては, 粉体振動層に生じる粉体対流が知られている[2]. これらの現象について, これまで多くの室内実験や数値計算が行われてきた[3-6]. しかし, イトカワのような微小重力環境で砂礫が分級するために必要な時間スケールを見積もることを目指した定量的な粉体振動層の研究はほとんどない. そこで, 室内実験で粉体対流の対流速度の鉛直成分 V_z を測定し, V_z の満たすスケーリング関係を次元解析により求めた. 得られたスケーリング関係より, 対流速度の重力依存性を定量的に議論することを試みた.

実験では粉体試料として直径 0.8 mm のガラスビーズを用いた. 粉体を入れる容器は内径 75 mm の円筒形アクリルセルを使用し, ガラスビーズを 50 mm 積層させ, 電磁式の振動装置 (EMIC 513-B/A) で容器全体に鉛直振動を加えた. 円筒容器壁面での粉体の流れ場を高速度カメラ (Photoron SA-5) により, 1,000 fps で撮影し, 対流速度場を PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて算出した. 振動パラメーターとしては, 重力加速度で無次元化した最大振動加速度 Γ ($\Gamma = A(2\pi f)^2/g$; A : 振幅, g : 重力加速度) を 2 から 6 の間で, 振動数 f を 10 Hz から 300 Hz の間で変化させた. 得られた動画像と対流速度場のデータより, グローバルな対流構造と対流速度の Γ および, f 依存性を調べた.

f の増加によりグローバルな対流構造が, $f \sim 50$ Hz 付近で, 粉体層全体が回転するロール状態から, 円筒容器中央で上昇し容器壁面で下降するトーラス状ロールに変化することが分かった.

トーラス状対流ロールが発生する振動パラメーターの領域のデータについて系統的な次元解析を行った. 結果, V_z の最大値 V_{zmax} は $V_{zmax} \propto (\sqrt{gd})^{0.37} (2\pi Af)^{0.63}$ とスケールされることが分かった. このスケーリング関係から V_{zmax} と g に着目すると $V_{zmax} \propto g^{0.19}$ という関係が得られる. この結果をイトカワのような微小重力環境下に外挿することを考えた. 地球の重力加速度の値: 9.8 m/s², イトカワの重力加速度の値: 1.0×10^{-4} m/s² を用いると, イトカワ上の V_{zmax} は地球上の V_{zmax} の 1/10 になることが示唆された. V_z の g 依存性が弱いこと, 重力が 5 桁小さい微小重力環境でも対流速度は 1 桁の減少にとどまっている.

[1] H. Miyamoto et al, Science 316, 1011 (2007); [2] J. B. Knight et al, Physical Review Letters 70, 3728-3731 (1993); [3] A. Garcimartin et al, Physical Review E 65, 031303 (2002); [4] K. M. Aoki et al, Physical Review E 54, 874-883 (2002); [5] N. Murdoch et al, Physical Review Letters 110, 018307 (2013), [6] C. Gütteler et al, arXiv: 1304.0569v1 (2013).

はやぶさ 2 の統合サイエンスと運用戦略

○渡邊誠一郎^{1,2}、小林直樹²、藤本正樹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 年末の打ち上げを目指して開発が進められている。氷微惑星の破片天体と推定される C 型の地球接近小惑星 1999 JU₃ にランデヴーし、多バンドフィルタ分光可視カメラ・近赤外分光計・中間赤外線カメラ・レーザ高度計などによるリモートセンシング観測と小型衝突装置（人工クレータ生成と分離カメラによる衝突イジェクタ撮像を予定）・小型ランダ・小型ローバによるアクティブ表面探査、さらにはサンプルによる最大 3 ヶ所からの試料採取によるサンプルリターンなどを行う予定である。

観測好期に 1999 JU₃ の地上観測が行われてきたが、そのスペクトルや自転軸の向きは未だ明確になっていない。運用に必要な情報は、質量（重力場）、天体形状、自転ベクトル（軸の向きと角速度）、表面地形・斜度分布、表面温度分布、表面状態であり、ミッションフェーズ前期にこれらを決める必要がある。これらの情報のもとに運用計画をたて、科学的価値と工学的安全性を両立させる着地点を選定して、タッチダウンを実施しなくてはならない。ただし、自転軸が横倒しに近い場合、全球の様子を把握するのに最悪の場合、4 ヶ月程度の時間を要するため、部分的な観測から運用計画を立案していく必要が生じる。

科学的な見地からより価値の高い試料を得るためのタッチダウン点選定に必要なのは、水質変成や熱変成の程度と不溶性有機物の存在量である。また、宇宙風化の影響が少ない地域が望ましい。水質／熱変成の程度は反射スペクトルのうち波長 $0.7\mu\text{m}$ 帯および $3\mu\text{m}$ 帯の吸収の深さや形状から推定でき、不溶性有機物（IOM）の量は $0.55\mu\text{m}$ の絶対アルベドなどから、宇宙風化度は可視から近赤外の波長域でのスペクトルの傾きなどから推定できる。IOM が多く水質／熱変成が少ない地域は始原性が高く原始惑星系円盤のプロセスが保持されている可能性があるとして推定される。一方で水質変成は受けているが熱変成度は低い地域は鉱物熱水反応による有機物進化を検証する観点からは価値が高い。表面上で特色の違う複数地点からサンプリングすることによって天体上の多様性を明らかにすることができると期待される。なお、工学的制約から少なくとも数十 m 四方の平坦な地形で、大型のボルダーの存在しない表面であることが必要である。基本的には細かい粒子に覆われた平原が着地候補となるが、平坦で広大な岩盤であれば着地／試料採取は可能と考えている。

小型搭載型衝突装置（SCI）による人工クレータの生成は、スケーリング則確立に向けた宇宙衝突実験としての科学的価値も高いが、地下の物質がイジェクタとして表面に放出されるため、宇宙風化の少ない試料を得る手段としても期待されている。ただし、SCI の衝突位置の誤差円はかなり大きいため、狙った地域にクレータを作ることは困難である。

小惑星 1999JU3 の重力および軌道推定について

○池田人¹, 松本晃治², 大坪俊通³, 並木則行⁴, 津田雄一¹, 三榎裕也¹, 吉川真¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²国立天文台, ³一橋大学, ⁴千葉工業大学

「はやぶさ 2」ミッションでは小惑星 1999JU3 滞在中に取得された追跡データ (RARR), 光学データ, レーザー測距データを用いて探査機の精密な軌道を推定するとともに, 小惑星の重力推定を実施する。また, 探査機の小惑星に対する相対位置情報と追跡データ (2-way range, ΔDOR), 小惑星の光学・レーダー観測データを組み合わせて小惑星の軌道推定も行う予定である。

はやぶさ 2 探査機は NEAR や Dawn のような安定した長期間の周回軌道には投入されず, 小惑星と探査機の距離を軌道制御によりある程度の範囲に保つというホバリング方式で科学観測を行う。本方式では比較的短い時間間隔で軌道制御が実施されるために, 通常重力場推定のように長期間にわたる追跡データを用いたロングアークの軌道決定から重力場を推定することは困難である。小惑星の重力推定については「はやぶさ」で実施した方法を発展させる方向で検討している。高度の比較的高い部分で, まずは粗精度の質量を, 高度が低下するに従って重力加速度の影響が大きくなっていくため, この部分で質量推定のための弾道飛行運用 (推進系運用無し) を実施し高精度な質量を推定する方針である。さらに, 複数回の弾道飛行運用に加え, タッチダウンやタッチダウンリハーサル運用など, 表面のごく近傍の領域で取得した観測データを統合して重力場推定を試みる予定である。

探査機の軌道情報を介した小惑星の軌道改良についても検討を実施している。改良手法としては, 事前観測で推定した小惑星の軌道要素をアプリアリの情報として, 地上で計測した探査機の追跡データ (2way range, ΔDOR) にオンボードで取得したカメラ画像と LIDAR で求めた相対位置情報を組み合わせて, ランデブー予定期間の約 1.5 年アークの軌道決定を行う方針である。小惑星の軌道進化に大きな影響を与えるものとして Yarkovsky 効果があり, 「はやぶさ 2」においても 1999JU3 の軌道を精密に推定することで Yarkovsky 効果について議論ができないか検討中である。小惑星の比較的長期間の軌道変化を評価するために, ランデブーフェーズで取得されたデータだけでなく, その前後に取得されたアストロメトリ (光学, レーダー) の情報も複合して長期間 (数十年単位) の軌道決定も行う予定である。

本発表では, 小惑星 1999JU3 の重力および軌道推定に関する解析方針と事前検討の結果について報告する。

CV コンドライト及び CR コンドライトの水質変成について

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

¹早稲田大学・²東京大学・³千葉工大・⁴RESTEC・⁵東北大・⁶ブラウン大・⁷会津大

小惑星での水質変成は、母天体の進化を知る上で重要なプロセスの一つである。しかしながら炭素質コンドライトの中でも、CV コンドライト及び CR コンドライトの水質変成については不明な点が多い。

アメーバ状オリビン集合体(AOA)は、殆どの炭素質コンドライト中に見られる数 mm から数 cm 程度の集合体である。AOA は、olivine と Ca-Al に富む細粒の鉱物から構成されているため、2 次変成の良い指標と成り得る。本研究では、CV・CR 隕石中に含まれる AOA に着目し、隕石母天体の 2 次変成の程度について考察した。

CV コンドライト隕石は、様々な程度の水質変成・熱変成を示し、Reduced, 2 次変成を経験した Oxidized Bali と Oxidized Allende の 3 つのタイプに分けられる[1]。CV コンドライトに含まれる AOA では、熱変成が進むにつれ、olivine 中の fayalite 量が増加する(Allende; Fa₅₋₃₅, reduced CVs; Fa₀₋₁₀)。一方、水質変成を経験した隕石では fayalite 量の増加は見られない(Kaba: Fa₀₋₁₀)。水質変成を受けた AOA では、metal の大部分は magnetite に酸化されており、anorthite は部分的に層状ケイ酸塩に置き換えられている。またクラックに沿って自形の fayalite や hedenbergite が成長しており、これらの相は流体を介して成長したことを示唆している。CR コンドライトでは、martix 中には層状ケイ酸塩が多く存在しているのに対し、AOA では magnetite/metal 比は小さく、水質変成の影響も限られている。

また、CV コンドライト隕石のそれぞれのタイプについて、UV-NIR 拡散反射スペクトル測定を行った。熱変成を受けた Allende(Oxidized Allende; 粉末)、水質変成を受けた Y-86009(Oxidized Bali; 岩石チップ)、reduced と oxidized Allende type の中間的な特徴を示す Y-86751(岩石チップ)の初期分析結果からは、以下の特徴が見られた。(i)岩石チップ表面分析でも、粉末試料分析[2]と同様に、olivine に起因する吸収(1-2 μ m)を確認できる。(ii)岩石チップの反射スペクトルは、Allende 隕石の結果[3]と同様、粉末試料に比べて傾きが小さい。(iii) Y-86009 では、olivine に起因する吸収が目立たず、平坦なスペクトルを示す。

Y-86009 では、他の二つに比べて、水質変成鉱物である magnetite が多く含まれている。Magnetite 量は反射スペクトルに大きく影響すること[4]を考慮すると、本結果で得られた平坦なスペクトルは magnetite 量を反映しているのかも知れない。CV 隕石のスペクトルの解釈において、表面状態・かんらん石の存在に加え、magnetite の量も影響している可能性がある。今後の研究で、より詳細な分析を行う予定である。

[1] Weisberg M.K. et al., 1997, MetSoc 60, #5156. [2] Cloutis E.A. et al. 2012, Icarus 217, 389-407
[3] 廣井ら, 2013, 日本惑星科学会秋季講演会予稿集 [4] Miyamoto M. et al., 1982, Proc. Symp. Antarctic Meteorites 7, 291-307.

09-08

炭素質コンドライトの可視・近赤外反射分光特性 の「はやぶさ2」ミッションへの応用

○廣井孝弘¹・佐々木晶²・小島秀康³・今栄直也³

¹ブラウン大学地学科・²大阪大学宇宙地球科学専攻・³極地研究所隕石ラボ

我々は2010年以来、国立極地研究所に所蔵されている隕石試料の可視・近赤外分光サーベイを継続しており、月・火星・HED隕石を終えた後、2012年11月からは炭素質コンドライト隕石に取り組んでいる。炭素質コンドライトは、日本が2014年末に打ち上げ予定の「はやぶさ2」の目標天体であるC型小惑星1999JU₃を構成している物質に近いものと考えられるので、その研究はミッションの成功のためにも重要である。今回は、炭素質コンドライト分光サーベイの結果を含め、炭素質コンドライトの物理形状や宇宙風化が可視・近赤外反射スペクトルに与える影響と、その「はやぶさ2」ミッションへの応用を考察する。

我々のサーベイでは、極地研の隕石カタログに記載された炭素質コンドライト試料のうちから質量・新鮮・表面形状の面で反射スペクトル測定に適するものを選んでいく。今までに毎回10個の隕石試料の分配を2度受け、その内訳は3個のCI/C1および17個のCMコンドライトであった。それらの試料を非破壊で各チップの上の1~2点を選び、約2~3mm程度の領域の双方向可視・近赤外反射スペクトルを0.25-2.5ミクロンの波長範囲で測定し、2.5ミクロン以上15または25ミクロンまでの波長はFT-IR分光計で測定した。

測定された3つのCI/C1コンドライト試料は全て、紫外吸収の欠如と3ミクロン吸収の弱さから、熱変性を受けたものと考えられ、表面に白くコーティングしている地球風化も分光特性から認識された。17個のCMコンドライト試料のうち、9個からは特定の蛇紋石の鉄二価および三価イオンに起因するといわれる0.7、0.9、1.1ミクロンの吸収帯を示した。また、カンラン石の3つの吸収帯を示す点が3つ見出された。赤外域で波長が長くなるにつれて表面形状の効果が大きくなるが、はやぶさ2のNIRS3の分光測定の対象である1.8~3.2ミクロンの波長範囲を含む、3ミクロン吸収帯の波長程度までは十分に試料の組成が吸収帯として表れていると考えられる。

一方、マーチソンやアエンデのように豊富にある隕石では、様々な物理状態の試料の測定がなされており、単純に言えば、粒系が大きくなるほどスペクトルが右上がりから右下がりになっていく傾向がある。それは他の種類の隕石でも同様な傾向があると考えられ、今後、小惑星表面での宇宙風化によるスペクトルの変化とも合わせて、物質組成とその他の要素をどうやってどこまで分別探査できるかが課題となってくるであろう。

はやぶさ2ミッションは、そのような炭素質コンドライトの遠隔探査の分野で手付かずになっていた宿題を済ませるよい機会でもある。

O9-09

はやぶさ 2 の試料採取地点の決定に向けた隕石反射分光実験

武井亮斗¹ 佐藤允基¹ 古賀すみれ² 長勇一郎² 鈴木秀彦¹ 亀田真吾¹ 杉田精司²

1 : 立教大学 2 : 東京大学

はやぶさは S 型小惑星イトカワからの試料採取を成功させた。その技術を基に、はやぶさ 2 は C 型小惑星に分類されている 1999JU3 を目指す。S 型小惑星と C 型小惑星は熱変性度が異なる。C 型小惑星は熱変性が進んでおらず、含水鉱物や有機物を多く含んでいる可能性が示唆されている。はやぶさ 2 は、1999JU3 の表面にあると予想されている熱変性の進んでいない始原的な試料の採取を目指す。

地上観測により 1999JU3 の反射スペクトルは CM2 型の隕石に近いという結果が得られている。CM2 型の隕石は含水鉱物や有機物を含んでいる為、1999JU3 の表面にも局所的にそれらの物質が存在している可能性がある。はやぶさ 2 は Optical Navigation Camera-Telescope (以下 ONC-T) によるマルチバンド分光観測の結果を考慮して着陸地点を選定する。その際、隕石の反射スペクトルと比較する事で 1999JU3 の表面を覆っている物質を推定する。

隕石の反射スペクトルは粉体のサンプルに対して拡散光を照射する事で取得されている。一方で、小惑星には太陽から平行光が照射されているため測定条件が異なる。従って同じ物質でも反射スペクトルが異なる可能性が生じる。その為打ち上げ前に FM を用いて隕石反射分光測定を行っておくことが重要である。

はやぶさ 2 は打ち上げが 2014 年 12 月に予定されており、現在開発が進められている。その中で FM を用いて実験を行う事が出来る期間が限られている為、事前に準備を行い本番の実験に臨む事が重要である。

先行研究から CM2 型の隕石 Nogoya の粉体の反射スペクトルは 700nm 付近に吸収があり、その深さは 5% 程度である事がわかっている。はやぶさ 2 で始原的な試料を採取するためには、マルチバンド分光でこの吸収が検出可能であることを、打ち上げ前に確認しておくことが重要である。2014 年 1 月の FM 品を用いた実験で含水鉱物の吸収特性を確認しておく事で、はやぶさ 2 が試料採取を行い地球に帰還する前に含水鉱物の有無を知る事ができる。これは、はやぶさ 2 の目標である『始原的な物質を採取する』為に重要である。

本講演では 1 月に行われる ONC-T の FM を用いた実験のための準備状況を発表する。

はやぶさ 2 LIDAR によるアルベド観測の検証

○山田竜平¹, 千秋博紀², 小林正規², 野田寛大¹, 阿部新助³, 吉田二美¹, 並木則行²

¹国立天文台, ²千葉工業大学, ³日本大学,

現在、我々は2014年に打ち上げ予定の「はやぶさ2」に搭載するレーザー高度計(LIDAR)を使用してターゲット天体である1999JU3のレーザー波長(1064nm)におけるアルベドとその地域変化を調べる事を検討している。はやぶさ2搭載用のLIDARには探査機-小惑星間の距離を測定する機能に加えて、レーザーパルスの送信光強度と小惑星表面からの反射パルスの受信光強度を測定する機能がついており、この強度データを用いて小惑星表面のレーザー波長におけるジオメトリックアルベドを推定することが可能である。特に、1999JU3のようなC型小惑星の宇宙風化に関する理解は大きく進んでおらず、小惑星表面での宇宙風化の地域差を調べるうえで、LIDARが与えるアルベド情報は有用となる。

C型小惑星表面でのアルベド変化を有意に検出するためには $\sim \pm 10\%$ の誤差でアルベドを決定する事が望ましい。LIDARで観測量として得られる送受信光強度は、LIDARの送光部、受光部で使用される検出器でレーザーを検出した後、後段の回路を通して、量子化されたデータである。この強度データからアルベドを推定するには、検出器-回路系の応答を補正してレーザーの送受光エネルギーを求めなければならない。そのため、アルベドを高精度で決定するには、LIDARの受光部、送光部の検出器-回路系の入出力応答を極力精度良く決定する必要がある。

そこで、本研究では、レーザー投光装置を用意してレーザーの出力エネルギーの較正を行った後に、既知のエネルギーのレーザーを実際のLIDAR受光部に入力する事でその入出力応答を調べた。またフィールドでの測距試験等から受信光強度の変動の程度についても評価を行っている。本発表ではその一連の測定結果について報告すると共に、その測定結果に基づいて、実際の小惑星上での観測における現状でのアルベドの決定精度を評価した結果についても報告を行う予定である。

はやぶさ 2 LIDAR を用いたダスト観測

○千秋博紀¹, 小林正規¹, 山田竜平², 並木則行¹, LIDAR サイエンスチーム

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 国立天文台

LIDAR (Light Detection And Ranging) は、ターゲットに対して光を照射し、反射光が戻ってくるまでの時間を計測することで、ターゲットまでの距離を測る装置である。これまでの月・惑星および小惑星探査に搭載された LIDAR は、ターゲット天体の表面までの距離を測る目的で用いられてきたため、レーザー高度計とも呼ばれる。一方、地上の大気観測に用いられる LIDAR は、光路上にあるダスト（エアロゾル）からの散乱光の時間プロファイルを求め、そこからダスト（エアロゾル）の視線上の分布を求めるために用いられている。月・惑星および小惑星の表面付近にもダストが浮いている可能性がある。しかし、受信光のプロファイルを取得し地上に降ろすには莫大な通信容量が必要となるため、LIDAR を用いたダストの観測はこれまでに行われた例はない。

これに対して我々は、はやぶさ 2 に搭載される LIDAR の機能を拡張し、世界で初めて探査機に搭載された LIDAR で小天体周りのダストの観測を行う予定である（ダストカウントモード）。ただし上で述べたように、受信光のプロファイルを取得し地上に降ろすのは困難である。そこではやぶさ 2 LIDAR のダストカウントモードでは、視線上に設定された連続する 1km の観測範囲を 50 に分割し、それぞれの領域からの散乱光が閾値よりも大きい小さいかだけを判断する。観測範囲の開始位置は探査機から 500m 先から 19.5km 先まで自由に設定できる。また、閾値は予め決められた 8 通りから、測定のたびに選択できる。

我々は、はやぶさ 2 LIDAR のダストカウントモードの機能検証のために、ダストからの散乱光を模した光を発光できる装置を開発した。この検証機は、トリガを受けると 10ns 単位で予め決められたパターンの光を出す。光の強度は 8 段階で設定可能で、ND フィルタを装着することで、強度を調整することもできる。

本講演では、はやぶさ 2 LIDAR のダストカウントモードを解説し、機能機を用いた機能検証実験の結果を紹介する予定である。

「はやぶさ2」中間赤外カメラ(TIR)の開発の現状

○岡田達明¹, 福原哲哉², 田中智¹, 田口真³, 荒井武彦¹, 千秋博紀⁴, 中村良介⁵, 今村剛¹, 関口朋彦⁶, 長谷川直¹, 出村裕英⁷, 小川佳子⁷, 北里宏平⁷, 松永恒雄⁸, 和田武彦¹, 滝田隼^{9,1}, 坂谷尚哉^{10,1}, 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産業総合研, ⁶北海道教育大, ⁷会津大,
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

次期小惑星探査「はやぶさ2」に搭載する中間赤外カメラ(TIR)の開発状況について報告する。TIR は非冷却2次元ボロメータを用いた熱撮像カメラであり、小惑星 1999JU3 のサーモグラフィを連続的に行うことで、小惑星表層の熱物性を遠隔的に決定する。特に小惑星の上空 20 km から小惑星表面の物理状態が砂、砂利、岩盤であるかの識別が可能であり、サンプリングに最適なミリメートル大の試料が得られる場所を特定するのに役立つ。また小惑星の熱環境がサンプル採取のためのタッチダウン運用が安全に実行可能かどうかの判定に必要な情報を提供する。

TIRによる熱放射撮像は科学的にも重要であり、小惑星の表面温度や熱物性測定を通して、小惑星の物理的性質を明らかにする。探査対象の小惑星 1999JU3 は C 型である。C 型小惑星は一般に低密度なことが知られるが、破碎した岩塊が寄せ集まった瓦礫構造が支配的なのか、岩石自体が多孔質であることが支配的なのかは分かっていない。また、微小重力下での流動・堆積によって形成されたレゴリスの物理状態は明らかでない。クレータや溝などがレゴリスに埋没した地形の検出、クレータ周辺のイジェクタ堆積物の可視化も期待できる。小惑星が最近の衝突過程や分裂過程などの活動によって揮発性成分が表面に露出する場合、昇華による局所的な低温化から検知できる。また、小惑星のその場で観測した熱物性と地上観測によるモデル化との比較は、太陽系天文学で用いられる熱モデルの検証にとって重要である。

TIR は 2013 年 10 月に開始される総合試験前に向けて、センサ部と電源部のフライトモデルの製造および検査を完了し、フード部の作業を残すのみである。TIR は小惑星表面の 250~400K を含む温度領域を熱撮像し、小惑星表面の温度や表面からの熱放射量を測定し、さらに小惑星表面の熱慣性などの熱物性分布を決定する。そのため、上記温度を含む広い温度範囲で較正する試験系を構築した。低温側は高真空下で行い、フライト時と同様に機器の取付パネル面とレンズ部の温度を制御しながら、一様温度の黒体面を撮像する。高温側は大気中で行い、室温とレンズ部の温度を制御しながら、大口径平面黒体やオイルバスで調温した黒体面を撮像する。現在までに温度範囲 225~423K での熱撮像を実施している。絶対温度精度 3K 以下、相対温度精度 0.3K 以下の目標を概ね実現できる見通しを得ており、更に高い精度の実現を目指している。TIR の較正試験は 6 月前半に初回を実施して TIR の機器や試験系の課題を抽出、8 月~10 月に 2 回目の較正を実施中である。観測プログラムの試験も実施している。3 回目の較正は 2014 年 1 月頃に探査機のシステムベーク中の期間を利用して行う予定である。

はやぶさ 2 DCAM3-D の光学性能検証試験

○石橋高¹, 荒川政彦², 飯島祐一³, 小川和律⁴, 白井慶³, 和田浩二¹, 本田理恵⁵, 澤田弘崇³,
坂谷尚哉⁶, 門野敏彦⁷, 小林正規¹, 中澤暁³, 早川基³, 池田優二⁸

¹千葉工業大学, ²神戸大学, ³宇宙航空研究開発機構, ⁴東京大学, ⁵高知大学, ⁶総合研究大学院大学,
⁷産業医科大学, ⁸フォトコーディング

現在、はやぶさ2に搭載される分離カメラ「DCAM3」の開発が進められている。DCAM3 にはアナログ系(DCAM3-A)、デジタル系(DCAM3-D)の2つのカメラが搭載される。DCAM3-D の観測目的は、(1) SCI(衝突体)の発射および小惑星への衝突の確認、(2)SCI 衝突により生成されるイジェクタの観測である。(1)では、SCI の発射位置や小惑星上の着弾点の位置の観測から、衝突条件の明確化を行う。(2)では、形成されるイジェクタカーテンの形状や移動速度、岩片の放出速度などから、標的状態の明確化、イジェクタのスケーリング則の検証、1999JU3 の表層構造の推定などを行う。これらの観測目的を達成するために必要な光学系の性能(要求仕様)を表 1 に示す。

本発表では、DCAM3-D の FM 光学系(レンズ+CMOS センサ)の光学性能検証試験の実施状況およびその結果について報告する。光学性能検証試験は、センサの電気試験、コリメータ試験、積分球試験から成る。センサの電気試験では、光学検証試験のベースとなる CMOS センサの性能の調査を行った。コリメータ試験では、まずハルトマンテストにより適切なレンズ-センサ基板間距離のシム調整を行った後、真空下(<1 torr)において温度・波長域・画角をパラメータとして振り、コリメータに設置したピンホール像の撮像を行い、集光性能(ensquared energy)、IFOV、歪曲などの測定を行った。積分球試験では周辺減光、迷光などの測定を行った。

これら一連の光学性能検証試験により、光学系の性能が要求仕様を概ね満たしていることが確認された。ただし、レンズとセンサ基板間の距離にはさらなる最適化の余地が残されていることもわかったので、今後最適化を行う予定である。

表 1. DCAM3-D 光学系の主な要求仕様

項目	性能・機能
観測波長域	450-750nm
画素数	1992 × 1992pix
視野角	□74 度 (性能保証範囲は○74 度とする)
IFOV	0.648 mrad 程度
F 値	1.7 以下
周辺光量比	○74 度で 70%以上、対角視野端で 50%以上
Ensquared energy	2 × 2pix に 65%以上

超小型深宇宙探査機搭載用ジオコロナ撮像装置の開発

○佐藤允基¹、亀田真吾¹、田口真¹、吉川一朗²、中村正人³

¹立教大学、²東京大学、³ISAS/JAXA

地球大気圏の最も外側で大気原子が無衝突になる領域を外気圏と呼ぶ。ジオコロナは外気圏の原子が太陽光を共鳴散乱することによって光る。水素ライマン α 線(121.567nm)が最も明るく、これを観測することで外気圏における水素原子の分布を知ることが可能となる。

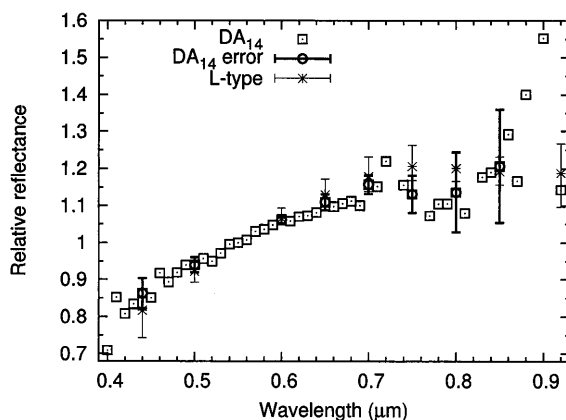
ジオコロナを構成する原子の軌道は、弾道軌道、地球を周回する軌道、地球重力圏を脱出する軌道の3種類ある。特に高高度では地球重力圏を脱出する軌道を持つ原子が支配的となり、過去の観測では高度約20 R_E にまで及ぶジオコロナが確認されている。ジオコロナの空間分布の特徴として、水素が反太陽方向に引き伸ばされるようなジオテイルと呼ばれる構造や、朝夕、南北、昼夜の非対称性などが知られている。それらの時空間変動については、太陽活動度によって変化する外気圏下端の温度や密度変動、磁気圏粒子との相互作用、太陽起源のライマン α 放射圧などの作用が提唱されているが、いまだに十分に理解されているとは言えない。特に、高高度における水素原子の分布を捉えるためには、ジオコロナの外から俯瞰する必要があるが、観測例は極めて少なく、マリナー5号、アポロ16号、のぞみだけである。最近、磁気嵐に伴って外気圏内水素密度が短時間に上昇する現象が見つかったが、その原因は未解明である。大気散逸過程に対する太陽活動の影響を知るために、この現象のメカニズムを解明することは重要である。

そこで我々は、地球を脱出して惑星間空間を航行する軌道に乗る超小型深宇宙探査機にジオコロナ撮像装置を搭載することを検討している。月軌道以遠に達する探査機からであれば、地球周回衛星からでは困難な15 R_E 以上の高高度のジオコロナの全球分布を捉えることができる。本発表では、装置の目的、概要、開発状況、運用計画を紹介する。

地球近傍小天体 2012 DA₁₄ の可視分光観測Visible Spectroscopic Observations of Near-Earth Object, 2012 DA₁₄○ 浦川 聖太郎¹、藤井 貢²、花山 秀和³、高橋 隼⁴、寺居 剛³、大島 修⁵¹ 日本スペースガード協会、² 藤井黒崎天文台、³ 国立天文台、⁴ 兵庫県立大学、⁵ 水島工業高校

直径 100m～数 km 程度の小惑星の多くが、岩塊同士が重力で弱く結びついたラブルパイル構造をしていると考えられている。一方、直径 100m 以下の小惑星の多くは、自身の強い引っ張り強度で構造を維持した、一枚岩小惑星であると考えられている。異なる形状維持機構をもつ小惑星のスペクトルタイプ分布に、どのような違いがあるか統計的に明らかにできれば、形状維持機構による構成物質や衝突過程の違いを解明できるものと期待される。しかしながら、直径 100m 以下の小惑星は、その暗さのため分光観測による詳細なスペクトル決定がなされた例がほとんどなく、観測データの蓄積ができていない。

2012 DA₁₄ は 2013 年 2 月 15 日に地表から 27700km まで接近した地球近傍小天体である。2012 DA₁₄ の推定直径は約 45m である。このような大きさの小惑星の分光観測を実施するには、大口径望遠鏡が必要となる。しかし、地球接近時に増光するため、天球上を高速に動く 2012 DA₁₄ をスリット内に導入できる観測技術があれば、小口径望遠鏡でスペクトル決定が可能となる。我々は、藤井黒崎天文台 40cm 望遠鏡を用いて 2012 DA₁₄ の地球への最接近直後にあたる 15 日 20 時 45 分～21 時 2 分 (UT) に可視分光観測を実施した。スリット内に 2012 DA₁₄ を適切に導入することに成功し、L-type 小惑星であることを明らかにした (図 1)。この結果は、約 8 時間半後に口径 10.4m の Gran Telescopio Canarias で行われた観測結果 (de León et al. 2013) と一致する。また、この一致は 2012 DA₁₄ には自転による表面反射率に大きな変化がなく、ほぼ一様な物質で構成されていることを示唆している。

図 1: 2012 DA₁₄ の相対反射率と L-type 小惑星との比較

メインベルト小惑星のアルベド分布の傾向

○臼井 文彦^{1,2}、長谷川 直¹、石黒 正晃³、大坪 貴文⁴¹ISAS/JAXA、²東京大、³ソウル大、⁴東北大

小惑星は現在までに 62 万個以上の存在が知られているが、そのうち 90%以上は 2--3.3AU のメインベルト領域に集中している。メインベルトにおける物質分布を調べることは、小惑星の生成と進化を論じる上で重要であるばかりでなく、太陽系形成過程についても大きな示唆を与えると考えられる。

小惑星のサイズ(直径)とアルベド(反射率)は、その天体を特徴づけるもっとも基本的な物理量の 1 つである。小惑星のサイズを測定するには様々な手法が開発されているが、その中でも熱赤外を用いる方法は、数多くの小惑星を効率的に観測するのに適している。これには赤外線サーベイ衛星のデータを使うのが有用である。これまでに赤外線で全天サーベイを行った衛星としては、IRAS(1983 年)、あかり(2006--2007 年)、WISE(2010 年--)がある。これらの観測データから派生して、[1]、[2, 3]、[4]などといった小惑星カタログが構築されている。これらを合わせることで、13 万天体に及ぶ小惑星のサイズ・アルベド情報を手にすることができる。我々は、これらに加えて、地上観測[5-8]で得られた可視から近赤外の波長帯の分光データに基づくスペクトル分類のデータを組み合わせて、メインベルト小惑星のアルベド分布について解析を行った。一般に、S 型はアルベドが高く C 型は低いことは以前から知られていた(e. g., [9])が、天体サイズが小さくなるとアルベドの多様性が増える傾向にあること、すなわち、低アルベドの S 型や高アルベドの C 型といった天体が一定の割合で存在することが確認された。さらに、5km 以上の天体に限定してアルベドの日心距離依存性を見ると、特に S 型や C 型については、メインベルト全体にわたってアルベドの平均値がほぼ変わらず一定であることがわかった。

本講演では、データ解析の詳細と、ここから得られるメインベルトにおける物質分布について議論する。

References:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| [1] Tedesco, et al. 2002, AJ 123,1056 | [2] Usui, et al. 2011, PASJ 63,1117 |
| [3] Hasegawa, et al. 2013, PASJ 65,34 | [4] Mainzer, et al. 2011, ApJ 731,53 |
| [5] Tholen 1989, in Asteroids II,1139 | [6] Bus & Binzel 2002, Icarus 158,146 |
| [7] Lazzaro, et al. 2004, Icarus 172,179 | [8] Carvano, et al. 2010, A&A 510,A43 |
| [9] Chapman, et al. 1975, Icarus 25,104 | |

O10-04

石垣島天文台 105cm むりかぶし望遠鏡による 太陽系小天体観測

○花山 秀和¹ 石黒 正晃² 福島 英雄¹ 宮地 竹史¹ 渡部 潤一¹

¹ 国立天文台 ² ソウル大学

石垣島天文台は、国立天文台、石垣市、石垣市教育委員会、NPO 法人八重山星の会、県立石垣青少年の家、琉球大学の 6 者の連携のもとに運営される国立天文台の観測研究施設である。石垣島の前勢岳（まえせだけ）山頂にあり、経緯度・標高はそれぞれ北緯 24 度 22 分 22.3 秒、東経 124 度 08 分 21.4 秒、標高 196.7m である。日本の西南端に位置する石垣島は、日本本土より 10 度以上緯度が南にあり、88 星座中 84 星座を見ることができる。このような位置条件から、黄道付近の太陽系天体・赤緯の低い天体の観測に適したサイトとなっている。

むりかぶし望遠鏡は九州・沖縄では最大の有効口径 (105cm) を持つ光学・赤外線望遠鏡 (西村製作所製) で、リッチー・クレチアン光学系、合成口径比 F12 の経緯台式望遠鏡である。望遠鏡には研究用のカセグレン焦点とナスミス焦点、および天体観望用のナスミス焦点があり、カセグレン焦点には MITSuME (Multi-color Imaging Telescopes for Surveys and Monstrous Explosions) プロジェクト (PI: 河合誠之 東工大) により製作された 3 色同時撮像カメラが搭載されている。高感度冷却 CCD カメラ (Apogee 社製 Alta U6, 画素数 1024 × 1024) が 3 台実装されており、F 変換レンズ (F12 → F6.5) の使用により画素スケールは 0".72/pix、視野は 12'.3 × 12'.3 である。フィルターにはバンド幅が広く夜光の影響を避けることができるものとして、g', Rc, Ic バンドが採用されており、3 色カメラの限界等級は露出 1 分で g' = 18.7、Rc = 19.0、Ic = 17.8 (S/N = 10) となっている。

石垣島天文台では MITSuME プロジェクトや光・赤外線天文学大学間連携によるガンマ線バーストなどの突発天体観測を行う一方で、サイト条件の良さを活かした太陽系小天体の観測が推進されおり、2006 年の開設以来、彗星や小惑星の研究で成果を挙げている (査読論文 6 編, 2013 年 9 月現在)。22P/Kopff 彗星の観測では、ダストトレイルとジェット構造の分析により、彗星核の活動性と自転軸の向きが推定された (Hanayama et al. 2012)。213P/Van Ness 彗星の観測では、本体の彗星核付近に新しい分裂核が発見され、過去のアウトバーストとの関連性が示唆されている (CBET2798)。一方、小惑星 (596) Scheila で起こったアウトバースト現象では、天体の周囲に 3 つの尾のような構造が観測され、詳細な解析から小惑星 (596) Scheila に数 10m スケールの小天体が衝突したことが明らかになった (Ishiguro et al. 2011)

本講演では石垣島天文台の望遠鏡や観測装置について紹介するとともに、上記の観測を含む太陽系小天体の研究成果について報告する。

反射スペクトルから見た木星の小衛星とヒルダ群・トロヤ群小惑星との関係

高遠徳尚、吉田二美(国立天文台)、大槻圭史(神戸大学)

1. はじめに 木星には多数の不規則衛星が存在する。力学的な考察と測光データから、これらの衛星は木星系外の天体が捕獲されたものと考えられている。しかしそれを証明する直接的証拠に欠けており、また太陽系内のどの領域で形成された天体をどのようなプロセスで捕獲したのかも未だ解明されていない。木星の不規則衛星の成因を解明することは、Nice モデルに見られるような太陽系内の動径方向の物質移動の理論に関して重要な制限を与えることができる点でも重要である。本研究では今まで分光観測がなされていなかった主要な不規則衛星の可視分光観測を行い、そのスペクトル型を正確に決定し、木星周辺の小惑星（ヒルダ群、トロヤ群）との比較を行った。
2. 観測と結果 不規則衛星は幾つかの family を構成しているが、そのうち Himalia family (5 天体中 4 天体)、と Sinope, Carme, Ananke, Pasiphae(それぞれの family の代表) の 8 天体を、2012 年 12 月 7 日 UT に Subaru/FOCAS を用いて分光観測（スリット幅 2"）を行った。図 1 に得られた反射スペクトルを示す（波長 550nm で規格化してある）。
3. 考察 決定した衛星のスペクトル型を軌道要素とともに図 2 に示す。Himalia family は Cb, C, B, X で構成されており、1 つの母天体から分裂したとするとその内部あるいは表面の不均一性を反映していると思われる。Himalia family は Hilda 群から捕獲されたとする説が提唱されているが(Cuk & Burns 2004)、観測されたスペクトル型は Himalia サイズの Hilda 群天体は 90%以上が広義の C 型である(Grav et al. 2012)ことと整合し、この説と矛盾は無い結果である。他の 4 天体は D 型と C/X 型が 2 天体ずつあり、数の分布を Grav et al.(2012)と比較すると、これらの天体はヒルダ群からの捕獲と考える方がトロヤ群からと考えるより整合性が高い。しかし 4 天体のみの観測なので、統計誤差が大きく強い制限ではない。さらに小さい不規則衛星を多数観測して型分布の精度を上げるとともに family 内の均一性の検証が必要である。特に Carme family の均一性の検証は D 型小惑星の内部構造を探る上でも重要である。

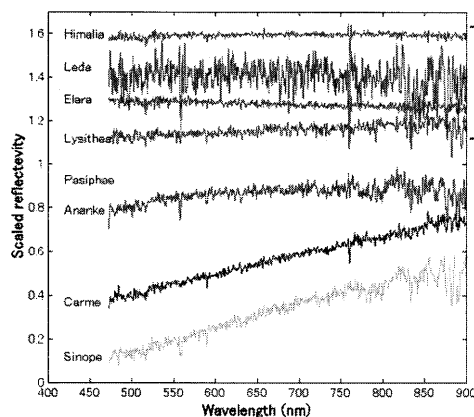


図1 木星不規則衛星のスペクトル
波長 550nm で規格化。見やすくする
ために適宜ずらして表示してある。

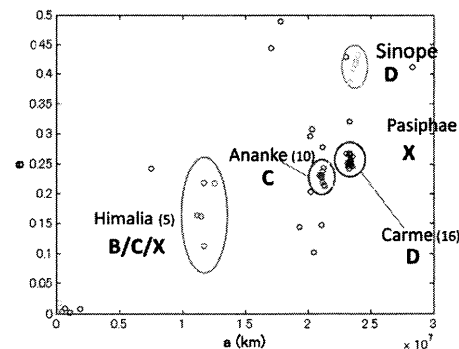


図2 木星不規則衛星の軌道要素と得られた
スペクトル型。原点付近の水色の○印はイオ
より内側を回る小衛星。

チェリャビンスク隕石の現地調査と衝突前発見の可能性

Field Survey of Chelyabinsk Meteorites and Possibility of Discovery before the Collision

高橋典嗣¹⁾²⁾・吉川真¹⁾³⁾・三輪田真¹⁾³⁾・布施哲治¹⁾⁴⁾・
奥村真一郎¹⁾・西山広太¹⁾・浦川聖太郎¹⁾・坂本強¹⁾

¹⁾ 日本スペースガード協会 ²⁾ 明星大学教育学部 ³⁾ 宇宙航空研究開発機構 ⁴⁾ 情報通信研究機構

2013年2月15日9時20分(YEKT、JST:12時20分)、NASAの推定によると直径17m、質量1万トンの小惑星が18km/sの速度で地球大気圏に突入し、ロシア南部のウラル地域、チェリャビンスク州の上空28kmで爆発して落下した。その後、チェリャビンスク市内の南ウラル大学では、爆発に伴う閃光から2分25秒経過した9時22分(YEKT)に衝撃波がキャンパスに到達、校舎内では飛び散った窓枠とガラス片に当たり怪我する学生が続出した。同様に、爆発地点から100km四方の広範囲内に点在する市街地で、爆発方向を向いたビルや家屋の窓ガラスや壁が衝撃波で壊れた。被害家屋は5000棟、四散した碎屑物により1500人以上の人々が負傷する、天体衝突による大きな自然災害となった。

当協会(JSGA)では、現地調査を行い、チェリャビンスク市内の被害状況、爆発地点の推定、隕石落下分布などを調査した。

最大輝度に達した爆発地点と高度は、爆発地点から19.0km北のコルキノ町のマーケット、北に約52.5km離れたクルチャトフスキーと南に約40km離れたキチキノ、西に167.5km離れたサトカの4箇所で爆発地点の方位角と高度を計測して求めた。この結果、隕石はチャバルクリ湖の氷上の落下穴を先端とし、経路手前の84.0km地点、上空29.9kmで最大輝度の爆発を起こしたと推定した。

現地調査の結果、最大爆発地点に近い町、エマンジェリンカからデプタツキーまでの南北5km、経路上(東西)30kmの範囲で多数の隕石が収集されていたことがわかった。隕石は、最大爆発後も数回小爆発を起こして落下、これに対応する落下地点の推定を行った。雪解け後に行われたロシア科学アカデミーの調査によると、推定した箇所から隕石が拾われていた。尚、現地調査では、隕石落下経路に沿って、エマンジェリンカ、デプタツキー、チェバルクリ湖の3地点、計23個の普通コンドライト(LL5)を取得することができた。

JSGAでは、スペースガードの取り組みとして、このような天体衝突による自然災害を未然に防ぐため、地球接近小惑星の早期発見と軌道決定を行っている。衝突すると地球環境を大きく変えることになる直径1km以上のNEAについては、そのほとんどが発見され、軌道が求められている。現在では、都市に衝突すると周辺地域を含めて都市機能に壊滅的な被害をもたらす直径150m以上のNEAの早期発見と軌道決定を目標にして観測を続けている。

チェリャビンスク州の広範囲に自然災害をもたらしたような直径10mサイズの小さなNEAの検出が、今後のスペースガードで重要な課題となると考えている。今回のチェリャビンスク隕石を軌道上で検出することができなかった理由、確実に検出を可能にするための観測施設整備、観測体制の構築などについて述べる。

【参考文献】

- 吉川真, 地球接近天体とスペースガード, ロシア隕石落下(日本地球惑星科学連合大会), 2013.
高橋典嗣・吉川真・奥村真一郎・浅見敦夫・西山広太・浦川聖太郎・坂本強, 地球への小天体衝突に対する日本スペースガード協会の対応と方針, ロシア隕石落下(日本地球惑星科学連合大会), 2013.
吉川真・高橋典嗣, スペースガードとチェリャビンスク隕石, 宇宙資源展(東京大学総合研究博物館), 75-79, 2013.
日本スペースガード協会, 『大隕石衝突の現実』ニュートンプレス, 2013.
高橋典嗣, 『隕石と宇宙の謎』宝島社, 2013.

チェリャビンスク火球の光度曲線

○柳澤正久¹¹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車載カメラを含む多くのモニター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、明るさと色の時間変化を調べた(図1(a))。光エネルギーのほとんどは最後の1~2秒のフレアで放出されたのが分かる。ピークの前後1秒間での単位波長あたりの光度 10^{11} W/nm は、3500 K の黒体放射を仮定すると 2×10^{14} W の放射に相当する。この時の火球高度は 30 km であり、直下点でのフラックスは太陽の13倍となる。また、この黒体放射を仮定し、時間積分すると全放射エネルギーは 4×10^{14} J である。これから推定される衝突エネルギーは、 2×10^{15} J (TNT 爆薬 480 kton のエネルギーに相当)となる。

RBG を 650, 550, 450 nm の単色光と近似し、光度の比から黒体温度を計算すると図1(b)となる。フレア以前の段階では、それぞれの比から求めた温度が一致せず、また、あり得ない高温を示している。スペクトルが黒体放射ではないことを示している。一方、フレア時のスペクトルは 3000 ~ 4000 K の黒体放射と矛盾しない。

ピーク前後の放射を 3500 K の黒体から放射するには 24 km^2 の面積が必要である。衝突天体の分裂時に、破片が進行方向と直角方向に 100 m 広がり、長い円柱の表面から黒体放射が起きたと考える。必要な長さは 37 km となる。これは 18 km/s の飛翔体がフレア期間で進む距離である。また、多くの動画に、フレアの後に残る長さ 20 km ほどの赤い発光雲が写っている。火球の最大放射は非常に細長い領域からの黒体放射であった可能性がある。

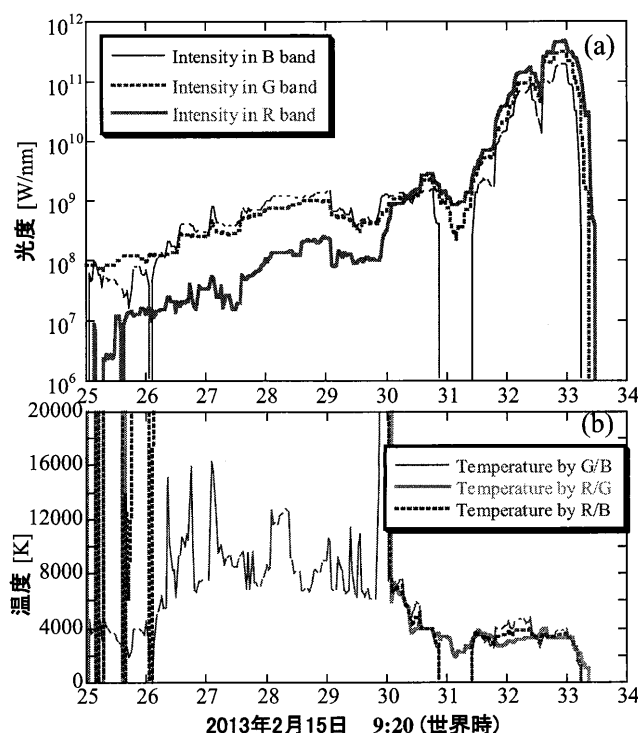


図1. (a) 火球の単位波長あたりの光度. RGBそれぞれのカラーバンドについての結果を太線, 破線, 細線で示す. (b) R/G(太線), R/B(破線), G/B(細線), それぞれの光度比から計算した黒体温度.

月バルク組成制約に向けた マグマオーシャン熱進化モデルの構築

○酒井 理紗¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹, 橘 省吾²

¹ 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ² 北海道大学大学院理学院 自然史科学専攻

月の高地地殻は、44-45 億年の年代を持つ厚さ~45km の斜長岩から構成されている。このような斜長岩質地殻は、月形成直後にできたマグマオーシャンの大規模分化によって形成されたと考えられている。近年の月探査により、非常に高精度の月表層の鉱物分布や地殻厚さの情報が得られているが、月深部の内部構造や組成は探査からでは推定困難なため、月の起源と進化に強く関係するバルク組成には未だに強い制約が与えられていない。特に FeO 量と難揮発性成分 (Al_2O_3 , CaO) 量は、月地殻形成に非常に重要であるが、地球のマントルと同程度 [Warren, 2005; Longhi, 1982, 2006] からそれぞれ 1.5 倍程度多い [Taylor, et al., 2006; Khan, et al. 2006] といった幅広い組成が提案されている。

本研究では、全球規模で起きたマグマオーシャンからの地殻形成の条件を、信頼できる情報の多い月地殻の観測事実を検討することで、月バルク組成と月起源を制約することを目的としている。マグマオーシャン分化過程に対して、分別効率をパラメータとした結晶分離モデルを構築し、MELTS/pMELTS を用いた鉱物相平衡計算を用いることによって、斜長石が析出し始めるまでに形成される内部構造とマグマオーシャンの残液組成を推定した。月地殻形成条件として、(1) 境界層を考慮した対流中での結晶分離メカニズム、(2) 月地殻厚みを説明する斜長石析出量、(3) 地殻鉱物の主要組成を検討した結果、月バルク組成の FeO 量は地球マントル組成よりも 1.3 倍以上多い必要があることが結論された。今回の発表では、マグマオーシャンでの熱輸送を考慮した分化モデルによって得られた冷却速度に関する新しい結果と、結晶分離効率の影響がマグマオーシャンの進化に与える影響についても議論する予定である。

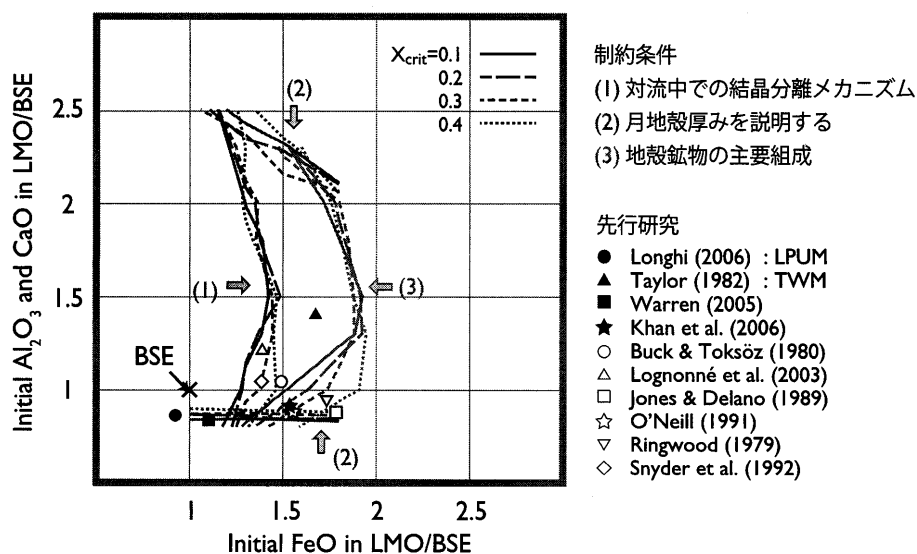


図1 本研究で制約された月バルク組成と、先行研究の月バルク組成。地球マントル (BSE) で規格化。線種は最大結晶分別を $X_{\text{crit}}=0$, 平衡結晶化を $X_{\text{crit}}=1$ としたときの結晶分離効率 (X_{crit})。

月高地地殻の Mg# と Th 濃度相関から考察する マグマオーシャン固化過程

○大竹真紀子¹, 小林進悟², 武田弘³, 諸田智克⁴, 石原吉明⁵, 松永恒雄⁶,
横田康弘⁶, 春山純一¹, 山本聡⁶, 小川佳子⁷, 唐牛讓¹, 佐伯和人⁸

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

これまでに、月周回衛星かぐやの分光観測データと γ 線観測データを用いる事により、月高地地殻中の苦鉄質鉱物含有量と苦鉄質鉱物の Mg# ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ モル% でマグマ分化度の指標) の両方に表裏二分性が見られ、従来考えられてきた鉄に比較的富んだ値 ($\text{Mg}\#=50\sim70$) に比べて高い Mg# の領域が裏側に存在する事や、マグマ固化時に液層に濃集し、マグマ分化の初期には低い値を持つ事からマグマ分化度の指標となる Th 濃度が月裏側で最も低い事が報告されている。これら報告は、Mg# と Th 濃度の分布傾向が整合している (月裏側でマグマの分化度が表側に比べて低い) ことを示唆する。本研究では得られた Mg# と Th 濃度の相関を調べる事により、Mg# と Th 濃度の観測値が、マグマオーシャン固化時の地殻形成にともなうマグマの分化過程を反映しているかどうかについて検討する。また、これら観測値がマグマの分化過程を反映しているならば、分化トレンド (Mg# の変化に伴う Th 濃度の変化量) より、推定されるマグマオーシャンの初期組成推定を試みる。

解析手法は、それぞれ異なった空間分解能で得られている高地地殻領域の Mg# と Th 濃度データを、同一の空間分解能に合わせ、同領域の Mg# と Th 濃度の変化量を把握する。一方、マグマオーシャンの初期化学組成を仮定し、マグマの分化に伴ってマグマ中の Mg、Fe、Th の各濃度がどのように変化するかを、既存のマグマ分化モデル計算ツール (今回用いたのは MELTS) を用いて推定する。Mg# と Th 濃度変化量の観測値と、マグマ分化モデル計算によって推定される値を比較し、両者の類似・相違性について考察する。

結果、高地地殻領域の観測値は Mg# の低下とともに Th 濃度は上昇する傾向を持ち、定性的にはマグマの分化に伴う変化で説明が可能な事、また地球のケイ酸塩部全体組成を月の初期マグマオーシャン組成と仮定した場合に、観測データとマグマ分化モデル計算によって得られる Mg# と Th の変化量は類似の傾向 (傾き) を持つ事が解った。ただし、Mg# および Th 濃度の絶対値としての整合性や、今回のような解析がどこまでの精度で初期組成に対する制約となりうるのかどうか、Mg# と Th 濃度の相関関係のマグマオーシャン初期化学組成への依存程度、観測データの誤差やマグマオーシャン固化後の衝突による地殻攪拌の影響などの点について、引き続き解析と検証が必要である。

月隕石 DaG 400 に含まれるトロクトライト地殻

○荒井朋子¹, 廣井孝弘², 佐々木晶³, 松井孝典¹¹千葉工大・惑星探査研、²ブラウン大、³阪大・理

月地殻の鉱物分布は、月マグマオーシャンの組成や結晶化過程を理解する鍵である。アポロ試料の鉱物分析や従来のリモートセンシングデータ解析から、低カルシウム輝石が斜長岩質地殻の主要なマフィック鉱物と考えられていた。一方、斜長石に富む月隕石には、斜長石とかんらん石からなる岩石（トロクトライト）が普遍的に存在する [1]。また、「かぐや」の可視近赤外波長域の反射分光データから、かんらん石が巨大衝突クレータのクレータリングや中央丘にかんらん石が分布することが明らかになっている [2]。従って、月地殻中のかんらん石と輝石の分布に係る従来の見解が見直されつつある [3]。

最近の月隕石の鉱物研究から、かんらん石の二次的分解または溶融により低カルシウム輝石が生成することがわかってきた [4, 5]。斜長石に富むインパクトメルト角レキ岩では、トロクトライト岩石片中の低カルシウム輝石が 2-3 vol% であるのに対し、インパクトメルトマトリクスでは約 10 vol% と高い。これはケイ酸塩メルトとかんらん石の反応により二次的に低カルシウム輝石が生成したことによる。また、低カルシウム輝石がトロクトライト中のかんらん石を置き換えて、コロナ状に成長する組織が見られる。これもかんらん石と低カルシウム輝石の反応関係によるものである。二次的熱変成により初生トロクトライト地殻中のかんらん石が低カルシウム輝石に置換することがわかる。

かんらん石は輝石より吸収係数が低いため、反射スペクトルにおける吸収が輝石に対して小さく、輝石とかんらん石が混在する場合、かんらん石の検知は困難である。従って、かぐやデータでかんらん石の存在が確認された地域は、輝石に比べかんらん石の存在度が圧倒的に高い地域である。一般的にクレータリングや中央丘は加熱・溶融を免れ、岩盤が機械的に破碎したものが隆起したと考えられる。つまり、輝石と共存しないかんらん石は熱変成の影響の少ない地殻に限定して存在することになる。これは、月隕石で見られたかんらん石と低カルシウム輝石の反応関係と整合的である。

本講演では、レゴリス角レキ岩月隕石 DaG400 に含まれる 2.0 cm 角のトロクトライト岩石片の鉱物分析と反射分光測定データを元に、月トロクトライト地殻の起源を議論する。

- 【参考文献】 [1] Korotev R. L. et al. (2006) *Geochim. Cosmochim. Acta* 70:5935-5956.
[2] Yamamoto S. et al. (2010) *Nature Geoscience*, 3:533-536. [3] Arai T. et al. (2008) *Earth Planet Space* 60:433-444. [4] Arai et al. (2007) *Meteorit. Planet. Sci.* 42, A14. [5] Arai T. et al. (2013) *Lunar Planet. Sci.* XXXXIII, abstract #1016.

月の海の玄武岩組成が示唆する月マンツルの進化史

○加藤 伸祐¹ 諸田 智克¹ 山口 靖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

1. 背景

固体惑星の形成と進化の体系的な理解に向けて、地球型惑星の小型端成分である月の初期進化を理解することは重要である。しかし、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非常に有効である。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。海の玄武岩はチタン含有量に多様性があり、マグマソースの組成の違いを反映していると考えられる。

2. 目的

月の海の玄武岩のチタン含有量と噴出年代との関係を明らかにし、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に制約を与える。

3. 手法

データは月探査衛星「かぐや」のマルチバンドイメージャによる波長 415nm と 750nm の光の反射率のデータである。今回は Otake et al. (2012) によって、Lucey 法 (Lucey et al. 2000) を用いて、反射率からチタン含有量に換算されたものを用いる。本研究では合計で 234 個の溶岩流ユニットについて、より正確に各ユニットのチタン含有量を決定するため、周囲からの飛来物質がなく、地形的に起伏が小さい領域のチタン含有量の平均値を算出し、各ユニットのチタン量とした。

4. 結果

図 1 にそれぞれの海におけるマグマの噴出年代とチタン含有量の関係を示す。これを見ると、約 40 から約 30 億年前の古い噴出については、チタン含有量に多様性があることが分かる。それに対して、嵐の大洋や雨の海などの PKT 領域では、古い玄武岩に比べて若い玄武岩ほど選択的に高チタンである傾向が見られる。次に地域差の影響を取り除いて、火成活動の時間的な変化を見るため、噴出が長く続いていた嵐の大洋と雨の海に限って詳細に調べてみると、約 23 億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇している事が分かった。このチタン含有量の変化はマグマソースが変化したことを示唆しているのかもしれない。そこで本研究では、23 億年前以前を「Phase1 火成活動」、23 億年前以後を「Phase2 火成活動」と呼ぶことにする。

さらに、本研究では、この Phase2 の火成活動がどの程度の規模であったかを調べるため、Phase2 に相当する溶岩流の厚さを推定することで Phase2 火成活動の溶岩流の体積を求めた。

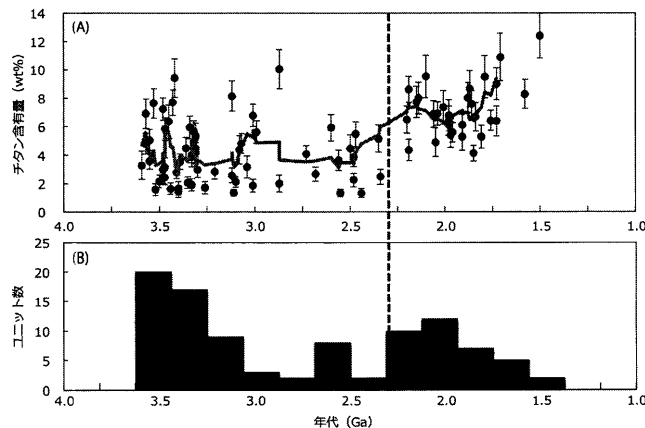


図 1. (A) 嵐の大洋、雨の海地域におけるチタン含有量と年代の関係、(B) ユニット数と年代の関係。約 23 億年前(破線)を境に、チタン含有量が有意に上昇している。また、ユニット数の変化と比較すると、約 20 億年の噴出ピークと高チタンな溶岩流がよく対応しているように見える。

かぐや GRS で得られた月表面の鉄成分の全球分布

○晴山 慎¹, 山下 直之², 唐牛 譲³, 長岡 央⁴, 小林 進悟⁵, 長谷部 信行⁴

¹ 聖マリアンナ医科大学, ² Planetary Science Institute, ³ 宇宙航空研究開発機構,

⁴ 早稲田大学, ⁵ 放射線総合医学研究所

月表層の元素組成分布は、月の進化と起源を考える上で重要な情報である。これまでに月周回衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計 (KGRS) [1]は、天然放射性元素 (K, Th, U) の全球濃度分布[2, 3]および、地殻中の主要元素 Ca の全球濃度分布[4]を報告した。

月面から放出される主要元素由来の核ガンマ線は、銀河宇宙線が月物質との衝突で作出した中性子と月物質の衝突によって生成される。そのため、ガンマ線強度から元素濃度変換に際しては中性子強度による補正が必要である。この反応には、熱中性子捕獲反応 $^AX(n, \gamma)^{A+1}X$ と高速中性子の非弾性散乱反応 $^AX(n, n\gamma)^AX$ 反応がある。過去の月ガンマ線観測である Lunar Prospector GRS (LPGRS) では、熱中性子捕獲ガンマ線を利用して月面の鉄(?)濃度分布を報告している[5]。しかしながら、熱中性子強度の月面分布は、地域差が非常に大きい(最大最小で約 3 倍程度)[6]ため、その補正量も大きくなる。一方、高速中性子の月面での強度分布の幅は比較的小さい(最大最小で約 30%程度)[6,7]ため、その補正量は小さい。このため、KGRS で報告した Ca 濃度分布[4]は、非弾性散乱ガンマ線から濃度を推定している。

本研究では、低高度観測(~50km)で得られた KGRS データを解析し、非弾性散乱反応ピークを用いて月面の Fe 濃度分布を推定した。ガンマ線強度から濃度への変換は、アポロサンプル[8]をグラントゥールスとして FeO 濃度を求めた。鉄成分濃度の全球的な月面分布は LPGRS による報告[5]とは大きな違いは見られなかったが、低濃度領域についてはその傾向に違いが見られた。また、本研究で同時に推定された Th, U と Fe の相関から、嵐の大洋付近が最も鉄濃度が高くかつ Th や U 濃度も比較的高いことが分かるが、このような月サンプルは現在までに得られていない。

本研究では、KGRS の観測データから推定された鉄成分の月面分布について報告し、本研究で得られた Fe 分布とこれまでに報告した Ca 分布、Th, U 分布との相関から、月面の鉱物・地質分布について議論する。

- [1]N. Hasebe et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78(2009)18-25. [2]S. Kobayashi et al., SSR 154(2010)193-218. [3]N. Yamashita et al., GRL 37(2010)L10201. [4]N. Yamashita et al., EPSL 353-354(2012)93-98. [5]T. H. Prettyman et al., JGR 111(2006)E12007. [6]S. Maurice et al., JGR 109(2004)E07S04. [7]M. Hareyama et al. 2012 惑星科学会秋季大会. [8]P. Lucey et al., "New View of the Moon" ed. J. J. Rosso (2006)83.

観測衛星による連続分光データを使った月面上のCaに富む輝石の全球搜索

○山本 聡¹, 中村 良介², 松永 恒雄¹, 小川 佳子³, 石原 吉明², 諸田 智克⁴, 平田 成³,
大竹 真紀子⁵, 廣井 孝弘⁶, 横田 康弘¹, 春山 純一⁵

¹国環研, ²産総研, ³会津大, ⁴名古屋大, ⁵JAXA/ISAS, ⁶ブラウン大

かぐや搭載のスペクトルプロファイラ(SP)により、月の全球の約7,000万地点において連続反射分光データ(ハイパースペクトルデータ)が取得されている[1](図1左に代表的なスペクトルを示す)。これらの全SPデータに対するデータマイニング手法を使ったスペクトルサーベイ研究により、特定鉱物の月表面分布を明らかにすることができる。実際にSP全データを使った特定スペクトルサーベイ研究により、極めて純度の高い斜長岩(Purest AnorthositeまたはPAN)に富む領域[1,2,3]、低Ca輝石(Low Ca pyroxeneまたはLCP)に富む領域[4]およびカンラン石に富む領域[5]、スピネルに富む領域[6]の月全球分布が明らかにされてきた。一方、これまで明らかにされていない月の主要鉱物の全球分布としては、Caに富む輝石(High Ca pyroxeneまたはHCP)が挙げられる。過去の研究では、例えば光条クレーターに注目した解析により、HCPに富む物質の局所的分布についての研究[7]はあるが、カンラン石、LCP、PANやスピネルのように全球分布について調べられた研究はない。

そこで、本研究では、SP全データを用いたデータマイニングによる、HCPの月全球搜索を行った。その結果、月の全球にわたって約15,000箇所で、HCPが支配的なスペクトルを検知した。それらの多くは衝突盆地に付随する玄武岩海で見つかるが、高地領域でも大量に見つかることが分かった。興味深いことに、高地における検知地点はいずれも、衝突クレーター構造に常に関連しており、例えばクレータ中央丘やテラスなどに集中して見つかることがわかった。この出現の特徴は、これまで見つかった、カンラン石、PAN、LCPの特徴と似ている(図1右に一例としてティオフィラスクレーターにおける検知地点の分布を示す)。本発表では、今回見つけたHCPの分布のうち高地のクレーターに着目し、それらの地質的特徴およびスペクトルの特徴を基にして、これらのHCPの起源と、そこから推定される月地殻~マントルの構造/進化についての議論を行う。

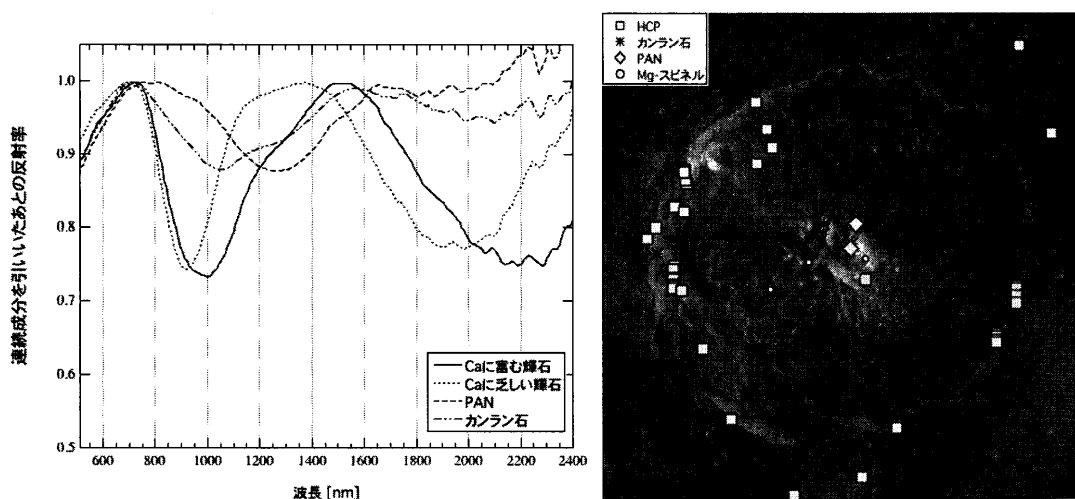


図1:(左)SPによって月面上で観測される月主要鉱物の反射スペクトルの例。連続光成分(コンティニューム)を引いたあとのスペクトル。(右)ティオフィラスクレーターにおけるHCPに富む場所の検知地点。比較のために、カンラン石、PAN、Mgに富むスピネルの検知点も示す。

[1] Matsunaga, T. et al. 2008, GRL, 35, L23201. [2] Ohtake, M. et al. 2009, Nature, 461, 236. [3] Yamamoto, S. et al. 2012, GRL, 39, L13201. [4] Nakamura, R. et al. 2012, NGEO, 28, NGEO1614. [5] Yamamoto, S. et al. 2010, NGEO, 3, 533. [6] Yamamoto, S. et al. 2013, GRL, doi: 10.1002/grl.50784. [7] Ogawa et al. 2011, GRL, 38, L17202.

アポロ試料粒子形状を用いた月表面での影隠し衝効果のシミュレーション

○丸山薫¹, 佐伯和人¹, 片桐淳², 松島亘志³, 大竹真紀子⁴, 土山明⁵

¹大阪大学大学院理学研究科, ²産業技術総合研究所, ³筑波大学大学院システム情報工学研究科, ⁴宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁵京都大学大学院理学研究科

月表層の岩石の種類や構成鉱物の組成を全球的に知るためにリモートセンシングによる可視近赤外反射スペクトルデータが使われている。測定される月面の光の反射強度は、観測幾何、鉱物組成や表面状態に依存するが、観測幾何による影響を取り除くためには測光補正が行われている。測光補正の理想は月面上の同じ場所に対して複数の観測幾何条件での測定を行い補正式を求めることだが、探査の制約上困難なため理論的、経験的に求められたモデル式が使われている。モデル式には複数のパラメータが存在し、測定データとのフィッティングにより決定されている。測光補正モデルの主要な要素に影隠し衝効果がある。これは太陽光入射方向と観測方向とのなす角が小さくなると月面が急激に明るくなる現象である。この効果は Hapke によって理論的に関数化され、モデル式に組み込まれている。しかし、衝効果の理論式は低密度に分布する粒子をイメージしており、実際の月表面とは状況が異なる。本研究の目的は、経験則によらない影隠し衝効果の関数形を求めることである。

まず、アポロ計画で採集されたレゴリス粒子のマイクロ X 線 CT 測定を行い、3 次元形状情報を得た。1 粒子を 10 個の球の集合体として近似し、74 種類の異なる形状をした粒子のセットを複製した 2426 個を使って、側面は周期境界、上下は載荷板で拘束し、圧縮することでレゴリス積層モデルを得た。そこに光を入射させ、ある方向から見た時に影となる割合を求めた。Hapke のモデル式と比べると影ができる割合は 1/3 前後となった。Hapke のモデル式に含まれるパラメータ $h = 0.05$ (Hapke, 1986) を $h = 0.5$ にすると値は似てくる。同じ位相角 60° でも、観測幾何が異なる場合、入射角 0° , 観測角 60° の時と比べると、入射角 30° , 観測角 30° の時は、影のできる割合は 1.3 倍となった。このことから、位相角のみの関数ではないことがわかった。

また、レゴリス積層モデルに光を入射させ、レゴリス表層のレゴリス粒子表面ですべて反射させ、光が出てくる角度を求めた。この条件下では Lunar-Lambert function (McEwen, 1986) に似た傾向の散乱特性が見られた。

月・小天体・火星の縦孔・地下空洞探査の科学的意義

Scientific significance of explorations to vertical holes and underlying caves
of the Moon, Minor bodies and Mars.

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

月惑星には、通常の隕石衝突痕クレータより、直径に比して深い縦孔が存在する。月においては、SELENE(かぐや)地形カメラが、数10m直径・深さを持つ縦孔を発見し¹⁾、その後、米国LRO搭載カメラで新たに発見されている²⁾。火星においても、月の縦穴に類似した縦孔が、アルシア山の麓などに見られる³⁾。更に、規模は異なるが、水星には明らかに隕石衝突痕と異なる直径数10kmに及ぶ巨大な凹みが見つかった⁴⁾。いずれも、溶岩チューブか、マグマ溜まりの陥没が原因の空洞の天井が崩落したものと考えられる。一方、火星の衛星フォボスなどには、連なった凹(へこ)みがある⁵⁾(図5参照)。これらの成因については様々な説があるが⁶⁾、火星潮汐による断層形成や内部からの脱ガス、或いは火星に捕獲された際の抗力によるひび割れが原因であれば、月や火星と同様に地下の空洞が形成されていることが考えられる。2005年、土星探査機カッシーニにより衛星ヒペリオン(半径幅は95-182km)は、スポンジのような深い孔構造で覆われていることを分かった⁷⁾(図6参照)。この縦孔の成因は、氷の昇華作用で生じたのかもしれない。

月惑星の縦孔・地下空洞構造を探査する意義は大きい。大気を持たない天体では、激しい隕石衝突によりあらかた層序が乱されているが、これら構造は、形成時の新鮮な様子を保つ優れた露頭であり、その調査により、火成活動の履歴や、衝突の履歴を知ることができる。縦孔壁の溶岩層、更に地下空洞内は、水などの揮発性物質の集積・保存も期待される。火星に至っては、生命の発現可能環境として重大な意味を持つ。火成活動起源でない縦孔も、それらの成因は興味を引くものであり、天体の進化を理解する上で着目すべき構造である。これら縦孔・地下空洞は、厳しい宇宙環境の中において優れた拠点となり得るという点でも探査の意義が大きい。いずれにしても、縦孔・地下空洞は、今後の月惑星探査において、最も重要な探査対象であると言える。

参考文献

- 1) Haruyama, J. et al., GRL. 36, L21206, doi:10.1029/2009GL040635, 2009.
- 2) Haruyama, J. et al., Moon: Prospective Energy and Material Resources, pp. 140 – 164, 2012.
- 3) Cushing, G.E. et al., GR L. 34, L17201, doi:10.1029/2007GL030709, 2007.
- 4) Gillis-Davis J.J. et al., E P S L 285, 243–250, 2009.
- 5) Veverka, J. and Duxbury, T. C., J G R 82, 42 13-4223, 1977.
- 6) Murray, J.B. et al., Planet. Space Sci., 42(6), 519-526, 1994.
- 7) Thomas P. C. et al., Nature 448, 50-53, doi:10.1038/nature 05779, 2007

月縦孔・地下空洞探査に向けた キャスティングシステムの開発

○有隅仁¹, 大槻真嗣, 久保田孝, 春山純一²

¹産業技術総合研究所, ²宇宙航空研究開発機構

本研究では、月・火星で発見された縦孔を通して地下空洞へ探査機を投入し、探査終了後にサンプルやデータを回収するミッションを扱う。初期段階として、ここでは着陸機から縦孔底へ探査機を高速に搬送する方法を議論する。なお、継続的な運用が困難となる点から、スラスタなど、現地で得られない燃料や火薬等の消耗品を要する装置の使用は考慮しない。

探査ローバーのような地形・地質などに依存する移動機構を用いると、着陸機から縦孔までの溶岩チューブ固有の隆起地形においてスタックや転倒、あるいは縦孔周辺の崩落などによる探査機の落下などによるシステムダウンの問題が起きうる。そこで、我々はキャスティングシステムにより遠方から観測機器や小型ロボットを収納するカプセルを投擲し、着地以外の地面への接触を避けて短時間で縦孔の底へ軟着地させる方法を提案する。その方法の詳細を図1に示す。まず、(a)カプセルと共にダミー錘を投擲する。次に、(b)~(d)ワイヤを介してカプセルを種々の適切な方向から繰り返し引っ張り合ってカプセル速度を十分に低減させる。さらに、(e)着陸機のリール機構および所望の位置に落下したダミー錘から伸びる各ワイヤによりカプセルを支持し、縦孔入口中心部に宙づりにさせる。最後に、(f)ワイヤ等を用いてカプセルから探査機を縦孔底まで降ろす。ここでは、開発装置を用いて遠投ならびに投擲したカプセルの大幅な速度低減化の動作について基礎的な検討を行う。

まず、投擲実験を JAXA つくばセンター敷地内で行った。月面上での目標到達距離を 100m とすると、重力の違いから地球上での目標到達距離は 16.67m となる。ただし、地球上では大気の影響を受けるので、本実験では目標到達距離を 18m に設定する。また、目標放出角度を 45deg、目標回転速度を 1038deg/s とする。投擲を複数回、繰り返し、レーザー測定器を用いてカプセルの落下位置を測った結果、目標点に最も近づいた距離は 17.7m で、目標到達距離に対する繰り返し精度は 1.83% となった。目標点へ届かない主な理由は空気抵抗および風の影響と考えられる。

次に、軟着地の実験結果を示す。図2はカプセルとダミー錘を同時に放出したときの両者の投擲軌道を示す。図中の緑色円はカプセルの位置を、赤色円はダミー錘の位置を表す。同図のようにカプセルは繰り返しワイヤにより引っ張られて減速し、着地前に短時間ながら空中に留まっているのが分かる。また、カプセルの目標点距離 2.5m に対して実際の着地距離は 2.53m で、他の軌道も含めほぼ理論値に近い動作を実現した。

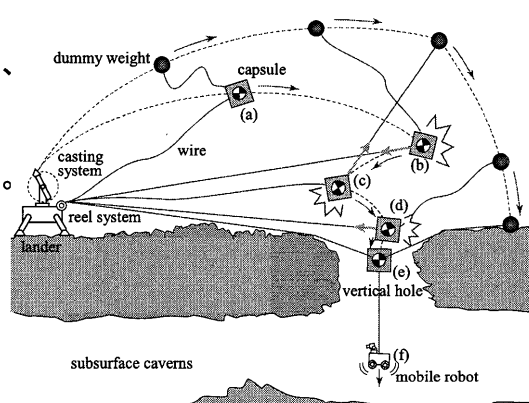


Fig. 1 Transportation of probe by Casting System

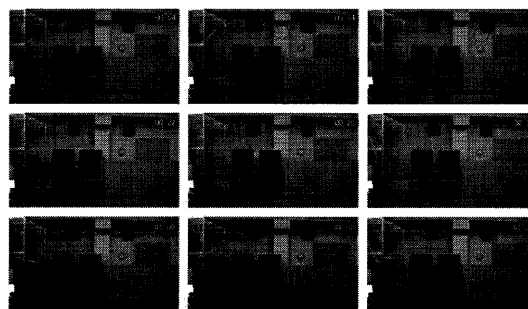


Fig. 2 Trajectories of capsule and dummy weight

月惑星熱流量の精密観測手法に関する検討と 測定プローブの基礎開発（2）

○堀川大和¹、田中智²、坂谷尚哉¹、滝田隼³、小川和律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し、材料物質や内部構造を議論する上で重要である。地殻熱流量は表層物質の熱伝導率と垂直温度勾配を測定することで求められる。我々はこれら 2 つのパラメータをその場観測するために、温度計や熱伝導率計を搭載して地下に埋設させるペネトレータなどの貫入プローブを開発してきた。しかし貫入プローブと周囲のレゴリスとの熱伝導率の違いから、貫入プローブとレゴリスの温度場に乱れが生じる熱屈折のために、貫入プローブに搭載されている熱流量計が本来のレゴリスの熱流量を計測するのに不確定性を有している。

そこで本研究では、熱流量計を入れた細いプローブを貫入プローブの構体表面から伸展させることによって、貫入による熱屈折の影響が少ない位置で、熱流量値を高精度（目標精度：10%以内）に計測できる装置を検討した。通常のニードルプローブは、線加熱法（Carslaw and Jaeger, 1959）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、本研究における熱流量プローブは、貫入による熱屈折の影響が極力少ない位置で測定したいため、プローブの先端部分に測温点を配置する。本研究における熱流量プローブの測定原理は、プローブ中の任意の測温点で熱伝導率を推定できるニードルプローブ法（Chan et al., 1978）を使用する。

これまでの研究では、月ペネトレータの熱数学モデルに基づく数値シミュレーションから、熱流量プローブの伸展による温度勾配精度の向上を確認した。また試作した熱流量プローブの性能評価のために、ガラスビーズを用いて熱伝導率測定精度を調査してきた。その結果、月の地下環境（熱伝導率は 0.01W/m/K のオーダー）における試作したプローブの先端部分での熱伝導率測定精度は、約 4.3% となり、高精度の熱伝導率測定が可能であることが分かった。またこの熱伝導率測定では、プローブとの比較測定のために線加熱法を複数点実施しており、プローブの先端部分での熱伝導率は線加熱法による熱伝導率に対して約 0.68 倍であることが分かった。この両者の差異は、プローブ内のヒーター線、熱電対を通る熱伝達（熱リーク）や、プローブと周囲のレゴリスとの熱接触による影響を考慮していないためだと考えられる。現在、熱伝導率の差異が生じる要因の定量的解明を進めており、本発表ではそれらの結果を報告する。

ボロノイ図を用いたクレーターの空間分布の評価

○木下達生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

月面には、隕石・小天体などによって形成した衝突クレーターが無数に存在する。地形緩和作用が非常に小さい惑星表面の形成年代をクレーターの数密度から地表面の形成年代を推定するクレーター年代学的手法において、クレーターを形成した隕石・小天体は、空間的にランダムな方向から降ってくることを仮定している。しかし、クレーターには隕石・小天体の衝突によって直接形成した1次クレーターと呼ばれるものの他に、1次クレーター形成の際に飛び出したエジェクタによってできる2次クレーターも存在する。2次クレーターの形成したエジェクタは、月面に対して空間的にランダムに分布を見せず、2次クレーターの空間分布は、偏っている。これら1次クレーターと2次クレーターの混合である月面上のクレーターは、地表面の形成年代以外の理由によって一部の領域において空間的な偏りが生まれる。そのため、これまでクレーター年代学を適用するために、あらかじめ2次クレーターを含む領域を目視で取り除く必要がある。目視による定性的な取り除き作業の結果、時折研究者間の差異が問題になることがある。これを解決する手段として、クレーターの空間分布を定量的に評価する手法が開発されてきた(Kreslavsky, 2007; Bierhaus et al., 2005; Michael et al., 2012)。

我々は、これまで階層凝縮型クラスタリングを応用した手法を開発してきたが階層凝集型であるがための誤評価が問題となってきた。そこで新たにボロノイ図を用いたクレーターの空間分布を評価する手法を考え、その評価を行った。評価対象の領域に対してクレーターの惑星表面上の円とみなし一般図形ボロノイ図作成を行い、各クレーターの持つ分割領域面積を計算し、この分割領域が小さいクレーター同士は、お互いにクラスターを形成していると定性的に評価できるだろう。我々は、その評価をするために比較対象として理想体にランダムな空間分布を示す比較領域を生成し、同じく一般図形ボロノイ図を作成して分割領域を計算・評価対象領域の分割面積と定量的に比較する。

この手法を用いると過去の階層凝縮型クラスタリングを用いた手法でクラスターと判断されなかった2次クレーターも定量的に判断することができたため、従来の手法より有用であることがわかった。

火山観測ロボット野外実証試験活動報告

Volcano-observation robot field test activity report

○佐伯和人¹

¹大阪大学・理学研究科

伊豆大島は近い将来、住民の避難が必要な規模の噴火をする可能性が高い。発表者はその時を、ロボットが世界で初めて火山観測に有効活用される機会とするべく、毎年多数のロボット開発者を伊豆大島に集めて、火山観測ロボット実証試験大会を実施している。この活動は、将来の宇宙探査のためにも重要な布石になると考えている。ロボット観測体制の現状、地球の火山観測ロボットと宇宙探査ロボットの類似点と相違点、火山観測から宇宙探査へ至るロードマップを発表する。

火山噴火の際には、噴火直後から避難完了に至る短期間に刻々と変化する状況を観測し、短期の状況予測を避難誘導に活かす事が重要である。1986年の伊豆大島噴火では爆発的な噴火が発生し、カルデラ底やカルデラの外など思いもかけない地点での活動となった。そのため、噴火地点に近寄ることができず、噴火現象の科学的理解や災害軽減のための貴重なデータを調査観測する機会を逸した。また、全島避難の際には、住民に噴火の状況が伝わらず、溶岩流によって岡田-元町間の道路が断たれているといった誤った情報が流れ、避難を妨げた。前回の噴火時の混乱を踏まえ、噴火時に即応できる新しい観測ロボットの開発と観測体制の確立が必要である。このような考えのもと、発表者は2009年より伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムを始めた。シンポジウムの目的は、火山学や宇宙工学や防災など様々な分野で無人観測ロボットを開発している研究者を大島に集め、野外実証試験と情報交換の機会を提供し、ロボットの開発と観測体制の確立を加速させることである。2009年度は9つの研究グループからUGV（無人観測車）8台、UAV（無人観測飛行機）2機が、2010年度は5つのグループからUGV5台、UAV2機が、2011年度は9つのグループからUGV13台、UAV3機が、そして2012年度は10のグループからUGV13台、UAV6機が参加した。2013年度の実証試験も本年秋季大会直前に実施される予定である。火山観測を目的としたロボット実証試験大会としては世界最大規模の大会に成長した。実証試験には宇宙分野からも多数の参加がある。宇宙ロボットと火山ロボットの共通点や相違点は当日整理して呈示するが、宇宙開発のロードマップの中で重要なのは以下の相違点である。（1）宇宙ものは開発グループのロボットが採用されなければ活躍の機会がないが、火山観測は全グループが活躍できる、（2）地球ものでは挑戦的な設計が許される、（3）火山観測は火山研究者との日頃からの交流と自然科学の理解が促進される、などが挙げられる。チャレンジ精神のある宇宙工学者を火山で育ててはどうだろうか。シンポジウムの詳細は以下のURLを参照していただきたい。

(<http://www.volcano-robot.org/>)

K-Ar 法を用いた惑星着陸探査におけるその場年代計測装置の開発: 天然岩石のもつアイソクロン年代の算出

○長勇一郎¹, 三浦弥生², 諸田智克³, 杉田精司^{1,4}

¹東京大学地球惑星科学専攻, ²東京大学地震研究所, ³名古屋大学環境学専攻, ⁴東京大学複雑理工学専攻

その場年代計測法: 惑星表面の地質ユニットの年代は, 惑星科学において最も重要かつ基本的な観測量の一つである. サンプルリターンなしに岩石の年代をその場計測する技術は今後の惑星探査において極めて有用な武器となりうることから, 様々な検討がなされてきた. 先行研究の多くは, 粉末にした岩石試料を炉で溶かして計測する”全岩モデル年代”であった[e.g., Talboys et al., 2009]. しかし全岩法には, 大気やマントルに由来する捕獲 ^{40}Ar の寄与を補正できないなど, 得られる年代に大きな不確かさが生じうるという問題があった[Bogard, 2009].

その場アイソクロン年代計測法: そこで著者らは, 岩石試料へのレーザーアブレーションによって K と Ar を抽出し, それぞれをレーザー誘起発光分光法(LIBS), 四重極質量分析計(QMS)で計測することによって K-Ar 年代の局所分析を行う装置を組み上げた. 本手法では, 異なる K 濃度をもつ複数の鉱物を撃ち分けてアイソクロンを引くことで放射壊変由来の ^{40}Ar と大気やマントルからの捕獲成分を分離し, 先行研究で示された問題点を解決できる可能性がある.

目的: 本研究では, 天然の岩石に対して同手法を適用し, (1)アイソクロン法の検証, (2)アイソクロン年代の取得, (3)捕獲 Ar の同定, を目的とする実験を行った.

実験: 南極産片麻岩の板状試料(黒雲母の K-Ar 年代: 485 ± 13 Ma[岩田, 2008])にレーザーを照射し, 15 の異なる点に対して K の発光スペクトルと $^{40}\text{Ar} \cdot ^{36}\text{Ar}$ のマスペクトルを得た. これらをレーザー掘削孔の体積と組み合わせることで, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ 間の関係に基づくアイソクロンを取得し, その傾きから年代を, 切片から非放射壊変由来 Ar の同位体比を求めた.

アイソクロン年代と初生 Ar 同位体比: 得られたデータ点は一本の直線上に比較的小さいばらつきで分布しており, アイソクロンとして成立することが確認できた. 予備的な結果では, 得られたアイソクロン年代は 660 ± 110 Ma, 初生 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比は 274 ± 170 であった(誤差は 2σ). 既知の年代値と比較すると, 得られた年代の下限値においても 13%程度の年代過大評価が見られる. 年代値の算出には, 既知量の ^{40}Ar を測定システムに導入し QMS 感度係数を正確に決定する必要があるが, このとき真空容器壁面からのガスの叩き出しや検出器の応答特性などの影響で, 標準ガスの信号強度は時々刻々と変化する. 現在, この効果をより正確に補正した感度係数を定める実験を進めており, 年代決定の確度・精度の向上を目指している. 他方, 捕獲起源 Ar の同位体比は地球大気の数値($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 296$)と整合的で, 放射壊変由来の ^{40}Ar と非放射壊変由来の ^{40}Ar が分離できることが示された. 以上の結果は, 本計測手法によって信頼性の高い岩石年代値を算出しうることを強く示唆するものである.

真空紫外 LIBS による K-Ar 年代測定方法の検証

○奥村裕¹, 大石峻裕¹, 芝崎和夫¹, 長勇一郎², 亀田真吾¹,

三浦弥生², 三部賢治², 杉田精司²

¹立教大学, ²東京大学

現在 JAXA では月周回衛星 SELENE(かぐや)の後続機として SELENE-2 の打ち上げを検討している。SELENE-2 では無人探査ローバーを月に着陸させ、まだ謎の多い月表面物質の科学調査を行う予定である。月面物質についての情報はアポロ計画で持ち帰られた試料に大きく依存しているが、月全体の特徴を反映していない可能性がある。

そこで、私たちは月の調査を行うローバーに搭載する元素組成・固化年代測定装置として LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy:レーザー誘起絶縁破壊分光法)を検討している。LIBS は高エネルギーのパルスレーザーを測定対象に照射しプラズマ光を発生させ、その光を分光することによって元素組成分析を行う手法である。LIBS を用いた元素測定は NASA の火星探査ローバー「Curiosity」によって既の実証されている。また、固化年代測定は K-Ar 年代測定によって行うことを検討している。K-Ar 年代測定は K の放射壊変を利用した年代測定法である。K は多くの岩石鉱物に含まれており、その放射性同位体である ^{40}K は、半減期 12.5 億年で ^{40}Ar に崩壊してゆく。したがって岩石に含まれる ^{40}K に対する ^{40}Ar の割合を測定することにより、その岩石が固化した年代を測定することができる。現在、LIBS を用いて K の輝線は検出されているが Ar の輝線は検出されていない。既にその場で K-Ar 年代測定を行うため、K を LIBS で定量し Ar を四重極質量分析計(QMS)を用いて定量する、という手法が検討されている。この方法では LIBS と QMS の 2 つの観測器が必要となる。しかし LIBS での Ar の定量分析が可能となれば、LIBS のみで固化年代測定が行えることになる。私たちは 104.8nm と 106.7nm の Ar 輝線の検出を目指して通常可視領域の輝線を用いる LIBS で真空紫外領域の輝線の測定実験を行い、LIBS のみを用いた K-Ar 年代測定の実現性を検証した。

Type II コンドリュールに含まれるカンラン石斑晶に見られる FeO-rich overgrowth 層の形成条件

○三浦均¹, 山本哲生²

¹ 名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科, ²CPS (神戸大学)

Type II コンドリュールに含まれる比較的大きな ($> 40 \mu\text{m}$) オリビン斑晶には, FeO に富んだ厚さ約 $10 \mu\text{m}$ 以下の overgrowth 層が観察される [1]。この overgrowth 層では, 斑晶中央部 (Fa22–Fa39)¹ から斑晶の縁 (Fa38–Fa77) に向かって FeO 含有率が直線的に増加するという組成累帯構造が見られる。もしこの斑晶が一度の加熱イベントで形成したのだとしたら, 従来考えられていた冷却速度 ($0.01 - 1 \text{ K s}^{-1}$) ではこのような急激な組成変化は説明できない [1,2]。Wasson [2] は拡散律速成長モデルに基づき, overgrowth 層形成時の冷却速度を $\sim 10^3 \text{ K s}^{-1}$ と見積もった。しかし, 彼のモデルには blocking temperature (オリビン成長が停止する温度) という不定パラメータが含まれている上, 組成の直線的な変化については説明がなされていなかった。

我々は, overgrowth 層に見られる直線的な組成累帯構造を説明可能な新しい分別結晶化モデルを提案する。珪酸塩メルト中でオリビン結晶が成長する際の, 固液界面における元素分配やメルト中の濃度分布の時間変化を自己無矛盾に数値的に解くことで, 冷却速度一定条件における結晶成長のダイナミクス及び結晶内の組成変化を再現した。簡単のため, 以下を仮定した: (a) 固液界面は平面, (b) 固液界面における局所平衡分配, (c) 固体内拡散無視, (d) メルト内拡散係数一定, (e) 固体・メルトともに Mg-Fe オリビン組成とする。数値計算の結果, 冷却速度一定条件においては結晶の成長速度は一定ではなく, 時間とともに指数関数的に加速することが分かった。この分別結晶化過程を単純化し, 指数関数的成長速度を仮定したところ, 結晶内の組成変化を与える近似的な解析解を得た。結晶成長開始前の固液界面の位置を $x = 0$ とし, 界面が x の位置まで成長したときの結晶の組成を $c_S(x)$ とすると, $c_S(x)$ は x の一次関数で表されることが分かった。すなわち, 直線的組成累帯構造である。その傾きは冷却速度 R_c の平方根に比例し,

$$\frac{dc_S}{dx} \simeq k_0(1 - k_0)c_{L0}\sqrt{\frac{2\pi R_c}{D_L\Delta T}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで, k_0 は平衡分配係数, c_{L0} は初期液相濃度, D_L はメルト中の FeO の拡散係数, ΔT はある組成におけるリキダスとソリダスの温度差であり, オリビン相図より求められる。式 (1) は, 数値解を広いパラメータ範囲 (初期メルト組成, 冷却速度) にわたって良く再現した。Wasson & Rubin [1] が測定した直線的組成変化の傾きを式 (1) に代入したところ, $R_c \sim 200 - 2000 \text{ K s}^{-1}$ を得た。この推定値は, 従来考えられていた値 ($0.01 - 1 \text{ K s}^{-1}$) よりも 3 桁以上も大きい。この結果は, 薄い overgrowth 層を示すオリビンを含むコンドリュールが, 複数回加熱過程の最後の加熱イベントにおいて極めて大きな冷却速度を経験した可能性を示している。

参考文献: [1] Wasson & Rubin (2003), GCA 67, 2239. [2] Wasson (2004), LPSC 35, 9113 (abstract).

¹Fa に続く 2 桁の数値は, オリビン中の原子比 Fe/(Mg+Fe) を百分率 (%) で表している。

珪酸塩の高温加熱過程の放射光によるその場観察実験

○、上梶 真之¹、安田 秀幸²、柳楽 知也³、中塚 憲章³、上杉 健太郎⁴

¹宇宙航空研究開発機構、²京都大学、³大阪大学、⁴JASRI/SPRING-8

隕石中のコンドリュールは太陽系の形成初期における高温現象で加熱・溶融の後、急速な冷却により再固化することで形成されたと考えられている。このコンドリュール形成過程、とくにその熱源に関しては1世紀以上の議論が続いているが、未だに解決されていない。コンドリュールの形成環境は、これまで主に模擬物質の加熱実験と、天然のコンドリュールとの比較によって調べられてきた。これまでの実験では、コンドリュールの組織、組成はその加熱・冷却のタイムスケール、最高温度、冷却速度などに強く依存していることがわかっている。しかし、これまでの加熱実験では加熱中にその場観察が出来ず、実際にどのような過程を経て最終的な組織・組成が達成されたのか、詳しく知ることが出来なかった。

このコンドリュールには、太陽系の平均的な化学組成と比較して、親鉄性元素が大きく欠乏しているという大きな特徴がある。Uesugi et al. (2008)では鉄粒子が溶融したコンドリュールの表面・内部・外部にある状態の力学的安定性について調べた。その結果、溶融したコンドリュール内部の鉄粒子はエネルギーが高く不安定であり、何らかの擾乱により鉄粒子が溶融したコンドリュール表面に到達した場合、ただちにコンドリュール外部へ排出されることがわかった。

しかし、この過程もまた、加熱実験で確認することができず、検証されてこなかった。上梶ら(2008)による加熱実験で、鉄粒子が珪酸塩の加熱・溶融時に1分以内という非常に短いタイムスケールで放出されることが調べられたが、なぜそのような短時間での排出が行われるのかは、その場観察が出来ないため、調べることはできなかった[2]。

本研究では、大型放射光施設 SPRING-8 を利用した高真空その場観察加熱実験装置を使用し、隕石試料の X 線その場観察による加熱実験をはじめて行った。その結果、試料が溶融を始めた瞬間に珪酸塩と試料を固定しているホルダが激しく反応し、発生したガスとともに金属鉄が激しく吹き出される現象を確認することが出来た。一方でこの様な反応をしないホルダを用いて加熱実験を行った場合、金属鉄の排出は起こらなかった。

本発表ではこれらの加熱実験の詳細を紹介し、この金属鉄の排出メカニズムや珪酸塩の凝固過程をその場観察の結果をもとに考察する。

観測ロケット “S-520-28 号機” を用いた微小重力実験から探る鉄微粒子の生成過程

○木村勇氣¹、田中今日子²、塚本勝男¹、竹内伸介³、稲富裕光³

¹東北大学理学研究科地学専攻、²北海道大学低温科学研究所、³宇宙航空研究開発機構

気相から均質核生成を経てダストが形成する際の、微粒子のサイズ、サイズ分布、数密度、モルフォロジー、多形などの特徴を知ることは、ダストの生成とその後の変成過程を理解するうえで非常に重要である。核生成理論を用いてダストのこれらの特徴を予測する際に、表面自由エネルギーと吸着確率の二つの物理パラメータが重要となる。現在、この予測がうまくいかないことがあるが、我々はその原因がバルクの値を用いている点にあると考えている。例えば、酸化チタン(アナターゼ)の表面自由エネルギーはナノ領域でサイズ依存性を持ち、直径 14 nm の時にバルクに対して約 30%大きな最大値を取ることが報告されている¹⁾。また、付着確率の実験的な決定が試みられているが、地上におけるバルク実験では 1 に近い値を示す報告が多い一方で、微小重力環境下におけるガスからの凝縮実験では 10^{-5} という非常に小さな値が報告されている²⁾。しかし、重力がミクロスケールの反応に効くとは考えにくい。微小重力環境下で均質核生成を経て生成する宇宙ダストの生成過程の解明を目標に、我々は 2012 年 12 月 17 日に観測ロケットを用いた微小重力実験を行った。その結果について報告する。

小型の真空チェンバーを用意し、不活性ガス($\text{Ar } 2 \times 10^4$ and 4×10^4 Pa)中で加熱蒸発させた鉄の蒸気が冷えて均質核生成を経て微粒子が形成する際の屈折率変化を二波長マッハツェンダー型干渉計でその場計測した。屈折率の変化はガスの温度と鉄の濃度変化によってもたらされる。屈折率変化の度合いは波長によって異なることから、赤と緑の二波長を用いることで二つの条件を同時に決定可能である。ここで、全圧は真空計により、蒸発源温度は放射温度計により測定した。これらのデータや干渉縞画像などはテレメトリーによって得た。観測ロケットによって得られた約 7 分半の微小重力環境で上述の装置を 3 組用いて 3 つの実験を行った。

3組用意した実験はすべて予定通りに実施され、成功した。同じ条件で地上実験を行い、合わせて解析した結果、微小重力環境下では地上実験 ($P/\text{Pe} = \sim 10^{12}$) よりも大きな過飽和環境下で ($P/\text{Pe} = \sim 10^{15}$) 核生成したことが分かった。ここで古典的核生成理論と半現象論モデルを用いて、実験における鉄蒸気の冷却のタイムスケールと凝縮温度から物理定数の評価を行った結果、地上実験よりも微小重力実験のほうが鉄の付着確率が小さい傾向にあることが分かってきた。今回、その理由について主に考察する。

1) H. Zhang, B. Chen, J. F. Banfield, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **11**, 2553 (2009).

2) Michael, B. P., Nuth III, J. A., Lilleleht, L. U. *Astrophys. J.* **590** (2003) 579-585.

分子間水素原子移動による HOCO ラジカルの分解

○大島基¹, 谷篤史¹, 菅原武², 大垣一成², 北野勝久³¹ 阪大院・理, ² 阪大院・基礎工, ³ 阪大院・工

HOCO ラジカルは $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ の反応における中間体, 及び他分子への水素原子の供給源として, 星間分子雲や惑星大気の形成, 進化を理解する上で重要な役割を果たしている [1,2]. HOCO ラジカルの基底状態の 1 つである *cis*-HOCO は, トンネル効果により CO_2 と水素原子に分解することが推察されているが [3], 反応性が高く短寿命であることからその減衰過程を観察することが困難であり, 実験的な証明はなされていない. ガスハイドレートは水分子が水素結合によりカゴ構造を形成しガス分子を含む包接化合物であり, 誘起された炭化水素系のラジカルや水素原子を他の物質よりも比較的安定にカゴの内部に補足できることが報告されている [4]. ガスハイドレートの 1 つである CO_2 ハイドレートを反応場として利用することで, 安定化された HOCO ラジカルの減衰過程を観察できることが期待される. 本研究では, ラジカルや水素原子を観察することができる電子スピン共鳴 (ESR) 法を用いることで, ガンマ線を照射した CO_2 ハイドレート内部に誘起された HOCO ラジカルの反応系について調査を行った.

cis-HOCO は *cis*-HOCO はトンネル効果ではなく熱活性的に二次反応により減衰し, その活性化エネルギーは約 14 kJ/mol (0.14 eV) を示した. この結果は, 気相環境下においても *cis*-HOCO がトンネル効果で分解せず, 他のラジカルや原子と反応して減衰することを示唆している. また, HOCO ラジカルは HOCO- CO_2 間における水素原子移動が起こることでハイドレート内部を見かけ上拡散し, $\text{HOCO} + \text{HOCO} \rightarrow \text{HCOOH} + \text{CO}_2$ の反応により減衰することがわかった. 本研究のラジカル-分子間の水素原子移動は, 一般的なラジカルによる水素原子引き抜き反応 (*i.e.* $\text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_3$) [5] とは逆のプロセスであり, ラジカルが余分な水素原子を安定な分子へ引き渡す反応である. これらの結果から, 惑星大気中や星間分子雲などの気相環境において, 他分子へ移ることが可能な水素原子 (またはプロトン) を持つラジカル種 (HOCO, HCO, HO_2 など) から安定な分子へ水素原子が供給されることにより, ラジカルの拡散や反応が進んでいる可能性が示唆される. さらに, 宇宙線や紫外線により固体表面で誘起されたラジカルが水素原子移動を伴って固体内部まで拡散することで, より広い反応場を形成していることが予想される.

References

- [1] T. P. M. Goumans et al., (2008) *Not. R. Astron. Soc.* **384**, 1158. [2] J. W. Stock et al., (2012) *Icarus*, **219**, 13. [3] H. G. Yu et al., (2001) *Chem. Phys. Lett.* **349**, 547. [4] K. Takeya et al., (2004) *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 353. [5] T. Ishimoto et al., (2005) *Chem. Phys.* **314**, 231.

大気大循環モデルを用いた木星型惑星大気の数値実験

○ 高橋芳幸¹, 竹広真一², 林祥介¹¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 京都大学数理解析研究所

木星の表層に見られる循環構造は縞状構造をしていることが知られている。約 30 本ほどの平均東西風が交互に形成されており、長期間維持されている。このような循環構造の成因については古くから研究が行われており、大きく分けて二つのモデルが提唱されている。一つは「深いモデル」であり、もう一つは「浅いモデル」である。「深いモデル」は、東西風の成因を惑星半径に対して無視できないほど厚い球殻内での対流に求めるものであり、「浅いモデル」は惑星半径に対して無視できるほど薄い表層の運動に求めるモデルである。「浅いモデル」の研究は、計算機能力の制限のため従来は球面上の順圧モデルや浅水系のモデルを用いて行われてきたが、近年は三次元モデルを用いた研究も行われるようになってきた (e.g., Schneider and Liu, 2009, 以後 SL09; Lian and Showman, 2010, 以後 LS10)。そこで本研究では、これらの先行研究を参考にして、我々が開発している惑星大気大循環モデルを用いて木星型惑星を想定した実験を行い、系内の水の量や熱強制の与え方に対する平均東西風分布の依存性について何らかの示唆を得ることを目指す。

実験に用いた大気大循環モデルは、地球流体電脳倶楽部有志で構築を進めている惑星大気大循環モデル (dcpam; <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) である。dcpam は、プリミティブ方程式 (静力学近似と薄い大気近似) に基づく力学過程に、放射過程、乱流混合過程、凝結過程といった物理過程を組み合わせたものである。放射過程は、SL09 と同様の短波と長波それぞれで灰色の放射を仮定している。今回の計算では乱流混合は考慮しないが、超断熱の温度分布は中立になるように戻す。また、凝結過程としては計算格子内の水蒸気が飽和した時に過飽和分が凝結すると仮定する。凝結した水は瞬時に落下し、下部境界から系外に出ていくと仮定している。

このようなモデルを用いて、木星大気を想定した実験を行った。鉛直計算領域は 30 bar から 0.03 bar まで取り、下部境界からは全球一様に 5.7 Wm^{-2} の熱フラックスを与えている。また、下部境界では比湿を固定し、拡散的に系内に入ってくると仮定する。仮定した下部境界の比湿は太陽組成値 (6.3×10^{-3}) である。下部境界、上部境界共に摩擦は与えない。実験に用いた解像度は、水平格子点間隔約 1.4-5.6 度 (T21-T85)、鉛直 30 層である。実験は、放射 (乾燥) 対流平衡の初期条件から、まず水平格子点間隔 5.6 度 (T21) の低解像度のモデルで 10000 日積分し、その最終状態を初期値として水平格子点間隔 2.8 度 (T42) の中解像度で 10000 日積分した。そしてその最終状態を初期値として水平格子点間隔 1.4 度 (T85) で 100000 日積分した。

実験結果は、縞状構造の平均東西風を示していた。これら東西風はほぼ鉛直に一樣な構造をしている。しかし、実際の木星および SL09 の実験結果は赤道で西風となっているのに対して、本研究の結果は 100 m/s の東風となっている。SL09 では、乾燥大気の数値実験により赤道で西風となる結果を得ている。そこで、湿潤過程に対する感度を調べるために、乾燥大気の実験を行った。実験設定は、下部境界で与える比湿量をゼロにする以外は最初の実験と同じである。その実験の結果は、赤道で東風を示していた。したがって、今回考慮した湿潤過程そのものが赤道の東西風の向きを決める本質的な要因ではないと考えられる。LS10 の結果でも赤道で西風となっているが、彼らの計算では南北一様な熱強制を与えており、今回の実験と直接的に比較することはできない。LS10 の結果との比較によって結果を吟味するためにも熱強制分布を変えた実験などを行う予定である。

木星大気における雲の凝結メカニズム： 放射対流平衡モデルを用いた大気成分鉛直分布の推定

○高橋康人¹, はしもとじょーじ^{2,4}, 大西将徳³, 倉本圭^{1,4}

¹北海道大学, ²岡山大学, ³神戸大学, ⁴CPS

木星は水素を主体とする厚い大気を持ち、複数種の凝結成分からなる雲によって全球が覆われている。雲の存在はアルベドを高めるなど木星のエネルギーバランスとスペクトル特徴に大きく影響していると考えられるが、具体的な雲形成過程や雲構造については観測が限られており、現在も詳しくは分かっていない。これらを考えるには、木星大気の熱的構造について理解する必要がある。

我々は独自に放射対流平衡モデルを開発し、木星大気の放射対流平衡構造の推定を行ってきた。その結果の一例として図 1(左)に平衡状態における放射加熱率分布を示す。これによれば、おおよそ 0.3 bar 面よりも高圧の領域で加熱率が負になっている。この領域では鉛直対流により大気深部から熱が補われることによって断熱的な温度分布が維持されている。一方、これより低圧の領域は加熱率が 0 であり、放射平衡に達していることがわかる。すなわち 0.3bar 面を境として放射平衡な領域と対流平衡な領域が形成されている。この面を対流圏界面とすると、その高度は過去の雲構造モデルで仮定されていた対流圏界面(0.1bar)よりも若干低い。一方、図 1(右)には木星の雲頂を形成していると考えられている NH_3 の鉛直分布を示した。ここでは NH_3 を含んだ気塊が対流や渦拡散によって持ち上げられて飽和蒸気圧に達し、凝結物は気塊から取り除かれるものと仮定している。この図から、放射平衡にある領域でも NH_3 の凝結が起こることがわかる。このことは、従来は対流性の積雲であると考えられていた最上層雲が、実際には主に成層圏雲である可能性を示唆している。ただし本計算では NH_3 の分布に影響を与える NH_4SH の凝結は無視している。

本発表では NH_4SH の凝結をモデルに導入した場合の平衡構造を示し、 NH_3 凝結領域と対流圏界面の位置関係にどう影響を与えるのかを議論する。また、雲頂付近の NH_3 雲構造のモデリングについて報告する。

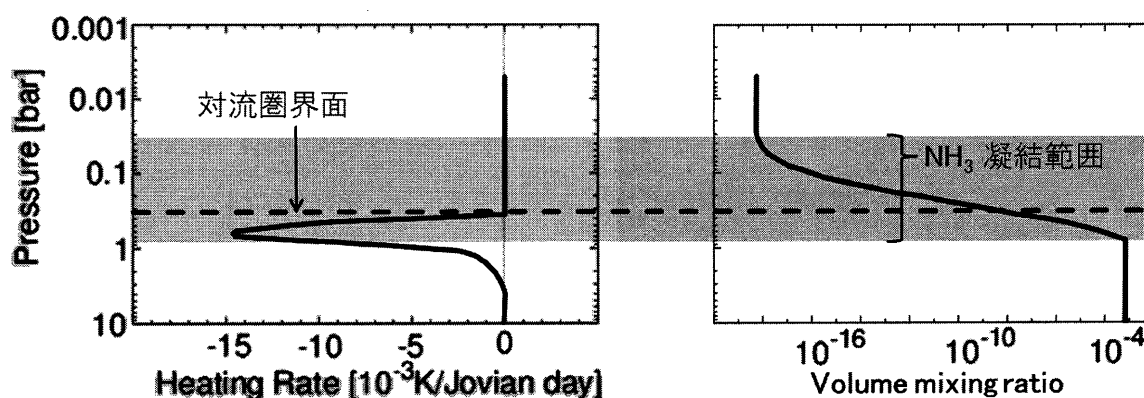


図 1:(左)本研究で得られた木星大気における放射加熱率分布。縦軸は圧力座標、横軸は 1 木星日あたりの温度変化を表す。破線で示した対流圏界面は放射平衡と対流平衡の境界を示している。(右)本研究で得られた NH_3 の高度分布。縦軸は左図と同様の圧力座標、横軸は NH_3 ガスの体積混合比を表す。灰色の帯は NH_3 の凝結が起こり得る高度範囲を示している。

同期回転惑星大気の数値実験: 非灰色放射スキームと雲スキームを用いた場合

○石渡 正樹¹, 阿部 豊², 倉本 圭¹, 高橋 芳幸³

¹ 北大・理, ² 東大・理, ³ 神戸大・理

はじめに

太陽以外の恒星の周囲に存在する系外惑星の中には、同期回転している、すなわち昼半球と夜半球が固定されていると考えられるものもある (Bloh et al., 2007). 我々は、これまでに、大気中に水蒸気を含む地球的な大気をもつ同期回転惑星の気候に関する数値実験をおこなってきた (納多他, 2011 など). しかし、そこでは灰色放射スキーム、雲無しの仮定など非常に単純化された系を用いており、現実の系外惑星における状況とはかなり異なるものとなっていた. そこで、より現実的な温度分布と水蒸気分布を得ることをめざして、我々は地球大気用の放射スキームと簡単な雲スキームを導入した数値実験を開始することにした. ここでは、その現状、特に灰色放射・雲無しの場合と比較した結果について報告する.

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. dcpam の力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成る. 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. スペクトル法においては全波数 42 の三角形切断を用いた. 鉛直方向の層数は 22 とした. 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. 太陽定数は地球の値を用いる. 自転角速度の値としては、 $\Omega = 0, 0.05, 0.5, 1.0$ (Ω は地球の値で規格化した自転角速度である) の 4 通りを与えた. 惑星半径、表面気圧などは地球の値を用いた. 積雲対流については、Relaxed Arakawa-Schbert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992) を用いた. 全球の地表面に対して沼条件 (swamp condition) を仮定した. 数値実験として、(1) 非灰色放射スキームと雲スキームを用いた実験及び (2) 灰色放射スキームを用いた雲無し実験の 2 種を行った. (1) においては、Chou and Lee (1996), Chou et al. (2001) に基づく放射スキームを用いた. また、雲水に関しては、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、および移流項を考慮してその時間発展を計算した.

結果

大気上端における外向き長波放射 (OLR) の水平パターンは、非灰色放射スキームと雲スキームを用いた実験と灰色放射を用いた雲無し実験で、おおまかには同様な結果となった. ただし、恒星直下点の周囲の領域では違いがあらわれ、非灰色放射スキームと雲スキームを用いた実験で得られた OLR の方が小さい値となった. ここで行った実験では、OLR の値に影響を及ぼすほど光学的に厚い雲が生成するのは恒星直下点付近のみに限られる結果となった. この結果は、同期回転惑星設定における暴走温室状態の発生条件は雲の有無によって大きく変化するものではないということを示唆しているのかもしれない.

周惑星円盤内におけるガス抵抗による 微惑星軌道進化

○ 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。

周惑星円盤内における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、周惑星円盤の構造として軸対称円盤モデルを用いて、ガス抵抗を考慮した微惑星軌道進化を調べた。ガス抵抗パラメータを振ることで、微惑星の粒子サイズやガス面密度を変えながら、様々な状況下における微惑星の軌道進化を調べた。本発表では、その結果を報告し、衛星形成との関連性も考察する予定である。

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 would like to show some preliminary results of our numerical integrations of test particles perturbed and transported from the the Oort Cloud toward the terrestrial planetary orbits through the jovian planetary zone.

本研究では、オールト雲の成長と同時進行で惑星領域に落ちて来る新彗星の軌道進化を数値実験により追い掛けている。現時点までの計算により以下の事柄が分かりつつある。(1) 惑星領域に突入した後のオールト雲起源新彗星の力学的寿命は 1000 万年の程度に留まる。(2) その時間を経過すると大半の新彗星は木星や土星に散乱されて双曲化し、太陽系内には戻らない。(3) 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。

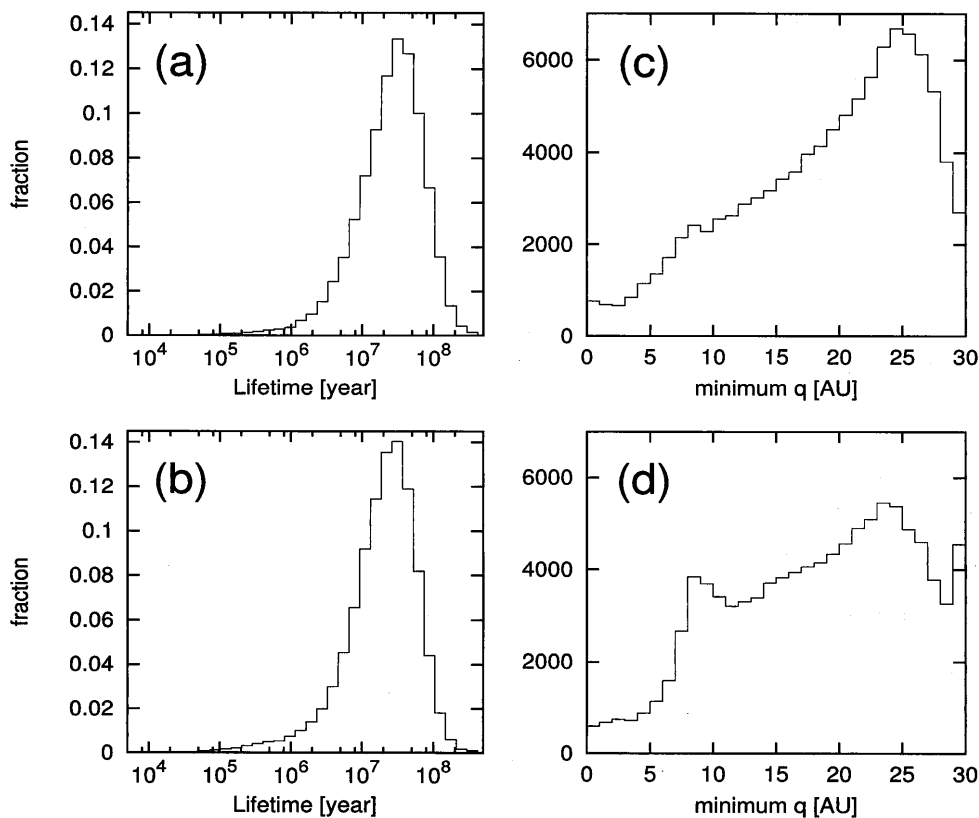


図 1: (a) と (b) はオールト雲起源新彗星の力学的寿命。(c) と (d) は新彗星が示した最小の近日点距離。(a) と (c) は太陽系形成から 40 億年を経過した時点のもの、(b) と (d) は太陽系形成初期から 10 億年のもの。(d) に於いては土星-木星によるバリアが見て取れる。

N 体計算と統計的計算を組み合わせた 惑星集積コードの開発

○森島龍司^{1,2}

¹カリフォルニア大学、²ジェット推進研究所

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。近年、衝突破片が惑星成長に与える寄与が大きいことが分かっており、これらはほとんど統計的計算により明らかになったことである。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、彼らのコードは質量と空間メッシュを必要とするのに対し、本コードはそれらを必要としない、よりラグランジアン的なものである。微惑星の空間、軌道、質量分布が多数のトレーサーで表現される。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問題からとまった衝突率 (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、ターゲットトレーサー近傍に侵入してきた微惑星の面数密度が必要となるが、これはツリー法を用いた近傍粒子探索によりもとめた。微惑星質量は衝突合体すると増え、トレーサー質量も増えるが、そのようなトレーサーは2つのトレーサーにスプリットすることによりトレーサー質量はほぼ変化しないようにしてある。トレーサー内に含まれる、微惑星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、原始惑星の軌道へ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：それより小さいものは準原始惑星と呼ばれる) まではそれらの相互作用は統計的手法で取り扱う。

講演ではいくつかのテスト計算を紹介する。

原始惑星からの地球型惑星形成

Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets: Effects of System Size and Position

○小久保英一郎 (国立天文台)・井田茂 (東工大)

○ Eiichiro Kokubo (National Astronomical Observatory of Japan)
Shigeru Ida (Tokyo Institute of Technology)

The final stage of terrestrial planet formation is known as the giant impact stage where protoplanets collide with one another to form planets. We have been investigating this final assemblage of terrestrial planets from protoplanets using N -body simulations. In the present paper, we systematically change the initial system radial range and position to investigate how they affect terrestrial planet formation. We show the statistical properties of terrestrial planets formed from protoplanet systems with various radial range and position and discuss the physics of their dependence on the system parameters.

惑星系形成の標準シナリオでは地球型惑星の形成過程は、(1) ダストからの微惑星の形成、(2) 微惑星からの原始惑星の形成、(3) 原始惑星からの地球型惑星の形成、の3段階に分けられる。本研究の目的は、確率的な過程である(3)段階を多数の多体シミュレーションを行うことによって統計的に明らかにすることである。これまでに、形成される地球型惑星系の特徴(個数、質量分布、軌道要素、自転パラメータ)が、原始惑星系の初期条件(全質量、質量分布、軌道間隔、速度分散、物質密度)にどのように依存するかを調べてきた。今回はこれまで固定していた原始惑星系の分布領域の位置と幅を系統的に変化させて、地球型惑星系の特徴がどのように変化するかを調べる。原始惑星系の内縁を0.5 AUに固定して外縁を1.5 AUから3 AUまで広げていくと、地球サイズ(地球質量の0.5倍以上)の惑星数は増加するが、軌道半径あたりの惑星数は減少する。このとき個々の惑星の原始惑星集積幅と質量は増加する。また、原始惑星系の分布領域の幅を1 AUに固定して内縁を0.5 AUから2.0 AUまで遠くしていくと、地球サイズの平均惑星数と軌道半径あたりの平均惑星数は減少する。最内縁の惑星位置は原始惑星系の内縁になる。そして、原始惑星系の分布領域の位置や幅を変えても、最大惑星の質量は原始惑星系の全質量にほぼ比例して増加することがわかった。これらの結果は地球型惑星形成は大域的に進行することを意味している。本発表では、分布領域の位置と幅の違う原始惑星系から形成される地球型惑星の特徴の統計的性質を定量的に示し、その依存性の物理について議論する。

平均運動共鳴への捕捉条件の導出と 系外惑星が経験した惑星移動速度への制限

○荻原正博 小林浩

名古屋大学・素粒子宇宙物理学

原始惑星系円盤中を軌道移動する2体の惑星が1次の平均運動共鳴に捕捉される条件を、様々な惑星形成環境を模擬した数値シミュレーションを実行することによって、経験的に求めた。具体的には、2天体の運動方程式に軌道移動の効果を組み込み、その軌道計算を様々な計算パラメータ（例：惑星質量）を幅広く変えて大量に行い、平均運動共鳴に捕捉される最大の軌道移動速度を表す「臨界移動速度（あるいは臨界移動時間）」を2:1から6:5の1次の平均運動共鳴について求めた。従来の研究では主にマズレス粒子が巨大惑星の共鳴に捕捉されるという制限問題を仮定した上で捕捉条件が議論されてきたが、本研究では系外惑星系形成において重要な等質量の天体の共鳴への捕捉（非制限問題）も重点的に調べた。

数値シミュレーションの結果、共鳴捕捉条件を表す臨界移動時間は惑星質量の増加とともに減少し、それは惑星質量に対して $-4/3$ 乗のべき乗則で表されることを確認した。また臨界移動時間は、他のパラメータ（例：離心率）にはあまり依存しないことがわかった。更に、等質量の惑星同士の臨界移動時間は、制限問題の場合のそれと比較して短くなることを発見した。一例として、2:1の平均運動共鳴への捕捉の臨界移動時間は、制限問題と非制限問題の場合で約10倍の違いが見られた。これらの結果を経験的表式として定式化した。

この表式は惑星形成における様々な研究に応用することが可能である。重要な応用の一つとして、平均運動共鳴を持つ系の起源を議論する際に、個別のN体計算を実行する必要なく、この表式を用いることで過去に経験した軌道移動速度を大雑把に求めることができる。例えば本研究では、これまで発見された1次の平均運動共鳴関係を持つ系外惑星系について、それらが経験した軌道移動速度に制限を加えた。その結果、共鳴関係を持つ系外惑星系の多くは、タイプI惑星移動速度と同等かそれよりも速い移動速度を経験した可能性があることが示唆された。更に、本研究で得られた経験式は共鳴にある系の起源を議論する際に有用であるだけでなく、惑星形成種族合成モデルへ導入することも容易である等、今後の応用が期待される。

惑星がつくるギャップ形状を考慮した ガス惑星の成長と軌道進化

○和田義輝¹, 竹内拓¹

¹Department of Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

ガス惑星と原始惑星系円盤との間にはたらくトルクにより、円盤はギャップ形成などの大きな変化を起こし、ガス惑星はそのギャップの中で成長しながら軌道を進化させる。そのため、円盤惑星間のトルクの構造や時間進化を知ることは重要である。長時間の円盤進化を追うために半径方向の1次元計算が行われているが、1次元計算には惑星が円盤に及ぼすトルクについてのモデルを与える必要がある。しかし、1次元計算に使われるトルクモデルは複数存在する。1次元計算に使用するトルクモデルの違いはギャップ形状の違いを生み、結果として、惑星の軌道長半径や惑星質量の進化に大きな違いが生じている。

そこで本研究では、ギャップ形状が惑星降着率などに与える影響を詳細に検討する。ギャップ形状の違いを惑星降着率などに反映する計算を行うため、Tanigawa & Watanabe (2002)の結果を応用する。Tanigawa & Watanabe (2002)では惑星近傍の円盤物質の流れを2次元で計算し、円盤物質が惑星に降着する領域を定めた【図1下】。

本研究では、この降着領域にあたるセルから、惑星に対するシア速度を考慮して、面密度

を一部抜き取り、それを惑星の質量に加える。また、Horseshoe領域では、同様にして面密度を一部抜き取り、それを惑星軌道に対して反対側にあるセルに加える【図1上】。この計算により、ギャップ形状の違いを反映した進化を求めることができ、また、その違いは惑星の最終形態に大きく影響することがわかった【図2】。

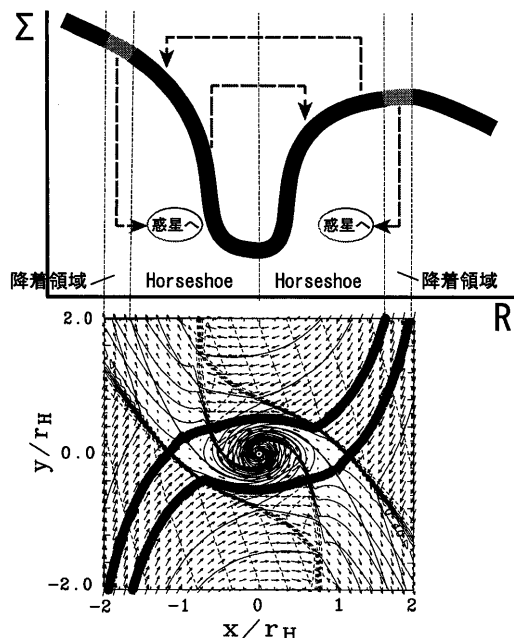


図1 惑星近傍の流線[下]と、
1次元円盤への適用[上]

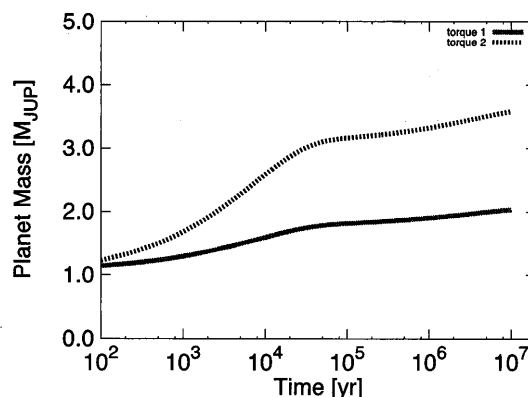


図2 トルクモデルによる惑星質量の違い

散逸円盤中のスーパーアースの大気獲得

○廣瀬 翔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

現在 900 個以上の系外惑星の発見報告があり、およそ 20 地球質量以下のスーパーアースと呼ばれる低質量惑星の報告も増えてきている。また、視線速度法とトランジット法の技術進化により、質量と半径が測定された惑星も多い。測定された質量と半径の関係を基に、理論モデルを用いることで系外惑星のバルク組成を推定することが可能になってきた。特に、短周期のスーパーアースのバルク組成を明らかにすることは、惑星の移動や集積などの形成過程を解明することに繋がる。

これまでに検出されたスーパーアースは、質量と半径に関して非常に多様である。その一つの可能性として考えられるのが、大気量の違いである。また、観測されているような大きな半径を説明するには、水素のように分子量の小さい大気成分が必要である。現在の惑星形成論の枠組みでは、原始惑星系円盤のガス成分を起源とする捕獲大気が最も有力である。

近年の惑星形成に関する理論的研究によれば、スーパーアースの大気獲得は現在の位置で行われた可能性が高い。まず原始惑星系円盤中で、原始惑星が円盤と惑星の潮汐相互作用によりタイプ I 移動で内側に移動する (Ward 1986)。そして、共鳴捕獲のため、原始惑星同士はかなり近くでまとまって存在する (Terquem & Papaloizou 2007)。その後に円盤散逸が始まり、円盤ガス密度減少により原始惑星の衝突成長が始まる (Ogihara & Ida 2009)。衝突合体によって成長したスーパーアースは、重力的に散逸しつつある円盤ガスを獲得して大気を形成する。こうした状況を想定して、Ikoma & Hori (2012) は、Kepler-11 まわりの 5 つのスーパーアースが獲得する大気量を調べられた。そこでは、中心星近傍では、獲得大気量が円盤ガスの温度に敏感であることや固体惑星からの熱的寄与が重要であることが示された。しかし、スーパーアースの獲得大気量を系統的に調べた研究はない。

そこで本研究では、Ikoma & Hori (2012) を発展させ、スーパーアースが獲得しうる大気量を系統的に調べた。具体的には、ある質量の固体原始惑星が円盤ガスに埋もれている状況を想定し、周囲の円盤ガスに接続した原始大気の構造を数値的に解くことで、大気量を計算した。本研究では、固体部分 (マントル) の熱進化を考慮し、質量と軌道長半径による円盤ガス温度を変化させ、惑星のその場における大気獲得過程を数値シミュレーションした。結果として、円盤ガスの散逸時期と円盤温度に対する大気量の依存性、さらにマントルの熱的寄与の重要性について系統的に理解することができたので、その結果を報告する。

トランジット低質量系外惑星の 透過スペクトルモデル

○川島由依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

1995年に最初の系外惑星が発見されて以来、現在までに900個を超す系外惑星の発見が報告されている。系外惑星の代表的な観測手法として、トランジット法と視線速度法がある。この2つの観測結果を組み合わせば、系外惑星の半径と質量が決定される。さらに最近では、トランジット時に大気の透過スペクトルが観測されるようになってきた。この透過スペクトルには、惑星大気中の分子による吸収・散乱の情報が含まれる。従って、観測データと、理論的な透過スペクト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と考えられる。大気組成の制約は、惑星形成過程や表層環境、生命存在可能性などを考える上で重要である。また、透過スペクトルが観測されているいくつかの系外惑星についても、その大気組成についてまだ十分な制約がなされていない。昨年からの日本の観測グループによるトランジット透過スペクトル観測も本格的に始まり、独自の観測結果を解釈するための理論スペクトルモデルが必要となった。

そこで、本研究では、トランジット観測されるような中心星近くに存在する低質量惑星の大気を想定し、理論的な透過スペクトルモデルを作成した。ここでは、惑星大気分子による主星光の吸収・散乱に加え、化学平衡を考えた上での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、HITRANを用いた。吸収線形関数には、ドップラー効果と分子衝突による広がりの方を考慮したフォークト関数を用いた。吸収係数は、遷移による吸収だけでなく、分子同士の衝突による吸収（CIA）やレイリー散乱も考慮した。大気組成には、太陽組成や太陽組成からその金属量を変えたもの、水に富んだ大気など様々な大気組成を仮定し、透過スペクトルの違いを調べた。さらに、惑星が全波長で不透明となるような厚い雲に覆われている場合も考え、雲の高さについても考慮した。

本発表では、大気構造の不定性を考慮し、観測との比較によって現時点で得られる確定的な知見および不確定性が大きい点を注意深く検討した。例えば、水素に富む大気の場合、可視光域では、分極率の大きい水素はレイリー散乱を強く起こす。そのため、短波長にいくほどトランジット半径が大きくなることから、水素大気であることはほぼ確実に特定できる。一方、近赤外域では、ある波長で、いくつかの大気組成モデルが同じトランジット半径を示すため、現在の観測精度では、理論と観測を比べることで確定的な結論を得ることができない。こうした事実をふまえて、これまでに日本の観測グループで多波長でのトランジット観測がなされている GJ 3470 b と GJ 1214 b に我々の理論スペクトルモデルを適用し、それらの大気組成について議論する。

海惑星が有する H_2O 層の構造と熱的状态

○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領域に 10 wt% 程度までの H_2O 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]。惑星に水が供給されるプロセスの多様性も考慮すると、地球型惑星が惑星表面に持つ水量には幅があると予測される。本研究では、水量が惑星表層環境へ与える影響の理解を目的に、地球のような惑星の表面に水を足した惑星を考える。

地球における少量の液体の水(0.023wt%)の存在は炭素循環などの気候調節メカニズムを担っている。しかし、地球表面に水を足していくとそのメカニズムの描像は変化していく。表面に 0.23wt%(10 海洋質量)程度の水を加えると大陸が海に覆われ、大陸風化が行われなくなる。さらにある程度以上の水を加えると海底に高压氷が発生し、岩石と水との相互作用を妨げると予測され、海洋底風化や栄養塩の供給がとまってしまう可能性が指摘されている[Leger et al., 2004]。このように、惑星表面の水量が増加することによって炭素循環に影響を及ぼすことが予測される。しかし、高压氷がどのような状態か詳細に議論されておらず、炭素循環を含む物質循環にもたらす影響についてはよくわかっていない。

したがって、本研究では高压氷の形成条件とその熱的状态について議論する。高压氷の形成条件について調べるために水量、表面温度、惑星質量をパラメータとして [Valencia et al., 2007]を参考に内部構造計算を行った。惑星質量が大きいほど少ない水量で高压氷が形成し、表面温度が高いほど大きい水量で高压氷が形成される。1 地球質量, 表面温度 290K の場合, 1.1wt%(48 海洋質量)以上の水が表面に存在すると高压氷が形成される。また混合距離理論[Abe, 1997]を用いて惑星内部の熱フラックスを高压氷が固体状態のまま輸送しきれるかどうかについても検討した。その結果、500 km の厚さの高压氷に地球の表面フラックスの半分程度の熱フラックス(40mW/m^2)が流入されたとすると固体状態では熱を輸送しきれず、高压氷層は固液混合状態を示す。一般に、惑星質量が大きいほど内部からの熱フラックスは大きくなるため[Tajika, 2008]、表面に液体の水が存在できるような高い表面温度領域では高压氷は固液混合状態を示すことが示唆される。

氷ダストの“こしとり”による地球への水供給量の調整

○佐藤貴央¹, 佐々木貴教¹, 井田茂¹

1, 東京工業大学

地球の水の起源については、これまでも数多くの議論がなされ(e.g., Matsui & Abe, 1986; Gomes et al., 2005; Ikoma & Genda, 2006)、地球が獲得する水の質量についての制約は、重要な研究課題となっている。特に近年では、地球形成時には、スノーラインが地球軌道の内側まで移動していたことが示唆されており (Oka et al., 2011)、この状況下で地球が形成されれば、現在よりも多量の水を保持した地球が形成され则认为られている。また、もし仮にスノーラインが地球軌道まで移動してくる前、あるいは地球軌道より内側へ移動後、再び外側へと移動した時に地球が形成されたとすると、前者はダストの成長時間や微惑星の形成時間の問題、後者は地球を形成するための固体物質の不足という問題があり、あまり現実的ではないと认为られている (Oka et al., 2011)。

一方、原始惑星系円盤は中心星へ降着しているため、地球軌道付近では、その場での氷ダストの凝縮ではなく、遠方で形成された氷ダストの降着によって氷が供給されると认为される。そこで、これらの氷ダストが地球軌道付近に到達する前に小惑星帯の微惑星に捕獲 (“こしとり”) されることで、地球軌道に供給される氷ダストの量が調整された可能性を検討した。

微惑星のインパクトパラメータ(b)内に存在する氷ダストは、ある衝突率(P_{col})で微惑星に衝突し、捕獲されると认为される。本研究では、このインパクトパラメータ(b)と衝突率(P_{col})に、Ormel & Klahr (2010) の結果を用いた。また、これらと円盤の固体面密度などをパラメータとして与えることで、微惑星によるダストの捕獲率(P_{cap})を求め、この捕獲率(P_{cap})と氷ダストの質量降着率、さらに降着時間を掛け合わせることで、地球に流れ込む氷ダストの質量を見積もった。

この研究により、スノーラインが地球軌道よりも内側に位置している場合にも、大量の水を保持することのない地球が形成される可能性を議論する。さらに、彗星や小惑星からの寄与によるものではなく、地球形成時の物理に関連した新たな供給プロセスにより、地球に水が供給された可能性を与える。

楕円軌道ガス円盤の永年進化

○今枝 佑輔¹

¹ 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻

ALMA など次世代望遠鏡の運用が開始されるにあたり、様々な天体現象の詳細な構造が明らかになりつつある。惑星系形成の分野で言えば、例えば原始惑星系円盤に非軸対称な構造が次々と見つかってきている。これらの構造がどのような物理状況下で形成されたのか、原始惑星系円盤の自己重力が効いているのか、ガス温度がどの程度高いのか低いのか、大きさの違いによるのか、また同時に形成される連星や惑星の軌道運動の影響を受けているのか、などなどといったことを明らかにすることは、惑星形成の母胎となる環境を理解する上で重要である。

本発表ではこのうち、連星系が重力的に原始惑星系円盤に及ぼす影響について調べる。惑星の主星となるべき恒星は、その過半数が連星として生まれることが知られている。また多くの場合その軌道は円軌道ではない。そこで楕円軌道を公転する連星の周りに存在するガス円盤が長時間にわたって連星からどのような影響を受けるかを調べる。手法としてはガス円盤流体の運動方程式を直接解くのではなく、ガス円盤を楕円リングの集合体と近似し、その永年摂動による影響を数値計算により求める方法を取る。この方法は運動方程式の直接積分より簡便で、長時間積分や様々なパラメタ調査に向いている。また手法的に独立であるため、直接積分の結果と相補的に比較することができる。弱点としては、連星に極度に近く軌道運動が楕円運動で近似できないような領域では近似が破綻する。従って設定状況としては連星系周りのガスが既にほとんど吹き払われているような星形成の後期段階を考えていることになる。

連星系周りを公転する質点は連星重力の影響により、歳差運動のタイムスケールで楕円軌道化することが知られている。ガス円盤の場合にはこの楕円軌道運動に加え、円盤の内側と外側とが圧力を通じて相互作用する。従って粒子系の場合には半径毎に独立に時間変化していた楕円歳差運動が、ガス円盤の場合では円盤の内と外でゆるやかに連動する。またそれに伴い円盤内に角運動量輸送も起きる。その結果、円盤の物理状態に応じて円盤全体が大きく楕円軌道化する場合がある (cf. 惑星科学会 2012 年発表)。前回発表ではガスの相互作用力を線形近似して結果を求めた。本発表ではこれを非線形にまで拡張し、それに伴い時間積分法も変更した。連星モデルの違い、円盤モデルの違いにより円盤内に形成される $m = 1$ な密度構造のコントラストがどの程度まで成長しうるか発表する。

光蒸発を考慮した中質量星周りでの 原始惑星系円盤の散逸

○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、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。近年の観測から、中質量星周りの円盤寿命が低質量星に比べて短いことが示唆されている。短い円盤寿命が中質量星周りの惑星の分布に影響を及ぼしている可能性が指摘されているが、現在までに中質量星周りの円盤寿命が短いことを説明する理論的研究はない。ここでは、原始惑星系円盤を散逸させる効果として、粘性降着と光蒸発を考慮する。光蒸発とはX線、紫外線（以下、XUV）によりガスが重力を振り切るだけのエネルギーを獲得し、円盤から散逸する過程である。光蒸発にはXUVの光の強度が重要であるが、これまでの研究では中心星の進化によるXUV光度の時間進化は考慮されてこなかった。観測的に、林トラックにある前主系列星のX線光度は全放射光度の約0.1%程度であり、ヘニエイトラック上の星は 10^{-5} 程度であることがわかっている。そのため、ここでは恒星進化コードを計算し得られた全放射光度からX線光度を見積もる。中質量星は小質量星に比べ全放射光度が大きいため、X線光度も大きい。一方、中質量星は林トラックを離れるのが早いため、中心星の進化によりX線光度が大きく変動する可能性がある。そこで本研究では、中心星の質量の違いやXUV光度の時間変動が原始惑星系円盤の進化・散逸にどのように影響するのか議論する。また、計算により得られた円盤寿命と観測結果を比較する。

原始惑星系円盤でのダスト落下問題における電荷を帯びたダストの運動と磁場の影響について

○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いては、円盤内に存在する微細なダスト粒子が合体成長する事により、その粒径が大きくなり、微惑星へと成長すると考えられている。円盤を構成するガスと、ガス中でのダスト粒子の運動を考えると、ケプラー速度で運動するダストに対して、円盤ガスは、重力およびガス自身の圧力勾配と遠心力とが釣り合う速度で運動する。このため、ダストの回転速度とガスの回転速度の間には速度差が生じる。これにより、ダストはガスの向かい風を受けて角運動量を失い、微惑星へと成長する前に中心星に落下してしまう。この問題は「ダスト落下問題」と呼ばれ、円盤内の電離度が非常に低く、背景磁場も弱いと考えられているため、多くの研究では電気的中性が仮定され議論されている。しかしながら、中心天体が固有磁場を持つ事を仮定すると、中心天体の近傍では一定の磁場強度となりうる事と、中心天体からの輻射によりガスの電離度が高くなる事を考慮すると、帯電したダスト粒子に働く電磁気力が無視できない値となる状況が考えられる。本研究では、ダスト落下問題に対して、ダスト自身が持つ電荷により背景磁場から受ける影響について議論する。

円盤内縁近傍において、中心星の輻射の影響で円盤ガスは電離状態にあると考えられるため、磁場中を回転する円盤ガスには電場が生じる。一方で、電離ガス中のダストは帯電するため(e.g., Spitzer, 1941)、この電場の影響を受けると考えられる。本研究ではテスト粒子シミュレーションにより、回転円盤中でのダスト粒子の運動を電磁気力も考慮して解き進める。これにより、任意のガス円盤モデルにおいて、様々な大きさのダストに働く電磁気力の影響を定量的に見積もることが可能となる。一例として、最小質量円盤モデルに基づいて、円盤中心面でプラズマベータ（プラズマ圧の磁気圧に対する比）が一定となるモデルを用いて、中心星から約0.1AUという中心星に近い領域を考え、ガスは中心星からの熱放射によって完全に電離していると仮定し、ダストの軌道計算を行った。その結果、1mmサイズのダストの落下が電場によって妨げられるとき、プラズマベータが 10^{-9} という非常に磁場が強い状況を仮定しなければならず、ダスト運動に対する背景場からの電磁気力の寄与は非常に小さいものとなった。しかしながら、中心星近傍での円盤ガスの密度や温度は、最小質量円盤モデルと異なる環境となっている可能性が高い。ダストにかかる電磁気力はモデルの設定に大きく依存するため、本発表では、他のモデルやパラメータ設定でのシミュレーション結果も示しながら、ダスト運動に対する電磁気力の寄与の大きさや、モデルやパラメータの妥当性について議論する。

原始惑星系円盤のガス圧力バンプにおけるダスト・ガス密度分布の進化とストリーミング不安定性

○ 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が速すぎるという問題で、これは「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って合体成長が阻害されてしまうという問題で、こちらは「衝突破壊の壁」と呼ばれている。

中心星落下の壁を回避できるメカニズムの1つとして、「円盤内のガス密度(圧力)が局所的に上昇している領域(本研究ではこれを圧力バンプと呼ぶ)によるダストの捕獲」が提案されている(Haghighipour & Boss, 2003 など)。実際に、Kato et al. (2012)では局所的な磁場の非一様性によって形成された圧力バンプにダストが集積し、さらに、密度の上昇したダストが自己重力によって収縮することで衝突破壊の壁も同時に回避できる可能性を示した。しかし同時に、ダストが濃集した領域ではダストからの摩擦によってガスの速度分布が変化してしまうことが報告されており、このような「ダストからの摩擦の効果」を考慮した場合の、ガス・ダスト両方の進化の様子を明らかにすることが求められている。

本研究では、円盤内にガスの回転速度分布に支えられた圧力バンプが存在するときの、ダストとガスの密度分布の進化を調べた。ダスト-ガス間の摩擦力による相互作用を自己無撞着に計算することで、ダストとガスが同時に進化していく様子を明らかにした。また、局所近似による円盤動径方向-鉛直方向の2次元計算を行い、圧力バンプによってダストが濃集した領域におけるストリーミング不安定性(Youdin & Goodman, 2005)の影響を明らかにした。

今回は、圧力バンプにおけるダスト集積メカニズムを解明するための第一歩として、回転速度分布に支えられただけの最も単純なバンプ構造を考えた。しかし、このようなバンプはダストが集積することによって力学的な平衡が崩れ、急速に破壊されてしまうことが明らかになった。また、バンプが破壊されたあとにはダスト-ガス比が1程度となる領域が残される。このような領域は従来、ストリーミング不安定性の成長に有利であると考えられていたが、ガスの圧力分布はバンプが破壊されるのに伴ってストリーミング不安定性の成長を阻害する方向に進化することがわかった。

本研究によって、回転速度分布に支えられたバンプ構造は、そもそもバンプ構造を維持することができず、かつストリーミング不安定性によるダストの密度上昇も期待できないということが分かった。しかし、このような領域ではダストの落下速度が遅く、また速度分散も小さいということが分かってきたため、単純な合体成長が効果的に働く可能性が考えられる。

層流円盤におけるダスト層の 重力不安定性の数値シミュレーション

○石津尚喜¹、関谷実²

¹ 自然科学研究機構国立天文台、² 九州大学大学院理学研究院

微惑星の形成モデルは、ストリーミング不安定性、ダストの連続成長、ダスト層の重力不安定性などが考えられている。ここでは重力不安定性による微惑星形成について考える。原始惑星系円盤の中心面ではダストが沈殿してダスト層が形成され、ダスト層が十分に薄くなり、臨界密度に達すると重力不安定性により分裂する。分裂したダスト層のダストが集積することによって微惑星は形成される。重力不安定性による微惑星の形成モデルは、cm 未満のダストからキロメートルサイズの微惑星を一気に形成することができるため有効である。しかしながら、乱流が存在すると、ダストは巻き上げられるために臨界密度に達することができない。本研究では円盤が層流状態で、かつ重力不安定の臨界密度に達しうる状況を仮定する。

重力不安定に関して、ガスとダスト間の相互作用がない場合や考慮されていても 2 次元での数値シミュレーションのみが行われてきた。本研究では、ガスとダストの相互作用を考慮した 3 次元数値シミュレーションを行った。ガスは非圧縮流体とし、ダストは粒子として取り扱っている。ダスト粒子の重力は Particle-Mesh 法を用いている。計算に用いられたパラメーターは、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 0.01 と 0.1 の場合で、林モデルで 1 AU ではそれぞれ直径 3cm と 10 cm のダスト粒子に相当する。初期値として中心面でのダスト、ガス密度比は重力不安定性の臨界密度未満の 100:1 とした。シミュレーション結果は、Wakita & Sekiya(2008)によって行われた動径方向、方位角方向の 2 次元計算が予測したように密度分布に非軸対称のパターンが生じた。パターンが生じた後、Yamoto & Sekiya(2006)による動径方向、鉛直方向での数値シミュレーションで見られるような中心面での高密度領域への流入と上昇流が見られた。ストークス数が 0.1 の場合の方が、ダストの沈殿によりダスト密度が増加するので、重力不安定性によるダスト層の分裂がより起こりやすいことがわかった。

原始惑星系円盤初期のダストの組成分布 ～熱力学的平衡計算と Particle Tracking Model～

○ 中田守¹, 永原裕子¹, 小澤一仁¹

¹ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

小惑星帯の大きく違わない場に由来するコンドライトには化学的多様性がある。コンドライト内の元素の揮発性と存在度の関係から高温ガスからの凝縮による所が大きいことが考えられるが、中心星からの距離の関数としての円盤構造の進化だけではこの多様性は説明できていない。

一方、コンドライトの材料となるダストは原始惑星系円盤初期に中心星重力による内側方向の移動だけでなく、拡散による外側への大規模な移動もあったことが明らかになっている。

そこで本研究では、Giesla の Particle Tracking Model を改良し、移流と拡散の効果を含む α 円盤内の個々のダストの移動を追いかけて、そのダストが経験する温度や圧力の変化に応じてダストの組成変化を記録し、2-5AU に集まったダストの集合からコンドライトの多様性が示せるか試みている。

Particle Tracking Model では、面密度・温度を中心星からの距離の関数とし、ガスやガスとカップルした小さなダストの乱流拡散の効果、乱数を用いて表すモンテカルロ法でこれらの円盤内の移動を記述していく。従来の円盤内の面密度の進化のようなオイラー型の記述では扱えない個々の粒子の経験する温度や圧力の違いが得られるモデルとなっている。

個々のダストの組成変化は、その場の温度、圧力、そして一様な太陽組成で熱力学的平衡計算によって決定する。この計算では、コンドライト内の元素のうち比較的難揮発性成分の組成のばらつきを示せるように高温部分の平衡を非理想固溶体も含めて解けるようにしている。

始原的隕石と斑状コンドリュールのストロンチウム安定同位体異常に関する研究

○奥井航¹, 横山哲也¹, 中本泰氏¹, 高橋栄一², 佐々木理³, 中村美千彦⁴, 奥村聡⁴

¹東京工業大学地球惑星科学専攻, ²東京工業大学地球惑星科学専攻マグマファクトリー,

³東北大学総合学術博物館, ⁴東北大学地学専攻

始原的隕石の体積の 8 割以上は球状ケイ酸塩であるコンドリュールと、構成要素の間隔を埋める微粒子であるマトリックスで構成される。しかしコンドリュールとマトリックスの形成環境に違いがあるかは未解明である。この問題は初期太陽系における物質循環プロセスと非常に重要な関係がある。本研究では Allende (CV3.6) 隕石から取り出したコンドリュールの分類を 3 次元 CT スキャン画像および REE パターンに基づいて行い、混ぜ合わせた。東京工業大学地球惑星科学専攻所有の TIMS (TRITON-plus) を用いてこれらのコンドリュールと全岩の超高精度 Sr 同位体分析を行い、初期太陽系内での物質循環プロセスについて議論を行う。

Sr 非質量依存同位体分別の測定結果を図1に示す。 $\mu^{84}\text{Sr}$ 値は標準物質の $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比に対する試料の同位体比の百万分率偏差である。Allende 隕石のコンドリュールの $\mu^{84}\text{Sr}$ 値 (+57 ppm, +90 ppm) は全岩の $\mu^{84}\text{Sr}$ 値 (+76 ppm) と近い値を持つことが明らかとなった。Allende 隕石の CAI の $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は全岩よりも高い($\mu^{84}\text{Sr} > 100$ ppm)。表1の値を用いて全岩から CAI を差し引き、コンドリュールとマトリックスの混合物の $\mu^{84}\text{Sr}$ 値 (-14 ppm) を算出するとコンドリュールよりも低くなる。これはコンドリュールとマトリックスの間に Sr 非質量依存同位体分別が存在することを意味し、コンドリュールとマトリックスが初期太陽系星雲内で時空間的に異なる領域で形成したことを示す。

References: [1] Paton et al., (2013) ApJL. 763, 1. [2] Moynier et al., (2012) ApJ. 758, 1. [3] Patchett (1980a) EPSL. 50, 181. [4] Makishima et al., (2006) Geostandards and Geoanalytical research 30, 245. [5] McSween (1977) GCA. 41, 477.

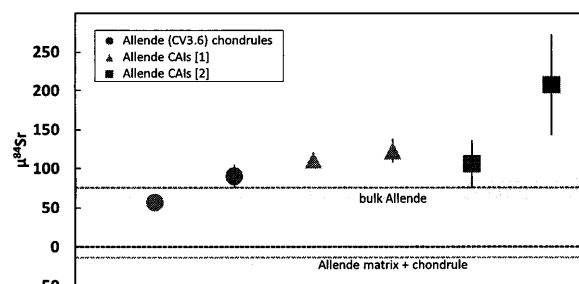


図1 Allende 隕石から取り出したコンドリュールの Sr 非質量依存同位体分別

表1 マスバランスの計算に用いた値

	$\mu^{84}\text{Sr}$	Sr (ppm)	vol. %
CAI	137 [1,2]	102 [3]	9.4 [5]
bulk Allende	76 [2]	16.1 [4]	

有機物マントルをもつダストの衝突合体速度の温度依存性

○上田裕太¹, 奥住聡², 中本泰史², 田中秀和³, 香内晃³, 永原裕子⁴¹東京工業大学/東京大学, ²東京工業大学, ³北海道大学, ⁴東京大学

原始惑星系円盤において、ミクロンサイズのダストがキロメートルサイズの微惑星まで合体成長すると考えられているが、未だに理論的な解明には至っていない。従来の理論研究においては、ダストの構成物質としてシリケイトもしくは氷のみが想定されてきた。一方で、宇宙に同程度豊富に存在する有機物は考慮されてこなかった。ミリメートルの厚さのダスト有機物層への衝突実験 (Kudo et al.2002) によると、有機物で覆われたダスト粒子の衝突合体可能速度は特定の温度領域で著しく上がる。しかしながら、有機物で覆われたダスト粒子がサブミクロンサイズである場合、そのアグリゲイトの衝突合体可能速度の温度依存性は明らかとなっていない。

本研究の目的は有機物を考慮してサブミクロンサイズのダスト粒子で構成されるアグリゲイトの衝突合体可能性を明らかにすることである。この結果によって微惑星形成に示唆を与えることが可能となる。本研究ではシリケイトコアを有機物マントルが覆っているような層構造のダスト粒子の衝突合体可能速度を、Kudo et al. (2002) と同じ温度で JKR 理論を用いて計算した。JKR 理論は付着力をもつ弾性体球に対する接触理論である。我々の推定では 200K 以上での衝突合体可能速度の温度依存性が得られた。計算の結果、合体可能速度は 200K 以下において 30-60m/s であり、200K 以上では 100m/s を超えることが示された。これは温度増加に伴う有機物の弾性率の減少によって、付着面積が増加するためである。この結果によって、ダスト粒子表面を有機物が覆っているような温度領域では、ダストの直接合体成長を通じた微惑星形成が可能であることが示唆される。

潮汐場における楕円体アグリゲイトの衝突破壊

○兵頭龍樹、大槻圭史

神戸大学理学研究科

土星のFリングなどは中心惑星のロッシュ半径の外側ではあるが、中心惑星に比較的近い領域であるため中心惑星の潮汐力の効果が無視できない領域に位置している。一方、カッシーニによる観測結果からFリングにはリング粒子が自己重力で集積したアグリゲイトが多数存在していると示唆されている。さらに形成されたアグリゲイトは潮汐力で中心惑星方向に引き延ばされて、球体ではなく楕円体として存在していると考えられる。潮汐場を無視した自由空間における天体同士の衝突については小惑星や微惑星の破壊プロセスとして多くの先行研究で扱われてきた。一般的にこれらの衝突では head-on 衝突において破壊は衝突エネルギーによって構成物質が重力的に散乱されることでおこる。つまり、衝突エネルギーの増加に伴って最大破片サイズは小さくなる傾向にある。しかし、中心惑星に近く潮汐力が強く効いてくる領域ではアグリゲイト自身の体積と重力ポテンシャルの大きさが同等のものとなってくる。このような状況におけるアグリゲイト同士の衝突は自由空間のものとは異なったものとなりうると予想される。

本研究では粒子間の相互重力と衝突を考慮した局所N体計算を用いて楕円体アグリゲイト同士の衝突シミュレーションを行ない、破壊条件が中心惑星からの距離にどのように依存するかを調べた。衝突方向としては動径方向と軌道運動方向の二通りを考慮し、衝突速度をパラメーターとした。

本研究によってロッシュ半径のすぐ外側の潮汐力が強く作用する領域では、動径方向の衝突よりも軌道運動方向の衝突の方がはるかに壊れやすいことが分かった。さらに動径方向の衝突においては自由空間の場合のように衝突エネルギーの増加によって最大破片サイズが律せられる結果にはならず、より複雑な速度依存性がみられた。これらの領域では、自由空間において従来合体するだろうと考えられていた脱出速度よりもはるかに小さい速度で衝突した場合でも破壊につながるということが分かった。このことから潮汐力が卓越する領域におけるアグリゲイト同士の衝突において、その破壊プロセスを議論する際に衝突エネルギーだけでなく、衝突直後のアグリゲイトの形状も重要となることが分かった。また、中心惑星からより遠ざかるにつれて潮汐場の効果は小さくなることで、衝突結果は自由空間で得られるものに近づいていくことを確認した。

Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics による巨大衝突シミュレーション

○細野 七月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、² 東京工業大学 地球生命研究所、³ 理化学研究所 計算機科学研究機構

惑星科学における非常に重要な仮説の一つに、巨大衝突説がある。巨大衝突説は、元々月の起源として提唱された仮説であり、この説によると、地球型惑星形成の最終段階において二つの原始惑星が衝突し、形成された周惑星円盤が集積して、月が形成される。この仮説が実際に起こりうるかを検証するため、これまで主に標準 SPH 法と呼ばれる粒子法的な流体計算手法を用いて、多くの数値実験がなされてきた。

しかしながら、近年、標準 SPH 法には、接触不連続面を正しく取り扱えないという問題が存在するという事が報告された。この問題は、基本的には標準 SPH 方が、定式化の際に密度の微分可能性を要請している事に起因している。巨大衝突の数値計算を行う際、コア・マントル境界は接触不連続面となっている。そのため、接触不連続面での流体粒子の振る舞いを改善することは、巨大衝突の数値計算にとって非常に重要である。そこで、著者らはこの問題点を解決した SPH 法、Density Independent SPH (DISPH) を新たに開発した。DISPH では、密度ではなく圧力の連続性を要請して定式化を行う事で、上記の問題点を解決している。接触不連続面の前後では圧力は連続であるため、DISPH は自然に接触不連続面を表現する事が可能である。

本研究では、実際に DISPH 法を用いて巨大衝突の数値計算を行った。実際に、先行研究において典型的な月が形成されるとされる衝突パラメータを採用して数値計算をしたところ、標準 SPH 法では月の起源となりうる円盤を作るが、DISPH では円盤を作れない事がわかった。本講演では、実際に二つのスキームで行った巨大衝突計算の結果を見せる他、その違いの原因についても言及する。

物理量の連続性を仮定しない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

数値流体力学の様々な分野で用いられる手法の一つとして、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法がある。SPH 法は流体を流体粒子の集まりとしてみなし、その運動を数値的に解く事で流体の基礎方程式を解く手法であり、空隙の多い流体を扱うのに適している。そのため、特に惑星科学において広く用いられている。しかしながら、SPH 法には接触不連続面や自由表面などでは適切な解が得られないなどの欠点も存在する。これは、SPH 法は導出において密度の微分可能性と正值性を前提としているが、接触不連続面や自由表面ではこれらの前提が破れており、そのために誤差が発生するからである。

そのため、これらの問題を解決するために様々な研究がなされてきた。例えば Saitoh and makino 2013 においては、流体粒子の体積要素を密度ではなく圧力を用いて求めている。この方法は、接触不連続面において適切な計算を行うことができ、有用な手法である。しかし圧力の微分可能性と正值性を必要とするため、衝撃波の扱いには改善の余地がある。また圧力がゼロの液体では、圧力の正值性を満たさないため、そのまま扱う事ができない。

そこで本研究では、密度や圧力のような物理量によらず、流体粒子の空間座標のみから直接導出される体積要素を用いる、新たな SPH 法の定式化を行った。新たな SPH 法では体積要素の導出の際に、密度や圧力などといった物理量の微分可能性や正值性を必要としないため、原理的に接触不連続面や衝撃波面で問題が起こらないと考えられる。

実際に新たな SPH 法を用いていくつかのテスト計算を行った所、従来の SPH 法と比べて接触不連続面などにおいて、適切な計算結果が得られる事が分かった。このことから新たな SPH 法は、従来の SPH 法に比べてより適切な計算を行うことのできる手法であると考えられる。

しかし他のテスト計算を行う際に、体積が極端に大きい、または極端に小さい流体粒子が発生し、計算が破綻してしまうといった問題が発生する。そのため、この問題を解決する事は今後行っていく課題となる。

また自由表面については、現在の定式化自体では解決しないが、物理量に依存しない形で自由表面の検出が可能のため、扱いを改善できると考えている。

火星の表層水量の進化：火星隕石中の水素同位体からの制約

○ 黒川宏之¹ 佐藤雅彦² 潮田雅司³ 松山健志³ 森脇涼太³ James M. Dohm⁴ 臼井寛裕³

¹ 名古屋大学 ² 九州大学 ³ 東京工業大学 ⁴ 東京工業大学地球生命研究所

現在の火星の表層環境は少量の水氷が極冠に存在するだけの寒冷で乾燥した気候である (Jakosky and Phillips, 2001; Christensen, 2006) が、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)。さらに、堆積物や含水鉱物・蒸発残留岩といった水性作用由来の存在は、火星表層で地球のような水性活動があった可能性を示している。過去の火星表層の水量は、海岸線地形を調べる研究や堆積物分布、三角州地形分布など地形学的な研究から、全体平均した水量で深さ ~ 100 m から ~ 1000 m の水が存在したとされているが、これらの研究では地質学的記録のない pre-Noachian (Frey, 2006) と呼ばれる時代の情報を得ることができない。また、火星大気の水素比は ~ 5000 ‰ と高く、表層水が失われた過程に大気散逸が寄与していると考えられるが、その時代や失われた水の量についてはよくわかっていない。

近年のイオンマイクロプローブ分析技術の進展によって、火星隕石中の正確な重水素比測定から鉱物結晶化時の火星水リザーバーの水素比を調べることが可能となった。本研究では、火星隕石中のマントル由来のメルト包有物中の重水素比 (Usui et al., 2012) を初期値とし、火星隕石の同位体年代測定と重水素比データ (Boctor et al., 2003; Greenwood et al., 2008; Usui et al., 2012) から得られた重水素比の時間進化から、大気散逸によって失われた表層水量と水量の時間進化を求めた。極域に存在する現在の火星の水氷の量 (Zuber et al., 1998; Plaut et al., 2007) を境界条件とし、失われた水量の最小値を調べることで、地質記録のない pre-Noachian と呼ばれる時代に対応する、火星の歴史の初期 4 億年において、その後数十億年間で失われた量以上の水量がすでに大気散逸によって失われていたことがわかった。さらに本研究の見積もりを地形学的な過去の表層水量の見積もり (Head et al., 1999; Carr and Head, 2003; Di Achille and Hynek, 2010) と組み合わせ、定量的に失われた水の量を求めることによって、未発見の地下水/水氷が極域に発見されている水氷の量より多く、現在の火星の水リザーバーの大部分を占める可能性が示唆された。この場合の大気散逸によって失われた水の量は大気中の酸素散逸過程の理論的研究 (Lammer et al., 2003; Terada et al., 2009) と比較して多く、未知の大気散逸過程や表層物質の酸化による酸素の消費があった可能性を示している。

火星大気の組成混合比変動を考慮した MGS 電波掩蔽観測データの再導出

Retrievals of temperature and pressure of the Martian atmosphere by the MGS radio occultation measurements considering mixing ratio changes

○野口克行、池田さやか（奈良女子大学）

火星大気の主成分は、二酸化炭素 (CO_2) である。地上観測や探査機観測によって、火星では CO_2 の飽和（凝結）温度を下回るような低温が中間圏や下層大気にて度々観測されており、大気中で CO_2 の過飽和が発生していることを示唆している。大気主成分の過飽和は、凝結によって大気総量の変動を引き起こす可能性があり、火星の気象に大きな影響を与え得る。火星大気を模した室内実験では、水 (H_2O) 氷核への CO_2 凝結は過飽和度が 34% 程度になるまで起こらないことが示されている。これは、温度に換算すると 2-3K ほど飽和温度よりも低い状態に相当するが、実際に過去に観測されてきた低温も CO_2 飽和温度を 2-3K 下回るという報告がなされてきた。しかし、 CO_2 過飽和発生条件や、どのような条件の時にどの程度の過飽和度まで取り得るのか等、詳細な解析はまだ不十分である。

このような CO_2 過飽和の研究においては、精度の良い気温と気圧の高度分布が得られる電波掩蔽観測データが適している。特に、米国が 1997 年に打ち上げた Mars Global Surveyor (MGS) は長期間にわたる観測に成功している。電波掩蔽観測では、導出過程において大気組成比を必要とする。従来は、標準的な火星大気の混合比率 (CO_2 95%、窒素 2.7%、アルゴン 1.6%) を仮定して導出されてきた。しかし、過去の観測において、南半球の冬の極域ではアルゴンの混合比が 6% 程度まで上昇することが知られている [Sprague et al. 2004]。 CO_2 の凝結は主に極夜で起こるため、 CO_2 が凝結することでその混合比が低下し、結果的にアルゴン他の非凝結成分の比率が大きくなっている可能性がある。そこで、本研究では、このような

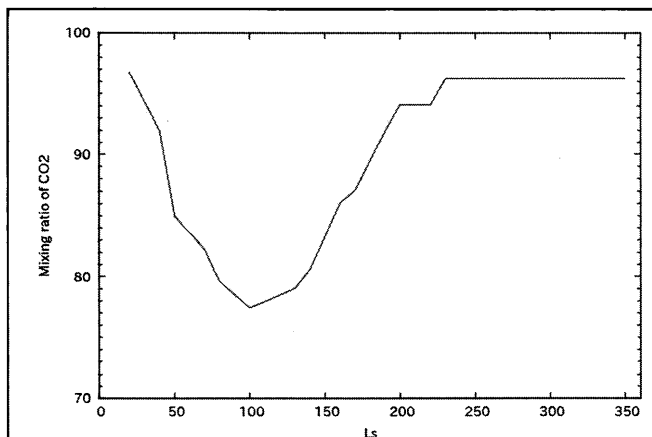


図 Sprague et al. [2012]におけるアルゴン混合比の L_s 変化から推定した CO_2 混合比の L_s 変化。

組成比率の変動が電波掩蔽観測データの導出に与える影響を検討した。講演では、Sprague et al. [2012]の南半球の極域付近の典型的なアルゴンの組成変動を元に、アルゴンと窒素の濃度比は変わらないと仮定して CO_2 混合比を推定し（図）、電波掩蔽観測による気温高度分布データの再導出を行なった結果を示す。

参考文献: Sprague et al. [2004], Science, 306, pp. 1364-1366. Sprague et al. [2012], J. Geophys. Res., 117, E04005, doi: 10.1029/2011JE003873.

火星隕石 Tissint の地球化学的研究： 火星マントル化学進化の理解に向けて

○森脇涼太¹, 臼井寛裕¹, 横山哲也¹

¹東京工業大学理工学研究科

2011年にモロッコに落下した火星隕石 Tissint は、落下隕石であるため地球上での汚染をほとんど受けていないと考えられており、化学分析に非常に適した試料であると言える。本研究ではこの隕石についての詳細な岩石記載を行った後、EPMA による主要元素組成の測定・LA-ICP-MS による微量元素組成の測定を行い、岩石組織の特徴や化学分析データについての総合的な解釈を行った。

Tissint は、カンラン石の巨晶と輝石・斜長石を主成分とする石基からなる斑状組織を示し、カンラン石玄武岩シャーゴタイトに特徴的な岩石学的・鉱物学的組成を有する。カンラン石巨晶のコアの Mg# (~80) は全岩の Mg# (~60) と化学平衡にあり、Tissint は捕獲結晶などの影響を受けず、初生メルトの組成を保持していることが明らかとなった。一方、水質変質を受けたと考えられる硫化鉄の他形結晶群を発見した。その周囲には、他のカンラン石と比較し著しく鉄に富むカンラン石微小結晶が認められ、これらのカンラン石も他形硫化鉄結晶と同様、水質変質作用の影響により形成されたと考えられる。また、衝撃ガラスの軽希土類元素存在度に多様性が見られることから（例えば、 $[La]_N=0.1\sim 8$ ）、衝撃ガラスには部分的に火星表層成分が取り込まれていることが明らかとなった。

以上から、Tissint にはマグマプロセスによって生じた部分と、火星表層での変質を記録している部分が共存していることが明らかとなった。詳細な岩石記載に基づき、これらを区別して化学分析（例えば、Sr-Nd-Pb 同位体）することにより、火星内部および表層の両者についての重要なデータを得ることができると期待される。

火星回転計測のための逆 VLBI 宇宙実証実験

Experiments of inverse VLBI for Mars rotation measurements

○岩田隆浩¹⁾、松本晃治²⁾、菊池冬彦²⁾、石原吉明³⁾、佐々木晶⁴⁾¹⁾JAXA 宇宙科学研究所、²⁾ 国立天文台、³⁾ 産総研、⁴⁾ 大阪大学Takahiro Iwata¹⁾, Koji Matsumoto²⁾, Fuyuhiko Kikuchi²⁾, Yoshiaki Ishihara³⁾, and Sho Sasaki⁴⁾¹⁾ ISAS/JAXA, ²⁾ NAOJ, ³⁾ AIST, ⁴⁾ Osaka University

一般に固体天体の表層環境の変化や内部構造は、その天体の回転（自転）変動に影響を及ぼし、その変動の振幅や位相は電波航法や VLBI などの宇宙測地学的手法により観測可能である。特に火星は、地球と類似の構成要素を有しながらも、過去から現在に至る進化やダイナミクスの様相は大いに異なっており、その相違を表層環境・内部構造から解き明かすことは比較惑星学的に重要である。火星の回転変動には、主に太陽潮汐等のトルクに起因する歳差・章動と、主に大気・極冠結合系の変動に起因する極運動・自転速度変動（以下 ΔLOD ）がある。本研究では、火星の回転変動の計測から内部構造・表層環境の変化を推定して、過去から現在に至る進化やダイナミクスを解き明して地球と対比させることを目的とする。また、そのために必要な、より高精度な観測手法を確立することにより、深宇宙における惑星測位の新たな手法を獲得する。

これまで火星の回転変動は、ランダー（着陸機）の追跡データ（2 ウェイ測距・距離変化率計測：RARR）などを利用して計測されているが、その計測精度は地上の原子時計の精度制約により頭打ちとなっている。逆 VLBI は、複数の宇宙機からの同期した信号の位相比較を行って、各々の相対位置を測定する新たな手法である（Kawano, *et al.*, *J. Geod. Soc. Japan.*, **45**, 181, 1999）。ここで測定精度は周波数の逆数に比例し、地上と対象宇宙機の距離に依存しないことから、特に月より遠い深宇宙での高精度位置決定で威力を発揮する。逆 VLBI が回転計測として最も威力を発揮するのは「オービタ + 複数ランダー」の構成が可能となる場合である。これは MELOS2 以降の本格的火星表面探査における実現を目指すこととし、次期火星表面探査では逆 VLBI 手法の構成要素であるオービタ・ランダー間測距の技術実証を行う。これには、将来ミッションにおいて確実に成果が挙げられる計測手法が獲得できるという意義がある。また、NASA の InSight 計画とは異なる時期に観測することにより、異なる表層環境にリンクした ΔLOD を観測することになるため、たとえば inter-annual 変動についての理解が深まると期待される。特に長期間にわたるオービタ・ランダー間測距が実現すれば、InSight に対して数倍の精度向上の可能性がある。大気大循環モデルと比較することにより、 ΔLOD を引き起こす原因（極冠の消長、大気圧変動、zonal な風の応力、グローバルダストストーム）について理解を進めることを目指す。

InSight で観測される大気励起火星常時微動

○小林直樹¹

¹宇宙科学研究所/JAXA

InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) は昨年 8 月に NASA (アメリカ航空宇宙局) の Discovery Program の 12 番目のミッションとして採択された火星内部構造探査計画である。現在、2016 年 3 月の打上げを目指し急ピッチで開発が進められている。この計画では広帯域地震計、電波測位計、熱流量計、磁力計、気温・微気圧・風速計を搭載した小型着陸機を火星表面に投入し、本格的な火星内部構造探査を目指している。地震計を用いた本格的な内部構造探査はアポロ月探査計画以降では初めてのことであり、世界中の固体惑星の成り立ちを研究している研究者から高い関心を集めている。InSight では火星の内部構造とそこで生起するプロセスを調べることで固体惑星の進化の過程を理解することと現在の火星内部のテクトニックな活動及び隕石衝突のフラックスを決定することを目指している。そして、火星の地殻と中心核の分化、内部構造の進化についての情報を引き出そうという野心的なプログラムである。

搭載される広帯域地震計は IPGP で開発が進められて来た VBB と Imperial College London で開発されている MEMS 短周期計である。VBB は日本の次期月探査 SELENE-2 でも搭載が検討されている広帯域地震計であり、InSight では 1 秒から 100 秒の帯域で $10\text{--}18\text{ m2s}^{-4}/\text{Hz}$ 以下のノイズレベルを観測要求としている。

このように魅力的であるが 1 点観測であるため事前の科学検討がミッションの成否に大きく関わる。InSight では地動を起こす震動源として、自然地震、隕石の衝突の他、大気によって励起される脈動にも着目している。本発表では火星表層の脈動のレベルを地球常時自由振動の知見を活かし推定した。推定方法は Kobayashi & Nishida 1998, Fukao et al. 2002 で用いたランダムな大気擾乱で生じる常時振動の励起公式をもとに地球のパラメータと火星のパラメータをスケールし求める方法をとった。ここでは、Kobayashi & Nishida 1998 とは異なり、大気運動のスケールリングで導いた大気運動ではなく火星探査機 Pathfinder の気圧データを用いた。この気圧変動が典型的な火星の気圧変動を示しているのかという問題も残るが観測値を採用した。

結果として火星常時自由振動の振幅は地球の $1/10$ 程度となった。観測的には厳しい値であるが、用いた値の不確定性を考えると検出をチャレンジする価値があろう。また、本発表では常時振動を用いた内部構造の推定方法についても紹介する。

Viking Lander 2地震計のデータ復元

Restoration of seismometer data on Viking Lander 2 mission

○ 山本幸生¹ 山田竜平² 中村吉雄³

¹ 宇宙航空研究開発機構 ² 国立天文台 ³ The University of Texas at Austin

Viking Lander 2 は地震計を搭載し火星に設置された唯一の地震計として、その観測データは貴重なデータである。このデータは NASA のデータセンターである National Space Science Data Center (NSSDC) から公開されているが、研究者がすぐに利用できる状態にない。本発表では、公開されているデータの現状とその復元方法について説明する。

Viking Lander 2 の地震データは、過去に保存されたテープからデータを読み出して、ファイルとして保存されている。現在は同一のデータが3つの異なるフォーマットで公開されている。

1. SEISF Tape ... Apollo PSE データの vkg.1 ~ vkg.29
2. VUS Tape ... Apollo PSE データの vkg.47 ~ vkg.56
3. SEISMIC EDR-2 Tape ... NSSDC で公開されている PSPG-00070 データ

SEISF Tape および VUS Tape は、Apollo の月地震データと共にテキサス大学でアーカイブしたデータに含まれている [1]。これらのデータは NSSDC から取得可能である。SEISF Tape のデータはいわゆる生データであり、本データを解析するのは文書の入手性・フォーマットの複雑さから容易ではない。VUS Tape は SEISF Tape のスクランブルを解いたバイナリデータであり比較的扱い易い。

SEISMIC EDR-2 Tape の内容は VUS Tape と概ね同じであるが、テキスト形式である点が変わる。テキスト形式ではあるが、そのままでは正確なデータを抽出することは困難であるため、整形が必要である。本データも NSSDC から入手することができ、またフォーマットに関して詳細な記述された文書が存在する [2]。現時点において、VUS Tape と SEISMIC EDR-2 Tape の関係については不明である。

本研究では、VUS Tape と SEISMIC EDR-2 Tape の双方の解析を行い、振幅に対して同一の結果を得ることができた。しかしながら (1) 特定の動作モードにおけるゼロ点の交差回数が異なる (2) データが含まれている期間の範囲が異なるなど、相違点も存在する。今後、これらの相違点を正確に把握した上で、第三者が利用可能な形式でアーカイブすることが必要である。

参考文献

- [1] Yosio Nakamura. Catalog of lunar seismic data from apollo passive seismic experiment on 8-mm video cassette (exabyte) tapes.
- [2] VIKING LANDER 2 SEISMIC EDR-2 75-083C-08A 75-083C-08B.

最近の13個の彗星(核)の偏光撮像観測結果 Imaging Polarimetry of recent 13 Comets/Nuclei

○古荘 玲子^{1,2}, 篠田 知則³, 寺居 剛², 渡部 潤一²

¹ 都留文科大学, ² 国立天文台, ³ 放送大学

彗星の偏光観測は、彗星ダストの特性を探るのに有用な手段である。彗星ダストによる太陽散乱光は直線偏光を示し、偏光度はダストの散乱位相角、光学定数、形状および粒径分布の関数として得られる。彗星の偏光撮像観測で得られる2次元の偏光度マップにおいて、ダストジェット等に関連した高偏光度領域が見られることがある。このような高偏光度領域は、コマ中のジェット活動やダスト崩壊などに起因する粒径や物質の偏りを示していると考えられる。したがって、偏光撮像観測は、彗星コマ中でのダストのふるまいを研究する上で貴重な手掛かりを与えてくれる。そこで我々のグループは、2003年末に彗星用広視野可視偏光撮像装置PICOを開発し^[1]、これまでの10年間に13彗星(分裂核を含む)の偏光撮像観測を行ってきた。

最初の観測として、2004年5月にニート彗星(C/2001 Q4)の偏光撮像観測を、県立ぐんま天文台65cm望遠鏡に取り付けて行った。次いで、9P/Tempelの偏光撮像観測を、2005年にDeep Impact mission地上観測の一環として鹿林天文台1m望遠鏡を用いて行った^[2]。2006年以降は、国立天文台三鷹の50cm社会教育用公開望遠鏡を利用して、継続的な観測を行ってきた。いくつかの観測を除き、フィルタはGunn's i'-band (686nm ~ 737nm)を用いた。

彗星コマの一定範囲内で平均した直線偏光度の散乱位相角依存性は、我々の観測した全ての彗星において、Jockers et al.^[3]による“ダストリッチな彗星の位相曲線”にととても良く一致している。

直線偏光度マップでは、顕著なダストジェット等に関連する高偏光度領域が捉えられたケースと、目立ったfeatureは見られなかったケースとに分けられる。さらに、ダストジェット等に関連する高偏光度領域の有無とは関係なく、中心に高偏光度の物質が集まりコマ周辺部に向かって偏光度が低くなる傾向が認められたものが複数あった。発表では、これらの偏光度マップから示唆される彗星コマ中でのダストのふるまいについて議論する。

Reference:

- [1] Y. Ikeda et al., PASJ, 59, 1017 (2007).
- [2] R. Furusho et al., Icarus, 190, 454 (2007).
- [3] K. Jockers et al., A&A, 441, 2, 773 (2005).

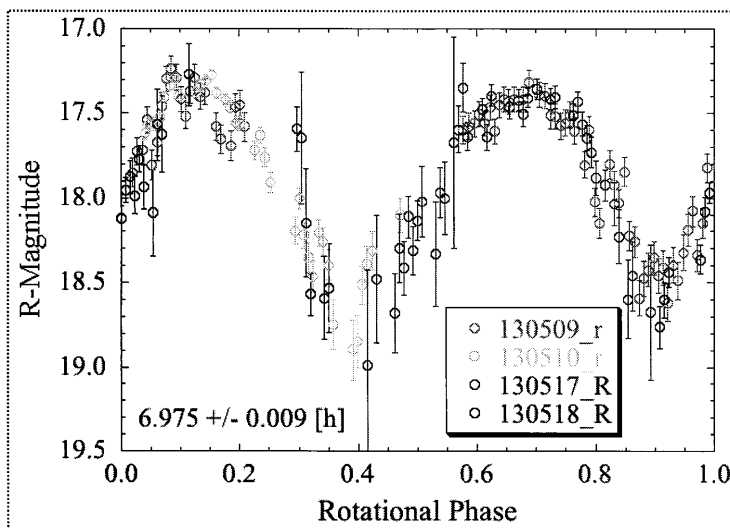
北大ピリカ望遠鏡による探査候補小惑星の観測

○関口朋彦¹, 石黒正晃², 黒田大介³, 長谷川直⁴, 花山秀和³, 渡辺誠⁵, 中尾光⁵,

¹北海道教育大学, ²ソウル大学, ³国立天文台, ⁴JAXA(宇宙研), ⁵北海道大学

現在我々のチームでは地球から比較的到達しやすい軌道を持ち、将来的な探査天体の候補となりうる小惑星に対して、多施設での観測キャンペーンを展開している。

今回、北海道大学ピリカ望遠鏡(名寄市)及び可視光装置 NaCS を用いて近地球型小惑星 "2009 SQ104" に対する可視光連続相対測光データ(一部石垣島天文台の測光データ含む)を取得し、そこから得られた光度曲線の解析からこの天体の自転周期は 6.975 時間であり、回転楕円体を仮定した際の天体形状(c 軸周りの回転を仮定)の a 軸 b 軸比は最小値で [1.6:1] という偏平な形状をしていることがわかった。また、国立天文台すばる望遠鏡(ハワイ)及び可視光装置 FOCAS を用いた可視光分光観測を行い、その反射光スペクトルの解析から小惑星の分光型は S 型であることがわかった。ここに報告する。



2009 SQ104 の可視光測光ライトカーブ

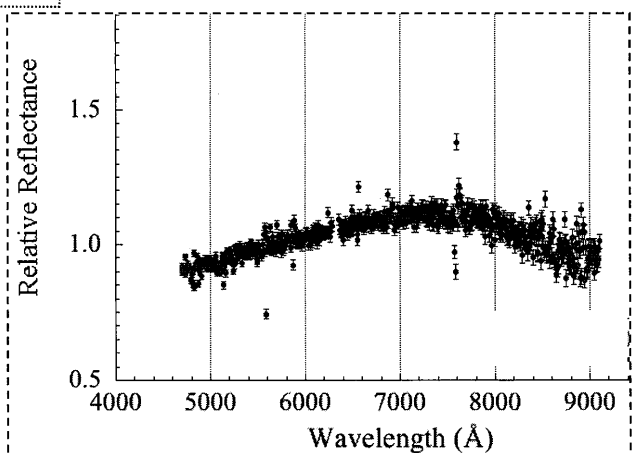
北大ピリカ望遠鏡及び国立天文台石垣島望遠鏡による可視光測光観測

小惑星 2009 SQ104 の観測結果

直径: 0.17 ± 0.04 [km]
(S 型小惑星のアルベド平均値 0.26 を仮定)
分光型: S 型
自転周期: 6.975 ± 0.009 [時間]
形状(楕円体縦横比): 1.6 : 1 (最小値)

軌道長半径	a	1.2850 AU
近日点距離	q	0.9256 AU
周期		1.46 年
軌道傾斜角	i	4.018 °
軌道離心率	e	0.280
Delta-V	ΔV	4.879 km/s

2009 SQ104 の軌道要素



2009 SQ104 の可視光反射スペクトル

国立天文台すばる望遠鏡による可視光分光観測

地球大接近小惑星 2012 DA₁₄ の表面特性測定

○ 寺居剛¹, 浦川聖太郎², 高橋隼³, 吉田二美¹, 大朝由美子⁴,
大島吾一⁴, 荒谷健太⁴, 星久樹⁴, 佐藤太基⁴, 潮田和俊⁴

¹ 国立天文台, ² 日本スペースガード協会, ³ 兵庫県立大学, ⁴ 埼玉大学

2013年2月16日未明（日本時間），小惑星 2012 DA₁₄ が静止軌道内側の距離まで地球に接近した．2012 DA₁₄ は直径数十メートルの近地球小惑星で，通常は大変暗いため観測は困難だが，最接近時は可視光で6-7等まで明るくなり，小口径望遠鏡でも高精度の観測を行うことが可能になった．我々は最接近前後で 2012 DA₁₄ の太陽位相角（太陽-天体-観測者がなす角）が大きく変化することに着目し，位相角変化に伴う光度変化（位相曲線）を測定することによって，未だ不明な点が多い微小小惑星の表面特性を調査した．

観測には埼玉大学 55cm 望遠鏡が使用された．天体が每秒約 50 分角の超高速度で天球を移動するという困難な観測だったが，満月の大きさに相当する広い視野（32'×32'），0.5 秒の短時間露出（R バンド使用），観測チームの巧みな望遠鏡操作によって，最接近時を挟む 2 時間にわたって継続して良質な撮像データを取得することに成功した（図 1）．さらに翌晩の 17 日 0:30 - 5:30（日本時間）にも観測を実施し，位相角がほぼ変化しなかったことを利用して自転による光度変化のみを測定することができた．

解析の結果，2012 DA₁₄ の自転周期は 11.0 時間，光度変化の全振幅は 1.6 等級と決定された．これらの値を用いて最接近時に得られた光度曲線から位相曲線（位相角 20°-40°）を算出したところ，その傾きは S 型小惑星のものに比べて顕著に緩やかであることが判明した．一般的に反射率が低い小惑星ほど傾斜が急な位相曲線を描くが，2012 DA₁₄ は S 型よりも反射率が低い L 型小惑星だと推定されている（de León et al. 2013; Urakawa et al. 2013）．講演では本結果から考察される 2012 DA₁₄ の表面特性について議論する．

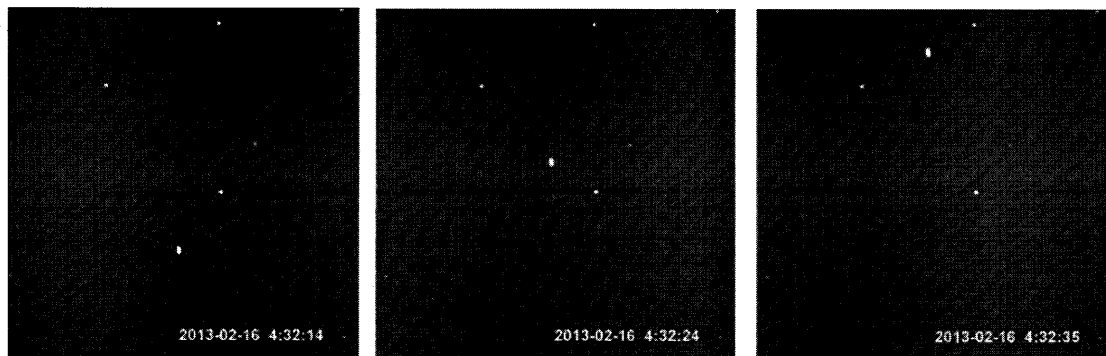


図 1: 埼玉大学 55cm 望遠鏡によって取得された，小惑星 2012 DA₁₄ の地球最接近時画像（R バンド，0.5 秒露出）．左から 2013 年 2 月 16 日 4 時 32 分 14 秒，4 時 32 分 24 秒，4 時 32 分 35 秒の撮像データ（いずれも日本時間）．視野は 32'×32' で，満月の大きさに相当する．恒星追尾での撮像であるため，背景の恒星は点光源として写るが，小惑星は伸びた星像となる．

2012 DA₁₄ 地球最接近時の近赤外カラー観測

○ 高橋隼¹、浦川聖太郎²、寺居剛³、花山秀和³、
新井彰¹、本田敏志¹、高木悠平¹、伊藤洋一¹

¹ 兵庫県立大学、² 日本スペースガード協会、³ 国立天文台

我々は小惑星 2012 DA₁₄（以下、DA14）地球最接近時の極めて直後に近赤外 3 色観測を行ったので、その結果を報告する。DA14 は、2013 年 2 月 15 日 19:25(UT、以下の時刻も同様) 頃に地球表面から約 27,700km の距離まで接近した。DA14 の直径は数 10m と事前に予想され、地球接近はこれほど小さい小惑星を詳細に観測する希有な機会であった。また、惑星接近が小惑星に及ぼす影響も興味深い。Binzel et al. (2010) は、地球近傍の S 型・Q 型小惑星の軌道解析から、Q 型小惑星の持つ「フレッシュな」（宇宙風化を受けていない）スペクトルは、地球接近時の潮汐作用による resurfacing によって生じる可能性を示した。かれらは resurfacing が起こる接近距離の目安として、16 地球半径つまり約 100,000km という値を挙げている。DA14 がすでに宇宙風化を受けている場合、今回の地球接近時にスペクトルが何らかの変化を示す可能性がある。

我々は、最接近時刻の約 0.5-1 時間後である 2 月 15 日 20:09 および 20:34 に、DA14 の近赤外 3 色観測を行った。世界各地で行われた他の時間帯の観測結果と比較することによって、今回の地球接近時に近赤外カラー（色等級差）に変化が見られるかを調べることができる。

観測には、兵庫県立大学西はりま天文台 2.0m なゆた望遠鏡、および近赤外 3 色同時撮像装置 NIC を用いた。観測波長帯は、*J* バンド（中心波長: 1.3 μ m）、*H* バンド（1.6 μ m）、および *Ks* バンド（2.1 μ m）である。DA14 は最大で毎秒 50 秒角弱という極めて大きい（赤道座標上の）速度で移動したが、なゆた望遠鏡は事前の軌道予測を基に DA14 を追尾することに成功した。また、NIC の特色である 3 色同時観測により、観測中の位相角変化や自転による不定性を回避することができた。

観測結果を表 1 に示す。2 月 15 日 20:09 と 20:34 のカラー（*J* – *H*、*H* – *Ks*）に有意な違いは見られなかった。また、de León et al. (2013) が 2 月 16 日 5:37-42（最接近から約 10 時間後）にスペインで行った近赤外観測と比較しても、誤差の範囲で一致している。このように、少なくとも最接近 0.5 時間後から 10 時間後の間に、DA14 の近赤外カラーに顕著な変化は見られなかった。

表 1: 観測された実視等級とカラー（色等級差）：比較のために de León et al. (2013) の結果も掲載。かれらは *Ks* バンドとはわずかに異なる *K* バンド（中心波長: 2.2 μ m）を用いている。

ID	UT	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>Ks</i> (<i>K</i>)	<i>J</i> – <i>H</i>	<i>H</i> – <i>Ks</i> (<i>K</i>)
#1	20:09, Feb. 15	5.87 $\pm$ 0.06	5.64 $\pm$ 0.04	5.56 $\pm$ 0.05	0.23 $\pm$ 0.07	0.09 $\pm$ 0.06
#3	20:34, Feb. 15	6.57 $\pm$ 0.05	6.31 $\pm$ 0.04	6.26 $\pm$ 0.04	0.26 $\pm$ 0.06	0.05 $\pm$ 0.06
de Leon	5:37-42, Feb. 16	12.47 $\pm$ 0.06	12.25 $\pm$ 0.06	12.29 $\pm$ 0.08	0.22 $\pm$ 0.08	-0.04 $\pm$ 0.10

参考文献: Binzel, R. P., et al, 2010, Nature, 463, 331 / de León, J., et al. 2013, A&A, 555, L2

小惑星 (163249) 2002 GT の多色ライトカーブ観測

○ 大島 雅英¹, 阿部 新助¹¹ 日本大学理工学部航空宇宙工学科

概要

NASA's Deep Impact/EPOXI spacecraft will encounter the asteroid (163249) 2002 GT, which is designated as a Potentially Hazardous Asteroid, on January 4, 2020. At present there is little more known about the nature of 2002 GT, but in mid-2013 it passes near the Earth affording an exceptional opportunity for ground-based characterization. Light curve measurements across a wide range of viewing perspectives will reveal the rotation rate and ultimately lead to strong constraints on the shape and pole orientation. Light curve observations would also be likely to reveal whether the object is a binary asteroid.*¹ We carried out multi-color lightcurve observation of 2002 GT with an 32-inch astronomical telescope and B-V-R-I filters at Tenagra Observatories in Arizona, USA and will discuss its nature.

NASA の探査機 Deep Impact/EPOXI は、2020 年 1 月に地球近傍のアポロ・タイプ小惑星 (163249) 2002 GT へのフライバイを予定している。現在、2002 GT の自転周期や自転軸、形状についての詳細は判っていないが、地上からのライトカーブ観測によって、自転軸や自転周期、形状を明らかにできると期待されている。我々は、米国アリゾナ州テナグラ天文台の望遠鏡と B-V-R-I フィルターを用いて 2002 GT の多色ライトカーブ観測を行った。本発表では、その観測と解析結果について報告する。

形状が球形でない小惑星は自転によってその明るさが変化するため、ライトカーブを取得することで自転周期が決定できる。また、様々な位相からライトカーブ観測を行うことで、小惑星の自転軸の方向を推定することも可能である。加えて、多色測光観測を行い、各フィルター毎のライトカーブを比較することで、小惑星表面の異方性に制限を与えることができる。

今回、我々は、「はやぶさ 2」のターゲット小惑星 (162173) 1999 JU3 の観測にも利用された*²米国アリゾナ州テナグラ天文台 (110° 52' 44.8"W, +31° 27' 44.4"N, 1312m) の口径 32 インチ (81cm) 望遠鏡と Johnson/Cousins の B-V-R-I フィルターを用いて観測を行った。2002 GT (直径 820m, 絶対等級 (H)18.263) の視等級が 16 等級程度、仰角が 70 度以上となる 2013 年 6 月 6, 7, 8, 9, 12, 13 日の 6 夜にわたり、地上からの多色観測に成功した。2002 GT は観測中も移動し続けることから、同一の比較星を相対測光に用いることは困難であるため、USNO-B1.0 のカタログデータを参照し位置測定を行い、測光を行った。また、今後、2002 GT 表面の異方性に関しても調査を行う予定である。

*¹ D.J. Grebow, S. Bhaskaran, S.R. Chesley, *Search & Selection for Future Flyby Targets for the DI/EPOXI Spacecraft*. AIAA 2012-5070, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Minneapolis, Minnesota, August 13-16, 2012.

*² Nicholas A. Moskovitz, Shinsuke Abe, Kang-Shian Pan, David J. Osip, Dimitra Pefkou, Mario D. Melita, Mauro Elias, Kohei Kitazato, Schelte J. Bus, Francesca E. DeMeo, Richard P. Binzel, Paul A. Abell. *Rotational characterization of Hayabusa II target Asteroid (162173) 1999 JU3*. Icarus 224 (2013) 24-31.

Sub-kmメインベルト小惑星のカラー分布

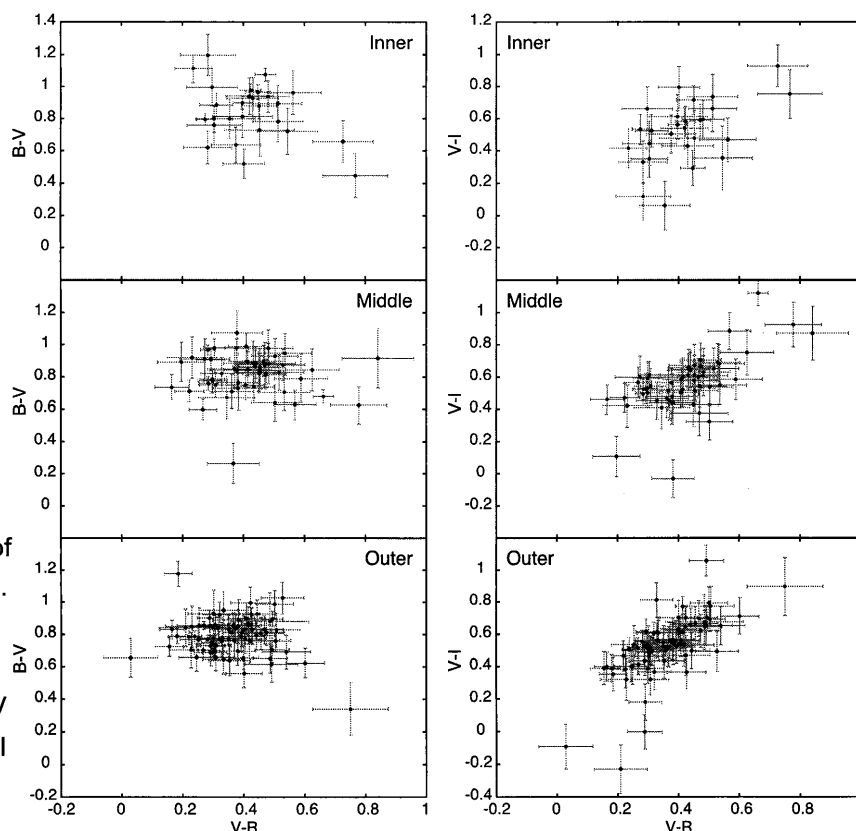
Color distribution of sub-km main belt asteroids

○Fumi Yoshida (NAOJ), Edward Lin, Wing-Huen Ip (NCU), Ying-Tung Chen (ASIAA)

We observed sub-km MBAs by Subaru telescope + Suprime-Cam with the B-, V-, R-, I-filters for investigating their colors. We surveyed 6 fields of Suprime-Cam's FOV (in total 1.5 deg^2) near ecliptic plane and near opposition. We detected 162 MBAs with the 4 bands. We report their color distribution and a correlation between color and orbital distributions.

As an example, the following figure shows the color-color dia-gram of MBAs from different regions of the main belt. We expected that the color distributions are slightly different between inner (dominated with S-type) and outer (dominated with C-type) regions. However, their distributions are almost overlapped each other. We will discuss a cause of no clear difference on the color distributions of sub-km MBAs from different regions.

Fig.1 Color distributions of Inner MBAs ($a < 2.5 \text{ AU}$, top). Middle MBAs ($2.5 \text{ AU} < a < 2.82 \text{ AU}$), and Outer MBAs ($a > 2.82 \text{ AU}$). V-R vs. B-V (left panels) and V-R vs. V-I (right panels).



太陽系小天体の深撮像観測に特化した 可視広帯域フィルターの開発と性能評価

Development and Performance Evaluation of a Newly Designed
Wide-Band Optical Filter Optimized for Deep Imaging of Small Solar-System Bodies

○奥村真一郎¹、西山広太¹、浦川聖太郎¹、坂本 強¹、高橋典嗣^{1,2}、吉川 真^{1,3}

¹ 日本スペースガード協会、² 明星大学、³ 宇宙航空研究開発機構

美星スペースガードセンターでは 2000 年以降、地球接近小天体の発見と追跡のための光学観測を実施してきた。より暗い天体まで観測できるように V バンドや R バンドの波長帯を含む、透過幅の広い広帯域フィルター(4900Å~9100Å、以降 W フィルターと記述)を主に使用してきた。しかしこのフィルターは市販の波長カットフィルター用のガラス材を流用して製作したものと思われ、われわれの用途においてこのフィルターが最適なものかどうかについては評価されていなかった。

そこで予備調査として V, R, I と W の各フィルターを用いて V-R のカラーが小惑星の観測値に近い恒星を測光し、星像の出力値と背景(空)の明るさとの比較から観測時の S/N 比を計算した。結果は W フィルターでの S/N 比が R, I フィルターで観測した場合の 2 倍あり、広帯域フィルターが効率的であることが確認された。同時に V フィルターでの S/N 比が R, I バンドにおける値の 1/2 以下であることもわかった。この結果から V バンド帯を除いた広帯域フィルターを使用すればより高い S/N 比が得られるであろうと推測できる。街明かりや大気夜光のスペクトル、地球大気の透過率や太陽光のスペクトル等を詳細に考慮して検討した結果、波長範囲 5880Å~9380Å のフィルターにするのが最も効率的であると結論し、このような透過特性を持つフィルターを設計・製作した。

新たに製作した広帯域フィルター(以降 Wi フィルターと表記)と旧 W フィルターでスペクトルタイプの異なる小惑星を観測して比較したところ、Wi フィルターを使用することで小惑星像の出力値は平均 3% 増加することが確認された。背景光についてはカットオン波長を長くしたために月明かりの散乱光の影響も減らす効果があり、OH 輝線など大気の大気夜光が優勢になるような非常に暗い空の場合には輝度が 3% 程度増加するものの、街明かりや月明かりの散乱光が優位な空の場合には背景の明るさを 10%~20% 低減できることがわかった。その結果、小惑星観測時に W フィルターを Wi フィルターに取り換えることにより S/N 比が平均で 6% 向上することになった。

参考

Okumura, S., Nishiyama, K., Urakawa, S., Sakamoto, T., Takahashi, N., and Yoshikawa, M.,
"Wide-Band Optical Filter Optimized for Deep Imaging of Small Solar System Bodies",
2012, Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, 47

P2-09

小惑星表面の温度場に対する2次加熱現象とその応答について

○ 滝田 隼^{1,2} 田中 智² 千秋 博樹³

¹ 東京大学 ² 宇宙科学研究所 ISAS ³ 千葉工業大学 PERC

小天体はその大きさから、物質的にも構造的にもほぼ均一な姿をしているとされているが、現状では単純とされている天体表面の温度分布において理論と観測の間に不整合が見られる。観測値は熱数学モデルによる理論値よりも数十度程度高く、天体表面上での温度分布のばらつきが小さい傾向にある。このため、小天体表面においては熱のやり取りの仕方が単純ではなく、惑星形状に起因する大域的な太陽光の入射条件だけではなく、表面の凹凸に起因する局所的な再加熱の影響が重要な役割をしている可能性があるため、天体の軌道や自転状態だけでなく天体の形状を考慮した境界条件で支配方程式系を解いた場合の解は、上記差異に関してどのような傾向を示すかについて現在検討している。

一般に、自転周期を既知とした条件下では、天体の表面温度は表面からの熱輻射率と、熱伝導率と熱容量で定まる熱慣性およびアルベドで決まる。今回の計算に関する仮定事項を以下に列挙する。天体の物性は一様で、温度や圧力依存性はない。1次加熱に関しては、太陽からの距離を1AUとし、自転軸の向きは黄道面に対して垂直であり、実際の天体の軌道要素ならびに自転状態を考慮したものではない。二次加熱に関しては、周囲からの輻射熱による加熱に加え、散乱反射による過熱が考えられるが今回これは除外した。また、伝熱現象に関しては今回は熱慣性は0、つまり放射平衡を基本的な計算条件とし熱伝導方程式を扱っていない。なお、輻射率は0.9、アルベドは0.02とした。

今回採用した小惑星の形状モデルは25143Itokawa(1998SF36)である。惑星表面を構成する微小三角形要素数は総計49152、節点数は25350のレベルのものを利用した(GASKEL-MODEL)。惑星表面が太陽で加熱されることで温度が上がる時間的な程度は、距離や角度といった天体と太陽との幾何学的な位置関係の他、天体の持つ自転周期と自身を作る岩塊の物性で決まる。今回の計算条件が放射平衡であるため、自転プロファイルのような非定常の温度曲線を差分法などで時間発展させることでシミュレートする数値計算法を採用せず、太陽と天体の幾何学的な配置のみを変えることで熱量の入射条件を決め、このときの天体全体での温度分布を計算する方法を用いた。結果については、太陽に対する自転位相が0度、90度の場合において、2次加熱で入射する熱エネルギーは面要素平均でそれぞれ2.4、6.3W/m²、最大で104、289W/m²であった。概して大域的には太陽定数1370W/m²に対してわずかではあるが、地形によっては追加で加熱される程度が太陽定数の2割にも及ぶため、局所的には無視できない影響がでることが分かった。影響がでる領域についてもヒストグラムからは表面の8割は10W/m²以下だが、2割程度にはある程度の影響があり、全体的な温度のばらつきを消す傾向にあることも分かった。しかしこれらの結果は地形や自転状態で結果が変わるため、2次加熱は天体表面の温度分布を均一にするのか不均一にするのかについてはさらなる検討が必要である。この程度を把握することはYarchovsky効果やYORP効果などを考慮する場合、天体の軌道計算による長期予測の精度向上には不可欠である。また、天体からの輻射熱の収支の素過程を明らかにすることは天体の近接観測や探査機のタッチダウンによるサンプルの回収などの、天体からの局所的な影響を受ける運用フェーズにおいては工学上、熱的に特に重要な知見になると思われる。

熱水実験と反応理論モデルに基づくセレスの表面 鉱物の解釈：形成・熱進化への示唆

○森 愛美¹, 関根 康人², 桑谷 立³, 橘 省吾⁴, 澁谷 岳造⁵, 鈴木 勝彦⁶, 正木 裕香⁶

¹東大・理・地惑, ²東大・新領域, ³東北大・環境科学, ⁴北大・理・自然史科学

⁵JAMSTEC・プレカンブリアンエコシステムラボ, ⁶JAMSTEC・IFREE

準惑星セレスは、小惑星帯における最大の天体であり、原始惑星の姿を現在まで留めている数少ない天体のひとつである。また、その密度や形状から、内部が岩石コアと氷マントルに分化している可能性が示唆されている。熱史モデルによると、このような内部構造を説明するためには、セレスは形成初期に大規模融解を経験した可能性が高いことが示唆されている [Castillo-Rogez and McCord, 2010]。その場合、内部では熱水反応に伴い、かんらん石などの始原的鉱物が水質/熱水変成を経験したと考えられる。このような水質/熱水変成において、生成される鉱物には温度条件や初期の鉱物・水溶液組成が大きく影響すると考えられる。したがって、セレスの鉱物組成は、その集積時期、微惑星の化学組成や初期太陽系の温度構造を知る上で重要な指標となりうる。

近年の地上望遠鏡によるセレスの反射スペクトルから、表面にはかんらん石の熱水反応によってできるブルーサイト、鉄に富む蛇紋石、マグネシウムに富む炭酸塩、磁鉄鉱が存在することが示唆された [Milliken and Rivkin, 2009]。また、アンモニアを含むサポナイトが存在することを示唆する観測的研究もある [King et al., 1992]。しかしながら、これらの鉱物がどのような温度条件・水溶液組成で生成されうなのか、各条件の違いが生成される鉱物・化学組成にどのような影響を及ぼすのかについてはよくわかっていない。

本研究では、温度・初期物質と生成する二次鉱物との関係を明らかにするため、始原的鉱物を用いた熱水反応実験を行なう。また、水溶液をサンプリングして得られる溶存種の時間変化を再現する反応理論モデルを構築する。熱水実験では、パラメタとして初期鉱物、温度、水溶液中の CO_2 量・ NH_3 量を変化させ、水溶液の溶存ガスと溶存イオン量の変化、生成される二次鉱物の化学組成を調べた。実験装置にはインコネル合金製オートクレーブを用い、初期鉱物としては輝石(opx)とかんらん石(Fo_{50} , Fo_{90})の粉末を用いた。温度は 120–300°C、圧力は 400 気圧で固定した。実験は、反応がほぼ定常状態に達したところで鉱物を取り出し、その化学組成を分析した。この結果から、鉄の酸化還元反応や炭酸塩の生成反応、二次鉱物への元素の分配などについて考察し、表面鉱物から推定されるセレスの材料物質や温度について議論する。

チェリャビンスク隕石火球：

微気圧および広帯域地震観測網に記録された衝撃波シグナルの特徴

○石原 吉明¹, 平松 良浩², 西田 究³, 新井 伸夫⁴, 岩國 真紀子⁴, 柿並 義宏⁵, 古本 宗充⁶,
山本 真行⁵

¹産業技術総合研究所, ²金沢大学, ³東大地震研究所, ⁴日本気象協会, ⁵高知工科大学, ⁶名古屋大学

2013 年 2 月 15 日、ツングースカイベント以来最大規模となる隕石落下イベントがロシア・ウラル地方で発生し、隕石落下に伴い励起された衝撃波により、人的被害を含め多くの被害が生じた。現在まで、多数の隕石片が回収され、チェリャビンスク隕石と命名されており、さらにチェバルクリ湖に沈んだ最大破片 (600kg とみられる) の回収に向けた準備が進められている。

チェリャビンスク隕石火球の最大の特徴は、100 年に 1 度と見積られるほどの非常に大規模な隕石落下イベントであった点にある。このような大規模な隕石落下イベントが、近代的な観測装置により観測されたのは史上初である。一般に火球イベントの解析には光学記録が用いられる事が多いが、本イベントではロシアで普及している車載ビデオカメラにより多数の映像記録が得られ、軌道解析等が行われている。また、人的被害をももたらした衝撃波に関して、核実験探知を目的に整備された CTBTO による微気圧観測網や、衝撃波が固体地球とカップリングする事で励起された地動という形で広帯域地震観測網に記録された。広帯域地震観測網記録からは、終端爆発により励起された衝撃波が爆発点ほぼ直下で固体地球とカップリングした結果励起された卓越周期が 20 秒程度の表面波 (レイリー波) が爆発点から 3 千数百キロ遠方まで伝播した事が見て取れる (図 1)。微気圧観測網に捉えられた衝撃波波形は非常に複雑であり、大気中の長距離伝播に伴いマルチパスの影響などで波形が変化したものと考えられる。また、衝撃波による微気圧変動の振幅には終端爆発地点からの方位による大きな違いが見られる。これは終端爆発によるほぼ球形の波面を持つ衝撃波と、流星物質の超音速飛行に伴う円錐形の波面を持つ衝撃波の干渉の結果である可能性がある。

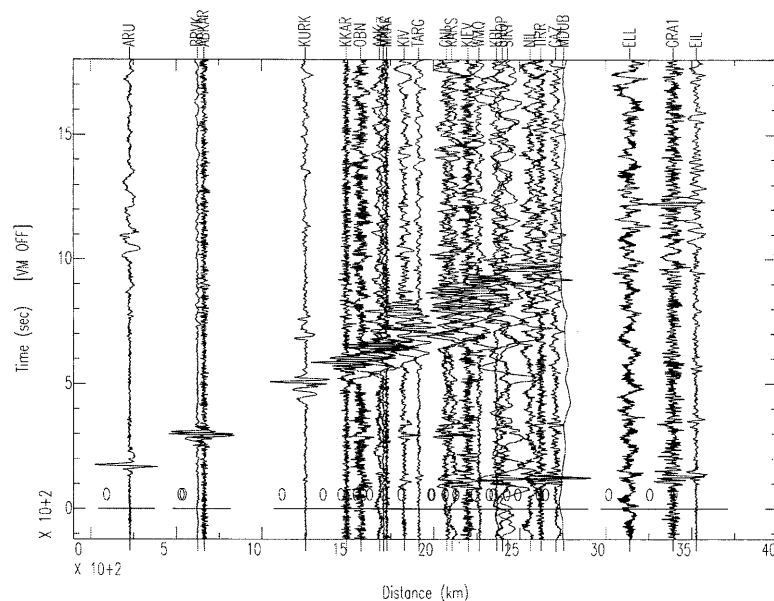


図1 広帯域地震観測網により捉えられたチェリャビンスク隕石火球の終端爆発により励起された衝撃波起源の表面波のペーストアップ記録。

木星火球の観測

○今井 啓輔¹、柳澤正久¹

¹電気通信大学 情報理工学研究所

1 研究背景・目的

シューメーカー・レビー第9彗星(SL9)のような木星への小天体衝突頻度は百年に一度あるかないかと考えられていた[1]。しかし、2009年に木星に衝突痕と思われるものが見つかり[2]、さらに2010年には約3か月の間に2回の木星火球が観測された[3, 4]。これらの観測は、木星への小天体衝突頻度が従来の予想よりも高い可能性があることを示している。私達は、2011年から2012年にかけて観測を行ったが木星火球を観測することはできなかった。2011年度と2012年度の観測から求めた木星火球発生頻度の上限値を図1に示す。図中のCase A、B、Cはそれぞれ、衝突頻度のモデル[1]だが、観測時間が足りないことから、上限値が大体、どのモデルに該当するか示すことができない。そのため、より長時間の観測を実現すべく、観測システムの自動化を行った。

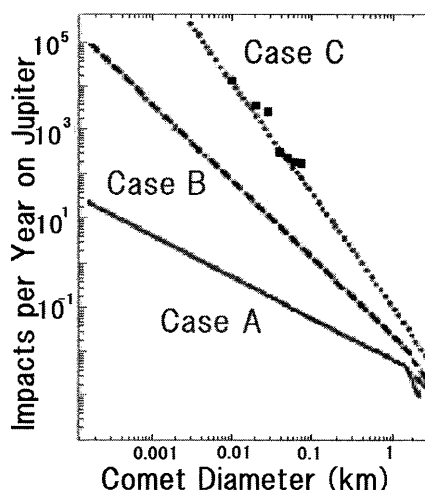


図1: 木星の小天体衝突頻度の累積分布。横軸は、小天体の直径。Case A、B、Cは、それぞれ異なるモデルによる衝突頻度の予測を表す。中央の7点は私達の観測から推定した衝突頻度の上限値である。([1]の図を一部修正)

2 観測システムの自動化

観測システムは、望遠鏡、観測ドーム、木星火球検出ソフトで構成される。望遠鏡はシュミットカセグレン式望遠鏡(C11(Celestron社): $D = 280\text{mm}$, $f = 2800\text{mm}$)である。望遠鏡の木星自動追尾は、スカイセンサー2000(VIXEN社)によって行うが、長時間の観測ではこれだけでは不十分である。そのため、木星像が視野から外れないようにするため、望遠鏡に取り付けたビデオカメラ(XC-003(SONY社))からPCに取り込んだ映像を用い、スカイセンサーの動きを補正するガイドソフトを作成した。

観測ドームは手動による制御であったものを、望遠鏡の動きに同期するよう自動化を行った。これには、望遠鏡の側面に取り付けたビデオカメラでドームのスリットを映し、その映像をPCに取り込んで制御を行う。

木星火球検出ソフト[5]は、2011年、2012年で使用したものを改良して用いる。このソフトは、望遠鏡から取り込んだ木星像を調べ、木星面上で発光が起きた場合、その前後数秒の画像を保存する。現在、それぞれのシステムは独立しており、それぞれのシステム用にPCを1台ずつ必要とする。今後は、すべてのシステムを1台のPCで制御可能にするために、システムの統合を行う予定である。

参考文献

- [1] Zahnle K. et al. (2003) Icarus, 163, 263-289.
- [2] Sanchez-Lavega A. et al. (2010) The Astrophysical Journal Letters, 715, L155-L159.
- [3] Hueso R. et al. (2010) The Astrophysical Journal Letters, 721, L129-L133.
- [4] Tabe I. (2010) www.libra-co.com/mastro/J2010augevent.html. (last access 2013/9/17).
- [5] Yanagi M. (2013) <http://www.yanagi.cei.uec.ac.jp/> (last access 2013/9/18)

木星火球シミュレーション：メタンバンド観測の有効性

○片桐陽輔¹、柳澤正久¹

¹ 電気通信大学 情報理工学研究科

1 概要

木星領域における小天体のサイズ分布は未だ謎が多く、その解明は太陽系の起源や進化に迫るものであると言える。それを知る方法の1つとして木星火球という現象が挙げられる。これは、木星にメテオロイド(小天体)が衝突する現象であり、地球の流星現象と同じく木星大気中で発光を生じる。木星火球のモニター観測においては、木星自体の明るさを暗くできるのである。メタンバンドフィルタが有効だとされている。このフィルタは、889[nm] 付近の波長域のみ透過し、それ以外の波長をカットする。木星大気にはメタンが含まれており 889[nm] 付近の光を吸収するため、木星自体の明るさを減ずることができる。

しかし、木星火球観測にメタンバンドフィルタを用いることが有効であるかどうかは木星火球の発光高度に依存し、木星大気深部での発光だと火球自体も明るく写らない。そこで本研究では、木星火球の発光を計算機上でシミュレーションする。得られる発光高度から木星火球観測におけるメタンバンドフィルタの有効性を検討する。

2 基本方程式

木星にメテオロイドが突入する現象を以下の3つの微分方程式 [1] で表す。

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dt} &= -C_D \frac{\rho_g A v^2}{m} \\ \frac{dx}{dt} &= v \\ \frac{dm}{dt} &= \begin{cases} -\frac{C_H \rho_g A v^3}{2\zeta} \left(\frac{v^2 - v_{cr}^2}{v^2} \right) & (v \geq v_{cr}) \\ 0 & (v \leq v_{cr}) \end{cases}\end{aligned}$$

t : 時間, v : 速度, x : 進行距離, m : 質量, A : 断面積 (時間関数), ρ_g : 大気密度, C_D : 抵抗係数, C_H : 熱伝導定数, v_{cr} : アブレーション臨海速度, ζ : 単位質量当りのアブレーションに要する熱エネルギー。

3 計算結果

ルンゲ=クッタ法を用いて基本方程式を積分した結果を図1に示す。ピークを持つ2本の曲線は、メテオロイドが抵抗に抗した単位時間あたりにする仕事である。なお、メテオロイドの成分は緻密な氷であると仮定し、case1, 2のそれぞれの初期値は半径 5.0, 10.0[m]、とし、初速度と入射角はともに 60[km/sec], 45[°] とする。

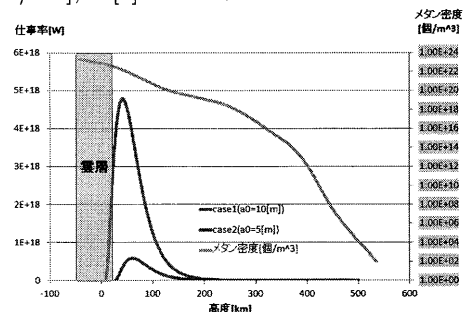


図1: メテオロイドの仕事率 (case1, 2), 右下がりな曲線はメタンの個数密度を示す [2]. 圧力 1bar の点を高度 0[km] とした。

4 考察

図1をみると、2つの case とも高度 50[km] 付近で単位時間あたりの運動エネルギーの消費がピークになる。この高度付近で木星火球(メテオロイドの発光)が起きていると考える。木星火球は木星本体(雲)よりも高い高度で発光しているが、このグラフだけではメタンバンド観測が有効と断言はできない。今後はメタンの光吸収率を求め、火球の明るさの予測を行う予定である。また、アブレーションだけでなく、フラグメンテーションも考慮した火球モデルを構築する予定である。

参考文献

- [1] Melosh H. J. , “Impact Cratering”, Oxford Univ. Press, pp 245, 1989.
- [2] G. Randall Gladstone, “Hydrocarbon Photochemistry in the Upper Atmosphere of Jupiter”, ICARUS 119, 1996.

木星火球のメタンバンド観測

○ 森山 正和¹、柳澤 正久¹

¹ 電気通信大学 情報理工学研究科

1 概要

1994年にシューメーカー・レヴィ第9彗星が木星に衝突したが、これは数百年から数千年に1度という珍しい出来事であると思われていた[1]。しかし2010年6月に二人のアマチュア天文家によって木星表面での発光現象が確認され(図1)[2]、同年8月にも同様の発光現象が観測された[3]。これらは木星表面での発光現象は考えられていたよりも高頻度で起こっている可能性を示唆している。そこで自動観測システムにより木星を継続観測することで小天体が木星に衝突する頻度を調べることにする。

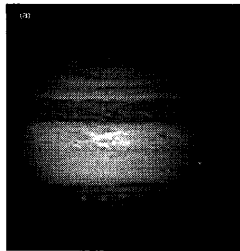


図1: 2010年6月3日20時31分29秒(UTC)にオーストラリアから観測された木星火球の合成写真[2]。撮影はA.Wesley.

2 観測システム

電気通信大学(東京都調布市)の望遠鏡(NGT-18: ニュートン反射, D=450mm, f=2025mm)にTele Vue パワーメイト(×4)を取り付け、メタンバンドフィルターを通してCCDビデオカメラ(WAT-100N)で撮影する。望遠鏡は無人でも木星像を正確に自動追尾するようになっている。その概略を図2に示す。望遠鏡に付属している手動コントローラには、天の東西南北方向に追尾を補正するボタンが付いている。コントローラにはモジュージャックがあり、ボタンを押すことに対応した動作を外部から制御できるようになっている。望遠鏡に取り付けられたビデオカメラの映像はPCに取り込まれ、木星像が動くとプロ

グラムがそれを検知する。そしてPC画面の一部の明るさを変える。これを光スイッチが検知しコントローラのON/OFFを切り替える。

一方、観測ドームに付属している手動コントローラにはドームを回転するボタンが付いている。コントローラを制御している回路に光スイッチを組み込み、外部から制御できるようにした。望遠鏡の自動制御と同様に、望遠鏡の側面に取り付けられたビデオカメラの映像をPCに取り込み、スリットの影をプログラムで検知するとPC画面の一部の明るさを変える。これを光スイッチで検知し、コントローラを介してPCに取り込んだドームが時計回りに動くようにする。

木星火球の検出も自動的に行う。画像を約0.5秒前の画像と比較しある画素が閾値以上の明るさの変化をした場合に木星火球を検出したとみなし前後の画像を保存する、というプログラムを用いている。

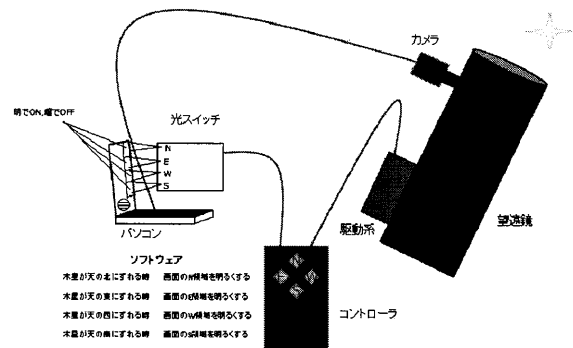


図2: 木星自動追尾システムの概略.

参考文献

- [1] Zahnle K. et al. (2003) Icarus, 163, 263-289.
- [2] Hueso R. et al. (2010) The Astrophysical Journal Letters, 721, L129-L133.
- [3] Tabe I. (2010) www.libra-co.com/mastro/J2010augevent.html. (last access 2013/9/18).

木星衝突発光現象の検出の試み

Trial for detecting Jovian impact flashes

○渡部潤一¹、田部一志²、柳澤正久³、伊藤孝士¹、杉田精司⁴

¹国立天文台、²(株) リブラ、³電気通信大学、⁴東京大学

Junichi Watanabe¹, Isshi Tabe², Masahisa Yanagisawa³, and Takashi Ito¹, Seiji Sugita⁴

¹*National Astronomical Observatory of Japan,*

²*Libra Co.,*

³*The University of Electro-communication,*

⁴*University of Tokyo,*

Optical flashes on the surface of Jupiter were observed by amateur astronomers in June, and August in 2010, and in September 2012. These flashes are considered to be bright fireballs in the Jovian atmosphere. There is a big difference in the impact velocity, which is almost constant. This gives us a unique opportunity to study size distribution of small bodies in this outer planet region.

The optical flash occurred in August 2010 was observed by four amateur astronomers in Japan. The duration of the flash was about 1.5 seconds, and the brightness was 6.2 magnitudes [1]. This is presumed to be an equivalent or slightly smaller scale than that in June [2]. These phenomena were bright meteors caused by the collision of small celestial bodies of a few to 10 m. Until now, we have three samples of such impact flashes detected by amateurs between 2010 and 2013.

If the frequency and the scale of these phenomena are investigated, the size distribution down to size of a few m can be estimated at around the giant planet region. In case of Earth, the brightness of meteors depends not only on sizes but also on the entry velocity. However, in the case of Jupiter, the entry velocity becomes almost similar value (60-64 km per second) which is almost independent on the impacting direction. We do not have any uncertainty for estimating size of impacting bodies from the brightness of the flashes. On the other hand, we have large uncertainty in the size distribution of small bodies in the giant planet region [3], because we cannot see directly any bodies of less than 1 km. Therefore, if the systematic observation is achieved, it will be a unique attempt to use the giant planets as a natural detector of small bodies, and to derive size distribution of small bodies in the giant planet region.

For this purpose, we coordinated both professional and amateur astronomers in Japan and China, and performed monitoring campaign in September and November 2012, and November 2013. Unfortunately we cannot detect any optical flashes during the past campaign in 2012. In 2013, we will use 2-m telescope in Nishi-harima Astronomical Observatory in order to detect smaller flashes. The software for automated detection is also developed by Hueso's group (Grupo de Ciencias Planetarias, UPV-EHU, Spain) which is opened at their web site <http://www.pvol.ehu.es/software/>. This presentation includes latest result of our effort in 2013.

References

- [1] J. Watanabe et al., Abstract in JGU meeting 2011, P-PS22 (2011).
- [2] R. Hueso et al. *Astrophys. J.*, 721, L129 (2010)
- [3] K. Zahnle et al. *Icarus*, 163, 263 (2003)

小天体衝突によりガス惑星大気中に生成された揮 発性分子の化学進化

○飯野孝浩¹

¹名古屋大学太陽地球環境研究所

海王星大気は 1ppm という他の惑星に比べて 30-1000 倍高い一酸化炭素分子の混合比によって特徴づけられる。その起源として、彗星の衝突や惑星間塵の流入といった外部からの輸送が有力な候補である。1994 年に発生したシューメーカー・レビー第 9 彗星の木星への衝突が木星の成層圏に大量の CO 分子を生成したことや、海王星大気中の CO 分子が上層ほど多いことがその理由である。しかし一方で既存の小天体分布モデルとの不一致などの問題も指摘されている。この外部起源仮説を検証するため、我々は国立天文台の ASTE 望遠鏡を用いて新たな衝突由来分子のサーベイ観測に取り組んでいる。2010 年に行った第 1 回の観測では、1994 年の彗星衝突後に木星大気に供給された CS 分子の観測を行った。輝線構造は取得できなかったが、得られた混合比上限値から、木星の事例や典型的な彗星に比べて CO/CS 値が 2 桁以上低いことが分かった。このことから、小天体の衝突が大気に与えた化学的な影響について、木星とは異なった描像を考慮すべきであると考えられる。また、S 原子のリザーバーとして別の硫化物が存在している可能性があることから、我々は H₂S, H₂CS, S O, SO₂, OCS 分子を対象とした硫化物分子のサーベイ観測を ASTE 望遠鏡を用いて行う予定である。本発表では、このサーベイ観測の結果を中心に報告する。

模擬星間環境中での宇宙線による 複雑態アミノ酸前駆体の生成

Formation of complex amino acid precursors by cosmic radiation
in interstellar environments

○江藤碧¹, 伊勢絢一¹, 金子竹男¹, 大林由美子¹,

福田一志², 小栗慶之², 吉田聡³, 小林憲正^{1,4}

¹ 横浜国立大学大学院, ² 東京工業大学原子炉工学研究所,

³ 放射線医学総合研究所, ⁴ 自然科学研究機構

〔緒言〕地球圏外の炭素質コンドライトや彗星等にアミノ酸前駆体を含む多様な有機物が検出され、それらが地球での生命誕生に果たした役割が注目されている。さらに、隕石などの有機物の起源としては、太陽系形成前の分子雲中で星間物質(一酸化炭素・メタノール・アンモニア・水など)に宇宙線などが作用して生成した可能性が考えられる。本研究では、星間での有機物生成の検証のため、模擬星間物質(一酸化炭素またはメタノール、アンモニア、水)に東工大タンデム加速器からの陽子線、もしくは放医研 HIMAC からの重粒子線を照射した。照射生成物は、MALDI-MS や ESI などを用いた構造解析と、HPLC を用いた加水分解した生成物のアミノ酸の定量を行った。

〔実験〕約 400 mL の Pyrex 製容器に一酸化炭素(350 Torr)、アンモニア(87.5–350 Torr)の混合ガスを入れた。また、この容器に水 5.0 mL を加えたものも作成した。CO、NH₃、H₂O の系 CO、NH₃ の系での生成物をそれぞれ CAW, CA と呼ぶ。陽子線照射後、サンプルは超純水で回収し、陽イオン交換 HPLC(島津 LC-10A)でアミノ酸の分析を行った。

〔結果と考察〕照射により、気相中に靄が生成した。各照射生成物の加水分解物中に、Gly、Asp、Ser、 α -アミノ酪酸、 β -Ala 等の多種類のアミノ酸が検出された。CAW 系でのアミノ酸の生成量は照射量に比例した(Fig. 1)。水のない CA でもアミノ酸が生成した。以上より、今回の系でのアミノ酸生成機構はストレッカー反応ではありえない。分子雲中では、星間塵アイスマントル中の一酸化炭素、水、アンモニアに銀河宇宙線があたり、生じた二次宇宙線や紫外線で多数の分子が活性化後、急冷時に結合しあって高分子態有機物が生成すると考えられる。現在、分子雲と同様の極低温下の氷(一酸化炭素などを含む)にデジタル加速器(KEK)からの粒子線を照射し、有機物の生成機構をさらに調べる予定である。

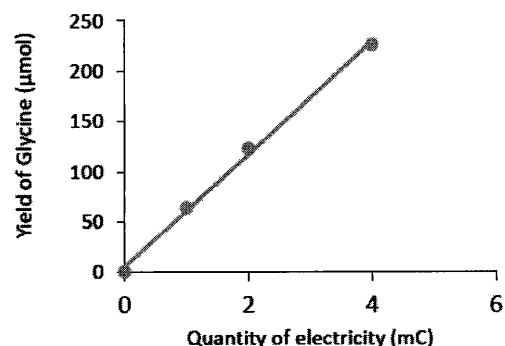


Fig. 1. 照射電気量とグリシン生成量の

宇宙線による星間物質からの 核酸塩基無生物的生成の検証

Studies on abiotic synthesis of nucleic acid bases from interstellar media
by cosmic radiation

○ 時村隼人¹, 岡部拓人¹, 金子竹男¹, 大林由美子¹,
福田仁志², 小栗慶之², 吉田聡³, 小林憲正^{1,4}

(¹横浜国立大学, ²東京工業大学, ³放射線医学総合研究所, ⁴自然科学研究機構)

【緒言】地球生命誕生に至る化学進化過程で、生体関連有機物である核酸塩基の供給が必要である。炭素質コンドライト中に核酸塩基が検出されていることから、宇宙環境下で核酸塩基が生成されることが示唆され、その生成の場として星間分子雲中の星間塵環境が考えられる。本研究では分子雲環境での核酸塩基生成の検証のため、エネルギー源として宇宙線を模擬した高エネルギー粒子線（陽子線）を模擬星間物質（一酸化炭素、アンモニア、水など）に照射し、生成物中の核酸塩基の検出を試みた。また、生成した核酸塩基の宇宙放射線に対する安定性を検証するため、核酸塩基試薬への炭素重粒子線照射を行い、変成を評価した。

【実験】模擬星間物質として、一酸化炭素、アンモニア混合ガス(CO 350 Torr, NH₃ 350 Torr)と超純水を封入したガラス製容器を用意し、東京工業大学タンデム加速器から 2.5 MeV の陽子線を照射した。照射生成物は超純水で回収し、そのまま、もしくは 6 M HCl 110°C で酸加水分解を行った後に、逆相 HPLC 法により核酸塩基類の画分の分取を行った。分取した生成物は、それぞれ HILIC カラムを用いた LC/MS により同定・定量を行った。また、核酸塩基水溶液を封入したガラス製容器に、放射線医学総合研究所の HIMAC 重粒子線照射装置から炭素線(290 MeV/u)を照射し、生成物の回収率を逆相 HPLC により求めた。

【結果・考察】加水分解前の陽子線照射生成物から核酸塩基であるアデニン (Ade)、グアニン (Gua)、プリン (Pu) ヒポキサンチン (Hyp) が、加水分解後の試料からは、ウラシル (Ura)、チミン (Thy) キサンチン (Xan) の生成が確認された。プリン塩基の多くは加水分解により分解した。これらのことから、核酸塩基はアミノ酸と異なり、遊離体としても生成することが示唆された。また、重粒子線照射実験により核酸塩基量の減少が確認されたが、アミノ酸やアミノ酸前駆体よりも安定であることが確認された。

以上の結果より、生命の材料となる核酸塩基が星間環境で宇宙線により生成し、隕石・彗星などにより地球に供給された可能性が示唆された。今後、各塩基の生成条件・変成について、より詳細な解析を行う予定である。

最新のカッシーニ探査データに基づく ディオーネの表層進化史

○平田直之¹ 宮本英昭¹

¹東京大学総合研究博物館

ディオーネは土星の中型衛星の一つであり、半径 561km ほどの天体である(図 1)。衛星表面には内的営力と外的営力による表層進化の痕跡が残されている。内的営力による痕跡としては、大規模な構造地形とみられる帯状の領域(Wispy terrain)や大きな衝突クレーターが欠乏している地域(Smooth Plain)が存在している。外的なものとしては Evander クレーターや Creusa Ray System, ダークテレーンなどが知られる。

こうした地形の形成史を理解することはディオーネの歴史を知るうえで基礎的かつ重要な情報である。そこで本研究では画像解析を通じて、ディオーネ表層の微細な地形を調べ、地質史を復元することを目標とした。

そのためにカッシーニ探査機によって得られた画像を使用した。ディオーネはいままでに 1700 枚以上の画像がカッシーニ探査機によって取られており、400m/pixel の解像度で北極域を除くほぼ全球が網羅されている。これら画像の解析の結果、ディオーネは一方的かつ単調な冷却を遂げた天体ではなく、加熱と冷却を経験した天体であることがわかった。このことは現在活発な火山活動を有するエンセラダスの進化を理解する上でも重要な示唆を与えるものであると期待される。これらの詳細についての発表をしたい。

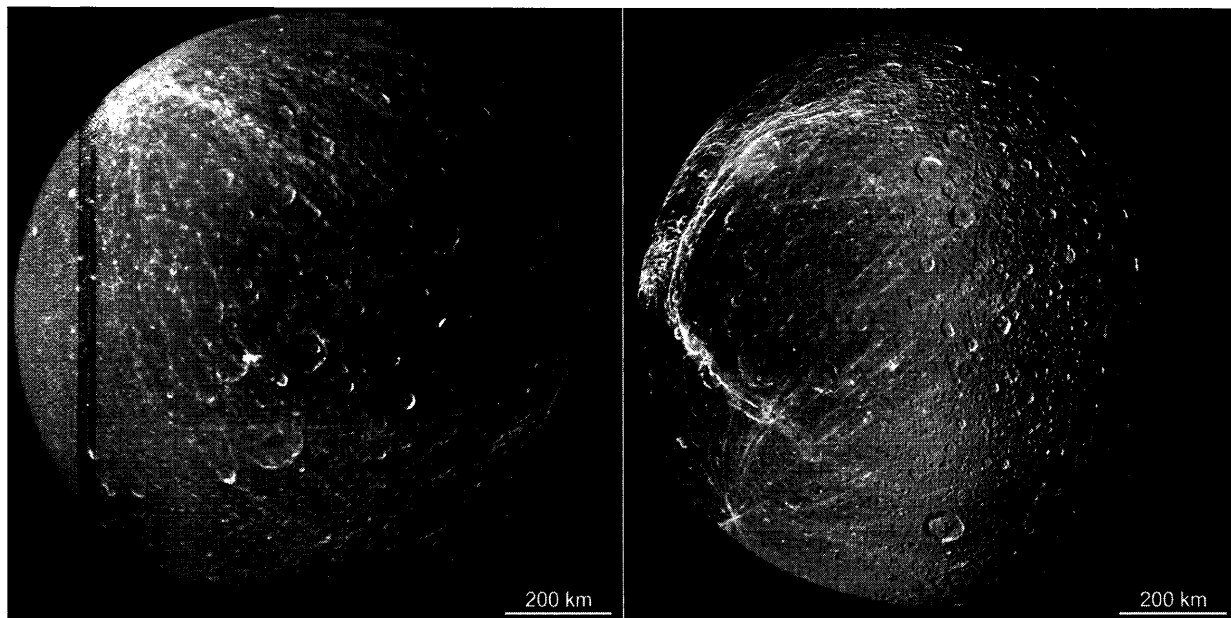


図 1 ディオーネの表側(左)と裏側(右) (W1649313601, W1649316019, N1643297347, N1643298118, N1643300578, N1643300999 の 6 画像のモザイク)。

ガニメデの金属核形成と膨張地形形成： カリスト・タイタンとの進化の分岐

Formation of a metallic core and extensional tectonics of Ganymede with implication for divergent evolutionary paths of Callisto and Titan.

○木村淳¹, 倉本圭²

¹ 東京工業大学地球生命研究所 (ELSI), ² 北海道大学

Jupiter's largest moon Ganymede has an abundant evidence of extensional tectonics resulting from global expansion in relatively young age, and has a large metallic core which is implied by the existence of the intrinsic magnetic field and small value of the moment of inertia factor. To investigate these origins, here we show dehydration models of primordial hydrous silicate and metal-mixed core, which is heated by long-lived radiogenic isotopes and becomes dehydrated. The volume expansion accompanying the dehydration is possibly enough large for the extensional tectonics and its timing is consistent with the cratering age. Dehydration also results in the sharp viscosity increase, and the central temperature possibly exceeds the eutectic point of conductive materials, allowing the formation of a metallic core. Actual Ganymede's interior (and possibly also Titan) can form a conductive core while slightly smaller Callisto can escape from sufficient heating. This may explain the observed difference in the surface geology and internal structure among the giant icy moons.

木星衛星ガニメデは、衛星で唯一の固有磁場と磁気圏を持ち、氷の表面には衝突クレータで飽和した極めて古い地質ユニットと大規模な伸張性テクトニクスが広がるユニットとが共存し、内部海が存在可能性が示唆されている太陽系最大の衛星である。本講演では、それらの起源を説明する新たな内部進化モデルを提示する。このモデルでは、衛星集積段階において岩石成分は含水鉱物化していると仮定し、金属と混合した初期含水核を持つ原始ガニメデの熱的進化を数値計算によって調べた。この初期核は岩石中の放射性核種の壊変熱によって加熱され始め、鉱物脱水温度に達するとそのレオロジー（熱輸送率）が急激に変化して内部の急激な温度上昇とさらなる脱水を引き起こす。初期核に含まれる膨大な水が衛星浅部へもたらした結果、衛星は全球的な膨張を受けて表層の伸張性テクトニクスが生じる。このイベントは長寿命放射性核種崩壊熱が持つ長いタイムスケールで生じ、伸張性地形に対して推定される約 20 億年という地形年代と整合的である。また、脱水により熱輸送率の低下した深部の温度はやがて金属成分の共融点に達し、金属核の形成が起きる。

一方、木星衛星のカリストや土星衛星のタイタンもガニメデと一見似た大きさと質量を持つが、内部分化度や表層テクトニクスの様相はガニメデと大きく異なる。この違いは、衛星間の大きさと平均密度のわずかな違いから示唆される岩石成分の含有量（すなわち放射性熱源量）の違いが内部の脱水度に有意な差を生み、衛星間の進化を別った可能性がある。本研究では内部熱輸送についての数値計算によってこの可能性を考察するとともに、衛星サイズや平均密度を幅広く変化させて内部脱水度の違いや金属核形成の可否を調べるパラメタスタディも行った。その結果、金属核形成を可能にする衛星サイズと平均密度のしきい値がガニメデとカリストの間に存在すること、および、タイタンはガニメデ同様に金属核形成を生じる領域にあることが分かった。

鉛直加振による粉粒体・液体系の 液状化と流体輸送の実験

○安田奈央¹、隅田育郎¹

¹ 金沢大学大学院 自然科学研究科

火星表面には何らかの振動により地盤が液状化し、流体が噴出して形成されたと考えられる泥火山のような地形が見られる。泥火山は高間隙水圧の流体が、ある特徴的な水平間隔で噴出する噴砂の結果形成される。この液状化とそれに伴う泥火山の形成は、地球に限らず液体が存在する惑星、あるいは過去に液体が存在していた惑星において起こり得る。しかし、泥火山が形成される条件、形成過程は十分に分かっていない。そこで私たちは、この素過程とパラメータ依存性を理解するための室内実験を行った。本実験では粒径2種のガラスビーズ層(上層が50 μ m、下層が200 μ m)と水を封入したケース(Fig. 1)に鉛直振動を与えて液状化させる。浅部に低浸透率層(白ビーズ層)を持つ水で飽和したガラスビーズ層に、周波数-振幅の組み合わせを変えた鉛直振動を与えた。実験の様子はハイスピードカメラで撮影し、加速度は加速度センサーで測定した。その結果、加速度が大きくなるに従い、浸透流としての水抜けから、火炎状の下層粒子の噴出へと形態が遷移していくことが分かった(Fig. 2)。この2層境界の振幅は、加速度の増加に伴い大きくなるだけでなく、周波数100 Hz付近で極大を持つことも分かった。ここで周波数100 Hzは無次元周波数 $F \cdot T \sim 2.5$ に対応する(F : 周波数、 T : 粒1個分ストークス速度で落下する時間)。以上を整理すると、無次元加速度 $a/(\Delta\rho/\rho)g > 1$ (a : 加速度、 ρ : ビーズの密度、 $\Delta\rho$: ビーズと水の密度差、 g : 重力加速度)、歪 $\varepsilon > 0.01$ 、加速度微分 $\dot{a} > 10^3 \text{ m/s}^3$ の条件下で、液状化により2層境界が不安定になることが分かった。

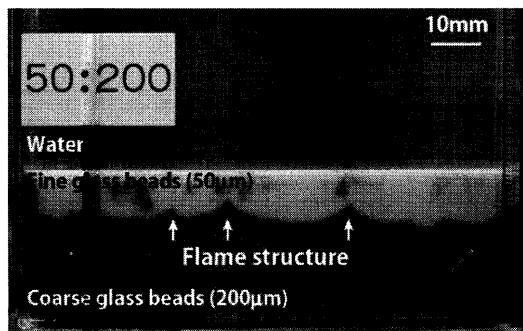


Fig. 1

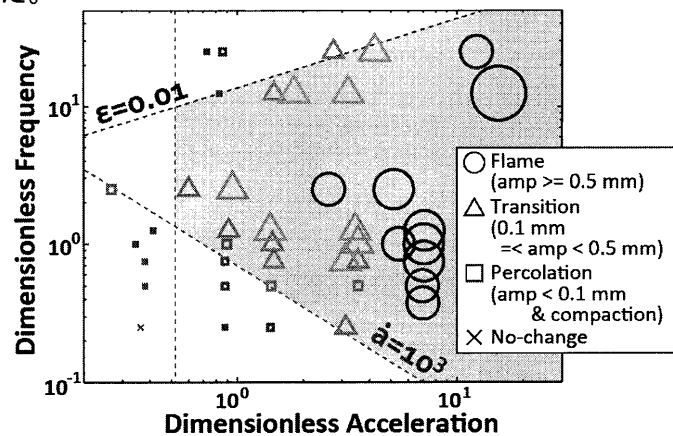


Fig. 2

Fig. 1 鉛直加振 (加速度 $a = 44.2 \text{ m/s}^2$, 周波数 $f = 40 \text{ Hz}$) で5秒間振動後に形成された火炎構造の例。

Fig. 2 本実験で得られたレジームダイアグラム。縦軸は無次元周波数、横軸は無次元加速度。マーカーサイズ(色)は2層境界不安定の振幅(標準偏差)を示す。

砂への低速度衝突による衝突励起地震の観測

○松本 恵里¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ², 小林直樹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：天体の衝突現象を直接観測することは難しい。一方、月面に設置した地震計には隕石衝突によって励起したと考えられる地震波形が記録されており、今後、InSight により火星に設置される地震計にも同様な隕石衝突が記録されることが期待される。また、今後の惑星探査において、人工衝突体を用いた地震波探査も検討されており、高速度衝突により励起される地震波の基礎研究が必要とされている。衝突励起地震は、(1) 衝突体の物理的性質と(2) 標的天体の表層構造に依存すると考えられており、この地震を研究することにより、天体衝突を惑星表層の地震波探査を行うための震源として利用したり、衝突体の物性を推測するための手段として利用できる可能性がある。McGarr et al. 1969 では、月震計のデータから、月における隕石フラックスや月の表層特性を明らかにするために月表層を模擬した試料への衝突実験を行っている。我々は McGarr らの手法を踏襲して、衝突励起地震の観測システムを構築した。さらに、McGarr らの実験では行われていない比較的低速度での衝突実験を行い、レゴリス層を模擬した砂層における地震波の励起・伝播特性を調べたので以下に報告する。

実験方法：衝突実験は神戸大に設置した縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には、直径 3mm の SUS 球と直径 10mm・高さ 10mm のポリカーボネート円柱を用いた。なお、衝突速度は約 100m/s とした。標的としては直径 200 μ m のガラスビーズを用いた。このビーズを直径約 30cm の容器に高さ約 8cm まで満たして、その表面に 3 個の加速度計（日本アビオニクス製 SV1111, SV1113, 応答周波数<10kHz）を衝突点からの距離を変えて設置した。また、加速度計はその一部、もしくは全体がビーズに埋まるように設置した。加速度計のデータは、A/D 変換速度 100kHz のデータロガーで収録した。

結果：図 1 はポリカーボネート円柱を 100m/s で衝突させた時に記録された加速度計の波形である。衝突点から離れるほど最大加速度は小さくなっていることがわかる。また、衝突点から遠い加速度計では波の伝播が遅れており、この時間差からビーズ層中を伝播する波の速度を推定することができる。本研究では、この速度は約 110m/s となった。また、加速度の継続時間は約

0.5ms となっており、この継続時間はほぼ弾丸の潜り込み時間と一致することがわかった。一方、加速度の最大値は伝播距離と共に減衰するので、その特徴を調べるためにクレーター半径で規格化した距離と最大加速度の関係を調べた。その結果、ポリカーボネート円柱と SUS 球のデータはほぼ連続的に変化し、加速度の距離に対する減衰率は-2 程度となることが分かった。

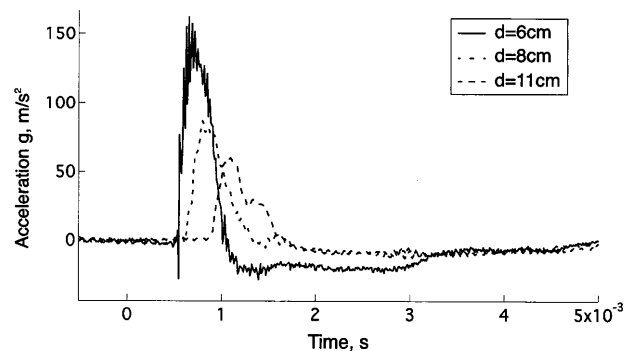


図 1 衝突励起地震の加速度の時間変化。d は衝突点から加速度計までの距離を示す。

低密度脆性弾丸による 空隙率を持つ標的への衝突実験

○原田竣也¹, 中村昭子¹, 岡本尚也¹, 青木隆修¹, 鈴木絢子², 長谷川直²

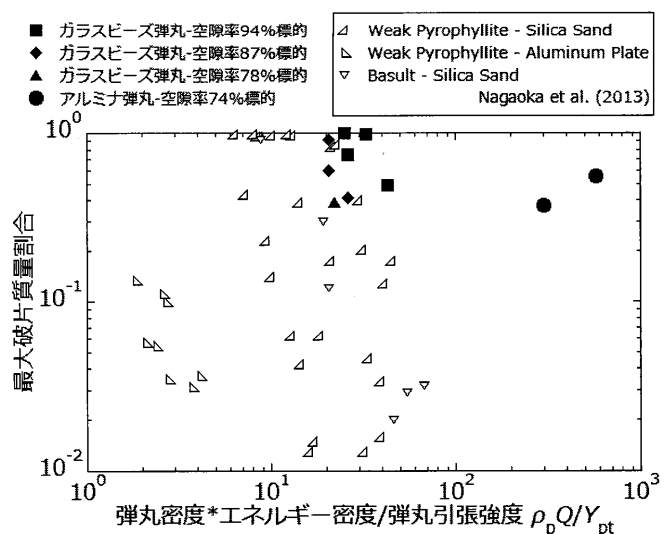
¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所

太陽系には氷天体が存在し, その中には平均密度が 1 g/cm^3 よりも小さいと考えられるものが存在し, これら天体表面は空隙を含んでいると考えられる. このような天体へも探査機による観測が進んでおり, 例えば土星の衛星ならば探査機 Cassini により高解像度の表面画像が得られるようになった. これより, 天体表面に存在する小クレーターが詳しく観測されるようになった. 氷天体の表層を特徴づけるクレーターについて調べることは, 天体の進化過程を知る一つの手段である.

本研究では, 空隙を持った天体表面に弾丸が衝突したことで形成されるクレーターや生じる現象を調べるための衝突実験を行った. 空隙と強度の異なる標的を作成するため, 粒径 $55 \mu\text{m}$ の中空ガラスビーズを焼結させた. 焼結温度を変えることで, この焼結体の空隙率を 73-94%, 強度を 0.6-1.9 MPa で変化させた. 弾丸には空隙を持つ天体表面と同様の物質が衝突することを想定し, 低密度で脆性な弾丸を用意した. 具体的には直径約 3 mm のガラスビーズ焼結体 ($\sim 1.3 \text{ g/cm}^3$), 多孔質アルミナ球 ($\sim 1.8 \text{ g/cm}^3$), 中空ガラスビーズ焼結体 ($\sim 0.5 \text{ g/cm}^3$) を使用した. 神戸大学の小型ガス銃と宇宙科学研究所の二段式ガス銃を用いて, 100-350 m/s 及び 2-5 km/s の範囲の衝突速度で実験を行った.

標的の空隙率が大きくなるほど, また弾丸の密度が大きくなるほど, 形成された孔は深くなった. 低速度域では孔の入り口直径と最大直径は同程度で, なおかつ弾丸サイズとほぼ変わらなかった.

衝突に伴い弾丸は破壊されて標的に貫入していた. この貫入深さは弾丸の貫入モデル(Kadono and Fujiwara, 2005; Okamoto et al., 2013)を用いることで説明できた. また, 破壊された弾丸を回収し最大破片質量を計測した. 弾丸密度 ρ_p と衝突のエネルギー密度 Q の積を弾丸引張強度 Y_{pt} で規格化して最大破片質量分布を見ると, 高速で空隙率 74%の標的に衝突させた多孔質アルミナ球は他の物質より壊れにくい結果となった(右図).



レゴリス模擬標的に対するインパクターの破壊と破片固化

○長岡宏樹¹、中村昭子¹、鈴木絢子²、長谷川直²¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構

多くの隕石は小惑星のかげらであり、コンドライト母天体は太陽系形成のごく初期に熱的活動を停止したと考えられるため、太陽系初期の情報を得られると考えられている。隕石は母天体ごとに、さらに化学組成ごとに分類されるが、異なる母天体由来と思われる岩片が混じっているものがある。例えば、筑波隕石や Almahata Sitta 隕石には炭素質コンドライトの破片が含まれていることがわかっている (Nakashima et al. 2003, Jenniskens et al. 2009)。また、ベスタ起源だと考えられている HED 隕石には一般的に 5 vol. % の炭素質コンドライトが含まれており (Zolensky et al. 1996)、ベスタ表面上には炭素質コンドライトが衝突してできたと考えられるクレーターが存在している (Reddy et al. 2012)。このように他天体由来物質の破片を含んでいる隕石は小惑星表面に存在するボルダーもしくはレゴリスに他天体由来のインパクターが衝突し、その破片がレゴリスと共に固化することによって形成されたと考えられている (e.g. Rubin et al. 1983)。

他天体由来物質を含む隕石の形成過程を知るために、まずはレゴリスに他天体由来の隕石が衝突したときの破壊の程度を実験的に調べることを目的として、これまでは低速度 (<1km/s) での衝突実験を行い、衝突速度と破壊の程度との関係を明らかにした (Nagaoka et al. 2013)。次に小惑星帯での衝突速度 ~5 km/s を模擬する 2-5 km/s での実験を宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用して行った。弾丸、標的はそれぞれ直径 3.2mm の玄武岩とシリカサンドである。

結果はこれまでの低速度衝突実験から予想される最大破片質量割合よりも大きくなった。弾丸破片には標的砂が付着していたため、薄片作成により弾丸破片中の玄武岩割合を求めた。さらに強度と歪速度の関係 ($\sigma \propto \dot{\epsilon}^{3/(m+3)}$ m: ワイブルパラメータ (Grady and Kipp 1980)、玄武岩では 9 (Benz and Asphaug 1984)) により弾丸の強度が約 2 倍程度大きくなることを考慮したが、それでも説明しきれなかった (長岡他、2013 年日本地球惑星科学連合大会)。標的砂が付着した要因は衝突時の圧力が高くなったことによって圧密の程度が大きくなったことだと考えられる。薄片の BSE 画像から付着している砂粒子同士の境界は確認できなかった。一方、弾丸破片と見なしていたものは、実は細かい破片がゆるく結合したもの (その強度は 0.45-4.8MPa) で、細かい破片の 1 つ 1 つの質量割合は低速度実験ラインの延長戦上にあることがわかった。本発表では衝撃焼結の理論を用いて、標的砂の付着や破片固化の条件やメカニズムについて議論する。

粘性流体への固体弾衝突によるフィンガリング不安定性とクレーター構造

桂木洋光

名古屋大学大学院環境学研究科

ミルクの滴がミルクの層に衝突したときに作られるミルククラウン形状は、その美しさから一般にも良く知られている。液滴の衝突現象は近年の計算機能力や高速撮影技術の飛躍的向上により、活発に研究されるようになった [1]。液滴を固体壁に衝突させた際に生じるフィンガリング不安定性についてもいくつかの研究事例があり、レイリー・テイラー不安定性に立脚した議論などが行われている [2]。

一方、小惑星イトカワから持ち帰られたサンプルの解析により、イトカワの微粒子の表面に多くのナノクレーターが存在することが分かった [3]。それらのナノクレーターには、ミルククラウンを想起させる形状が見られるが、その成因等は解明されていない。流体に見られるミルククラウン形状は一瞬の構造であり、すぐに姿を消してしまうが、イトカワの微粒子ではあたかもその形状が凍結されているかのように見える。流体の衝突により誘起される界面不安定性でイトカワ微粒子のナノクレーターの起源を直接議論することは難しいと思われるが、流体の挙動を深く知ることは何らかの手がかりを与えてくれるかもしれない。

衝突による流体界面不安定性の研究のほとんどは、これまで液滴の衝突により行われてきた。そこで、本研究では、固体弾を流体に衝突させ、それにより誘起される流体界面不安定性について実験的に調べることにした。

実験系としては鉄球の流体プールへの自由落下衝突系を用いた。直径 $d = 3, 6.35, 8$ mm の鉄球を高さ $h = 10\text{--}600$ mm から流体プール ($40 \times 40 \times 25$ mm³) へ自由落下衝突させた。標的流体としては水、もしくはシリコンオイル（動粘性係数 $\nu = 0.65\text{--}200$ cSt）を用いた。衝突の様子を 5,000 fps のフレームレートで撮影し、衝突スプラッシュにフィンガリング不安定性が見られた場合はそのフィンガー数を画像から測定した。

実験により得られたフィンガー構造は、時間的に変化し、最終的には完全に緩和される。本研究では、衝突による不安定性に注目するため、合体等で緩和される前のフィンガー数を数え上げた。フィンガー数はレイノルズ数の $1/2$ 乗とウェーバー数の $1/4$ の積として定義される衝突レイノルズ数 [2] と固体弾と流体の密度比の積により定量化できることが分かった。無次元数によるフィンガー数の定量化や今後の課題について発表では詳しく議論する。

参考文献

- [1] A. L. Yarin, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **38**, 159 (2006).
- [2] H. Marmanis and S. T. Thoroddsen, *Phys. Fluids* **8**, 1344 (1996).
- [3] E. Nakamura et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* doi:10.1073/pnas.1116236109 (2012).

NaCl を含むはやぶさ帰還粒子のコンソーシアム研究

○矢田達¹、Michael E. Zolensky²、上相真之¹、唐牛譲¹、石橋之宏¹、
岡田達明^{1,3}、安部正真^{1,3}

¹宇宙航空研究開発機構(JAXA)/宇宙科学研究所(ISAS)、²Johnson Space Center/NASA

³宇宙航空研究開発機構(JAXA)/月惑星探査グループ(JSPEC)

2010 年 6 月の小惑星探査機「はやぶさ」再突入カプセル帰還以来、JAXA 地球外試料キュレーションセンターではカプセル内のサンプルキャッチャーから微粒子の回収・初期記載・保管・配布を行ってきた[1]。その結果、これまでに 400 個以上の粒子の初期記載を行った。その内、イトカワ起源とみられる主にケイ酸塩鉱物からなる粒子はおよそ 80%を占める。

探査機打ち上げ前に JAXA と NASA の間で結ばれた合意文書では、回収された試料の 15%は初期分析に、15%は国際公募研究に、15%は JAXA に、10%は NASA に、残りの 45%は将来の研究のための保管に割り当て、とある。これに基づき、JAXA 地球外試料キュレーションチームでは、2010-2011 年に初期分析へ、2012、2013 年に国際公募研究へ、2011、2012 年に NASA へ試料の配分を行ってきた[1, 2]。上記の JAXA 割り当て分として、貴重で一つの研究グループに配布する事が適切でない試料のコンソーシアム研究を今年度より開始した。該当する試料は、最大サイズ粒子[3]、主に鉄ニッケル及び鉄硫化物からなる粒子[4]、リン酸塩鉱物を含む粒子[4]、それに NaCl を含む粒子などである。なおこれらのコンソーシアム研究については、今年の 10 月末までに研究課題を応募し、課題を提出した研究者間での分析方針の検討の上、分析を開始することになっている。本研究ではこの NaCl を含む粒子のコンソーシアム研究について紹介する。

NaCl を含むケイ酸塩鉱物粒子はこれまでに 1 個しか見つかっていない。この粒子(RA-QD02-0129)はサイズ 40 μm の、主に斜長石もしくはガラス質からなる粒子で、表面に 3 - 5 μm の NaCl 組成を示す自形の微粒子が見られた。これまでに惑星物質試料中では、mm サイズのものがモナハン 98 隕石とザグ隕石[5, 6]、微小なものがマーチソン隕石[7]、ユレイライト隕石[8]、火星隕石[9]、月の砂[10]の中から NaCl が見つかっている。モナハン・ザグ隕石で見つかった NaCl は特に大きかった為、¹²⁹I-¹²⁹Xe 年代法などにより約 46 億年前という初期太陽系の形成年代が求められている[6]。

この NaCl を含む粒子のコンソーシアム研究においては、NaCl が地球外起源であることを証明することが最も重要である。前述の通り、NaCl 自体は 3 - 5 μm と非常に小さいので、年代法の適用は厳しいと思われる。モナハン・ザグ隕石の NaCl は宇宙線照射などの影響により紫色を示すことから[5]、透過顕微鏡観察を実施する予定である。また、結晶中に残る太陽フレアの痕跡を発見することにより、この NaCl が地球外起源であることを証明することを考えている。

参考文献：[1] Yada T. et al. (2013) *Meteoritics Planet. Sci.*, Early view Online. [2] Yada T. et al. (2013) *LPSC XLIV*: #1948. [3] 上相ほか(2013), 本講演会. [4] 唐牛ほか(2013), 本講演会. [5] Zolensky M. E. et al. (1999) *Science* 285: 1377. [6] Whitby J. et al. (2000) *Science* 288: 1819. [7] Barber D. J. (1981) *GCA* 45: 945. [8] Berkley J. L. et al. (1978) *GRL* 5: 1075. [9] Bridges J. et al. (2001) *Space Sci. Rev.* 96: 1365. [10] Clanton U. S. et al. (1978) *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 9th 1945.

はやぶさ試料コンソーシアム研究：最大粒子

○上相 真之¹, 矢田 達¹, 唐牛 譲¹, 石橋 之宏¹, 岡田 達明¹, 安部 正真¹, 上杉 健太郎²,
竹内 晃久², 鈴木 芳夫², 土山 明³, Jisun Park⁴, 長尾 敬介⁵, 西泉 邦彦⁶

¹宇宙航空研究開発機構, ²高輝度光科学研究センター, ³京都大学, ⁴Rutgers University,

⁵東京大学, ⁶University of California,

小惑星探査衛星はやぶさは小惑星イトカワから表層のレゴリス粒子を回収し、地球に帰還することに成功した。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]。しかし、はやぶさ帰還試料の中には、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がある。これらの粒子に対しては、他の分析とは特定の分析のみで破壊・消費するのではなく、科学的成果を最大にするため、複数の分析を系統立てて適用することが望ましい。地球外試料キュレーションチーム(Extraterrestrial Sample Curation Team, ESCuTe)はこれらの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捗を報告する。

このコンソーシアム研究の対象である 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、体積は $V = 4/3 \pi r_a r_b r_c \sim 4/3 \pi / (2\sqrt{2}) r_a^3$ 、密度を 3.4 g/cm³ と仮定して[5]およそ 20 μ g となる。大部分が Ca-rich な輝石からなっており、かんらん石、斜長石、長石、硫化鉄鉱物などを含む。この粒子を非破壊分析から破壊分析まで、系統的に分析することで、他の粒子では不可能だったより大きな結晶組織の観察だけでなく、微量元素分析や同位体分析など、試料の量が必要な分析を精度良く行うことが可能である。

この粒子に対する分析として、まず放射光による非破壊分析が検討されている。この分析には ESCuTe が主体となって開発した非汚染型の試料ホルダが使用される予定で、これにより、その後の分析に対する大気汚染や樹脂汚染を防ぐことが出来る。その他の分析については、今後分析フローを検討する予定である。

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.

はやぶさ試料のコンソーシアム研究：金属粒子 およびリン酸塩鉱物を含む粒子の分析について

○唐牛讓¹, 上相真之¹, 矢田達¹, 石橋之宏¹, 海老原充², 白井直樹², 関本俊³,
寺田健太郎⁴, 岡田達明¹, 安部正真¹

1 宇宙航空研究開発機構, 2 首都大学東京, 3 京都大学, 4 大阪大学

小惑星探査機「はやぶさ」は小惑星イトカワの表層物質を回収し、地球に持ち帰ることに成功した。JAXA 地球外試料キュレーションチーム (JAXA Extraterrestrial Sample CUration Team, ESCuTe) による初期記載作業により、これまでに 400 個以上の「はやぶさ」帰還粒子が記載されカタログ化されている。これらの「はやぶさ」帰還粒子は初期分析および国際公募研究に配分され、小惑星の形成過程や進化過程、レゴリスの進化過程や小惑星表層における物理過程などが詳しく研究されている[例えば 1-7]。ただし、「はやぶさ」帰還試料の中には科学的に重要な特徴を持ちながら、極めて数が少ないために国際公募研究へ提供されてこなかった試料がある。このような試料に対しては、科学的成果を最大にするために複数の分析を系統的に行う必要がある。ESCuTe はこれらの試料の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。本稿では、コンソーシアム研究のうちで、主に FeNi 金属もしくは硫化鉄鉱物から成る粒子およびリン酸塩鉱物を含むことが確認された粒子に対する研究計画を報告する。

数 10 マイクロメートル以上の粒子で、主に FeNi 金属もしくは硫化鉄鉱物からなる試料はそれぞれ 1 つずつ確認されている。これらの試料は少量のカンラン石、輝石などのケイ酸塩鉱物が粒子表層に付着もしくは内部に埋め込まれている。これらの粒子に対しては放射光による非破壊分析を行う予定である。さらに、試料を分割し、化学組成分析、組織観察およびホウ素、酸素、ケイ素などの同位体分析を行う予定である。

リン酸塩鉱物を含むことが初期記載により確認された粒子はこれまでに 6 個見ついている。リン酸塩鉱物は希土類元素やウランなどの液相濃集元素の濃度がカンラン石の数倍以上高いため、ウラン-鉛年代測定やサマリウム・ガドリニウム同位体測定による宇宙線照射年代分析を行うのに適した試料である。放射光による非破壊分析により粒子中におけるリン酸塩鉱物の立体配置を調べたのち、リン酸塩鉱物を面出しし、SIMS などで分析を行う予定である。

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.

C 型小惑星の位相曲線：地形による影の影響

○松浦 隆裕¹、北里 宏平¹

¹会津大学

2014 年打ち上げ予定の次期小惑星探査ミッション「はやぶさ 2」が探査する地球近傍小惑星 1999JU3 は、水や有機物を含む物質からなるとされる C 型小惑星である。C 型小惑星はこれまでの観測的研究から地球に落下する炭素質コンドライトに似た反射スペクトル特性 [1] や、S 型小惑星と比べて位相曲線が急傾斜になる光散乱特性 [2] を持つことが知られている。一方、最近の実験的研究からは、C 型小惑星由来とされる炭素質コンドライトの位相関数は S 型小惑星由来の普通コンドライトのものとほとんど差がないことが示されている [3]。つまり、炭素質コンドライトの光散乱特性を仮定した球形の天体の場合に C 型小惑星の急傾斜な位相曲線を再現することができず、彼らはその原因について、C 型小惑星が影のつきやすい起伏の大きな形状をしているためと指摘している。しかし、そのことを実証的に示した例はない。そこで本研究では、擬似的に生成される立体形状を用いて数値的に地形による影の影響について調べる。

解析は任意の観測幾何条件に対して形状モデルから反射される光の総量を計算し、ライトカーブを求める。さらに様々な位相角条件でのライトカーブから位相曲線を導出するという流れである。解析に用いる不規則な形状モデルは Random Gaussian Sphere [4] によって生成し、ライトカーブの計算には NASA/JPL の提供している SPICE/DSK [5] を利用した。本発表では、解析によって得られた結果から地形による影の影響で C 型小惑星の位相曲線をどの程度説明できるかについて議論する。

参考文献：

- [1] Gaffey et al., 1993, *Meteoritics* 28, 161-187.
- [2] Muinonen et al., 2002, *Asteroids III*, 123-138.
- [3] Beck et al., 2012, *Icarus* 218, 364-377.
- [4] Vokrouhlicky & Capek, 2002, *Icarus* 159, 449-467.
- [5] Acton, 1996, *PSS* 44, 1, 65-70.

P3-05

はやぶさ 2 近赤外分光計 NIRS3 の運用計画

○ 北里宏平¹, 岩田隆浩², 安部正真², 大竹真紀子², 平田成¹, 千秋博紀³, 中村智樹⁴,
小松睦美⁵, 荒井朋子³, 廣井孝弘⁶, 松浦周二², 津村耕司², 荒井武彦², 仲内悠祐²,
高木靖彦⁷, 本田親寿¹, 松永恒雄⁸, 高遠徳尚⁹, 渡邊誠一郎¹⁰

¹会津大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³千葉工業大学, ⁴東北大学, ⁵早稲田大学,
⁶ブラウン大学, ⁷愛知東邦大学, ⁸国立環境研究所, ⁹国立天文台, ¹⁰名古屋大学

次期小惑星探査機「はやぶさ 2」は 2014 年に打ち上げられ、約 3 年半の巡航期間を経た後、2018 年夏頃から探査対象である小惑星 1999JU3 とのランデブーを開始し、約 1 年半のミッション期間にリモートセンシング、サンプリング、小型ローバによる表面探査および衝突装置による人工クレータ実験を行う計画にある。本発表では、はやぶさ 2 に搭載する近赤外分光計 NIRS3 の巡航期間からミッション期間までの運用方法について議論する。

NIRS3 は 1.8–3.2 μ m の観測波長域を持っており、含水鉱物に起因する 3 μ m 吸収を測ることで小惑星表面の含水度や類似隕石タイプを特定することを狙う観測機器である。その主な科学目的は、小惑星表面の含水度や組成の分布傾向から天体形成後に受けたであろう太陽放射加熱や宇宙風化の影響を把握し、母天体における水質変成作用の痕跡を紐解くことにある。また、その含水度や組成の分布情報はサンプリング地点を選定する上での重要な判断材料にもなる。したがって、それらの目的を達成するためにはより広い範囲を高い空間分解能で観測することと、衝突装置によって暴露される表層内部物質を観測することが重要であり、現計画では高度 40km と 20km でグローバルマッピング（空間分解能はそれぞれ 70m と 35m）を、高度 5km と 1km で詳細マッピング（空間分解能はそれぞれ 9m と 2m）を実施することを検討している。巡航期間には、打上げ後の感度やアライメントの変化を確認するための恒星・惑星の観測や、地球スイングバイの際に月および地球の観測を行うことも計画している。

はやぶさ 2 LIDAR の光トランスポンダ機能を使った 機器アラインメント測定

Alignment measurement with optical transponder system of Hayabusa-2 LIDAR

○野田寛大¹、水野貴秀²、國森裕生³、竹内央²、並木則行⁴

¹ 国立天文台、² JAXA、³ NICT、⁴ 千葉工業大学

はやぶさ 2 に搭載されているレーザ高度計 LIDAR は、探査機と小惑星の距離を測定して、探査機位置推定、地形・重力推定を行う機器であるが、地上にある衛星レーザ測距用望遠鏡から LIDAR にレーザを照射し、受光後に規定のエネルギーのレーザを送光する機能を備えている（光トランスポンダ機能）。探査機が地球スイングバイ時に地球に近づく機会を利用して、地上—探査機間の光リンク通信実験を予定している。この実験は LIDAR の初めての運用となるため、測距、アラインメント等、機器のパフォーマンス確認に役立つ。

はやぶさ 2 では、小惑星の地形モデルは主にカメラ画像を LIDAR の測距値でスケールリングして作成するため、LIDAR のアラインメントは地形モデル作成の精度に直接影響する。打ち上げ前の地上試験で探査機に対する LIDAR の視野方向測定を行うが、打ち上げ時の衝撃・振動でずれる可能性があり、打ち上げ後の測定を何等かの方法で行うことが必要である。アラインメント測定は地形を利用する方法や、着陸点の目印になるターゲットマーカーを利用する方法等が考えられるが、ここでは光リンク通信実験を利用した方法を検討する。

傾斜 30 度の小惑星上のある点での位置ずれによる高度方向の誤差を 20 m に抑えるためには、衛星構体に対する LIDAR 送光ボアサイト方向を 1.8 mrad 以内の精度で推定することが必要である。他方、LIDAR 送光視野角は 1 mrad であるから、探査機姿勢誤差 0.52 mrad（性能値）と合わせると、地上レーザ局で LIDAR からの送光が受信できれば、姿勢誤差含めて 1.5 mrad 以内で送光ボアサイトの探査機に対するアラインメントが測定できる。同様に、地上レーザ局からのレーザが LIDAR で受信できれば、LIDAR 受信視野角 1.5 mrad と姿勢誤差 0.5 mrad と合わせて、2.0 mrad 以内で受光ボアサイト方向が推定できる。

既存の NICT 小金井（東京都）の口径 1.5 m 衛星レーザ測距用望遠鏡に、波長 1 μm 、エネルギー 1.2 J、繰り返し周波数 10 Hz のレーザを搭載する。衛星の姿勢を LIDAR 送光視野である 1 mrad よりも細かく振りつつ、はじめは LIDAR を通常の測距モードに設定して双方で 1-way の送受光を行って回線バジェットとアラインメントの確認を行い、次に光トランスポンダモードに設定して地上局からレーザを送信して LIDAR で折り返し、地上からのレーザ測距、時刻同期試験を行う。測距値は電波によるものと比較する。探査機に入射できる太陽方向の制限から許容できる太陽—探査機—地球のなす角が決まり、実験機会が制限される。

references: 國森他 (2012) 宇宙・航行エレクトロニクス研究会 発表資料, D. Smith et al. (2006) Science 311, pp. 53.

Hayabusa-2 DCAM3-D の耐環境設計と検証試験

Environmental compatibility design and verification tests of Hayabusa-2 DCAM3-D

○小川 和律¹、荒川 政彦²、飯島 祐一³、白井 慶³、澤田 弘崇³、和田 浩二⁴、
本田 理恵⁵、石橋 高⁴、坂谷 尚哉⁶、中澤 暁³、門野 敏彦⁷、小林 正規⁴、早川 基³

¹東京大学, ²神戸大学, ³宇宙航空研究開発機構, ⁴千葉工業大学/PERC,

⁵高知大学, ⁶総合研究大学院大学, ⁷産業医科大学

現在、Hayabusa-2 で行う衝突実験を観測するため、小型可視光カメラ (DCAM3) の開発を進めている。これは小惑星近傍で母船から分離される衝突装置 SCI (Small Carry-on Impactor) の衝突実験時、同時に母船から分離して、衝突点近傍でイジェクタの挙動を 2-3 時間にわたって連続撮像する分離型の小型カメラである。DCAM3 内部にはリアルタイムモニタカメラ DCAM3-A と、理学観測に特化した DCAM3-D の 2 つの系統があり、それぞれがカメラ・通信機・データ処理/記録部を保有して、電源を共有する構造となっている。この内、DCAM3-A は IKAROS に搭載された DCAM1,2 の後継機であり、DCAM3-D は新規開発品である。

DCAM3 は小型分離式の特性上、サイズ・重量・電力リソースの制限が極めて強く、特に電子基板を極力小型省電力に抑える必要があり、使用できる部品も限られる。実際には分離カメラ内部の CMOS センサ基板・電源基板をそれぞれ 40 mm x 28 mm の長方形基板 1 枚、データ処理基板・送信機基板をそれぞれ直径 60 mm の円形基板 1 枚で実現する必要があった。母船側のユニットについては比較的余裕があるものの、やはり電子基板を小型軽量におさえる必要があった。これらの基板上に、自動的に観測する機能、撮像データを高速に処理して速やかに母船側へ通信する機能、母船側で受信したデータを記録するための大容量データレコーダ、コマンド/テレメトリインターフェイス機能などの実装を行った。その際、このような厳しい制約の中で、熱設計、機械環境適合性、放射線耐性など、宇宙環境における耐環境性をどのように確保するかが主要な開発課題となった。

本発表では、特に新規開発部である理学観測系 DCAM3-D に焦点を当て、耐環境性設計上の課題と対策について紹介し、それらのための各種検証試験の計画と結果について報告する。

P3-08

はやぶさ 2 搭載 DCAM3-D 用 CMOS 光学センサの性能評価

○ 白井慶¹、小川和律²、石橋高³、坂谷尚哉⁴、飯島祐一¹、荒川政彦⁵、和田浩二³、
本田理恵⁶、澤田弘崇¹、門野敏彦⁷、小林正規³、中澤暁¹、早川基¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²東京大学, ³千葉工業大学, ⁴総合研究大学大学院, ⁵神戸大学,
⁶高知大学, ⁷産業医科大学,

現在、はやぶさ 2 に搭載し衝突体 (SCI) の小惑星への衝突およびイジェクタ放出の様子を撮像する分離可視カメラ (DCAM3) の開発をおこなっている。DCAM3 には、2 系統の可視カメラが搭載され、SCI の小惑星の衝突時の連続撮像を探査機本体より分離されて行う。DCAM3-D の理学目的は、(1) SCI (衝突体) の発射および小惑星への衝突の確認、(2) SCI 衝突により生成されるイジェクタの観測である。(1) では、SCI の発射位置や小惑星上の着弾点の位置の観測から、衝突条件の明確化を行う。(2) では、形成されるイジェクタカーテンの形状や移動速度、岩片の放出速度などから、標的状态の明確化、イジェクタのスケーリング則の検証、1999JU3 の表層構造の推定などを行う。DCAM3-D はこれらの理学観測に特化するように、光学系、データ処理部、通信系から構成され、DCAM3-A (アナログ系) と電源源部を共有する。DCAM3-A は、IKAROS ミッションに搭載された DCAM1, 2 の後継機であり、DCAM3-D は新規での開発を行っている。

DCAM3 の理学観測要求と運用条件のもと、高い空間分解能を実現するために DCAM3-D の光学センサには、2000 x 2000 画素数の CMOS センサを搭載する。本発表では、レンズを含めた光学系性能試験の基礎となる CMOS イメージセンサの温度特性調査の結果を報告する。あわせて、DCAM3-D の理学観測サイエンスゲインを得るために必要なデータ処理について紹介をする。

はやぶさ 2 小型衝突装置の中空弾丸がクレーター形成過程に及ぼす影響

○荒川 政彦¹、門野 敏彦²、辻堂 さやか¹、保井 みなみ³、長谷川 直⁴、白井 慶⁴

¹ 神戸大学大学院理学研究科、² 産業医科大学医学部、³ 神戸大学自然科学系先端融合研究環、

⁴ 宇宙航空研究開発機構

次期小惑星探査機「はやぶさ 2」の小型搭載型衝突装置（SCI）では爆薬によりライナーと呼ばれる銅円盤を加速して、中空の半球殻の弾丸へと成形する。この中空弾丸は秒速約 2km で小惑星に衝突するが、その衝突時の姿勢は制御できない。また、クレータースケール則は均質等方的な弾丸を仮定して理論が構築されているので、このように極端な内部構造を持つ弾丸でもスケール則が適応されるかは定かでない。そこで本研究では、SCI 弾丸を模擬した衝突実験を行い、中空と衝突姿勢が及ぼすクレーター形成効率に対する影響を調べた。

クレータースケール則に対する中空弾丸の影響を調べるために、宇宙科学研究所の衝突実験施設に設置された二段式軽ガス銃を用いて秒速 1.9–2.2km/s での衝突実験を行った。弾丸には、SCI 中空弾丸を模擬した直径 3mm、肉厚 100 μ m、高さ 2.3mm の銅パイプと比較のために直径 2mm、高さ 1.3mm の銅ロッド（密度 8.9g/cm³）を用いた。両者とも質量はほぼ 36mg である。標的には引っ張り強度約 2MPa、空隙率約 50–60%の石膏ブロック（約 7cm）を用い、弾丸の底面が標的面に衝突するような姿勢で実験を行った。実験後の回収試料を観察すると、銅パイプ、銅ロッド共に形成したクレーターの直径は約 6mm であった。一方、クレーター深さは、銅パイプでは約 10mm、銅ロッドでは 22mm と約 2 倍深くなっていた。銅パイプが作るクレーターは円筒形であり、その底には潰れた銅パイプがリング上に突き刺さっていた。一方、銅ロッドが作るクレーターは釣鐘型であり深くなるほど穴の直径は小さくなっていた。このようにクレーター孔の形状は異なり、銅パイプが作るクレーター体積は、銅ロッドが作るクレーター体積の約半分になることがわかった。この結果、既存のクレータースケール則との比較から、銅パイプ弾丸は中空部分も含む平均密度（2.2g/cm³）を用いる方が相応しいことがわかった。

次に、衝突姿勢の影響を調べるために氷ブロックに対する衝突実験を行った。実験は北大・低温研の縦型ガス銃を用いて行った。実験では、直径 15mm、高さ 10mm、肉厚 0.4mm のキャップ状銅弾丸を用意し、この弾丸を開口面方向からと底面方向から衝突させた。衝突速度 400m/s で実験を行った結果、開口方向からの衝突では直径 102mm のクレーターが形成され、底面方向からの衝突ではクレーター直径は 69mm となった。クレーター深さも開口方向からの衝突の方が 1 割ほど深くなり、氷のような脆性物質に対するクレーター形成においては衝突姿勢が形成クレーターの大きさに影響を与えることが分かった。今後、砂などの粒子を用いて重力支配域における同様な実験を行う予定である。

はやぶさ 2 探査機データを用いた小惑星形状モデル作成手法の検討

○平田 成^{1,2}, 森 洋平¹

¹会津大学コンピュータ理工学部, ¹会津大学先端情報科学研究センターARC-Space

小惑星探査において、対象天体の形状モデル作成は工学的にも理学的にも重要な要素である。小惑星探査機はやぶさ2プロジェクトにおいても形状モデルは重要プロダクトと位置づけられ、その作成手法、精度、必要なデータ種などについて集中的に検討を行うチームとして、はやぶさ2小惑星形状モデル作成検討チームが組織されている。本チームでは、2種類の小惑星形状モデル作成手法を検討している。一つは、Structure from Motion (SfM) と呼ばれる複数画像を用いたステレオ視の拡張手法であり、もう一つは、Photometric Stereo と呼ばれる、日照条件の異なる複数の画像中に写っている対象物の輝度値から物体形状を復元する手法である。SfM は物体の全体形状を素早くモデリングするのに向いている一方、Photometric Stereo は画素スケールでの詳細な地形復元に適している。このため、両者は相補的に用いることが想定されている。以下、本稿では特に前者の SfM を用いた小惑星形状モデル作成手法の検討結果について報告する。

先に述べた通り、SfM は対象物を多方向から撮影した複数の画像から、物体の形状を復元することができる。このとき、対象物の三次元形状とともに撮影時のカメラ位置・姿勢も同時に推定することが可能となる。このため、カメラ位置・姿勢（小惑星探査の場合は探査機の位置・姿勢）に不確定性があっても処理を行うことができる。コンピュータビジョン分野において SfM は長らく研究が続けられており、多くの手法が提案されているのに加え、安定動作するプログラムの実装も行われている。このため、本チームではオープンソースとして公開されている SfM の実装例の一つ、*Bundler* (Snavely et al, 2006)を使用することとした。

Bundler は SfM の実装例として広く利用されているが、小惑星画像に対する適用例は知られていない。このため、まずははやぶさ探査機が取得した小惑星イトカワの画像に対して *Bundler* を適用し、形状モデルの解像度、精度、処理速度などを評価した。これは、探査機が小惑星に到着した直後に実施する全球観測データを用いて、運用の方針、特に試料採取地点を決定するために用いられる初期形状モデル作成のための基本的な適用可能性を確認するためである。イトカワ画像を用いた評価では、はやぶさ探査機が2005年当時に使用した初期形状モデルに比べて、同じデータから *Bundler* で作成した形状モデルが解像度、精度、処理速度において優れていることが確認された。

はやぶさ2搭載ミネルバ2における紫外LEDを用いた有機鉱物検出の試み

○出村裕英¹, 三田肇², 阿部新助³, 吉光徹雄⁴, 久保田孝⁴,

¹会津大学, ²福岡工業大学, ³日本大学, ⁴宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

ピレン等芳香族の有機鉱物は紫外光で励起されて可視の蛍光を発する性質がある。水質変成の過程で生じる細脈に有機鉱物が濃集する可能性があり、はやぶさ2のターゲット天体表面で発見できれば、隕石よりも大きなスケールでの物質移動や小惑星初期進化に関する知見を得られる。この目標を踏まえて、はやぶさ2搭載小型ローバのミネルバ2には、紫外LED光源と可視カメラを搭載する予定である。石炭やマーチソン隕石、有機鉱物を例にとった検出実験を行ったので、報告する。

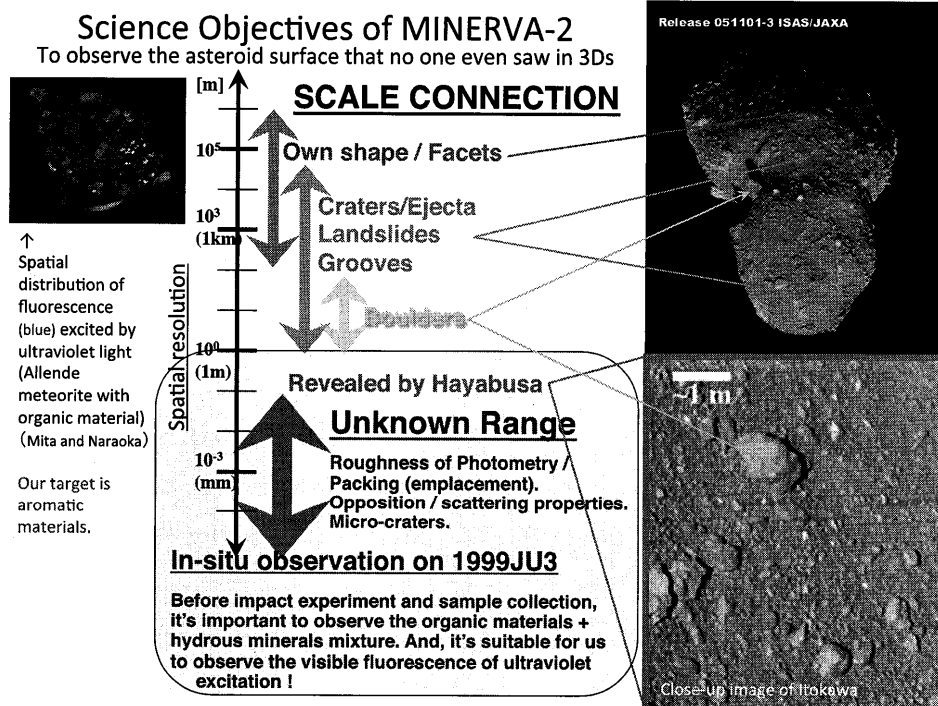
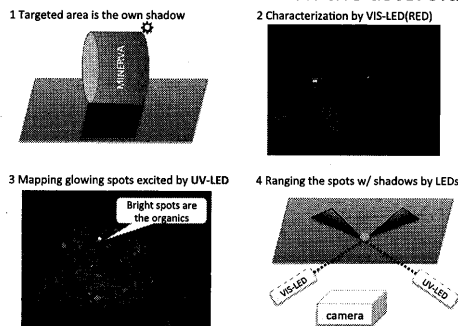


図1 小惑星着陸ローバで狙うスケール

Observation Procedures on the asteroid



Visible glow image excited by UV-LEDs

Meteorites and pure PAHs are found by "visible" camera, but matured coals are difficult to be detected because of few PAHs.

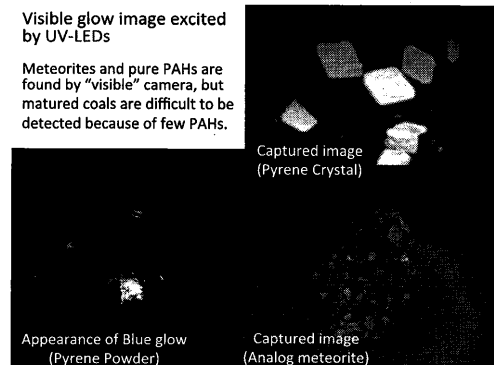


図2 紫外光源励起可視撮像コンフィギュレーション 図3 有機鉱物・マーチソン隕石撮像

月・水星・小惑星のナトリウム大気

○亀田真吾¹, 布施川綾花¹, 鈴木秀彦¹, 鍵谷将人², 杉田精司³

¹立教大学, ²東北大学, ³東京大学

月・水星の表面における大気圧は1兆分の1気圧以下であり、大気は非常に希薄である。水星周辺には光学観測により水素、ヘリウム、酸素、ナトリウム、マグネシウム、カリウム、カルシウムが検出されている。これらの中で、ナトリウムは量が多く発光効率も高いため、地上望遠鏡によって比較的容易に観測することが可能であり、1985年の発見以降数多くの観測がなされている。また、ナトリウムは月周辺にも存在することが確認されている。

ナトリウムは地表面に太陽紫外線、太陽風、微小隕石が衝突することによって放出され、1-3時間で太陽紫外線によって電離して惑星間空間に散逸すると考えられている。無衝突大気であり大気循環なども生じないため、ナトリウム大気の密度分布は月惑星表面の含有量を反映していると考えられる。水星のナトリウムは全球一様ではなく高緯度に濃集しているという結果が数多く得られており、高緯度の磁気圏カスプ領域を通して太陽風が地表面に衝突することによって大気放出量が増加するために、高緯度濃集が起きるという説が有力である。しかしながら、我々がこれまでに行った地上観測の結果と、水星周回衛星 **MESSENGER** によって得られた太陽風に関する情報から、太陽風衝突による大気生成量は水星大気の全生成量に対して支配的ではないと考えられる。また、**MESSENGER** のガンマ線検出器によって得られた最新の成果によれば、地表面のナトリウム密度が低緯度で低く、高緯度で高くなっている。このことは、ナトリウム大気密度分布は表面の密度に大きく依存していることを示唆している。また、表面ナトリウム分布の非一様性は表面温度の差異によるものと推測されており、400K程度を超えると表面のナトリウムが著しく減少すると考えられる。

はやぶさ2では目的地である小惑星 1999JU3 周辺のナトリウム発光の観測を予定している。1999JU3 の表面反射分光の結果は、惑星表面に存在する物質分布が非一様であることを示しており、被加熱量が地域によって異なる可能性がある。はやぶさ2 光学航法カメラ (ONC) ではマルチバンド分光を行い、被加熱量の少ない地域から始原的な試料を持ち帰ることを目標としており、ナトリウム大気光観測から有益な情報が得られることが期待される。本講演では、水星大気の地上観測結果とはやぶさ2 ONC によるナトリウム大気光の観測手法について紹介する。

かぐや搭載マルチバンドイメーজャの 分光画像データ校正・解析最前線

○大竹真紀子¹、大嶽久志¹、春山純一¹

¹JAXA

月周回衛星かぐやに搭載された観測機器マルチバンドイメーজャ（MI）は、可視から近赤外波長域 9 バンドの月面反射画像を空間分解能 20m/pixel（可視波長）、62m/pixel（近赤外波長）で月全球にわたり取得した。これら MI による取得データは、月面上 1 度 x 1 度のタイル状に区切った全球反射率マップデータとして既に公開し、かぐやデータアーカイブシステムを通じて誰でも入手できる状態となっており、これらを用いた研究成果が出ているが、これら公開済みデータには校正上の改善余地が残されている。

具体的には、i) MI は月全球を 6 つの異なる時期に異なる月面照明条件で観測しており、それらをつなぎ合わせて 1 度 x 1 度のタイル状データを作成しているが、異なる時期に観測したデータ間に反射率のギャップ（隣り合う画像間の明るさの段差）が生じている場所がある、ii) 画像内で位置ずれ（例えば、クレータの右半分と左半分が南北に数画素分ずれているなど）が生じている場所がある、iii) 近赤外波長帯検出器データから作成した画像内に画素単位の反射率偏差（画素単位での南北に渡る筋が見える）が生じている場合がある、などが課題として残っている。

これら課題の解決に向け、各課題の原因究明を行った結果、各主原因を以下のように求めた。i) 異なる時期に観測したデータに対し、現状、互いの照明条件の違いを補正する処理（位相角補正）を施しているが、補正後の誤差が残るために反射率のギャップが生じる、ii) かぐや衛星の位置・姿勢情報の精度に比べて MI 画像の空間分解能が高いため、衛星からの位置・姿勢情報のみを用いた現状の画像つなぎ合わせでは精度が不足して位置ずれが生じる（早期のデータ公開に向けて実現可能な処理時間とするため、画像の明暗変化を用いたマッチングによる詳細位置合わせは、これまで実施していないため）、iii) 近赤外波長帯検出器の画素特性補正が完全でない（現状約 1 ヶ月の観測期間内に取得したデータに対し、同一の補正項を適用するアルゴリズムとしているが、この期間内でも検出器特性の微小な変動が生じていることに起因）ため、他とやや異なる反射率となる画素が生じる。

今後、これら課題解決の方針を決定した上で、より精度の高い全球反射率マップデータの再制作と、かぐやデータアーカイブシステムへのデータ再登録を行う予定である。今回の発表では、これら MI のデータ校正状況について紹介するとともに、校正方法の改善により解析にどのような影響が生じるのかについても議論する。

かぐやレーダサウンダ観測による月表層媒質の実効誘電率及び密度の推定
Estimation of the effective dielectric constant and the density of the lunar surface media
based on the Kaguya radar sounder observation

熊本篤志¹, 小林敬生², 押上祥子³, 小野高幸¹, 春山純一⁴

A. Kumamoto¹, T. Kobayashi², S. Oshigami³, T. Ono¹, and J. Haruyama⁴

¹ 東北大, ² 韓国地質資源研究院, ³ 国立天文台, ⁴ JAXA

¹Tohoku Univ., ²KIGAM, ³NAOJ, ⁴JAXA

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、地下数 100m までの密度($1.6 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$)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、月表層での熱伝導にも影響を与えている可能性があることから、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る. そこで本研究では、かぐやのレーダサウンダ (LRS) で観測される表面エコーの強度をもとに、月の全球で、表層の深さ数 10 m までの範囲のレゴリス層・玄武岩層の平均的な密度 (バルク密度) を導出した.

実際の月面地形は、多数回の隕石衝突を経て roughness を持っていて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、かぐやの地形カメラ (TC) (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、複数の誘電率を仮定して、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、最も観測データと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 4.5, 高地領域 (Hurst 係数 ~ 0.8) では 3.5 と推定された. 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 2.3 g/cm^3 , 高地領域では 1.9 g/cm^3 となった. これらの結果は、月表面のレゴリス層とその下の玄武岩層の境界面が、海領域では地下数 10 m の範囲内に、高地領域ではそれより深い場所にあることを示唆している.

かぐや衛星搭載レーダーサウンダーと地形・分光カメラに基づいた月玄武岩層のバルク誘電率と空隙率の推定

○石山謙¹, 熊本篤志¹, 小野高幸¹, 山口靖², 春山純一³, 大竹真紀子³,
加藤雄人¹, 寺田直樹¹, 押上祥子⁴

¹東北大学, ²名古屋大学, ³ISAS/JAXA, ⁴国立天文台

月地下構造を理解することは、月の火山活動などを議論するために重要である。月地下構造を調査するために、かぐや衛星には月レーダーサウンダー（LRS）が搭載された[Ono and Oya, 2000]。LRSは、4~6MHzで周波数変調した電磁波を放射し、月面と地下で反射した電磁波の遅延時間を観測した、この観測によって、はじめて、月の海領域の表層構造が同定された[Ono et al., 2009]。この遅延時間は、月地下層のバルク誘電率に依存することが知られている。バルク誘電率とは、空隙を含んだ地下層の比誘電率である。アポロ玄武岩サンプルのバルク誘電率は、測定に基づくと、4 - 11 程度であり、それらの空隙率に依存する [e.g., Carrier et al., 1991]。したがって、LRSによって遅延時間を測定し、月地下層のバルク誘電率を決定することで、その空隙率を推定することができる。この空隙率は、月の地質状態（岩相の脆さ）や、月の熱的進化過程の議論において重要になる[e.g., Ishiyama et al., 2013; Ziethe et al., 2009]。

Ishiyama et al. [2013]では、かぐや衛星で得られた観測データを使用して、月の晴れの海および湿りの海の2か所の溶岩ユニットで、それらのバルク誘電率が推定された。特に、湿りの海の溶岩ユニットでは、高い空隙率をもった地層であることが示された。しかし、2か所の解析だけでは、こうした高い空隙率が月の海領域に共通した性質であるかどうかを判断することはできない。そこで、本研究では、Ishiyama et al. [2013]の手法に基づき、新たに晴れの海の2か所の溶岩ユニットと嵐の大洋の1か所の溶岩ユニットで上部玄武岩層のバルク誘電率と空隙率の推定を行った。

その結果、今回解析した溶岩ユニットのバルク誘電率は、晴れの海では1.9-7.0と1.6-14.0、嵐の大洋では1.3-5.1と推定された。これらの結果は、Ishiyama et al. [2013]の結果ともよく整合している。もし、月上部玄武岩層が海全体で同じバルク誘電率の範囲に含まれるならば、Ishiyama et al. [2013]および本研究の研究結果から、そのバルク誘電率は4.2-5.1の範囲に制約されることがわかった。このバルク誘電率は、月の上部玄武岩層の空隙率が21%-33%であることを示唆している。この空隙率は、溶岩固有の空隙成分と隕石衝突由来の空隙成分からなり、月上部玄武岩層中には、アポロ玄武岩サンプルには含まれない隕石衝突由来のマクロなクラックが豊富に含まれていることが示唆された。

月の物理探査: 次のターゲット

Next targets of seleno-physical exploration of the Moon

○佐々木晶¹ RISE 月惑星探査検討室²¹大阪大学宇宙地球科学専攻 ²国立天文台

かぐやの測月ミッション（子衛星を使った重力測定およびレーザ高度計による地形計測）により、地殻厚分布や衝突地形内部構造のバリエーションが明らかになり、表と裏側の違いが見えてきた。その後ルナ・リコネッサンス・オービタの高度計 LOLA、複数衛星間の軌道変化から 600 次を超える重力場を得た GRAIL により、改訂された。次のターゲットとして、下部マントル、コアのサイズと状態を、着陸船と軌道船による物理観測（VLBI、月面天測望遠鏡）、新反射板を加えた LLR 長期観測により、探ることを目指してきた。低次（2-5 次）の不均質の計測と原因の解明がターゲットになる。

月内部の状態をあらわすパラメータのうち、潮汐ラブ数 k_2 を 1% の精度で決定すれば、コアが流体か固体かを制約でき、流体コア半径の数 10km 精度で制約できる（マントル構造を仮定したとき）。かぐやまでの重力計測による低次重力場の変動から、潮汐ラブ数 k_2 として 0.0255 ± 0.0015 の値が出ている (Goossens et al. 2011)。一方、マントル下部の部分熔融層の存在も k_2 の値を変えるため、コアの情報を得るために、月震観測のデータも取り入れた統合解析について検討を始めている。

NASA の GRAIL 探査はノミナルミッション期間の 3 ヶ月で、潮汐ラブ数 k_2 についても 0.02405 ± 0.00018 という 1% を切る精度のデータを出している (Konopliv et al 2013)。さらに、3 次の k_3 については 0.0089 ± 0.0021 という値をはじめて出している。これを上回るためには、長期の継続観測が必要になるが、SELENE-2 では着陸船の寿命で制約される。月震計でコアのサイズが確定できれば、LLR や月面天測望遠鏡による回轉變動計測により、潮汐ラブ数以外の内部状態を決めるパラメータを得ることは可能である。次期月探査として極域を含む検討がされている。LLR を地上局から観測できる極域に設置することで、秤動の南北成分の精度が上がる。月面天測望遠鏡は、鏡筒の温度分布が安定すれば、極域で連続観測を行うことで、精度のよい回轉變動の情報を提供できる。

RISE 月惑星探査検討室メンバー (2013) : 花田英夫、松本晃治、荒木博志、野田寛大、石川利昭、鶴田誠逸、浅利一善、田澤誠一、菊池冬彦、押上祥子、山田竜平、長澤亮佑

次期月探査計画SELENE-2の検討状況(4)

Current status of the Lunar Landing Mission : SELENE-2(4)

○田中 智¹, 三谷 烈史¹, 大嶽 久志¹, 小林 直樹¹, 小川 和律⁴, 橋本 樹明¹,
星野 健¹, 大槻 真嗣¹, 木村 淳³, 倉本 圭², 若林 幸子¹

○Satoshi Tanaka¹, Takefumi Mitani¹, Hisashi Otake¹, Naoki Kobayashi¹, Kazunori Ogawa⁴, Tatsuaki Hashimoto¹, Takeshi Hoshino¹, Masatsugu Otsuki¹, Jun Kimura³, Kiyoshi Kuramoto², Sachiko Wakabayashi¹

1、宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2、惑星科学研究センター/北海道大学, 3、東京工業大学地球生命研究所,
4、東京大学大学院新領域

1, ISAS/JAXA, 2, CPS/Hokkaido University, 3, ELSI/Tokyo Institute of Technology, 4, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

月周回衛星「かぐや」プロジェクトに続く月探査計画としてJAXAでは月惑星の着陸探査技術獲得を主目的とした「SELENE-2」プロジェクトの検討が進められている。2007年にプリプロジェクト(フェーズA)がスタートして6年が経過した。本講演では2012年度秋季講演会以降の主な進捗状況について報告する。

2012年度においても、プロジェクト化に向けた重要な次のステップであるシステム要求審査(SRR)およびシステム定義審査(SDR)の実施が見送られた。この停滞状況の中で、科学搭載機器開発に関しては着陸地点検討結果や搭載機器の開発可能性、開発状況などを踏まえて優先度を暫定的に決定し、優先度の高い機器を中心に重点的に開発をサポートした。地震観測システムは開発当初から国際協力のもとで開発が進められており、短周期地震計(日), 広帯域地震計(仏), 搭載用ジンバル(独), そして電子回路(スイス)間でのインターフェース試験が進められた。また、可視近赤外分光カメラでは、搭載を検討しているCCDの性能試験を実施し、搭載温度範囲内で要求する性能が得られることが確認されたなど搭載に向けた開発は着実に進んでいる。

長期にわたって停滞しているプリプロジェクト状態から脱却してプロジェクト化を進めるための新たな可能性の一つとして、米国, EU, ロシアが検討を進めている月探査プロジェクトとの協働の模索を開始した。各国で検討が進められている探査領域は、従来のSELENE-2が着陸地点として規定していた表側および低中緯度(緯度60度まで)の範囲とは異なる極域を中心としている。本プリプロジェクトでは極域でのシステム成立性の検討および地質学的, 地球物理学的な側面からの科学的意義, さらに揮発性元素の存在や生命探査などの極域に特化したサイエンスも付加した上での検討を実施している。極域では月面の平均温度が低中緯度よりも低くなることや太陽高度が異なるために、これまで開発してきた越夜モジュールをはじめとして種々のシステムがそのまま適用できないものがある。これまでの開発実績を最大限度活用することを考慮した検討を実施している。本講演では検討の現状, 成果などを発表する。

月レーザ測距用ホロー型新規月面反射板の開発

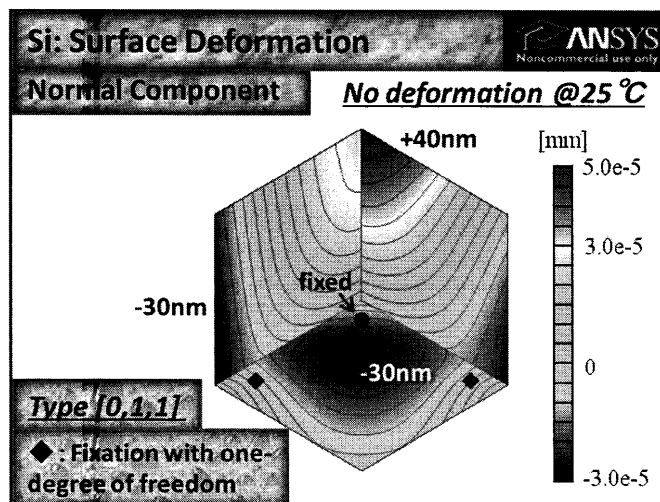
Development of the Retro-reflector on the Moon for the Future Lunar Laser Ranging

○荒木博志¹、鹿島伸悟¹、野田寛大¹、國森裕生²、千葉皓太³、大坪俊通⁴、
宇都宮真⁵、松本吉昭⁶

¹ 国立天文台、² 情報通信研究機構、³ 岩手大学、⁴ 一橋大学、

⁵ 宇宙航空研究開発機構、⁶ (株) プラネット、

月レーザ測距(LLR)は過去 40 年以上にわたり、月の回転、潮汐、および内部構造に関する重要なデータを供給し続けている。LLR の測距精度は過去 20 年間では、地上局におけるレーザ光の発振・受信システム改良やレーザ光の大気遅延モデルの改良が進んだため、2cm 以下になっている。しかしながら月の深部構造(流体コアの存否・サイズ・形状、マントルの非弾性など)のさらなる理解のためには、さらにひと桁以上の高精度測距が必要とされている。そこで我々は将来の月面設置を目標に、原理的に測距誤差を発生させない「単一素子ホロー型逆反射板(corner cube mirror; CCM)」の開発研究を進めている。CCM はオプティカルコンタクトで 3 枚の鏡を接合した 3 面鏡であり、アポロ 11 号地点に置かれた LLR 用コーナーキューブをしのぐ反射効率を持たせるため、口径 20cm を目標にしている。ミラーの材質については、「熱膨張率/熱拡散率」及び剛性率をもとに極低膨張率ガラスセラミック(CCZ-EX;オハラ)か単結晶シリコンを候補とした。さらに CCM のミラー部だけでなく CFRP 製ジンバルと組み合わせた熱モデルを作製し、月面の温度環境における熱変形/光学応答シミュレーションを行った(下図参照)。その結果、ミラーの固定方法に敏感ではあるが、(1)ミラーに影が付いて温度差がしやすい日照条件でも光学性能の劣化は十分小さくできる



ること、(2) 差はわずかではあるが CCZ-EX よりも単結晶 Si の方が性能面で優れていることがわかった。

図 CCM 変形シミュレーションの例。単結晶 Si (銀コート)、口径 200mm、ミラー厚 1cm。ティコに設置した時の南中時を想定し、温度分布は 83.3~83.7°C。変形量は 50nm 以下に押さえられており光学的な影響は無視できる。

P3-19

DOE (Diffractive Optical Element) を用いた月面天測望遠鏡の開発及び DOE 試作状況

○鹿島伸悟、荒木博志、鶴田誠逸、花田英夫、宇都宮真*、安田進*、鈴木浩文**

無印:国立天文台、*:JAXA、**:中部大学工学部

【月面天測望遠鏡(ILOM)計画】

ILOM計画は、月の物理秤動の観測精度を画期的に上げることによって、月の内部構造や物性、とくに中心部の物質が何であるか、それが溶けているかどうかを通して起源と進化を解明しようとするものである。そのために、個々の星に対してCCDの複数のピクセルに記録された星像の中心位置を1ミリ秒角(1mas)以下の精度で決定し、それらの星の1年以上にわたる軌跡を解析することによって月の物理秤動各成分の振幅や位相をこれまでの月レーザ測距(LLR)より一桁以上高精度に推定する。月回転の高精度観測は月の科学にとって重要であるばかりでなく、将来の月面からの超高精度位置天文観測を行う場合の座標系を確立する上でも不可欠の観測である。

【なぜDOEか？】

ILOMは上記のように月面という過酷な環境で星像位置決定精度1masという高精度を実現する必要があるため、その光学系には非常に高い性能が要求される。星像位置決定精度を悪くする要因は色々あるが、最も問題となるのが環境温度変化によるものである。それは具体的には、硝材の屈折率変化とレンズの形状変化、枠等の形状変化となって現れるが、最も影響が大きいのが硝材の屈折率変化である。ILOMの光学系は屈折系なので色収差を高精度に補正する必要があり、そのためには所謂「低分散ガラス」を用いなければならないが、低分散ガラスは、屈折率の温度変化(dn/dt)が一般硝材より1桁以上大きく、温度変化に非常に弱いという問題点がある。

DOEは回折で光を曲げ屈折とは色分散が逆であるため、屈折レンズと組み合わせることにより非常に協力的に色収差が補正できる。そのため上記低分散ガラスが不要となり、温度変化に強くすることが可能となる。色収差を非常に強力に補正できるDOEであるが、回折効率が形状と波長に依存するという問題点も有する。詳細な検討により、ILOMの目的(精度)には、多少の不要次数光は影響しないことが分かったため、実際に使える目処が立った。

【試作状況】

DOEの公差解析を行い、所望の性能を実現するための製造精度を明確にしたが、やはりかなり厳しいレベルであったため、中部大学鈴木研の協力の元、DOEの試作を開始した。まだ、サンプルトライの段階であるが、ほぼ所望の形状が得られ、面精度や面荒さも徐々に改善されるつつある。DOEの完成は今期末(2014/3/E)を目標にしており、来期はそれを屈折系と組み合わせ、望遠鏡としての性能を実際に確認することを行う予定である。

P3-20

月面 CCR の光学応答解析及び CCM 作製基礎検討

○鹿島伸悟、荒木博志、野田寛大、花田英夫、宇都宮真*、安田進*、國森裕生**

無印:国立天文台、*:JAXA、**:NICT

【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リフレクタ(CCR)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。

【CCPとCCM】

コーナーキューブリフレクタ(CCR)には、プリズムタイプのCCP(Corner Cube Prism)とミラータイプのCCM(Corner Cube Mirror)があり、それぞれに一長一短がある。CCPには合成石英を用いるのが一般的であるが、20cmクラスになると最も高精度な石英であっても内部の屈折率の不均一性が問題となり、所望の性能を満たせないことがわかった。また、CCMに比べて質量が非常に大きくなることもマイナス要因であり、今回はCCMを採用することとなった。

【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。各反射面が変形するとその反射光の光学特性が崩れ、地上の検出器に戻ってくる光量が激減するからである。今回、変形に関しては有限要素法を用いて計算し、そのデータを取り込んで光学応答を計算する手法をイチから構築した。この手法を用いて様々なケースで光学応答を正確に計算し、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ることを可能とした。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。

【作製方法】

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、その作製は非常に困難を極める。作製方法としては、1)一体ものとして作製する、2)3面を別々に製造して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、1)の一体構造に関しては千葉工大瀧野研と東京理科大谷口研の協力の元、IBF技術を用いて高精度に作製するための基礎検討を開始した。一方、2)の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、それを実験確認するための計画を立案し、動き出したところである。

月縦孔・地下空洞探査

Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME)

○春山 純一、久保田 孝、水野貴秀、大槻 真嗣、河野 功、西堀 俊幸、川勝 康弘、野田 篤司、加藤 裕基、渡辺 恵佑、上田 敦史、(宇宙航空研究開発機構) 吉田 和哉 (東北大)、石上 玄也(慶應大)、有隅 仁 (産総研)、茂渡 修平 (東京大)

我が国の月探査機 SELENE (かぐや) は、人類史上初めて、月に数 10m の直径-深さを持つ巨大な縦孔を 3 つ発見した。縦孔は火成活動起源の地下空洞 (たとえば溶岩チューブ) へと繋がっている。縦孔は、火星でも発見されている。

縦孔・地下空洞の科学的最大の魅力は、定常温度、放射線・紫外線・隕石からの遮蔽環境である。つまり稀少な月火星の水や揮発性物質の貯蔵庫になっているかもしれないということである。結果、地球外生命の発現・維持・進化が最も期待される場所である。そして又、それらが人類活動拠点として有益な場所であることも意味する。縦孔・地下空洞は、そのほか、火山学・地質学・宇宙環境電磁気学・太陽科学等様々な研究課題の解明の鍵を与える所でもある。月火星の縦孔・地下空洞は、今世紀の宇宙探査・宇宙開発において最も重要な探査対象であると言えよう。

しかし、縦孔は、すり鉢状の縁、切り立った壁、岩体が散在する底、永久影ともなる部分を有する、まさに「秘境」である。その探査には、様々な技術の習得・実証が必要である。そこで、我々は、そのパスファインダミッションとして、月の縦孔を探査し、

1) 数° から数 10° におよぶ斜面の先の縦孔へ接近し、最大数 m の岩体が最近で数 m おきに散在するような不整地を踏破する技術

2) 50~100m の深さにも及ぶ深く、垂直に切り立った縦孔壁の緩降下する技術

3) 数度程度の指向を目指した観測などを遠隔ロボットによって行うような精密測量・地下物質同定技術

等を、得たいと考えている。これらの技術は、今後の詳細月火星の縦孔・地下空洞の探査のみならず、月惑星のクレータ中央丘、クレータの壁、火星の峡谷、影領域などの探査においても、転用されよう。広く今後の月惑星探査において、世界を主導する技術にもなる。一方で又、これら技術を、海底資源探査を含む極限作業ロボットや遠隔介護ロボット等、日本のロボット産業界牽引の基幹事業へとスピノフすることを目指し、日本のロボット産業界活性化にも貢献することも視野に入れて、技術開発を進めようとしている。

月の線状重力異常地域の地形的特徴

澤田 なつ季¹・諸田 智克²・石原 吉明³・平松 良浩¹

1 金沢大学 2 名古屋大学 3 産業総合技術研究所

1.はじめに

重力分布による月内部の密度構造の理解は月の初期進化過程を理解するためのひとつの手段である。2011 年に NASA により打ち上げられた重力探査機 GRAIL は重力異常分布を高精度に測定した。Andrew-Hanna et al. (2013) は GRAIL の重力データを解析し、衝突盆地を囲む環状構造以外に大規模な線状の重力異常を複数発見した。彼らはこの線状の重力異常の成因を月の初期における全球規模の膨張とマグマの貫入によるものと推定している。そのような大規模なマグマ貫入のイベントがあったならば重力データ以外でも表面地形などにその痕跡が見えることが期待される。2009 年に打ち上げられた米国月探査機 LRO に搭載されたレーザ高度計 LOLA は 5 方向のレーザ測距にもとづいて月面地形データを得た。本研究では LOLA の地形データを用いて、線状重力異常に対応する地形的特徴の存在を調査し、月の初期におけるマグマ貫入仮説の検証を目的とする。

2.研究手法

LOLA データ^{*1}を用いて、小規模なクレーターによる地形の起伏の影響を除去するために 50km 以下の波長をフィルターで取り除き、線状重力異常に垂直な地形断面図に対し地形的特徴を強調するために側線毎にスタック処理^{*2}を行い、地形断面図を作成した。

*1…LOLA Date Archive (<http://imbrium.mit.edu/LOLA.html>)

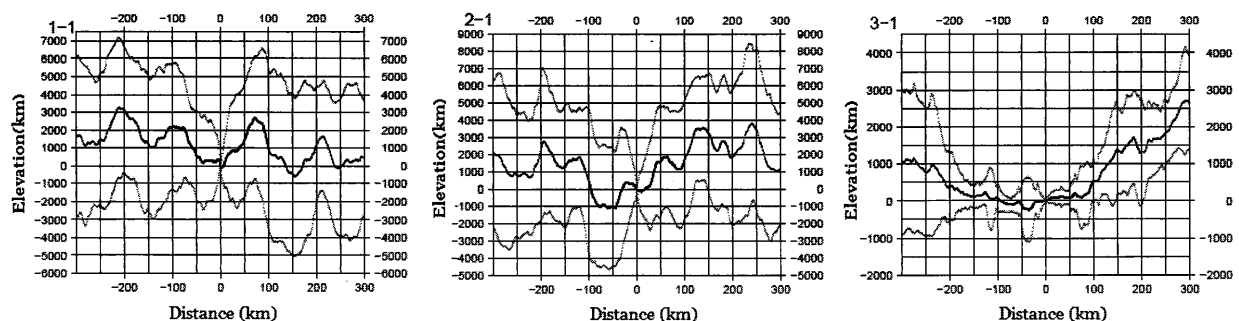
格子間隔は 1°/1024 のものを使用。ただし LGA_s1 はデータ数が大きいので 1°/513 を使用

*2…N は側線上のデータ数、 a_i はデータ値

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^n\right)^{1/n} \quad n=1,2,4$$

3.結果

Andrew-Hanna et al. (2013)で発見された計 19 個の線状重力異常すべてにおいて顕著な地形学的特徴は見られなかった。講演では線状重力異常に対応した地形学的特徴が見られなかった原因について考察する。



図：線状重力異常上の標高をゼロとして相対評価した時の平均($n=1$ のスタック処理^{*2})地形断面
(赤線は標準偏差) 横軸 0 の時、線状重力異常上である。

月面swirl4地域の分光特徴量比較と swirl形成過程への制約

○小川佳子¹, 春山純一², 松永恒雄³, 中村良介⁴, 廣井孝弘⁵, 林洋平⁴, 林祐樹¹

山本聡³, 横田康弘³, 大竹真紀子², 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国立天文台

月面swirlは、渦が巻いたような、うねった形状をもつ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。これまでに15個の月面swirl構造が確認されている [Blewett et al., 2011]。このアルベドコントラスト構造の成因については、まだよくわかっていない。これまで提唱されてきた代表的な説は3つある： (i) (彗星)インパクト説 (表面吹き飛ばし) [ex. Pinet et al., 2000]、(ii) 太陽風隔離説 (磁気シールド) [Hood and Schubert, 1980]、そして、(iii) ダストトランスポート説 (荷電粒子巻き上げ) [Garrick-Bethell et al., 2011] である。本研究では、月探査衛星かぐや(SELENE)のデータを用いた分光解析を行い、この3つの説の可否を検討し、swirl形成過程に制約を与えることを目指す。

(1) Reier Gamma (7.5N, 59.0W)、(2) Mare Ingenii (33.7S, 163.5E)、(3) Mare Marginis (16.0S, 88.0E)、(4) Gerasimovich (21.0S, 236.5E)、の4つの月面swirl地域を解析対象とする。(1)は海の領域、(4)は高地の領域に位置し、(2)(3)は海と高地の境界領域に分布する。この4つの地域は月面上でアルベドコントラストが最も顕著で代表的なswirl構造である。それぞれのswirl地域における可視-近赤外分光特徴量と宇宙風化度合いを可視化する。そしてアルベドパターンとの比較を行う。Swirlを形成するアルベドコントラストの実態が、可視-近赤外分光特徴量の差から示される組成差なのか、風化度の違いなのか、を明らかにする。また、4つのswirl間で結果の比較を行い、海/高地という、分布域に起因するローカルな影響の有無についても調べる。もしアルベドコントラストについて組成差の影響が顕著であるならば、(i)または(iii)が支持され、風化度の差が効いているなら(ii)が支持される結果となる。尚、(ii)が有力となった場合に、月面の宇宙風化メカニズムについても、今回のswirlにおける分光特性の結果に基づき制約を行うことを目指す[cf. Sasaki et al., 2000; Vernazza et al., 2009]。

月の初期分化におけるチタンの役割

○堀 文子¹, 酒井 理紗¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

月の地殻やマントルは全球的なマグマオーシャンの分化によって形成されたと考えられている。また月の海と呼ばれる2次的な火成活動で形成された玄武岩地殻は、チタンの存在量によって high-Ti、low-Ti、very low-Ti の3つに分類できる。チタンに濃集したこの玄武岩地殻が月形成過程の終盤に起きたオーバートーンと関わりがあると考えられており、チタンはマグマオーシャンの冷却分化過程において月進化の重要な役割を担っていると考えられる。

そこで本研究では、月マグマオーシャン初期分化過程におけるチタンの役割を、熱力学と流体力学モデルを用いて評価することを目的としている。モデルは Sakai et al. (2012) の分化モデルを使用した。初期組成は月バルク組成を想定し、地球のバルク組成(BSE)を基準としてアルミニウムと鉄の初期量をそれぞれ 1.0~2.0 倍まで変化させた。チタンの初期量はアルミニウム(カルシウム)などの難揮発性元素とのコンドライト比により与えた。初期マグマオーシャンの深さは 1000km と仮定し、鉱物の相平衡計算をマグマオーシャンの真ん中の深さに相当する圧力において、MELTS または pMELTS を用いて行っている。結晶は、メルト中の結晶化度が臨界結晶化度 $X(=0.1\sim0.4)$ より大きくなったときに対流するマグマオーシャンから分離する。分化過程におけるマグマオーシャン残液の深さと化学組成は、分離した鉱物結晶の体積をマントルの厚さに換算して計算した。この手順を斜長石が析出するまで繰り返した。

チタンの初期量に関わらず斜長石析出時のメルト組成は大きくは変化しなかった。これは、チタンの存在量がそもそも少ないためであると考えられる。難揮発性元素の存在量が BSE の 2 倍の時に、チ

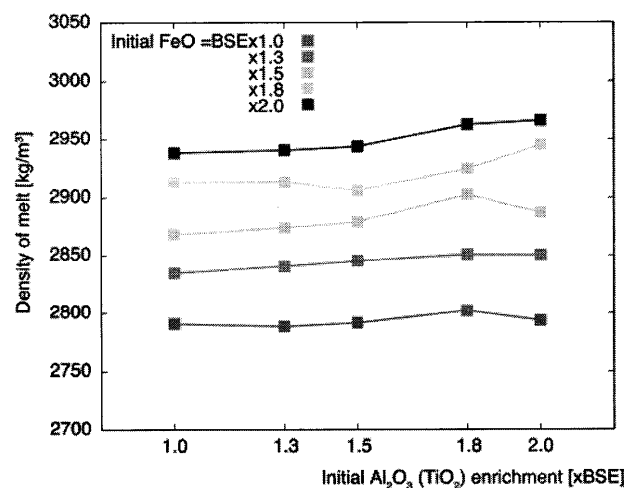


図 1. 斜長石析出時のメルトの密度

タンはマントル鉱物である clinopyroxene に $\sim 0.2\text{--}2.2\text{wt}\%$ 、spinel に $0.2\text{--}1.6\text{wt}\%$ だけ含まれていた。また、斜長石析出時のメルトの密度を計算した結果、チタンの存在量に比例して僅かに大きくなったが、これは鉄の存在量の影響に比べて非常に小さかった(図 1)。これは、臨界結晶化度 X を変化させても同様であった。以上のことから、本研究では、月の海を特徴づけるチタンは、初期存在量が少ないことから、月のマグマオーシャン分化過程においてオーバートーンの発生を左右するような大きな役割は果たしていないということがわかった。

クレータ生成率モデルの修正と月進化史への影響

○諸田 智克¹, 春山 純一², 本田 親寿³, 大竹 真紀子², 平田 成³,
出村 裕英³, 山本 聡⁴, 松永 恒雄⁴, 横田 康弘⁴, 中村 良介⁵, 石原 吉明⁵,
渡邊 誠一郎¹, 古本 宗充¹

¹名古屋大学, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³会津大学,
⁴国立環境研究所, ⁵産業技術総合研究所

地球や他の固体天体に比べて月は早い段階で主な地質活動が終了した。そのため月面には過去 40 億年に及ぶ地質イベントの情報が残されており、月面クレータは地球-月系の長期的な衝突履歴をほぼ完全に保存した数少ない直接的記録である。我々は「かぐや」、LRO 画像を用いて月面クレータのカウンティングを行い、過去 30 億年のクレータ生成率の長期的な時間変化について調査してきた。その結果、新鮮クレータ放出物上のクレータ数密度は過去の見積りよりも小さく、過去 30 億年のクレータ生成率は時間とともに減少してきたことがわかった (図 1)。過去 40 億年の月面クレータ年代学関数は、2つの指数関数の組合せで表現できる。これによると現在の生成率は 30 億年前の半分程度に見積もられる。

月の地質進化史の理解はクレータ年代学にもとづくところが多い。過去の地質年代の調査は主にクレータ生成率一定のモデルが用いられてきたが、本研究で得られたクレータ生成率減少モデルにもとづいた場合、年代推定に 5 億年以上の違いが生じる。例えば、月の主な地質活動の終焉時期は生成率一定モデルにもとづいて 15 億年前と見積もられているが [Morota et al. 2011; Cho et al. 2012]、クレータ生成率減少モデルを用いた場合、20 億年前となり、月の進化史の理解が大きく異なってくる。

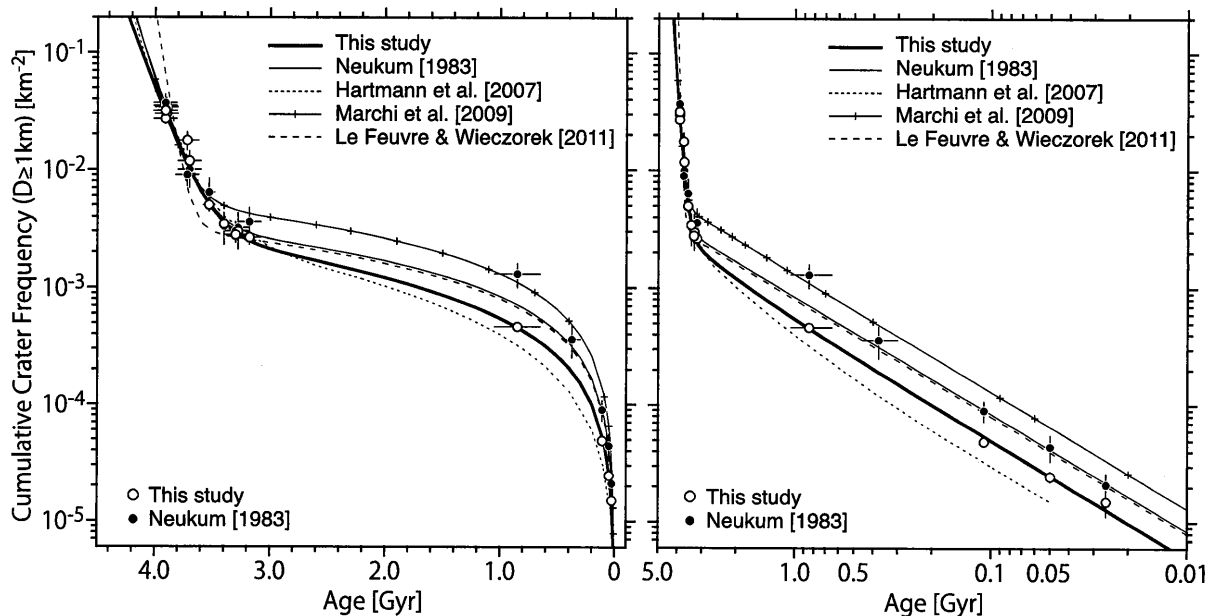


図1 月試料の放射年代とクレータ数密度の関係 (クレータ年代学関数)。過去研究との比較を示す。

模擬低重力下での砂標的への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

小惑星の表層の地形は衝突現象によってほぼ支配されており、表面の大部分はレゴリスによって覆われている。また、小惑星表面における重力加速度は非常に微小なものであるため、小惑星表面の進化の過程を考えるうえで、微小重力環境における衝突クレーターの形成を理解することは重要である。

そのためには微小重力環境での衝突クレーター形成実験が不可欠であるが、微小重力を模擬する装置の規模が大きいこともあり、多くの実験は行われていない。数少ない実験例として、Gault and Wedekind (1977)は、標的にかかる重力を 0.073G~1G の範囲で変化させ、石英砂（粒径~350 μ m）に対する衝突実験を行い、クレーター直径が重力の 0.165 乗に反比例することを示した。一方、Takagi et al.(2007)では、重力が 10^{-5} G 以下の環境でガラスビーズ（粒径 80~900 μ m）に対する衝突実験を行っており、その結果、クレーター直径に重力の影響は見られなかった。これら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変化させる装置を開発し、低速度での衝突実験を行うこととした。この装置では 0.1G~1.0G の範囲で重力を変化させることができ、また、装置の規模が比較的小さいため数多くの実験データを得ることが可能となっている（木内他 2013 年地球惑星科学連合大会）。標的にはシリカサンド（粒径~150 μ m）を用い、直径 8mm のステンレス球弾丸を約 4m/s の衝突速度で標的表面に衝突させた。標的にかかる重力を変化させて衝突実験を行った結果、低重力下で形成されるクレーター直径は、1G 下で形成されるクレーター直径より大きくなる傾向が見られた（図 1）。また、標的にかかる重力が 1G から低重力に緩和する際、粒子の配置の変化がどのように起こるかをすることは、本実験下におけるクレーター形成を理解する上で不可欠である。本発表では、重力の変化過程における粉体のふるまいについても議論する。

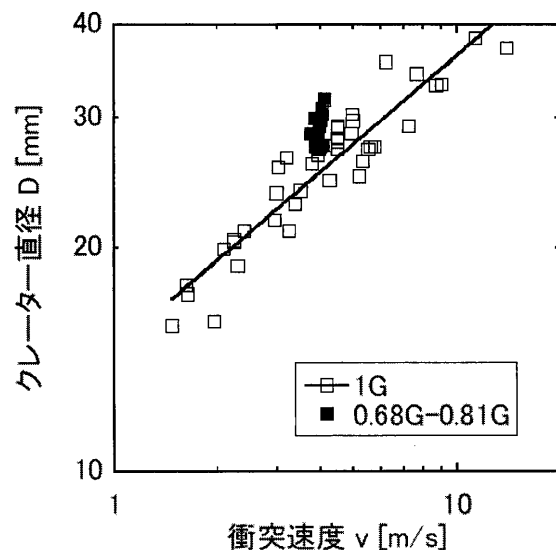


図1:クレーター直径と重力の関係

玄武岩標的クレーター形成実験から求められた スケーリング則

○高木 靖彦¹、長谷川 直²、鈴木 絢子²

¹愛知東邦大学、²JAXA

衝突クレーター形成は太陽系の形成・進化において最も普遍的な現象であると考えられており、その過程を解明するために、砂のような非固着性の物質、岩石、金属など様々な物質を用いた実験が行われてきた。しかし、太陽系内で最も普遍的に存在していると考えられる玄武岩を用いた実験はほとんど行われていなかった。その理由の一つとして、クラックの無い均質な岩石資料を一定量入手することが難しいことが考えられる。

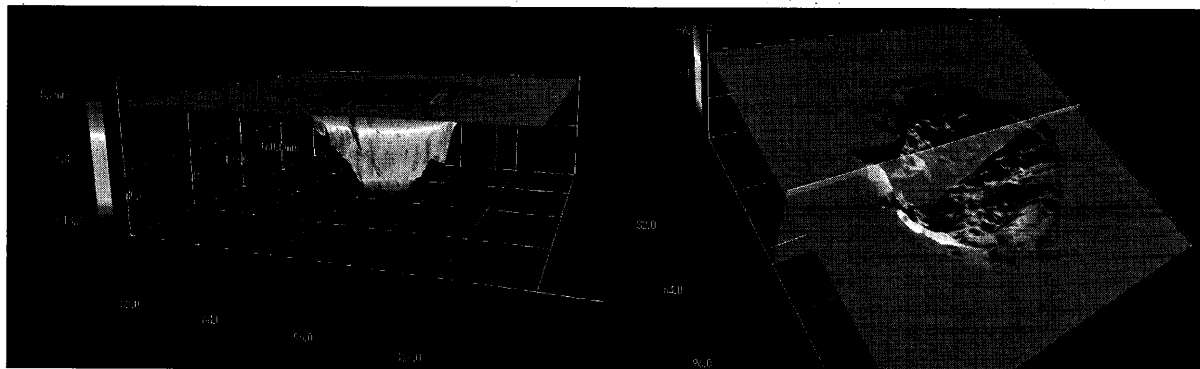
今回我々は、クレーター形成実験に適切な大きさのクラックの非常に少ないウクライナ産の玄武岩を入手することができた。そこで、この資料を用いて系統的なクレーター形成実験を行い、物質強度が支配する場合のスケーリング則の検証を目指した。

実験は、JAXA 相模原キャンパスにある二段式軽ガス（水素）銃を用いて行った。計 24 回の実験を行い、実験条件は以下の通りである。

弾丸物質	タングステンカーバイト、ステンレス鋼、アルミニウム、ナイロン
弾丸形状	球
弾丸直径	1.0mm、3.2 mm (1/8 inch)、7.1 mm (9/32 inch)
弾丸質量	4 ~ 218 mg
衝突速度	2400 ~ 5900 m/sec
衝突角度	90 °

結成されたクレーターの 3 次元形状は、Keyence レーザー変位計を付けた X-Y ステージにより測定した。測定された 3 次元形状より、クレーターの直径・深さ・容積をもとめ、 π 無次元パラメーターにより衝突条件との関係性を明らかにした。

求められたスケール則はポスターで。



イジェクタカーテン観測から イジェクタの放出角度と速さを推定する方法

○和田浩二¹, 辻堂さやか², 荒川政彦²

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

衝突クレーター形成時のイジェクタ放出過程は、標的物性を反映すると考えられており、そのスケーリング則を確立することが重要である。しかしながら、室内実験や「はやぶさ2」におけるSCI衝突実験において個々のイジェクタ粒子の放出速さならびに角度を計測することは困難である。これまで行われてきたイジェクタ速度（速さ・角度）計測は、サイズの大きなイジェクタ粒子の個々の軌跡を直接高速カメラで撮像したり、特殊なレーザーシート光源を用いて記録するなど、限られた環境においてのみ可能なものであった。それに対して我々は、個々のイジェクタ粒子ではなく比較的撮像が容易なイジェクタカーテンの観測からイジェクタ粒子の放出速さならびに放出角度を推定する方法を提案する。観測量としては、衝突後からある時刻 t におけるイジェクタカーテンの角度 α 、およびイジェクタカーテンの根本の水平進行速度（いわゆる地を這う速度） $\dot{X}$ である。このとき、重力加速度を g とし、時刻 t に落下したイジェクタ粒子の放出角度 θ に対して次式が成り立つことを導出した

$$\frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{2\dot{X}}{gt}.$$

ただし、ここでは垂直衝突を考え、標的表面の粒子は位置によらず時刻 0 で放出されてイジェクタカーテンの外側表面を構成しているものと仮定した。この結果は標的表面から高さ h におけるイジェクタカーテンの観測においても拡張することができ次式を導出した：

$$\left(1 + \frac{2h}{gt^2}\right) \frac{1}{\tan \theta} + \left(1 - \frac{2h}{gt^2}\right) \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{2\dot{X}}{gt}.$$

ここで $\dot{X}$ は高さ h の水平面におけるイジェクタカーテンの進行速度となる。以上の式からイジェクタ粒子の放出角度 θ が求められれば、放物運動の式を用いて時刻 0 でのイジェクタ粒子の放出速さが求められる。ただし、イジェクタカーテンの形状および誤差解析を考慮すると、本手法を適用する際にはイジェクタカーテンの角度をより精密に測定することが要求される。本発表では、以上の理論式の導出過程を示し、その適用条件などについて議論する予定である。

CReSS を用いた火星気象予測実験

* 杉山耕一郎 (宇宙研), 小高正嗣 (北大・理), 中島健介 (九大・理), 高橋芳幸 (神戸大・理/CPS), 西澤誠也 (理研), 乙部直人 (福岡大・理), はしもとじょーじ (岡山大・自然), 長谷川晃一 (中電 CTI), 榊原篤志 (中電 CTI), 坪木和久 (名大・HyARC)

1. はじめに

着陸船による生命・表層環境探査を主体とした火星探査計画 MELOS では, 観測機器の設計および探査機の安全な着地のために, 着陸予定地の気象予測が必要とされている。我々は, 地球大気用に開発されてきた領域モデル CReSS を火星大気に適用することで, 火星気象予測実験を実施するための環境整備を行ってきた。本稿では, CReSS の火星化の概要を報告し, 予備的な計算結果を紹介する。

2. CReSS の火星大気への適用

CRess を火星大気へ適用するためには, 火星固有の物理過程の導入が必要である。モデル内に含まれる諸々の定数を火星大気のそれで置き換え, 大気大循環モデル dcpam5 に含まれる火星大気用の大気放射伝達計算モジュールを移植した。それらに加えて, Odaka *et al.* (2001) による火星領域モデル研究の結果や理化学研究所で開発されている SCALE による火星大気 LES (Large Eddy Simulation) の結果と比較検討を行うために, CReSS のソースコードに放射強制を外部パラメタとして与えるためのモジュールを追加した。

さらに, 初期値・境界値として外部データを読み込むための調整を行った。結果として, 大気大循環モデル dcpam5 を用いた火星大気大循環計算の結果を CReSS の初期値・側面境界値として利用し, 地形データとして火星地形データを利用できるようになった。

3. 予備的実験の結果

Odaka *et al.* (2001) の放射強制を外部パラメタとして与えることで, 比較的地形がなだらかな領域 (125°E , 25°N), および着陸候補地点 3 カ所 (42°S , 203°E ; 20°N , 75° ; 10°N , 85°E) の近傍において, 予備的実験を実施した。数値

モデルの水平解像度は約 2 km とした。鉛直領域はおおよそ 15 km であり, 鉛直格子ストレッチングを用いるため鉛直解像度は地表面近くで 30 m 程度, 大気上部で 500 m 程度である。春分 ($L_s = 0^{\circ}$) において, それぞれの地点の地方時 (LT) が $LT = 0:00$ となる時刻を計算開始時刻とし, 1 日分の数値積分を行った。

以下では, 比較的地形がなだらかな 125°E , 25°N 近傍での結果を示す。対流層の最も発達する時刻 ($LT = 14:00$) と, 地表面温度の日変化の振幅 ($\sim 90\text{ K}$) および温度がピークを取る時刻は, Odaka *et al.* (2001) の結果と整合的であった。 $LT = 14:00$ では, 15 m/s 程度の斜面風が生成され, 鉛直流は地表面付近において細胞状に分布する (Fig.1)。クレーターに対応する地点で鉛直流は強まる ($w \sim 6\text{ m/s}$)。この細胞状の形状は, 解像度や地形の有無という違いがあるにもかかわらず, Michaels and Rafkin (2004) や SCALE による LES の結果と似ている。一方で, 顕熱の大きさは Odaka *et al.* (2001) の結果に比べて約 4 倍大きい。この差異をもたらす要因については現在調査中である。

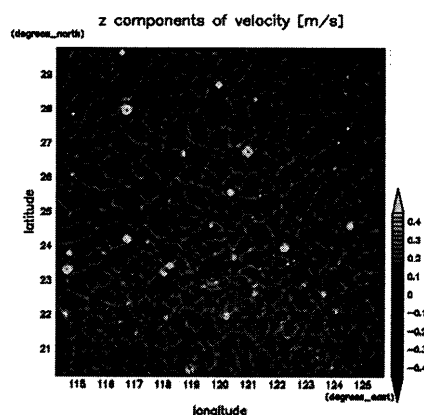


Figure 1: 120°N , 25°E 近傍における $LT=14:00$ でのモデル最下層の格子点での鉛直流。

ピリカ望遠鏡と VMC による 金星の同時紫外測光の手法開発と スーパーローテーション周期の持つ寿命推定

○ 今井 正亮¹; 高橋 幸弘¹; 渡部 重十¹; 渡邊 誠¹

¹ 北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻

紫外波長 (365 nm) で金星大気を観測すると、惑星規模で明暗模様を示す大気構造を検出することができる。この大気構造の動きは、70 km 以上の高度における大気波動の伝搬及び大気循環の風速と対応することが示唆されており、金星のスーパーローテーションに関連したものであると考えられている。Del Genio & Rossow (1982, 1990) は、Pioneer Venus 探査機の紫外測光から約半年程度の間隔で金星の雲の輝度変化に存在する周期性について調べ、緯度帯ごとに独立した周期の変動があり、かつその周期は 4-5 日程度であることを報告した。しかし、このような周期性が常に金星に存在するかどうか、即ちある‘寿命’を持った現象なのかどうかについての調査は十分なされていない。我々はこの現象の背後にひそむメカニズムの解明がスーパーローテーションの駆動と惑星スケールの大気波動の関係を知る手掛かりになると考えている。

周期性の持つ寿命を判別するためには長期に渡る金星紫外光のイメージングデータが不可欠である。現行の金星観測探査機 Venus Express 搭載の Venus Monitoring Camera (VMC) からは、金星の紫外線輝度の絶対変化についての貴重なデータを得ることができる。しかし、本研究で利用できる VMC のデータでは、撮像範囲が南半球に制限されてしまう欠点がある。両半球のデータを得るために、我々は 2012 年春よりピリカ望遠鏡搭載の Multi-Spectral Imager (MSI) による地上からの同時観測を行っている。1.6m のピリカ望遠鏡は北海道大学が所有・運営する惑星観測専用の望遠鏡である。2012 年 7 月には 5 日間連続の昼間観測を行い、~5000 km の空間スケールをもつ大気構造が観測された。MSI による撮像観測は断続的に 1 または 2 ヶ月の間隔で行われ、最近では 2013 年 8 月に 2 週間の連続データが取得された。

VMC と MSI それぞれのデータセットからは、緯度と時間の関数で紫外の輝度変化をマッピングすることができる。我々の VMC 画像の解析からは紫外の輝度変化が顕著な時期 (~50%) とそうでない時期の 2 つのタイプにはっきりと分類できることが分かってきた。2008 年 2 月には南半球に 4 日強の顕著な周期変化が見られたが、地上観測を行った 2012 年 7 月頃は周期性が見られず輝度の変化は 10% 程度であった。紫外の周期性が現れる時期とこの輝度変化の顕著な時期との対応は未確認だが、大気波動伝搬の周期性を議論する上で重要になると考えている。また、金星の地上観測が明るさ変化のモニタリングに有効な手段となる可能性を示す結果が得られている。一般に内惑星である金星は、測光標準星の観測が難しいことから地球大気減光を補正した測光が困難な天体である。しかし 2012 年 7 月の MSI データを用い、南緯 50 度帯の明るさで全体の輝度を規格化した相対輝度変化のマッピングによって金星両半球の輝度変化を調べたところ、その結果を示すプロットが 5 日間で 2 つのピークと 1 つのボトムを示し、同時期の VMC データから得られた絶対変化と非常に良い相関を示した。本発表では、上記結果を交えて金星輝度変化の持つタイムスケールと地上観測による探査機データの再現について議論する。

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

日本惑星科学会 2013年 秋季講演会実行委員会

実行委員長 渡部潤一

特別顧問 林 正彦

実行委員 荒木博志, 石津尚喜, 伊藤孝士, 押野翔一
小久保英一郎, 寺居 剛, 成田憲保, 花山秀和
藤井顕彦, 古荘玲子, 堀 安範, 宮地竹史
山下卓也, 山田竜平, 吉田二美, 脇田 茂