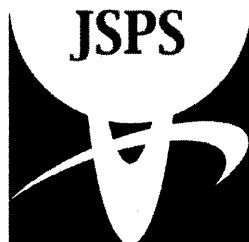


**日本惑星科学会**  
**秋季講演会予稿集**  
**2012**

**主催：日本惑星科学会**  
**共催：神戸大学大学院理学研究科**



# 日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会

## (1) 一般講演会

場所: 神戸市立青少年科学館 新館地下ホール

日時: 2012 年 10 月 27 日(土) 15:30~17:00

題目: なぜ地球だけに陸と海があるのか?

講演者: 巽好幸(神戸大学大学院理学研究科 教授)

## (2) 秋季講演会

場所: 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール

日程: 10 月 24 日(水)~ 26 日(金)(3 日間)

### 1日目 10月24日(水)

8:30 受付

8:55 開催挨拶, 連絡事項

9:00 特別セッション 最優秀発表賞選考

10:45 ポスターセッション 1

11:50 昼食

12:50 口頭発表セッション 1 月科学

14:55 口頭発表セッション 2 惑星探査

16:49 口頭発表セッション 3 惑星探査

### 2日目 10月25日(木)

8:30 受付

8:45 口頭発表セッション 4 惑星大気, 衝突科学 I

10:28 口頭発表セッション 5 衝突科学 II, 室内実験 I

11:56 昼食

13:10 口頭発表セッション 6 室内実験 II

14:26 口頭発表セッション 7 隕石

15:32 ポスターセッション 2

16:35 総会

17:35 最優秀研究者賞特別講演

18:30 懇親会

### 3日目 10月26日(金)

8:30 受付

8:45 口頭発表セッション 8 室内実験 III, 惑星形成論 I

10:35 ポスターセッション 3

11:50 昼食

13:00 口頭発表セッション 9 惑星形成論 II

15:05 口頭発表セッション 10 惑星形成論 III, 系外惑星

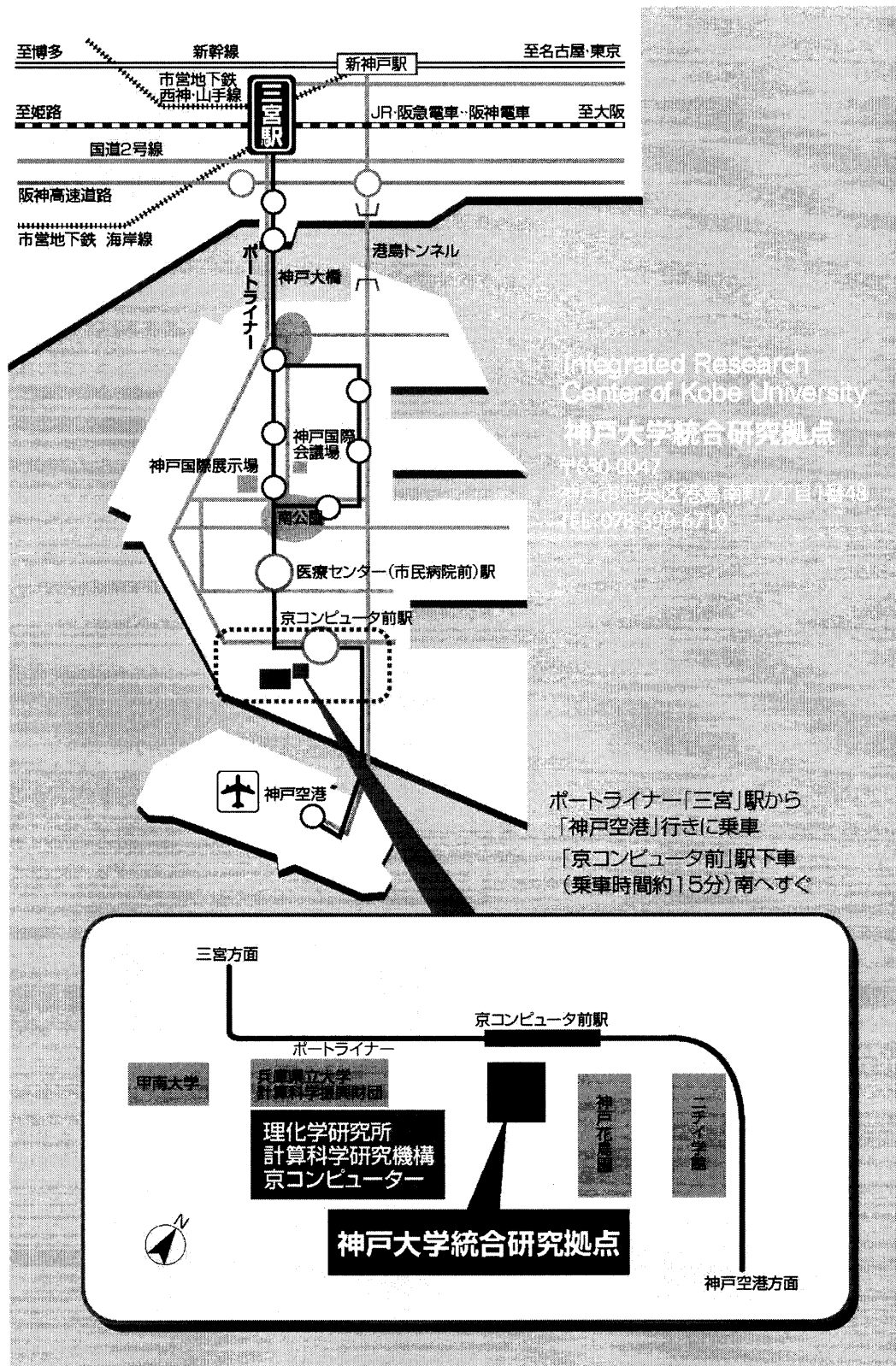
## 日本惑星科学会2012年度秋季講演会・会場案内

於：神戸大学統合研究拠点コンベンションホール

〒650-0047 神戸市中央区港島南町7丁目1番48

口頭発表会場：2階大ホール

ポスター発表会場：1階「デジタルアーカイブ」および2階ホール入口前「ホワイエ」



★ポータライナー「三宮」駅までの所要時間

<飛行機>

- ・ 関西国際空港より神戸三宮までの直通バス 65 分（毎日 40 便以上）
- ・ 大阪国際空港(伊丹空港)より神戸三宮までの直通バス 40 分（毎日 30 便以上）

<新幹線>

- ・ 新神戸より 8 分（神戸市営地下鉄 2 分+徒歩 6 分）
- ・ 新大阪より 30 分（JR 東海道本線 29 分+徒歩 1 分）

<近郊電車>

- ・ 大阪より 24 分（JR 東海道本線 23 分+徒歩 1 分）
- ・ 京都より 55 分（JR 東海道本線 54 分+徒歩 1 分）

★ポータライナー「京コンピュータ前」駅までの所要時間

- ・ 三宮より 15 分（ポータライナー、神戸空港行きに乗車）
- ・ 神戸空港より 6 分（ポータライナー）





## 口頭発表プログラム

口頭発表の講演時間は3分間の質疑時間を含めて特別セッション15分、一般セッション11分です。

### 10月24日

8:30-8:55 受付

8:55-9:00 開催挨拶、連絡事項

#### 特別セッション：最優秀発表賞選考 座長：関根康人（東大新領域）

9:00 S01 月のマリウス丘における形成史

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

9:15 S02 崩れた月衝突盆地：粘弾性変形だけでは説明困難

\*鎌田俊一（東大理），杉田精司（東大新領域），阿部豊（東大理），原田雄司（東大地震研），石原吉明（国立環境研），並木則行（千葉工大），岩田隆浩（JAXA），花田英夫，荒木博志（国立天文台）

9:30 S03 super-Earth の進化：水素大気散逸による質量・半径の進化について

\*黒川宏之（東工大理工/マックス・プランク研），Lisa Kaltenegger（マックス・プランク研/ハーバードスミソニアンセンター），Helmut Lammer（オーストラリア科学アカデミー），Nikolai V. Erkaev（ロシア科学アカデミー）

9:45 S04 斜長岩質地殻形成条件から制約する月バルク組成と月の起源

\*酒井理紗，永原裕子，小澤一仁（東大理），橘省吾（北大理）

10:00 S05 K-Ar 法を用いた惑星探査におけるその場年代計測法の開発

\*長勇一郎，三浦弥生（東大理），杉田精司（東大新領域）

10:15 S06 土星系の衛星におけるE環粒子の堆積物からわかるE環の性質とエンセラダスの火山活動史

\*平田直之，宮本英昭（東大理）

10:30 S07 周惑星円盤ガスの降着過程についての理論的解析

\*藤井悠里，奥住聡（名大理），谷川享行（北大低温研/CPS），犬塚修一郎（名大理）

#### 10:45-11:50 ポスターセッション1

11:50-12:50 昼食

#### 口頭発表セッション1（月科学） 座長：岩田隆浩（JAXA），大竹真紀子（JAXA）

12:50 O1-01 SELENE 統合サイエンスに向けたデータ解析と最新成果

\*岩田隆浩，春山純一，大竹真紀子，晴山慎，北條勝己，大嶽久志（JAXA）

13:01 O1-02 かぐやデータアーカイブの現状

\*晴山慎，北條勝己，大嶽久志，岩田隆浩，大竹真紀子，春山純一，山本幸生（JAXA）

13:12 O1-03 地球-月系における過去30億年の天体衝突史とクレータ年代学モデルの修正

\*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（産総研），石原吉明（国立環境研），渡邊誠一郎，古本宗充（名大環境）

13:23 O1-04 月の海の玄武岩噴出年代と化学組成変遷

\*唐牛譲（JAXA），小林進悟（放医研），晴山慎（JAXA），長岡央，平居悠（早稲田大理工），鎌田俊一（東大理），諸田智克（名大環境），大竹真紀子（JAXA），長谷部信行（早稲田大理工）

- 13:34 O1-05 衝突メルトの分布・形状解析による中央丘形成速度の推定  
\*栗山祐太郎（東大理）、大竹真紀子、春山純一、岩田隆浩（JAXA）、平田成（会津大）
- 13:45 O1-06 クレーター年代を用いた雨の海北西部に位置するリッジの形成年代制約  
\*嵩由美子、山路敦、佐藤活志（京大理）、諸田智克（名大環境）、春山純一（JAXA）、松永恒雄（国立環境研）、大竹真紀子（JAXA）
- 13:56 O1-07 月の表側に分布する火砕性堆積物の化学組成と結晶度の推定  
\*有本龍三（東大理/JAXA）、大竹真紀子、春山純一、岩田隆浩（JAXA）
- 14:07 O1-08 月高地地殻の化学組成から推定する高地地殻形成過程  
\*大竹真紀子（JAXA）、武田弘（千葉工大）、松永恒雄、横田康弘（国立環境研）、春山純一（JAXA）、諸田智克（名大環境）、石原吉明、山本聡（国立環境研）、小川佳子（会津大）、廣井孝弘（ブラウン大）、唐牛譲（JAXA）、佐伯和人（阪大理）
- 14:18 O1-09 月隕石 Dhofar 1428 の希ガス同位体組成  
\*三浦弥生（東大地震研）、岡崎隆司（九大理）、山口亮（国立環境研）
- 14:29 O1-10 月南極のシャクルトンクレータの底に、20%以上もの水氷はあるのか？  
\*春山純一（JAXA）、山本聡、横田康弘（国立環境研）、大竹真紀子（JAXA）、松永恒雄（国立環境研）

14:40-14:55 休憩

## 口頭発表セッション2（惑星探査） 座長：佐伯和人（阪大理）、白石浩章（JAXA）

- 14:55 O2-01 深発月震の発生特性に関する研究  
\*山田竜平、野田洋人、荒木博志（国立天文台）
- 15:06 O2-02 3軸姿勢制御衛星用ペネトレータ分離機構の開発ーBBMによる検証試験結果について  
\*白石浩章、小林直樹、早川雅彦、田中智、早川基、石井信明、小松敬治（JAXA）
- 15:17 O2-03 月面観測機器の越夜技術: SELENE-2 サバイバルモジュールの開発状況  
\*小川和律、飯島祐一、坂谷尚哉、大嶽久志、田中智（JAXA）
- 15:28 O2-04 SELENE-2 の着陸地点評価  
\*佐伯和人（阪大理）、荒井朋子（千葉工大）、荒木博志（国立天文台）、石原吉明（国立環境研）、大竹真紀子、唐牛譲、小林直樹、春山純一（JAXA）、杉原孝充（JAMSTEC）、本田親寿（会津大）、佐藤広幸（アリゾナ州立大）、武田弘（千葉工大）、諸田智克（名大環境）、栗谷豪（大阪市大理）、三谷烈史、大嶽久志、田中智（JAXA）
- 15:39 O2-05 月惑星熱流量観測のための伸展式プローブの開発(2)  
\*堀川大和（東大理）、田中智（JAXA）、坂谷尚哉（総研大）、滝田隼（東大理）、小川和律（JAXA）、
- 15:50 O2-06 火星における2種類の火山活動と内部ダイナミクス  
\*栗田敬（東大地震研）、大森聡一（放送大）、David Baratoux（中部ピレネー観測所）、野口里奈（東大地震研）
- 16:01 O2-07 火星生命探査提案:細胞、アミノ酸、メタン検出を目的とした  
\*山岸明彦（東京薬科大生命科学）、吉村義隆（玉川大農）、長沼毅（広大生物）、宮川厚夫（静大工）、出村裕英（会津大）、豊田岐聡（阪大理）、本多元（長岡技科大）、小林憲正（横浜国立大工）、三田肇（福岡工大工）、大野宗佑、石丸亮、石上玄也（JAXA）、佐々木晶（国立天文台）、宮本英昭（東大理）
- 16:12 O2-08 木星系探査衛星 JUICE 搭載レーザ高度計の開発  
\*野田寛大（国立天文台）、Hauke Hussmann（ドイツ宇宙庁惑星科学研）、荒木博志（国立天文台）、木村淳（北大理/CPS）、佐々木晶、田澤誠一（国立天文台）、並木則行（千葉工大）、Juergen Oberst、

Kay Lingenauber (ドイツ宇宙庁惑星科学研)

**16:23 O2-09 水星探査計画「BepiColombo」におけるダスト計測器の開発現状**

\*柴田裕実 (京大工), 野上謙一 (獨協医大), 藤井雅之 ((株) FAM サイエンス), 大橋英雄 (東京海洋大), 小林正規 (千葉工大), 佐々木晶 (国立天文台), 矢野創 (JAXA), 木村宏 (神戸大理/CPS), 武智誠次 (大阪市大工), 岩井岳夫 (東大工), 長谷川直 (JAXA), 平井隆之 (総研大), 服部真季 (東大新領域), 宮地孝 (千葉工大), Ralf Srama, Eberhard Grün (マックス・プランク研)

16:34-16:49 休憩

**口頭発表セッション3 (惑星探査-小天体-) 座長: 橘省吾 (北大理), 森島龍司 (カリフォルニア大)**

**16:49 O3-01 はやぶさ2の現状とサイエンス**

\*安部正真, 田中智, 飯島祐一, 中澤暁, 津田雄一, 南野浩之, 吉川真 (JAXA), はやぶさ2プロジェクトチーム

**17:00 O3-02 はやぶさ2近赤外分光計 NIRS3の開発状況**

\*北里宏平 (会津大), 岩田隆浩, 安部正真, 大竹真紀子, 松浦周二, 津村耕司 (JAXA), 高木靖彦 (愛知東邦大), 平田成, 本田親寿 (会津大), 仲内悠祐 (JAXA), 松永恒雄 (国立環境研), 高遠徳尚 (国立天文台), 廣井孝弘 (ブラウン大)

**17:11 O3-03 はやぶさ2 Optical Navigation Camera(ONC)によるサイエンス観測**

\*杉田精司 (東大新領域), 本田理恵 (高知大理), 亀田真吾 (立教大理), 諸田智克 (名大環境), 澤田弘崇 (JAXA), 本田親寿 (会津大), 鈴木秀彦 (立教大理), 小川和律, 飯島祐一, 白井慶 (JAXA), 山田学 (千葉工大), 中村良介 (産総研), 出村英裕, 平田成 (会津大), ONC サイエンスチーム

**17:22 O3-04 小惑星イトカワ粒子のサイズ分布・鉱物比率について**

\*矢田達, 安部正真, 岡田達明, 上相真之, 唐牛譲, 石橋之宏 (JAXA), 八亀彰吾 (東大理), 白井慶 (JAXA), 中村智樹 (東北大理), 野口高明 (茨大理), 藤村彰夫 (JAXA)

**17:33 O3-05 微小隕石試料における衝突変成組織の観察とイトカワ帰還粒子との比較**

\*八亀彰吾 (東大理/JAXA), 上相真之, 唐牛譲, 石橋之宏, 矢田達, 岡田達明, 安部正真, 藤村彰夫 (JAXA)

**17:44 O3-06 イトカワレゴリスと月レゴリスの比較による粒子表面の進化プロセスの考察**

\*松本徹 (阪大理), 土山明, 松野淳也 (京大理), 永野崇, 島田玲 (阪大理), 中野司 (産総研), 上杉健太郎 (JASRI)

**17:55 O3-07 小惑星イトカワ粒子中の空隙の微細構造**

\*土山明 (京大理), 松本徹, 永野宗 (阪大理), 松野淳也 (京大理)

**18:06 O3-08 自転運動と円軌道運動を考慮に入れた球状小天体の温度分布の逐次近似解**

\*関谷実, 下田昭仁 (九大理)

**18:17 O3-09 Sub-km サイズ地球近傍小惑星 2011 XA3 の高速自転**

\*浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 阿部新助 (台湾中央大), 大塚勝仁 (東京流星観測網)

**18:28 O3-10 土星リングの遠赤外線スペクトロスコピー**

\*森島龍司 (カリフォルニア大/JPL), Scott Edgington, Linda Spilker (JPL)

**10月25日**

**口頭発表セッション4 (惑星大気, 衝突科学I) 座長: 倉本圭 (北大理), 道上達広 (近畿大工)**

**8:45 O4-01 飛騨天文台 HOPS による金星上層雲偏光観測**

\*佐藤毅彦 (JAXA), 中串孝志 (和歌山大観光), 仲谷善一 (京大飛騨天文台), 木村かおる (科学技術館), 榎本孝之 (総研大), 細内麻悠 (東大理), 大月祥子 (専修大商)

8:56 O4-02 惑星大気探査を見据えた大気大循環モデルの構築に向けてー火星大気の場合

\*高橋芳幸 (神戸大理/CPS), 地球流体電脳倶楽部 dcmode1 プロジェクト

9:07 O4-03 火星境界層乱流の LES 実験

\*西澤誠也, 八代尚, 宮本佳明 (理化学研究所), 小高正嗣 (北大理), 高橋芳幸, 林祥介 (神戸大理/CPS), 富田浩文 (理化学研究所), 竹広真一 (京大理), 石渡正樹 (北大理/CPS), 中島健介 (九大理), 佐藤陽祐 (理化学研究所), 杉山耕一郎 (北大低温研/CPS), Team SCALE, 地球流体電脳倶楽部

9:18 O4-04 薄い回転球殻対流により引き起こされる表層の帯状流

\*佐々木洋平, 竹広真一 (京大理), 中島健介 (九大理), 林祥介 (神戸大理/CPS)

9:29 O4-05 木星の対流圏界面高度はどのように決まっているのか:放射対流平衡モデルを用いた解析

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

9:40 O4-06 粉体層への衝突貫入の数値シミュレーション

\*和田浩二 (千葉工大), 中村昭子 (神戸大理)

9:51 O4-07 高速粒子衝突による高空隙率ターゲットにできるトラック形状:弾丸強度と初期動圧との対応

\*岡本尚也, 中村昭子 (神戸大理), 黒澤耕介, 長谷川直 (JAXA), 土山明 (京大理), 池崎克俊 (阪大理)

10:02 O4-08 複数回衝突が及ぼす氷ターゲットの衝突破壊強度への影響

\*羽山遼, 荒川政彦 (神戸大理), 保井みなみ (神戸大自然)

10:13-10:28 休憩

**口頭発表セッション5 (衝突科学 II, 室内実験 I)** 座長: 和田浩二 (千葉工大), 山本聡 (国立環境研)

10:28 O5-01 レゴリスに対するインパクトの衝突破壊の程度

\*長岡宏樹, 中村昭子, 三軒一義 (神戸大理)

10:39 O5-02 カンラン岩ターゲットを用いた衝突実験破片の微細構造

\*島田玲 (阪大理), 土山明 (京大理), 道上達広 (近畿大工), 門野敏彦 (産業医科大医), 長谷川直 (JAXA)

10:50 O5-03 焼結雪への衝突におけるエジェクタ速度計測

\*鈴木絢子 (神戸大理/CPS), 荒川政彦 (神戸大理), 保井みなみ (神戸大自然)

11:01 O5-04 同サイズ微惑星の衝突破壊における破片速度分布

\*河本泰成 (神戸大理), 保井みなみ (神戸大自然), 寫生有理 (名大環境), 荒川政彦 (神戸大理)

11:12 O5-05 月、火星の縦穴と斜め衝突実験

\*道上達広 (近畿大工)

11:23 O5-06 ラブルパイル小惑星上のサイズ偏析に関する実験

\*Carsten Güttler (神戸大理/ブラウンシュバイク工科大), 中村昭子 (神戸大理), Jürgen Blum (ブラウンシュバイク工科大)

11:34 O5-07 ASTER によるマルチスペクトルデータを用いた地球衝突クレータ搜索

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

11:45 O5-08 粉体の熱伝導率に関する実験的研究:圧縮応力の影響

\*坂谷尚哉 (総研大/JAXA), 小川和律, 飯島祐一 (JAXA), 本田理恵 (高知大理), 田中智 (JAXA),

津田彰子（東大理／JAXA）

11:56-13:10 昼食

「月惑星探査の来る 10 年：第三段階について」

**口頭発表セッション6（室内実験 II）** 座長：小林憲正（横浜国立大工）

13:10 O6-01 岩石表面粗さと反射スペクトルの関係

\*鳥居大亮，佐伯和人（阪大理）

13:21 O6-02 カンラン石の粉体とカンラン岩との反射スペクトルの比較

\*丸山薫，佐伯和人（阪大理），大井修吾（京大人間環境）

13:32 O6-03 マグネタイトの高圧下磁気ヒステリシス測定実験：火星地殻磁気異常のソースについて

\*佐藤雅彦（東工大理工）、山本裕二（高知大海洋センター），西岡孝（高知大教育），小玉一人（高知大海洋センター），綱川秀夫（東工大理工），望月伸竜（熊本大先端機構），臼井洋一（JAMSTEC）

13:43 O6-04 彗星衝突によるアミノ酸の重合ー化学進化の原動力としてー

\*菅原春菜，三村耕一（名大環境）

13:54 O6-05 タイタン液体圏での有機物凝集体生成可能性の検証

\*河合純（横浜国大工），Seema Jagota（NASA Ames），大林由美子，金子竹男（横浜国大工），Bishun N. Khare（NASA Ames），David W. Deamer（カリフォルニア大），Christopher P. McKay（NASA Ames），吉村義隆（玉川大農），小林憲正（横浜国立大工）

14:05 O6-06 太陽系における基本鉱物の定義：三状態変化を示す鉱物

\*三浦保範（山口大）

14:16-14:26 休憩

**口頭発表セッション7（隕石）** 座長：田中今日子（北大低温研）

14:26 O7-01 ショックを受けた普通コンドライト隕石の U-Pb システムティックス

\*寺田健太郎（阪大理），伊勢田大輔（広大理）

14:37 O7-02 CV, CO 隕石中のネフェリン・ソーダライトの形成過程と水質変成作用の関係

\*松本恵，留岡和重，瀬戸雄介（神戸大理），三宅亮（京大理）

14:48 O7-03 Tagish Lake 炭素質隕石中の細粒コンドリュールリム：母天体上のプロセスによる形成の検証

\*高山亜紀子，留岡和重（神戸大理）

14:59 O7-04 X 線 CT による炭素質コンドライトの三次元構造と化学組成の分析

\*上梶真之（JAXA），上杉健太郎，竹内晃久，鈴木芳夫（JASRI），土山明（京大理）

15:10 O7-05 コンドリュール形成モデル：H<sub>2</sub> 解離を含む微惑星弧状衝撃波

\*山崎布美香，中本泰史（東工大理工）

15:21 O7-06 コンドリュールメルトの多成分凝固数値実験：コンドリュールは急冷したのか？

\*三浦均，塚本勝男（東北大理）

15:32-16:35 **ポスターセッション2**

16:35-17:30 **総会**

17:30-17:35 休憩

17:35-18:25 **最優秀研究者賞特別講演：** 座長：長沢真樹子（東工大理工）

**ST01 惑星形成における衝突破壊の重要性**

小林浩（名大理）

18:30-20:30 **懇親会**

於：コンベンションホール 4 階ラウンジ

**10 月 26 日**

**口頭発表セッション 8（室内実験 III, 惑星形成論 I）** 座長：中本泰史（東工大理工），城野信一（名大環境）

8:45 O8-01 軟 X 線照射による模擬星間有機物の疎水化と生命の起源

\*小林憲正，川本幸徳，岡部拓人，江藤碧，金子竹男，大林由美子（横浜国大工），三田肇（福岡工大工），神田一浩（兵庫県大），吉田聡（放医研）

8:56 O8-02 分子動力学シミュレーションにおける水分子の凝縮過程の再現と付着確率の評価

\*田中今日子（北大低温研），河野明男（JAMSTEC），田中秀和（北大低温研）

9:07 O8-03 ダスト生成に重要な吸着係数と表面自由エネルギーの同時決定

\*木村勇氣（東北大理），田中今日子（北大低温研），三浦均，塚本勝男（東北大理），稲富裕光（JAXA）

9:18 O8-04 Subaru/HiCIAO による観測で明らかになった原始惑星系円盤の非軸対称構造

\*武藤恭之（工学院大），Carol A. Grady（NASA/GSFC），橋本淳（国立天文台），深川美里（阪大理），SEED/HiCIAO/IRCS/AO188 チーム

9:29 O8-05 乱流円盤中における水の重水素比進化

\*古家健次，相川祐理（神戸大理），野村英子（京大理），Franck Hersant，Valentine Wakelam（ボルドー大）

9:40 O8-06 原始惑星系円盤におけるダストの静的圧縮過程

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

9:51 O8-07 円盤磁気乱流による微惑星離心率の増幅と微惑星成長への影響

\*奥住聡（名大理），Chris Ormel（カリフォルニア大），廣瀬重信（JAMSTEC）

10:02 O8-08 温度上昇イベントにともなう氷ダストアグリゲイトの進化

\*城野信一（名大環境）

10:13 O8-09 原始惑星系円盤内の氷微惑星の熱進化

\*脇田茂（国立天文台），関谷実（九大理）

10:24 O8-10 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

\*前島直彦，渡邊誠一郎（名大環境）

10:35-11:50 **ポスターセッション 3**

11:50-13:00 昼食

**口頭発表セッション 9（惑星形成論 II）** 座長：野村英子（京大理），樋口有理可（東工大理工）

13:00 O9-01 ホットジュピターが存在する系での微惑星集積の N 体計算

\*押野翔一，堀安範（国立天文台）

13:11 O9-02 中間質量星周りの惑星分布：ガス惑星砂漠とホットジュピターの起源について

\*堀安範（国立天文台），大宮正士（東工大理工），Gregory Laughlin（カリフォルニア大）

13:22 O9-03 太陽系外における木星型連惑星の形成

\*落合裕道, 井田茂, 長沢真樹子 (東工大理工)

13:33 O9-04 原始惑星系円盤中における固体原始惑星へのダスト降着流

\*谷川享行 (北大低温研/CPS), 小林浩 (名大理), 町田正博 (九大理)

13:44 O9-05 周惑星円盤へのダストの流入について

\*丸田有希人 (九大理), 谷川享行 (北大低温研/CPS), 町田正博 (九大理)

13:55 O9-06 巨大惑星による微惑星一時捕獲過程

\*末次竜, 大槻圭史 (神戸大理)

14:06 O9-07 周惑星円盤から受けるガス抵抗による微惑星捕獲

\*藤田哲也, 大槻圭史 (神戸大理), 谷川享行 (北大低温研/CPS)

14:17 O9-08 地球型惑星形成における巨大惑星の移動と共鳴クロッシングの影響

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

14:28 O9-09 N 体シミュレーションによる巨大惑星存在下での地球型惑星集積過程の研究

\*荻原正博, 犬塚修一郎, 小林浩 (名大理)

14:39 O9-10 恒星遭遇によるオールト雲彗星個数の減少

\*樋口有理可 (東工大理工), 小久保英一郎 (国立天文台)

14:50-15:05 休憩

**口頭発表セッション10 (惑星形成論 III, 系外惑星)** 座長: 谷川享行 (北大低温研), 玄田英典 (東大理)

15:05 O10-01 地球型惑星形成後期の衝突デブリ円盤について

\*玄田英典 (東大理), 小林浩 (名大理), 小久保英一郎 (国立天文台)

15:16 O10-02 隕石重爆撃期における金星、地球、火星の大気進化

\*黒澤耕介 (JAXA), 濱野景子 (東大理), 杉田精司 (東大新領域), 門野敏彦 (産業医科大医)

15:27 O10-03 水の散逸を考慮した地球型惑星の進化

\*小玉貴則, 玄田英典, 阿部豊 (東大理), Kevin Zahnle (NASA Ames)

15:38 O10-04 惑星集積過程を伴うコア形成過程シミュレーションによって示唆される初期地球内部構造

古市幹人, \*中川貴司 (JAMSTEC)

15:49 O10-05 地球型水惑星表層における気候

\*門屋辰太郎 (東大理), 田近英一 (東大新領域)

16:00 O10-06 地球型惑星が保持する内部海に対して高圧氷が与える影響

\*上田翔士, 佐々木貴教 (東工大理工)

16:11 O10-07 水に富むスーパーアースの質量・半径関係に対する熱進化と質量散逸の影響

\*黒崎健二 (東工大理工), 生駒大洋 (東大理), 堀安範 (国立天文台)

16:22 O10-08 スーパー地球のマントル対流: 断熱圧縮の効果

\*立浪千尋 (東工大理工), 小河正基 (東大理), 土屋卓, 亀山真典 (愛媛大理)

16:33 O10-09 ドップラー法による重い G-K 型巨星の惑星探索

\*大宮正士 (東工大理工), 比田井昌英 (東海大), 佐藤文衛 (東工大理工), 泉浦秀行 (国立天文台)

16:44 O10-10 スーパーアース GJ1214b の近赤外線 3 色同時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), 永山貴宏 (名大理), 末永拓也 (総研大), 福井暁彦 (国立天文台), 生駒大洋 (東大理), 中島康, 西山正吾, 田村元秀 (国立天文台)

## 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10終了までに撤収して下さい。

### ポスターセッション1：1日目(10/24) 10:45~11:50

#### S01 月のマリウス丘における形成史

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

#### S02 崩れた月衝突盆地:粘弾性変形だけでは説明困難

\*鎌田俊一(東大理), 杉田精司(東大新領域), 阿部豊(東大理), 原田雄司(東大地震研), 石原吉明(国立環境研), 並木則行(千葉工大), 岩田隆浩(JAXA), 花田英夫, 荒木博志(国立天文台)

#### S03 super-Earth の進化:水素大気散逸による質量・半径の進化について

\*黒川宏之(東工大理工/マックス・プランク研), Lisa Kaltenegger(マックス・プランク研/ハーバードスミソニアンセンター), Helmut Lammer(オーストラリア科学アカデミー), Nikolai V. Erkaev(ロシア科学アカデミー)

#### S04 斜長岩質地殻形成条件から制約する月バルク組成と月の起源

\*酒井理紗, 永原裕子, 小澤一仁(東大理), 橘省吾(北大理)

#### S05 K-Ar 法を用いた惑星探査におけるその場年代計測法の開発

\*長勇一郎, 三浦弥生(東大理), 杉田精司(東大新領域)

#### S06 土星系の衛星におけるE環粒子の堆積物からわかるE環の性質とエンセラダスの火山活動史

\*平田直之, 宮本英昭(東大理)

#### S07 周惑星円盤ガスの降着過程についての理論的解析

\*藤井悠里, 奥住聡(名大理), 谷川享行(北大低温研/CPS), 犬塚修一郎(名大理)

#### P1-01 月の海の玄武岩組成の時空間変化

\*加藤伸祐(名大理), 諸田智克(名大環境), 大嶽久志, 大竹真紀子(JAXA)

#### P1-02 SELENE による衝突クレーターの観測に基づいた月玄武岩層の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(名大環境), 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)

#### P1-03 月面 swirl 地域の分光解析と特徴量マップの作成:月探査機かぐや/SP スペクトルから鉱物情報を抽出・可視化した新しいデータの作成に向けて

\*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), 横田康弘, 山本聡(国立環境研), 大竹真紀子(JAXA), 寺菌淳也, 林祐樹(会津大), 佐々木晶(国立天文台)

#### P1-04 かぐや LRS データに基づく月表側の火成活動の再解釈

\*押上祥子(国立天文台), 渡辺志穂, 山口靖(名大環境), 山路敦(京大理), 小林敬生(韓国地質研), 熊本篤志, 小野高幸(東北大)

#### P1-05 かぐやによる 5MHz での月表面アルベドの全球マッピング

\*熊本篤志, 中川広務, 小野高幸(東北大), 小林敬生(韓国地質研), 春山純一(JAXA)

#### P1-06 月の速中性子分布と平均原子質量数分布

\*晴山慎(JAXA), 藤林ゆかり(早稲田大理工), 唐牛譲(JAXA), 小林進悟(放医研), 山下直之, Robert C. Reedy(PSI), Olivier Gasnault(トゥールーズ大), 長谷川信行(早稲田大理工)

#### P1-07 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, 小川和律, 小林直樹, 飯島祐一, 榎本樹明, 星野健, 大槻真嗣(JAXA),



木村淳（北大理／CPS）

**P1-08 SELENE-2 月探査ローバ搭載用 LIBS の設計開発**

\*亀田真吾（立教大理），石橋高，小林正規，並木則行，荒井朋子（千葉工大），坂本進，奥村裕，前田憲吾（立教大理）

**P1-09 SELENE-2 に向けたその場元素分析のためのガンマ線・中性子分光計の開発状況(2)**

\*三谷烈史（JAXA），小林進悟（放医研），唐牛譲（JAXA），荒井朋子，武田弘（千葉工大），長谷川信行（早稲田大理工），GNS Team

**P1-10 SELENE-2 月広帯域地震計の開発状況**

\*小林直樹，白石浩章，小川和律（JAXA），山田竜平（国立天文台），飯島祐一（JAXA），Tanguy Nebut, Sebastien de Raucourt（パリ地物研），Marco Bierwirth, Roll Reinhard（マックスプランク研），Philippe Lognonne（パリ地物研），鹿熊英昭（中央大理），セレーネ 2 月広帯域地震計チーム

**P1-11 惑星探査機搭載に向けた LIBS の開発**

\*坂本進，奥村祐，前田憲吾，亀田真吾（立教大理），石橋高，並木則行，荒井朋子，小林正規（千葉工大）

**P1-12 木星系探査ミッション JUICE と日本の貢献**

\*佐々木晶（国立天文台），藤本正樹（JAXA），国際共同木星総合探査ワーキンググループ

**P1-13 BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション:MMO プロジェクト最新状況報告**

\*早川基，前島宏則（JAXA），BepiColombo MMO プロジェクトチーム

**P1-14 MGS 電波掩蔽観測データを用いた火星大気 CO<sub>2</sub> の過飽和現象に関する研究**

\*野口克行（奈良女子大理）

**P1-15 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）

**ポスターセッション 2 : 2 日目 (10/25) 15:32~16:35**

**P2-01 「はやぶさ 2」中間赤外カメラ(TIR)の科学観測**

\*岡田達明（JAXA），福原哲哉（北大理），田中智（JAXA），田口真（立教大理），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），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），荒井武彦（国立天文台），滝田隼（東大理），坂谷尚哉（総研大／JAXA）

**P2-02 小惑星 1999JU3 の熱慣性に対する TIR の観測精度と天体表層状態の推定について**

\*滝田隼（東大理／JAXA），田中智，岡田達明（JAXA），坂谷尚哉（総研大／JAXA）

**P2-03 はやぶさ 2 サンプラー開発の現状とリターンサンプルの科学**

\*橋省吾（北大理），澤田弘崇（JAXA），岡崎隆司（九大理），はやぶさ 2 サンプラーチーム

**P2-04 はやぶさ 2SCI(小型搭載型衝突装置)で目指す衝突の科学**

\*荒川政彦（神戸大理），門野敏彦（産業医科大医），和田浩二（千葉工大），高木靖彦（愛知東邦大），平田成（会津大），本田理恵（高知大理），小林正規（千葉工大），白井慶，早川雅彦，岡本千里，小川和律，矢野創，中澤暁，飯島祐一，佐伯孝尚，今村裕志，澤田弘崇（JAXA）

**P2-05 はやぶさ2ONCの較正試験準備状況と現状**

\*武井亮斗，亀田真吾，鈴木秀彦，佐藤允基（立教大理），はやぶさ2ONCチーム

**P2-06 小惑星の PSF 測光:はやぶさ2探査対象天体 1999JU3 のライトカーブの再評価**

\*松浦隆裕，北里宏平（会津大），黒田大介（国立天文台），関口朋彦（北海道教育大），阿部正真（JAXA）

**P2-07 はやぶさ帰還粒子の国際公募研究への配布状況と今後の計画**

阿部正真, \*矢田達, 岡田達明, 上相真之, 唐牛讓, 石橋之宏 (JAXA), 八亀彰吾 (東大理), 向井利典, 藤本正樹, 藤村彰夫 (JAXA)

**P2-08 固体天体内部探査用地中レーダーHGPRの開発状況**

\*松本岳大 (東大新領域), 宮本英昭 (東大理), 西堀俊幸 (JAXA), 真鍋武嗣 (大阪府大工), 春山純一 (JAXA), 伊藤琢博 (大阪府大工)

**P2-09 IKAROS-ALADDIN 観測データから示唆される内惑星領域ダスト分布の微細構造**

\*平井隆之 (総研大), 矢野創, 岡本千里, 尾川直子, 長谷川直, 田端誠 (JAXA), 藤井雅之 ((株)FAMサイエンス), 田中真 (東海大学), 岩井岳夫 (東大工), 奥平恭子 (会津大) **【講演キャンセル】**

**P2-10 小天体周りのダストの運動について**

\*千秋博紀 (千葉工大), 木村宏 (神戸大理/CPS), 山本哲生 (北大低温研/CPS), 和田浩二, 小林正規, 並木則行, 松井孝典 (千葉工大)

**P2-11 海王星衛星 Nereid の高精度測光観測**

\*寺居剛 (国立天文台), 伊藤洋一 (兵庫県大)

**P2-12 北大 1.6m ピリカ望遠鏡による大学教育用太陽系天体分光カタログの作成**

\*関口朋彦 (北海道教育大), 河北秀世 (京産大理), 渡辺誠 (北大農)

**P2-13 小天体表面の岩塊の姿勢と砂礫の支持力の関係についての検討**

\*青木隆修, 中村昭子 (神戸大理)

**P2-14 レゴリス層への低速度斜め衝突実験**

\*木内真人, 中村昭子 (神戸大理)

**P2-15 分化天体模擬物質への衝突実験**

\*岡本千里 (JAXA), 荒川政彦 (神戸大理), 長谷川直 (JAXA)

**P2-16 等質量氷ダスト球の衝突破壊実験: 破片速度分布の空隙率依存性**

\*寫生有理 (名大環境), 荒川政彦 (神戸大理)

**P2-17 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, 玄田英典 (東大理), 小林浩 (名大理), 田中秀和 (北大低温研), 阿部豊 (東大理)

**P2-18 火星氷河・凍土を模擬した高濃度岩石粒子を含む氷の静的圧縮強度: 強度に対する岩石粒子の粒径の影響**

\*保井みなみ (神戸大自然), 荒川政彦 (神戸大理)

**P2-19 鉛直加振による液状化と流体輸送の実験的研究: 浅部に低浸透率層がある場合**

\*安田奈央, 隅田育郎 (金沢大自然)

**P2-20 炭素質コンドライト母天体でみられる Na 交代変成に関する実験的研究**

\*市村隼, 瀬戸雄介, 留岡和重 (神戸大理)

**P2-21 アエンデ隕石に含まれる特異な暗色包有物の形成過程**

\*酒井碧, 留岡和重, 瀬戸雄介 (神戸大理)

**P2-22 始原的コンドライト Yamato81020 (CO3.0) に含まれる水質変成の痕跡を示すクラスト**

\*森家智嗣, 留岡和重, 瀬戸雄介 (神戸大理), 三宅亮 (京大理)

**P2-23 カンラン石の水熱変成実験によるコンドライト母天体の水質変成環境の推定**

\*宇津木綾香, 森永慎也, 留岡和重, 瀬戸雄介 (神戸大理)

**ポスターセッション3 : 3日目 (10/26) 10:35~11:50**

**P3-01 陽子線照射による模擬星間物質からのアミノ酸前駆体生成とその安定性**

\*江藤碧, 金子竹男, 大林由美子 (横浜国大工), 福田一志, 小栗慶之 (東工大理工), 吉田聡 (放医研), 小林憲正 (横浜国大工)

**P3-02 輻射流体計算に基づくファーストコアの化学的性質**

\*古家健次, 相川祐理 (神戸大理), 富田賢吾 (総研大/国立天文台/プリンストン大), 松本倫明 (法政大人間環境), 西合一矢 (国立天文台), 富阪幸治 (総研大/国立天文台), Franck Hersant, Valentine Wakelam (ボルドー大)

**P3-03 原始惑星系円盤からの水分子輝線モデル**

\*野村英子 (京大理), Catherine Walsh (クイーンズ大), Dominikus Heinzeller (NZ 気象サービス社), Tom J. Millar (クイーンズ大)

**P3-04 原始惑星系円盤の非一様密度分布によるダストの捕獲とその最大密度**

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

**P3-05 原始惑星系円盤内ダスト層におけるストリーミング不安定性による乱流状態**

\*石津尚喜 (国立天文台), 犬塚修一郎 (名大理), 関谷実 (九大理)

**P3-06 ガス・ダスト二相流体の熱的不安定とダスト集積**

\*渡辺圭亮, 中本泰史 (東工大理工)

**P3-07 渦における微惑星形成が起こるタイムスケールと渦によってもたらされるダストのサイズ分布変化**

\*河村恵里, 渡邊誠一郎 (名大環境), 稲葉知士 (早稲田大国際教養)

**P3-08 火星の寡占的成長の N 体計算と W/Hf 同位体比進化への応用**

\*森島龍司 (カリフォルニア大), Gregor Golabek (リヨン高等師範校), Henri Samuel (パイロイト大)

**P3-09 原始惑星系円盤内における惑星捕獲によるスーパーアース系の形成**

\*松本侑士, 長沢真樹子, 井田茂 (東工大理工)

**P3-10 楕円軌道連星まわりの周連星系円盤の長時間進化 一円盤密度構造の影響一**

\*今枝佑輔 (東工大総合理工)

**P3-11 低面密度の原始太陽系星雲中でのエッジワース・カイパーベルト形成**

\*田村隆哉 (京大理), Chiang Eugene (カリフォルニア大), 野村英子 (京大理) **【講演キャンセル】**

**P3-12 中低質量星周りの地球型惑星の初期進化**

\*濱野景子, 阿部豊, 玄田英典 (東大理)

**P3-13 Observed-Minus-Calculated 法(O-C 法)を使った B 型準矮星を周る惑星と褐色矮星の探査**

\*小谷朋美, Terry D. Oswalt (フロリダ工科大)

**P3-14 太陽系外惑星のスピン推定**

\*河原創 (首都大理工)

**P3-15 小惑星 Nereus の YORP 効果**

\*北里宏平 (会津大), 阿部新助 (台湾中央大), 石黒正晃 (ソウル大), 石橋之宏, 阿部正真 (JAXA)

## 月のマリウス丘における形成史

### The formation history of the Marius Hills region on the Moon

○今枝隆之介<sup>1,2</sup>, 春山純一<sup>2</sup>, 大竹真紀子<sup>2</sup>, 岩田隆浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

はじめに：嵐の大洋に属するマリウス丘は、月面における最大の火山複合体の一つである。この地域に多く見られる火山学的地形について詳細な解析を行う事は、月面上に存在する同様の火山複合体や全球的に起こった火成活動から月の熱史を解明する際の重要な手がかりとなる。マリウス丘は同時に、月周回衛星かぐやに搭載された地形カメラ（TC）の画像から Haruyama et al. (2009b)によって縦孔構造が発見された領域でもある。特異とも言える縦孔形成イベントは、マリウス丘全体の火成活動に密接に関連がある可能性が高く、いずれにせよマリウス丘全体について詳細な形成史を整理する重要性は高い。

**先行研究：**Besse et al. (2011)は、インドの月探査機 Chandrayaan-1 に搭載された M<sup>3</sup>が取得した鉱物マッピング画像（解像度 240m/pix）を用い、次のような過程を経て現在に至ったと結論付けた。

- ① 高カルシウム輝石から成る溶岩から台地（低いドームを伴う）が形成。
- ② 台地上に高いドームが形成。
- ③ かんらん石に富む嵐の大洋の溶岩形成に伴って台地の周囲が覆われ、台地上でかんらん石に富んだ溶岩の噴出イベントが部分的に発生。
- ④ マリウスクレータ底にかんらん石に富んだ溶岩が噴出。

**本研究の目的：**我々は月周回衛星かぐやと LRO 等による最新の月探査データを活用し、マリウス丘全体の地形や地質、鉱物についてより詳細な解析を行った。本研究では、これまでのマリウス丘の形成史を検証すると共に、より正確な形成史の構築を行い月の火成活動の解明を目指す。本講演では、月周回衛星かぐやに搭載されたマルチバンドイメージャ（MI）の高解像度画像（20m/pix）による地質区分の再検討、地形カメラ（TC）の画像データ（10m/pix, ステレオ視）によるそれらの地質区分域における地形学的特徴の把握及びクレータ年代学的評価によって再整理を行ったマリウス丘全体の形成史について発表を行う。

## 崩れた月衝突盆地：粘弾性変形だけでは説明困難

鎌田俊一<sup>1</sup>, 杉田精司<sup>1</sup>, 阿部豊<sup>1</sup>, 原田雄司<sup>1</sup>, 石原吉明<sup>2</sup>, 並木則行<sup>3</sup>, 岩田隆浩<sup>4</sup>, 花田英夫<sup>5</sup>, 荒木博志<sup>5</sup>

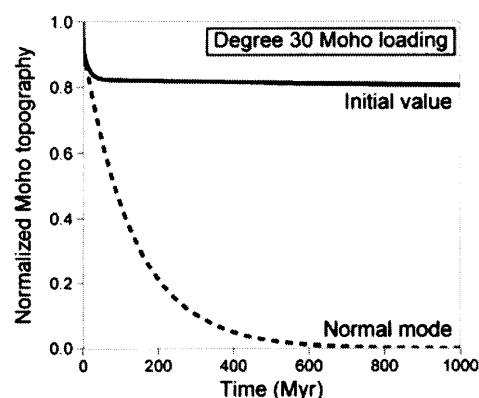
<sup>1)</sup>東大、<sup>2)</sup>国立環境研、<sup>3)</sup>千葉工業大学、<sup>4)</sup>JAXA/ISAS、<sup>5)</sup>国立天文台

固体惑星・衛星の地殻やマントルは、地質学的時間スケールにおいて粘弾性体として振る舞う。岩石の粘性は温度に非常に敏感であるため、惑星の粘弾性変形状態の観測からは、その天体の熱進化に関する知見を得ることが出来る。特に、形成後約 10 億年という初期の熱状態を記憶していると考えられる、月の衝突盆地の長期変形 (i.e.,  $10^8 - 10^9$  yr) に関する詳細な研究は極めて重要である [e.g., 1, 2]。

古い衝突盆地の多くは、地形や重力場では明確な同心円構造が見られない。従来、このような顕著な地形緩和の実現条件は、単純な 1 層粘性流体モデルや 6 層粘弾性体モデルなどで解析されてきた [e.g., 1, 3]。これらの解析から、高いモホ面温度 (>1300 K) がマグマオーシャン固化から数億年維持されたことにより、地殻下部で激しい粘性水平流動が起きたことが推定されてきた。また、月面には崩れた盆地が多く観測されていることから、地殻水平流動は衝突盆地の主要な変形プロセスであると広く考えられてきた。しかしながら、(A) 盆地変形中の月の熱進化や (B) 粘性の鉛直連続構造といった、盆地の変形に決定的な寄与をする可能性が高い要素を含んだ詳細な変形計算はこれまでなされてこなかった。そのため、月の衝突盆地に観測される地形緩和に必要な温度構造の推定には、未だに非常に大きな不確定性があると言わざるを得ない。

本研究では、(1) 月周回衛星「かぐや」で得られた詳細な重力場を元にした地殻厚モデルと (2) 上記(A)(B)の要素を考慮した、より現実的な内部構造モデルを用いた粘弾性変形計算を行った。その結果、起伏緩和は先行研究よりも著しく緩慢であり、崩れた盆地地形を説明するのに必要な最低地温勾配は従来推定値より ~50 % 以上も高い必要があることが判明した。この地温勾配は、地殻が完全に固化するよりも前に盆地が形成しなくてはならないほどに熱い内部構造が必要であることを示している。また、長期粘弾性変形だけでは Lomonosov-Fleming 盆地のような極めて平坦な地殻構造は再現できないことも明らかとなった。これらの結果は、固体地殻の粘性水平流動が衝突盆地の主要な変形プロセスではないことを示唆している。

先行研究と大きな差を生んだ主要素を明らかにすることは、月の初期熱史や衝突盆地の変形史を理解する上で必須である。先行研究と本研究は、内部構造モデルに加えて計算手法も異なる。そこで、(1) 異なる内部構造モデルを用いた計算と、(2) 先行研究で用いられたノーマルモード (NM) 法 [e.g., 4] による変形計算プログラムを作成し、我々の用いた初期値法 [e.g., 5] による計算結果と比較した。その結果、計算手法の違いが決定的であることが分かった (右図)。また、NM 法は長い時間スケール (i.e.,  $>10^8$  yr) において計算誤差が極めて大きいことが判明した。したがって、先行研究は NM 法を用いたために長期の粘性緩和を過大評価していたことが分かった。更に、この NM 法の計算誤りは長期変形計算において根源的であり、本研究で扱った月の衝突盆地以外の長期変形問題についても再考を要することが分かった。



図：計算手法の違いによるモホ面緩和の差。内部構造と荷重条件は同一である。

[References] [1] Solomon et al., 1982, *JGR*, **87**. [2] Zhong & Zuber, 2000, *JGR*, **105**. [3] Mohit & Phillips, 2006, *JGR*, **111**. [4] Peltier, 1974, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**. [5] Kamata et al., 2012, *JGR*, **117**. [6] Zhong, 1997, *JGR*, **102**.

## super-Earth の進化 : 水素大気散逸による質量-半径の進化について

○黒川宏之<sup>1,2</sup>, Lisa Kaltenegger<sup>2,3</sup>, Helmut Lammer<sup>4</sup>, Nikolai V. Erkaev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学, <sup>2</sup>Max-Planck-Institut fuer Astronomie, <sup>3</sup>Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, <sup>4</sup>Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, <sup>5</sup>Institute of Computational Modeling, Russian Academy of Sciences

系外惑星 GJ1214b や Kepler-11 惑星系のような低質量低密度の惑星は、水素を主体とする大気をまとった岩石惑星や氷を主成分とする惑星であると考えられている。我々は惑星の大気・内部構造計算と大気散逸・熱進化計算を行うことで、水素大気をまとった惑星の大気量の進化、および半径の進化を調べた。惑星の組成や質量、中心星からの距離、中心星タイプへの依存性も明らかにした。これらの結果から、観測される系外惑星の大気散逸量を示すとともに、観測される系外惑星の質量-半径から得られる示唆を議論する。

### Evolution of super-Earths:

Time evolution of mass-radius relations caused by hydrogen atmospheric escape

○Hiroyuki Kurokawa<sup>1,2</sup>, Lisa Kaltenegger<sup>2,3</sup>, Helmut Lammer<sup>4</sup>, Nikolai V. Erkaev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Max-Planck-Institut fuer Astronomie, <sup>3</sup>Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, <sup>4</sup>Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, <sup>5</sup>Institute of Computational Modeling, Russian Academy of Sciences

The discovery of planets like GJ1214b and planets in the Kepler-11 system shows a new class of planets, with no analog in our Solar System. These low mass & small density planets can be interpreted as rocky planets with massive hydrogen atmosphere or icy composition planets.

In our calculations we focus on super-Earths with hydrogen atmosphere, which can be formed by nebula gas capture in their formation phase or degassing. Intense mass loss is expected for these planets by thermal atmospheric escape. We developed a combined atmospheric escape and thermal evolution model of such planets and explore their mass loss history, as a function of planetary mass & composition, orbital distance, and central stellar type.

We derive a resulting mass-radius over time that can constrain the nature of the observed planets.

# 斜長岩質地殻形成条件から制約する月バルク組成と月の起源

## The bulk composition of the Moon and its origin constrained by the formation conditions of the anorthosite crust

○<sup>1</sup>酒井 理紗, <sup>1</sup>永原 裕子, <sup>1</sup>小澤 一仁, <sup>2</sup>橘 省吾

<sup>1</sup>東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>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( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 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た。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を用いた熱力学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(mafic鉱物のMg#, 斜長石のAn値)、(4)地殻鉱物の微量元素組成、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多い必要があること、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 量は1.4倍より少ないことが結論された。この結果は、月を形成した最後の巨大衝突において、衝突天体がコンドライト的であったとすると、原始地球はすでに分化してFeO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ に富んだ玄武岩質の初期地殻を持っていた可能性を示唆する。

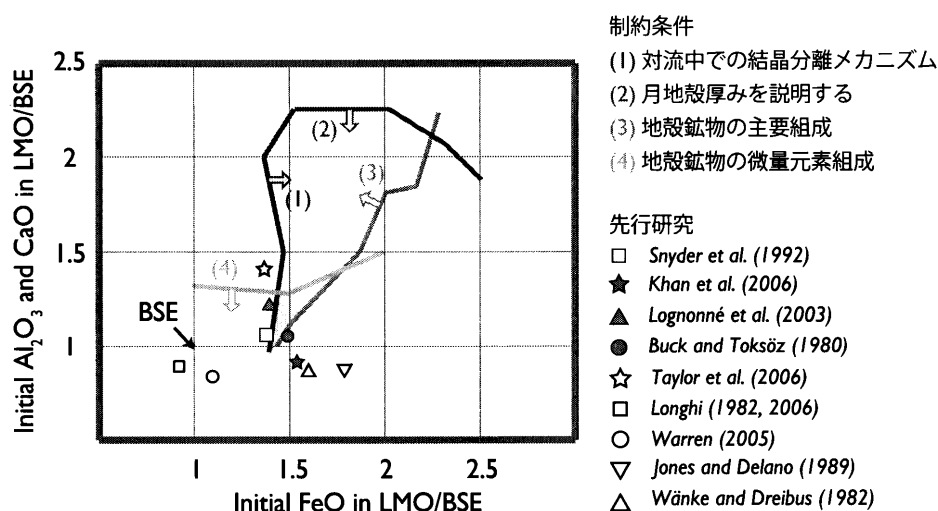


図1 本研究で制約された月バルク組成(～月マグマオーシャン(LMO)組成)範囲(グレーの網掛け部分)と、先行研究の月バルク組成。地球マントル(bulk silicate Earth: BSE)組成で規格化。

## K-Ar 法を用いた惑星探査におけるその場年代計測法の開発

○長 勇一郎<sup>1</sup>, 三浦 弥生<sup>2</sup>, 杉田 精司<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学 地震研究所, <sup>3</sup> 東京大学 複雑理工学専攻

**惑星年代学:** 惑星表面の年代は、月のクレータ密度とアポロ・ルナ試料の年代との対応付けによって得られたクレータ生成曲線によって推定されている[e.g., Neukum, 1983]. しかしこれを火星に適用した年代学モデルは、月の年代学モデルに基づき、重力効果や衝突天体の軌道要素・衝突確率の違いに対する解析的研究に立脚して推定しているに過ぎず[Ivanov, 2001], 絶対値にして 10 億年ほどの不定性が内在している[Doran et al., 2004]. そのため火星の気候進化や火成活動進化の描像にも大きな不定性が伴う. この不定性を取り除き、火星進化の定量的な描像を得るためには、採取された地質ユニットとの対応が明らかな試料の年代を計測して、火星の年代モデルを実証的に制約することが必要である.

**その場年代計測法:** そこで我々は、 $^{40}\text{K}$  が  $^{40}\text{Ar}$  へ壊変することを利用したカリウム-アルゴン法と呼ばれる年代測定法を用いて、惑星着陸探査において岩石の固化年代をその場計測する装置の開発を進めている. その場年代計測は惑星表面での繰り返し測定が可能であるという特長を持ち、持ち帰る試料の選定にも使えることから、サンプルリターンミッションとも相補的な役割を果たす. 本手法では、試料となる岩石へ高エネルギー密度のレーザーパルス照射して試料の一部を蒸発・プラズマ化させることにより、試料の同一部分から K と Ar を同時に抽出する. K は LIBS(レーザー誘起プラズマ発光分光法)によって、Ar は QMS(四重極質量分析計)によって計測する. レーザーによるスポット分析では高空間分解能の測定が可能であるため、単一の岩石試料から K の多い鉱物と少ない鉱物とを撃ち分け、アイソクロンを引けるという特徴がある. このアイソクロン計測は従来に Beagle 2 や Curiosity 探査機で用いられた全岩分析手法[Talboys et al., 2009; Swindle et al., 2003]では不可能であり、年代測定の信頼性を飛躍的に高める効果を持つ.

**検出限界:** 我々は先ず、これまでに製作してきた原理実証用装置を用いて K および Ar 定量の較正実験を行った. 24 個の  $\text{K}_2\text{O}$  濃度既知の試料(30 ppm~13 wt%)の LIBS 計測から、 $\text{K}_2\text{O}$  の検出限界は 4 ppm であり、 $\text{K}_2\text{O}=1$  wt%, 7 wt%における定量の相対誤差はそれぞれ 15%, 10%と見積もられた. また、既知量の Ar をシステム内に導入することで  $^{40}\text{Ar}$  に対する QMS の感度を決定し、放出された Ar 量の較正を行った. 真空ラインの残留ガスレベルで規定される検出限界は  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  それぞれに対して  $1 \times 10^{-11}$ ,  $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ STP}$  であった. さらに、ある量の K を含む岩石がある年代だけ経過した時に試料内に蓄積する  $^{40}\text{Ar}$  の量と、今回得られた  $^{40}\text{Ar}$  の検出限界、および LIBS による K の検出限界を比較することによって、火星における計測の実現性を評価した. その結果、Mars Exploration Rover が Gusev クレータで発見したような  $\text{K}_2\text{O}$  濃度(1000~10000 ppm)の岩石がそれぞれ 10~1 億年程度の年代を持っていれば、本装置を用いた計測が可能であることが明らかになった.

**年代既知試料の測定:** 以上の準備に基づき、本手法を用いて年代既知試料の年代値を初めて算出した. その結果、Hornblende 試料(1.74 Ga,  $\text{K}_2\text{O}=0.93$  wt%)に対して  $2.7 \pm 0.5$  Ga, Biotite 試料 (1.80 Ga,  $\text{K}_2\text{O}=7.1$  wt%)に対して  $3.7 \pm 0.4$  Ga という年代値が得られた. 現状では年代値の過大評価の傾向が大きい、この要因として、Ar がレーザーアブレーションによって試料に生じたクレータの内部から放出されただけではなく、壁面から約 100-200  $\mu\text{m}$  試料中に入った領域においてもレーザーの熱により拡散・放出された可能性がある. 正確な年代を算出するためにはクレータ壁面からの脱ガスを抑えることが有効な手法となると考えられる. これは、レーザーパルスの照射周波数を下げることによって試料への熱の蓄積を抑えることが有効な対策となる可能性を示唆している.



# 土星系の衛星における E 環粒子の堆積物からわかる E 環の性質とエンセラダスの火山活動史

○平田直之<sup>1</sup> 宮本英昭<sup>1</sup>

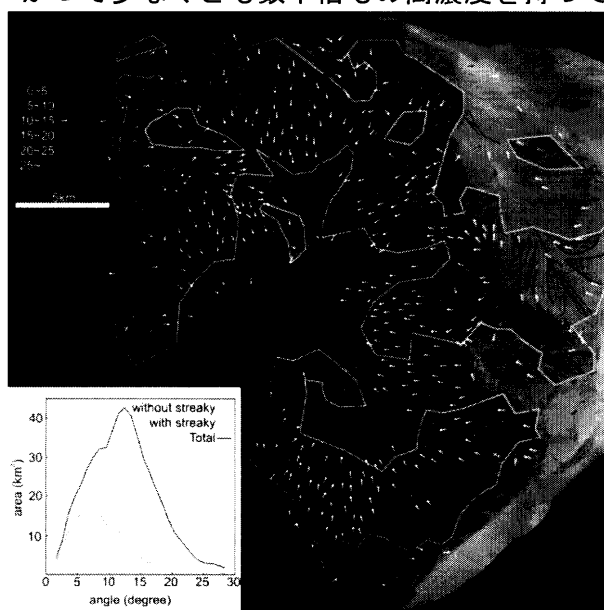
<sup>1</sup> 東京大学総合研究博物館

エンセラダスは活発な火山活動を持ち、地下には海が存在すると考えられている。このためエンセラダスの火山活動の期間や活動度は、アストロバイオロジーの観点からも強い関心が持たれている。土星のE環はその起源がエンセラダスの火山噴出物と考えられており<sup>1</sup>、その中に位置する衛星はE環によって汚染されている<sup>2,3</sup>と言われてきた。私たちはこの点に着目し、衛星表面に堆積したE環の痕跡を徹底的に調査した。その結果これまで全く注目されてこなかった小型衛星において顕著にE環の堆積物が認められ、この堆積物が衛星表層に大きな影響を持つことが明らかになった。例としてディオーネのL4点に位置するヘレネでは、先行半球のみが異様に滑らかな表面を持ち、筋状の構造を持つことを私たちは新たに発見した。そこでヘレネの形状モデルを独自に構築し、ここから求まる表層重力と表面形状とを詳細に比較した結果、これら筋構造は重力方向と驚くほど一致しており、かつ勾配の急な斜面にのみ見られることを発見した(図)。これは堆積したE環粒子が地すべりを生じていること、その粒子間の内部摩擦が極めて小さいことを示す重要な結果である。同様に他のE環領域の小型衛星も異様に滑らかな表面を持つことがわかった。A環領域の衛星は静電氣的な力によって表層が滑らかに保たれていることを私たちは既に報告していた<sup>4</sup>が、E環領域の衛星の場合、環粒子の堆積によるものであることがわかった。これら堆積物上のクレーター年代から、E環による衛星の汚染が始まったのは1億年を超えないことを明らかにした。同等の解析をE環においてデータが取得されている全ての衛星に適用することで、①どの衛星でも類似した汚染が生じていること、②しかし堆積状況が衛星によって異なること、③この差異は理論的に求まるE環粒子と衛星との相対速度の違いで極めてうまく説明できることなども明らかにした。また衛星表層のE環堆積物の量と現在のE環の濃度を比較した結果、現在のE環の濃度では堆積物の量は説明できず、かつて少なくとも数十倍もの高濃度を持っていた可能性が高いことが示された。これらの発見は、エンセラダスの火山活動は一時的なもので、ごく最近急激に活発化したものであるということを示唆している。

## References

- <sup>1</sup> Kempf, S., et al. 2008, Icarus, 193, 420-437.
- <sup>2</sup> Verbiscer, A., et al. 2007, Science, 315, 815.
- <sup>3</sup> Filacchione, G., et al. 2010, Icarus, 206, 507-523.
- <sup>4</sup> Hirata, N., and H. Miyamoto 2012, Icarus, 220, 160-113.

図 ヘレネの先行半球と表面重力の方向(矢印)。矢印の色は勾配を表している。矢印の向きが衛星表面に存在している筋状構造(青線)とよく一致しており、かつ勾配の急な斜面にのみ見られる。左下のグラフは筋状構造のある領域(黄)とない領域(赤)それぞれの勾配分布である。筋状構造がある領域は急勾配に多いのがわかる(背景の画像はNASA 提供 N1687120437)。



## 周惑星円盤ガスの降着過程についての理論的解析

○藤井悠里<sup>1</sup>、奥住聡<sup>1</sup>、谷川享行<sup>2</sup>、犬塚修一郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学、<sup>2</sup>北海道大学低温研/CPS

本研究では周惑星円盤の面密度の決定を目指し、周惑星円盤において磁気乱流がガス降着に重要であるかどうかを調べた。

母惑星の赤道面に公転軌道面をもち、ほぼ円軌道で回転してる衛星は規則衛星と呼ばれる。周惑星円盤はこの規則衛星の形成現場であると考えられており、衛星形成を理解するためには、周惑星円盤進化の理解が不可欠である。しかし、周惑星円盤の降着メカニズムが詳しく分かっていないため、ガス降着率や面密度もよく分かっていないのが現状である。一般には、磁気回転不安定性(Magnetorotational Instability: MRI) が最も有力なガス降着メカニズムであると考えられているが、MRI が起こる領域の大きさは、例えばガスの密度分布に強く依存する。

周惑星円盤の現実的な密度分布を求めるには、原始惑星系円盤から周惑星円盤への流入質量フラックスを調べ、これを用いて周惑星円盤の面密度分布を求めることが望ましい。Machida et al. (2010)などによって円盤の形成過程が調べられ、さらに円盤への流入質量フラックスについては Tanigawa et al. (2012) によって詳細な解析が行われた。本研究ではこの質量フラックスを用いて円盤の拡散方程式を解き、周惑星円盤の面密度分布を求めた。そして、Fujii et al. (2011) で開発した計算法を用いて円盤の電離度を調べ、さらに Okuzumi & Hirose (2011) の結果を用いて、MRIによる降着率を求めた。しかし、周惑星円盤の降着初期にはMRI 起源の乱流は発生しないという結果が得られ、MRIのみを降着メカニズムと仮定すると、与えた降着率と矛盾なく面密度を決めることは不可能だった。

この結果は、少なくとも周惑星円盤の進化初期にはMRI以外のメカニズムがガス降着を支配しており、それによって円盤の面密度が決まるということを示唆している。他の降着メカニズムの候補としては渦状腕状の密度波が考えられ、惑星のHill圏の外側に発生した密度波がどの程度周惑星円盤に影響を与えるかを調べるのは非常に重要であると考えられる。

### References

- Fujii, Y. I., Okuzumi, S., & Inutsuka, S., 2011 ApJ, 743, 53  
 Machida, M. N., Kokubo, E., Inutsuka, S., & Matsumoto, T., 2010, MNRAS, 405, 1227  
 Okuzumi, S. & Hirose, S., 2011 ApJ, 742, 65  
 Tanigawa, T., Ohtsuki, K., & Machida, M. N., 2012, ApJ, 747, 47

## SELENE 統合サイエンスに向けたデータ解析と最新成果

Data analysis and the latest results for Integrated Sciences by SELENE

○岩田隆浩<sup>1)</sup>、春山純一<sup>1)</sup>、大竹真紀子<sup>1)</sup>、晴山 慎<sup>2)</sup>、北條勝己<sup>2)</sup>、大嶽久志<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、<sup>2)</sup>宇宙航空研究開発機構月・惑星探査プログラムグループ

Takahiro Iwata<sup>1)</sup>, Junichi Haruyama<sup>1)</sup>, Makiko Ohtake<sup>1)</sup>

Makoto Hareyama<sup>2)</sup>, Katsumi Hohjoh<sup>2)</sup>, Hisashi Otake<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency,

<sup>2)</sup>JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency,

月周回衛星 SELENE は、月の元素分布・鉱物分布・表層構造・環境・重力分布の観測を目的とした 14 の科学観測機器を用いて、2007-2009 年の運用期間にデータを取得した。個々の機器が目的とする各々のサイエンスに対して、複数の機器のデータを用いて月の起源と進化の解明に向けた研究を、統合サイエンスと称する。我々は、SELENE による月の起源と進化に対する新たなモデルを構築すべく、統合サイエンスに向けたデータ解析を行っている。

例えば、RSAT（リレー衛星中継器）を用いた月裏側の重力場観測結果は、月の二分性が内部の構造・温度分布にも及んでいることを示唆し（Namiki, *et al.* 2009）、これと LALT（レーザ高度計）データを併せて推定された地殻厚さの分布（Ishihara, *et al.*, 2009）は、月の誕生直後に内部構造の二分性を形成する要因が存在したことを示唆している。また、TC（地形カメラ）による火成活動の年代分布（Morota *et al.*, 2010）、MI（マルチバンドイメージャ）による鉱物分布（Ohtake *et al.*, 2012）、GRS（ガンマ線分光計）による放射性元素分布（Kobayashi *et al.*, 2010、他）は、高地地殻形成からマグマオーシャン形成に至る地殻形成・進化の様子を表している。他方では、月の形成期課程で地球はどのように影響したか、地殻の進化過程で物質の再配分がどのように行われたか、後期重爆撃が月の進化にどれだけの規模の影響を与えたかなど、定量的に解明すべき課題も残されている。これらの解明を確実に実行するために、解析のストラテジー、用意すべきツールと、最新科学成果について論じる。

## かぐやデータアーカイブの現状

○晴山 慎、北條 勝巳、大嶽 久志、岩田 隆浩、大竹 真紀子、春山 純一、山本幸生  
宇宙航空研究開発機構

月探査機「かぐや」は、2007年11月から2009年6月までの間、月極周回軌道にて月の観測を行った[1]。「かぐや」に搭載された14の科学観測機器で観測されたデータ（ハイビジョンカメラ（HDTV）を除く）は、「かぐや(SELENE)データアーカイブ」[2]よりインターネットを通じて公開されている。かぐやデータは2009年9月から一般に公開され、研究・教育目的の場合、自由にダウンロードし利用することができる。

かぐやデータアーカイブからは、レベル2プロダクトと呼ばれる59種類、約25テラバイトの観測データがダウンロード可能である。ファイルフォーマットは、NASAのPDS(The Planetary Data System)[3]を参考に作られており、ほぼ互換性があるものとなっている。公開以来、これまでに約32万ファイル、約24テラバイトのデータがダウンロードされ利用されている。

2009年に公開を開始した「かぐやデータアーカイブ」は、2012年3月にシステムリニューアルを行い、宇宙航空研究開発機構(JAXA)/宇宙科学研究所(ISAS)のDARTS(Data ARchives and Transmission System)[4]内から公開されている。システムリニューアルにともない、ユーザ利便性向上のための改良を施すことにより、リニューアル後のダウンロード数は大幅に伸びている。

また、レベル2プロダクトの他、月の重力場研究用として主衛星「かぐや」と2つの子衛星「おきな」「おうな」の追跡データを別途2012年5月より公開されている[5]。HDTVデータについては、現在JAXAデジタルアーカイブス[6]より一部が公開されているほか、科学利用を目的として、HDTVの全データをDATRSより公開する予定である。

本報告では、システムリニューアルによって新しくなった機能等を紹介するとともに、現在登録されているデータの紹介および今後の予定について報告を行う。

[1] M.Kato et al. Space Sci. Rev.154 (2010) 3-19.

[2] かぐやデータアーカイブ: <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/>

[3] The Planetary Data System. <http://pds.nasa.gov/>

[4] T.Miura et al. ASPC 314 (2004) 22. <http://darts.isas.jaxa.jp/>

[5] かぐや追跡データ:

<http://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/selene/rise/index.html.ja>

[6] JAXA デジタルアーカイブス: <http://jda.jaxa.jp/>

# 地球-月系における過去 30 億年の天体衝突史と クレータ年代学モデルの修正

○諸田 智克<sup>1</sup>, 春山 純一<sup>2</sup>, 本田 親寿<sup>3</sup>, 大竹 真紀子<sup>2</sup>, 平田 成<sup>3</sup>,  
出村 裕英<sup>3</sup>, 山本 聡<sup>4</sup>, 松永 恒雄<sup>4</sup>, 横田 康弘<sup>4</sup>, 中村 良介<sup>5</sup>, 石原 吉明<sup>4</sup>,  
渡邊 誠一郎<sup>1</sup>, 古本 宗充<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>3</sup>会津大学,  
<sup>4</sup>国立環境研究所, <sup>5</sup>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。本研究では「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を調査した。

図 1 はアポロ岩石試料の放射年代とクレータ数密度と関係 (クレータ年代学関数) を示す。過去のクレータカウンティング研究からは [e.g., Neukum 1983], 過去 30 億年間のクレータ年代学関数は比例関係 (つまり、クレータ生成率一定) で表わされると考えられてきた。しかし高解像度画像を用いた小クレータのカウンティングの結果、新鮮クレータ放出物上のクレータ数密度は過去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 2)。

小天体の軌道進化シミュレーションによると、小天体数の時間変化は Kohlrausch 関数 (引き延ばされた指数関数) [Dobrovolskis et al. 2007], または対数関数 [Minton & Malhotra 2010] で表わされる。しかし過去 40 億年の月面クレータ年代学関数はそれらの関数に従わず、2つの指数関数の組合せで表現できることがわかった。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られる。

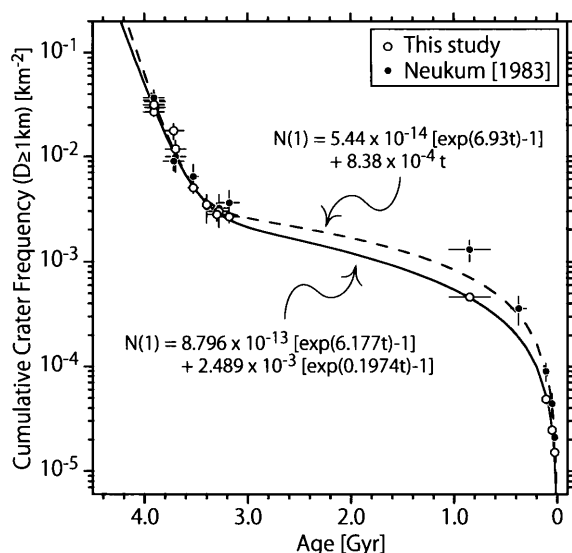


図 1 月試料の放射年代とクレータ数密度の関係 (クレータ年代学関数)。

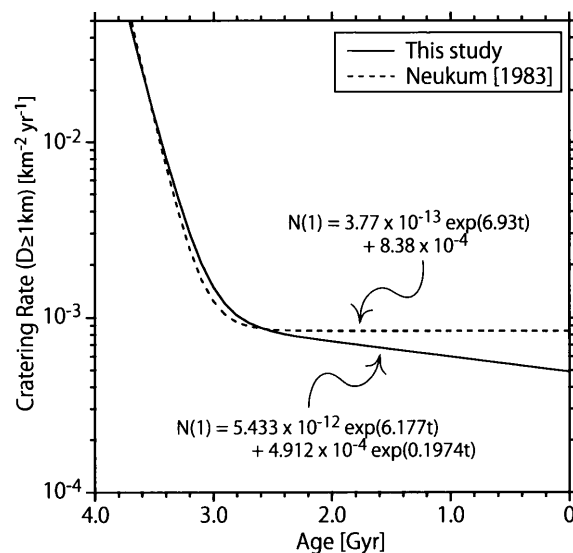


図 2 クレータ年代学関数の時間微分により算出したクレータ生成率の時間変化。

## 月の海の玄武岩噴出年代と化学組成変遷

○唐牛讓<sup>1</sup>, 小林進悟<sup>2</sup>, 晴山慎<sup>1</sup>, 長岡央<sup>3</sup>, 平居悠<sup>3</sup>, 鎌田俊一<sup>4</sup>, 諸田智克<sup>5</sup>, 大竹真紀子<sup>1</sup>, 長谷部信行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>放射線医学総合研究所, <sup>3</sup>早稲田大学, <sup>4</sup>東京大学, <sup>5</sup>名古屋大学

月の海の火山活動は比較的長い間（～15 億年前まで）続いていた可能性が、クレータ密度計測により示唆されている[例えば 1]。また、比較的新しい噴出年代を示す溶岩流ユニットは PKT (Procellarum KREEP Terrane) [2] 領域に集中している[1]。PKT 領域は Th や K などの天然放射性元素を豊富に含む KREEP 物質が濃集した地域であるため[例えば 3]、海の玄武岩噴出のための熱源として天然放射性元素が関わっていた可能性が示唆されている[例えば 4]。さらに、KREEP 物質との関連が示唆されるアポロ試料 (KREEP basalt, Mg-suite および alkali suite) や月隕石 (NWA773) の結晶化年代と化学組成 (Rb/Sr 比) の間に相関があることが示唆されており[5]、月の火山活動に KREEP 物質が寄与を及ぼした可能性は高い。これに対して、アポロ計画によって持ち帰られた海の玄武岩試料の REE 存在度パターンは溶岩流噴出に KREEP 成分が寄与していないことを示している[例えば 6]。そこで本研究では、月周回衛星「かぐや」による遠隔探査で得られた海の溶岩流ユニットそれぞれの噴出年代と化学組成の間の相関関係を調べることを目的とした。

溶岩流の噴出年代はクレータ年代[1, 7 など]を用い、化学組成は「かぐや」搭載ガンマ線分光計 (KGRS) のデータを用いた。KGRS の空間分解能は最も良い条件で 60～70km であり、数百 km サイズのユニットは十分に識別可能である。空間分解能と同等かそれ以下の大きさで入り組んだ形状をしている溶岩流ユニットの組成を見積もることも可能であるが、注意すべき点がある。解析対象の溶岩流ユニットが、Th 濃度が月面で最も高いホットスポットと呼ばれる地域 (フラマウロ, アリスティリスなど) の近傍であったり、ユニットの面積が KGRS の空間分解能に比べて極端に小さくなったりすると、そのユニット周辺地域からくるガンマ線の寄与が相対的に大きくなるために、着目したユニットの組成を見積もることはしだいに難しくなる。本講演では、KGRS による面積・形状を考慮した溶岩流ユニット組成の計算法、および溶岩流の噴出年代に対するマグマの組成変化について報告するとともに、月の火山活動における熱源と KREEP 物質との因果関係について考察する。

[1] Morota et al., EPSL 302, 255–266, 2011. [2] Jolliff et al., JGR 105, 4197–4216, 2000. [3] Kobayashi et al., SSR DOI 10.1007/s11214-9650, 2010. [4] Wieczorek and Phillips, JGR 105, 20417–20430, 2000. [5] Borg et al., nature 432, 209–211, 2004. [6] Heiken et al., Lunar Sourcebook, 1991. [7] Hiesinger et al., JGR 105, 29239–29275, 2000.

## 衝突メルトの分布・形状解析による 中央丘形成速度の推定

○栗山祐太郎<sup>1,2</sup> 大竹真紀子<sup>2</sup> 春山純一<sup>2</sup> 岩田隆弘<sup>2</sup> 平田成<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京大 <sup>2</sup>宇宙研 <sup>3</sup>会津大

**導入:** 中央丘を伴う衝突クレーターについて、衝突メルトの分布や形状などから中央丘形成速度の制約が試みられてきた。地球のクレーターの観察によると、クレーターの底に存在する衝突メルトシートは中央丘の周囲を变形を受けずに囲んでいるため、衝突メルトの粘性が上がる前に中央丘が隆起したと考えられていた [1, 2]。しかし、Jackson や Tycho などの月面クレーターの最近の研究で、衝突メルトが底だけでなく中央丘上にも存在することが徐々に明らかになってきた [3, 4]。中央丘の斜面に分布する衝突メルトの存在は、中央丘隆起時にメルトがすでに高い粘性を持っていたことを示すものであり、メルトの厚さや斜度などの形状や分布について詳しく解析することで、中央丘形成速度について新たに制約を与えることができる。本研究では月面クレーター中央丘上の衝突メルトの流動形態に着目し、かぐやのマルチバンドイメージャ(MI)によるスペクトルデータと標高情報、Lunar Reconnaissance Orbiter の高分解能力カメラ (LROC) による組成・形状情報を解析し、その結果から中央丘形成速度について考察する。

**手法:** 最初に、衝突メルトの流動形態が存在する場所を全て洗い出し、次にそれら流動形態から次に挙げる手法に適したものを選定した。まず、MI データと LROC データを用いて、斜面の方向と衝突メルトの流動の方向の関係を確認し、流動と中央丘斜面形成の時間的因果関係を考察した。次に、冷却のタイムスケールを推定するため、衝突メルトローブの地形情報から冷却当時の降伏応力・粘性を見積もり [5, 6, 7]、粘性に対応するメルト温度の関係を求めた選考研究 [8] を用いて衝突メルト残留時の温度を見積もり、さらにその温度から冷却速度についての先行研究 [1] を用いて、衝突メルト冷却時間を推定した。

**結果と考察:** 衝突メルトは中央丘上斜面に分布しており、衝突メルトローブの方向と斜面方向が一致していることから、メルトは斜面に沿って流れたことが明らかになった。これは中央丘形成後もある程度はメルトが流動可能であったことを示している。一方で、メルトローブは中央丘斜面上で停止しており、このことから中央丘形成と衝突メルトの冷却はほとんど同じタイムスケールで起こったと考えられる。また、見積もった降伏強度・粘性は 1000~1100°C のメルトに対応しており、少なくとも 100 秒のオーダーで冷却したことが推定される。

### 参考文献:

[1] Onorato P. I. K. et al. 1978 *Geophys. J. R* 117, [2] Melosh H. J. & Ivanov B. A. 1999. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 27, 385-415. [3] Kuriyama Y. et al. 2012. 43<sup>rd</sup> LPSC abstract [4] Ohtake M. et al. 2009. *Nature*, 461, 236-241. [5] Hulme G. 1974. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 39, 361-383. [6] Moore H. J. et al. 1978. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 9th, 3351-3378. [7] Moore, H. J., & Ackerman, J. A. 1989. *NASA Tech. Memo.* TM-4130, 387-389. [8] Öhman T. & Kring D. A. 2012. *Geophys. J. R* 83, 2789-2798

## クレータ一年代を用いた雨の海北西部に位置する リッジの形成年代制約

### Formation age of a mare ridge in northwestern Mare Imbrium

○嵩由美子<sup>1</sup>, 山路敦<sup>1</sup>, 佐藤活志<sup>1</sup>, 諸田智克<sup>2</sup>, 春山純一<sup>3</sup>, 松永恒雄<sup>4</sup>, 大竹真紀子<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>京都大学理学研究科, <sup>2</sup>名古屋大学大学院環境学研究科,

<sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>4</sup>国立環境研究所環境計測研究センター

月の mare ridge や straight rille は、海の溶岩ユニットだけでなく、高地をも変形させているものや複数の溶岩ユニットを変形させているものがあることから、多くがテクトニクな構造であると考えられる。従って、それらの構造形成年代を明らかにすることは月の造構応力史を推定する上で重要であり、構造形成の活発な時期や期間を制約することで熱史の理解へと繋がる。月の mare ridge や straight rille の形成年代に関しては、各溶岩ユニットのクレータ一年代を求めた先行研究(例えば, Morota et al. 2011, Hiesinger 2000)の結果を用いて、3.6Ga よりも若い溶岩ユニットでは見られない straight rille の形成は約 3.6Ga までに終了し、以降は様々な年代を示す溶岩ユニット上で見られる mare ridge の形成のみが行われたと一般に考えられている。また近年では、1Ga 以降に形成されたと考えられる lobate scarp の存在から、mare ridge 形成は現在も続いているともいわれている。このように構造形成に関する大まかな年代制約はなされているが、各 mare ridge や straight rille の形成年代は明らかになっていない。そこで、mare ridge で変形している溶岩ユニットは mare ridge 形成前に、mare ridge で堰きとめられている溶岩ユニットは mare ridge 形成後に形成されたと考えられることを利用して、mare ridge の形成年代制約を試みた。

本研究では、月探査衛星 SELENE(かぐや)によって得られた TC データ, MI データ, DTM を用いて、溶岩ユニットを区分し、mare ridge に堰き止められているように見える溶岩ユニットと、mare ridge で変形している溶岩ユニットの存在を確かめ、それぞれのクレータ一年代を求めて雨の海北西部に位置する mare ridge の形成年代制約を行った。その結果、対象とした mare ridge の形成年代は約 3.2~2.0Ga であった。

今後は、複数の mare ridge や straight rille の形成年代を制約し、構造の形成順序や形成頻度について明らかにしたいと考えている。



月の表側に分布する火砕性堆積物の化学組成と結晶度の推定

# Composition and crystallinity of pyroclastic deposits on the lunar near side

○有本龍三<sup>1,2</sup>、大竹真紀子<sup>2</sup>、春山純一<sup>2</sup>、岩田隆浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院、<sup>2</sup>宇宙科学研究所

月の体積の約 90%を占める月のマンツルの化学組成を知ることは重要である。マンツル組成を知る手がかりとして、アポロミッションにより月面から採取された火砕性粒子（ガラスまたはガラス内部に結晶が成長している粒子）が挙げられる。火砕性粒子は、マンツル深部（300～500km）から揮発性物質とともに月面上に爆発的に噴出したマグマの液滴が急冷し形成された。このマグマは上昇速度が大きく、分化や周囲の岩石との混合がほぼ無いため、火砕性粒子はマンツルの組成を保持していると考えられる。この粒子が月面上に堆積している低反射率領域を Dark Mantle Deposit (DMD)と呼び、その化学組成を知ることでマンツル組成情報を得ることができる。また、粒子の結晶化の程度とマグマ液滴の冷却速度に相関があり、マグマ冷却速度はマグマ中の揮発性物質の含有量により変化するため、粒子の結晶度を推定することは揮発性物質の含有量決定につながる。しかし、過去の DMD の研究では観測波長域や空間分解能が原因で、DMD の詳細な化学組成や結晶度は検証できていない。

本研究では、全球的なマンツルの組成・揮発性物質の含有量を知るために、月周回衛星「かぐや」に搭載された Multiband Imager (MI)観測データを基に、DMD の中で分布面積の大きい DMD (Aristarchus Plateau, Sinus Aestuum, Rima Bode) の化学組成と粒子の結晶度を推定し、各 DMD 間におけるそれらの均一・不均一性について議論した。手法として、MI データの反射率 (750nm) マップと鉱物およびガラスの吸収の特徴を反映する RGB 画像 (R : 950nm, G : 1050nm, B : 1250nm での吸収の深さに対応) を作成し、周囲の mare basalt と DMD 領域を区別した。次に観測した DMD の反射率と吸収のスペクトル形状を、アポロ試料の火砕性ガラス(TiO<sub>2</sub> 量の小さい順に green, yellow, orange)やガラス内部に結晶を持つ black beads の吸収形状と比較し、DMD の化学組成 (TiO<sub>2</sub> 量) を推定した。さらに、Kobayashi(2010)が開発した BI-plot (ガラスの吸収中心である 1000nm 付近の吸収形状を利用した火砕性粒子分類法) を作成し、mixing model (Denevi, 2008)を用いて結晶度 (ガラスと結晶度の高い black beads の混合量) を推定した。

解析結果から、Aristarchus Plateau DMD と Rima Bode DMD は同程度の低い結晶度(0～30%)を持つが TiO<sub>2</sub> 量は異なり、前者 (yellow glass に富む) は後者 (orange glass に富む) より TiO<sub>2</sub> 量が低いことが示された。一方、Sinus Aestuum DMD と Rima Bode DMD の TiO<sub>2</sub> 量はどちらも High-Ti であるが、DMD 間の距離が近い(約 250km)にも関わらず結晶度が異なり、前者は後者よりも結晶度が高く black beads に富むことが確認された。また、各 DMD は周囲の mare basalt と異なる組成を持つ傾向を示した。これらの結果からマンツル組成や揮発性物質の含有量に水平方向または鉛直方向の不均一性が存在する可能性が示唆される。

## 月高地地殻の化学組成から推定する高地地殻形成過程

Formation mechanism of the lunar highland crust estimated  
based on the observed chemical composition

○大竹真紀子<sup>1</sup>、武田弘<sup>2</sup>、松永恒雄<sup>3</sup>、横田康弘<sup>3</sup>、春山純一<sup>1</sup>、諸田智克<sup>4</sup>、  
石原吉明<sup>3</sup>、山本聡<sup>3</sup>、小川佳子<sup>5</sup>、廣井孝弘<sup>6</sup>、唐牛譲<sup>1</sup>、佐伯和人<sup>7</sup>  
<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構、<sup>2</sup>千葉工大、<sup>3</sup>国立環境研究所、<sup>4</sup>名古屋大、  
<sup>5</sup>会津大、<sup>6</sup>ブラウン大、<sup>7</sup>大阪大

M. Ohtake<sup>1</sup>, H. Takeda<sup>2</sup>, T. Matsunaga<sup>3</sup>, Y. Yokota<sup>3</sup>, J. Haruyama<sup>1</sup>, T. Morota<sup>4</sup>,  
Y. Ishihara<sup>3</sup>, S. Yamamoto<sup>3</sup>, Y. Ogawa<sup>5</sup>, T. Hiroi<sup>6</sup>, Y. Karouji<sup>1</sup>, and K. Saiki<sup>7</sup>  
<sup>1</sup>JAXA/ISAS, <sup>2</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>3</sup>NIES, <sup>4</sup>Nagoya University,  
<sup>5</sup>The University of Aizu, <sup>6</sup>Brown University, <sup>7</sup>Osaka University

これまでに月周回衛星”かぐや”により取得したデータを用いて、月高地地殻中に  
ほぼ 100% 斜長石からなる純粋な斜長岩が普遍的に存在すること[1, 2]や、高地地殻中  
の苦鉄質鉱物含有量とそれら苦鉄質鉱物の Mg#(Mg/(Mg+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、アポロ試料分析結果を中心に従来考えられてきた鉄  
に比較的富んだ値(Mg#=50~70)に比べて高いMg#の領域が裏側に存在する事[3]、Mg#と  
同じくマグマの分化度を示すTh濃度が裏側で最も低い事[4]が報告されている。これら  
結果は、従来の月高地地殻組成の推定(斜長岩中に 10-20%程度の苦鉄質鉱物を含み、  
苦鉄質鉱物は Mg#が比較的低い)を基に想定されてきた地殻形成過程に修正が必要で、  
月裏側が表側に比べて未分化なマグマオーシャンから形成するような過程が必要であ  
ることを示唆している。

本研究では、苦鉄質鉱物含有量やMg#の高地地殻内での深さ方向変化を把握し、そ  
れにより表裏二分性を持つ高地地殻の形成過程をより詳細に推定することを目的とし  
た。解析手法は、あらかじめ作成した各緯度・経度における苦鉄質鉱物の量とMg#マッ  
プを用い[3]、1)直径20km以上のクレータおよび盆地における各半径とイジェクタ(ク  
レータ外側かつ2半径以内領域と定義)の平均苦鉄質鉱物含有量およびMg#の関連、2)  
各盆地における盆地リムからの距離と苦鉄質鉱物含有量およびMg#の関連(盆地リムに  
近いほど地殻深部からの掘削物質となる法則を利用)を求めた。

解析の結果、地殻中では深度が増加するにつれ苦鉄質鉱物の含有量が減少し、Mg#  
は増加する傾向が見られた。今回解析した盆地による掘削深度は最高で50km程度に達  
すると推定され下部地殻に相当することから、今回得られた苦鉄質鉱物含有量の月表層  
から下部地殻50km程度までの深さ方向変化は、月下部地殻が深部ほどマフィック鉱物  
に富むとする従来の研究結果[5, 6]とは異なる結果である。またMg#も、単純なマグマ  
オーシャンからの斜長石浮揚による地殻成長の場合に想定される深さ方向変化とは逆  
の傾向を示している。これら結果の解釈として、地殻の成長過程で再熔融等を受け単純  
な深部方向への成長ではないと考えるのか、もしくは地殻形成後の隕石衝突等による攪  
拌による影響と考えるのか、今後Mg#とTh濃度の関係等も用いて検討が必要である。

[1] Ohtake, M. et al. (2009) *Nature* 461, 236-240. [2] Yamamoto, S. et al. (2012) 39, L13201. [3] Ohtake,  
M. et al. (2012) *Nature Geoscience* 5, 384-388. [4] Kobayashi, S. et al. (2012) *Earth Planeta. Sci. Lett.*  
(in print). [5] Spudis, P. et al. (2012) *Proc. Lunar Sci. Conf.* 5<sup>th</sup>, 197-210. [6] Tompkins, S. and Pieters,  
C. M. (1999) *Meteoritics & Planetary Sci.*, 34, 25-41.

## 月隕石 DH0 1428 の希ガス同位体組成

○三浦弥生<sup>1</sup>、岡崎隆司<sup>2</sup>、山口亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学・地震研、<sup>2</sup> 九州大学・理・地球惑星科学、<sup>3</sup> 国立極地研究所

DH0 1428 は、2006 年にオマーンの砂漠で発見された月隕石で、様々な鉱物片やクラスト (KREEP 的クラストも少量含む) からなる角礫岩である [1]。Zhang et al. [2] は、それら岩石・鉱物片がガラス質マトリックスに埋まっていることやマトリックス内に微小空隙が見られることからレゴリス角礫岩の特徴を示すと指摘している。レゴリス角礫岩は天体表層で衝突・攪拌されながら形成されるので太陽風を含むことが特徴である。本研究では DH0 1428 の希ガス同位体分析を行い、太陽風希ガスの存在やその他の起源の希ガス成分について調べた。

希ガス分析は、1-2mg の試料を用いて段階加熱法により行った。試料加熱温度は、#1 (1.14 mg) は、300, 600, 1000, 1800° C の 4 steps、#2 (1.60 mg) は、400 から 1800° C まで 13 steps、#3 (1.72 mg) は、1800° C の 1 step とした。各温度 step について He から Xe までの全希ガス同位体測定を行った。

DH0 1428 は、いずれの分析試料も太陽風希ガスを含有していた。試料間での違いはわずかに見られるが小さい。太陽風希ガス濃度は、月レゴリス角礫岩についてのこれまでの報告値の範囲内であるが、He 量が相対的に少なく全岩の  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  比 (0.40-0.56) は他の試料に比べて 1 桁程度低い。全岩での He, Ne, Ar 同位体組成は、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比を除いて典型的な太陽風の値に近い ( $^3\text{He}/^4\text{He} = (3.0-3.8) \times 10^{-4}$ ,  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 12.06-12.09$ ,  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 0.186-0.190$ )。全岩  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比は 2.9-3.1 である。1000°C 以下では高い  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比 (最大で 37) を示し、 $^{40}\text{K}$  起源  $^{40}\text{Ar}$  が放出されていると思われるが、その  $^{40}\text{Ar}$  量は全岩量の数%以下である。大部分の  $^{40}\text{Ar}$  は parentless  $^{40}\text{Ar}$  であると考えられ (parentless  $^{40}\text{Ar}$  については [3], [4] 参照)、[3] で示されている同位体比-年代対応曲線にあてはめるならば、DH0 1428 の太陽風は約 20 億年前に捕獲されたものと推測される。ただし、He/Ne 元素比、および  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  同位体比も僅かに、他の月隕石で見られる値より低いことから、太陽風捕獲後に何らかの加熱の影響を受けていたことが示唆される。また、宇宙線照射起源希ガスは太陽風起源希ガスに隠されてほとんど見えないため照射年代決定は難しい。

References: [1] Bunch et al. (2006) *Meteoritics & Planetary Science* 41, A31; Hidaka et al. (2010) *Meteoritics & Planetary Science* 45, A81 など. [2] Zhang et al. (2009) *Meteoritics & Planetary Science* 44, A226. [3] Eugster et al. (2001) *Meteoritics & Planetary Science* 36, 1097-1115. [4] Ozima et al. (2004) *Icarus* 170, 17-23.

## Is there water ice of more than 20% on the floor of Shackleton Crater at Lunar South Pole?

Junichi Haruyama<sup>1</sup>, Satoru Yamamoto<sup>2</sup>, Yasuhiro Yokota<sup>2</sup>, Makiko Ohtake<sup>1</sup>, and Tsuneo Matsunaga<sup>2</sup> : <sup>1</sup> Institute of Space and Astronautical Science / JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshino-dai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan. <sup>2</sup> Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan.

The inside of the lunar south-pole Shackleton crater (SC) was expected to be a cold trap of amounts of volatiles, especially water ice, because it receives almost no direct sunlight. Zuber et al.<sup>1</sup> observed the crater with the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) and reported the reflectance of both floors and walls of SC for LOLA 1000 nm beams to be as much as 50%, considerably higher than that of the surrounding terrain. They asserted that the high reflectance of SC's inner surfaces could be explained by a dearth of space weathering by micrometeorite bombardment, or by more than 20% water ice coverage.

The LRO Lyman Alpha Mapping Project (LAMP) observation has been interpreted as meaning that at most ~2% water frost covers the SC inside<sup>2</sup>. Optical image analysis of the Terrain Camera aboard SELENE also suggested less than a few percent, or totally lack, of water ice on SC's floor, even assuming the same albedo for the floor and inner wall<sup>3</sup>. As found from observation of Spectral Profiler, higher latitudes are relatively occupied by fresh materials, showing brighter reflectance than that at lower latitudes<sup>4</sup>. The brighter inside of SC should be explained by the distribution of bright, fresh plagioclase, probably very bright PAN that has been found globally on the Moon by Spectral Profiler and Multiband Imager aboard SELENE<sup>4-6</sup>, rather than by water ice. More than 20% water ice deposits<sup>1</sup> would be fantastic but is implausible.

### Reference

1. Zuber M. T. et al., "Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole", *Nature* **486**, 378-382 (2012).
2. Gladstone G. R. et al., "Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions", *J. Geophys. Res.* **117**, E00H04, doi:10.1029/2011JE003913 (2012).
3. Haruyama, J. et al., "Lack of Exposed Ice Inside Lunar South Pole Shackleton Crater", *Science* **322**, 938-939 (2008).
4. Yokota Y. et al., "Lunar photometric properties at wavelengths 0.5-1.6  $\mu\text{m}$  acquired by SELENE Spectral Profiler and their dependency on local albedo and latitudinal zones", *Icarus* **215**(2), 639-660 (2011).
5. Matsunaga, T. et al., "Discoveries on the lithology of lunar crater central peaks by SELENE Spectral Profiler", *Geophys. Res. Lett.* **35**, L23201, doi:10.1029/2008GL035868 (2008).
6. Ohtake M., et al., "The global distribution of pure anorthosite on the Moon", *Nature* **461**, 236-240 (2009).
7. Yamamoto, S. et al., "Massive layer of pure anorthosite on the moon", *Geophys. Res. Lett.*, in press, doi:10.1029/2012GL052098 (2012).

## 深発月震の発生特性に関する研究

○山田竜平<sup>1</sup>、野田寛大<sup>1</sup>、荒木博志<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

NASA の Apollo 計画において 1969-1977 年に実施された月地震観測により、月深部で発生する地震イベントが確認された。それらは深発月震と言われ、月内部およそ 700~1400km の深さで発生することが分かっている (Nakamura, 2005)。この深発月震の発生の特徴として、ある特定の震源から地球-太陽-月の位置関係、すなわち月内部に作用する潮汐力に關与して、周期的に発生する事が明らかにされた (e. g., Lammleign, 1977, Bulow et al, 2007)。このような震源は現在までの Apollo データの解析から、およそ 100 個その位置が特定されている (Nakamura, 2005)。

一方で、Apollo 計画で用いられた地震計の観測周波数帯域と感度の制約、及び月表層の不均質構造により引き起こされる波の散乱の影響により、深発月震の波形解析からその発生メカニズムについての十分な情報はいまだ得られていない。現在でも、月潮汐応力自体が月深部での断層の破壊を生じるか (Nakamura, 1978, Frohlich and Nakamura, 2009)、元々存在した歪に潮汐応力がトリガーとして作用して月震が発生するか (Chen and Toksöz, 1978, Minshull and Guly, 1988)、または震源ごとにその発生メカニズムが異なるか (Araki, 2001)、その発生原因については諸説挙げられている。また、発生の有無だけでなく、深発月震の振幅値の大きさ、そのイベントごとの変動も、月震の発生を理解するうえで重要な情報であるが、振幅値と潮汐応力との関係はこれまで十分に議論されてこなかった。特に、これまでの研究では[A1]と呼ばれる Apollo で最多のイベントが検出された震源に集中して、振幅値の大きさ、変動は議論されたが、他の震源との比較はほとんど成されていない。

そこで、本研究では[A1]以外にも特に Apollo 観測時に活発であった他の震源にも注目して、計 15 個の震源に対して、深発月震の発生特性についての調査を行った。本研究では、まず 15 個の震源から発生した計 800 個のイベントを解析し、その S 波振幅値から、各震源における深発月震の地震モーメント (エネルギー) の大きさとイベントごとの変動について評価を行った。その結果、地震モーメントは震源によって最大 1 桁の違いがあり、明らかな地域性を示す事が分かった。また、地震モーメントは各震源で異なる時間変動を示している事も分かったので、本研究ではさらに各震源に加わる潮汐応力を計算して、地震モーメントの大きさ、時間変動との関連性についても調査を行った。本発表では上記の解析、調査結果の報告と得られた結果についての議論を行う予定である。このように多数の震源での深発月震の発生特性を明らかにする事は、深発月震の発生メカニズムの理解に有用だけでなく、現在の月深部の応力、熱的状态及び内部構造の不均質性を知る上での情報源ともなり得る。

### 3 軸姿勢制御衛星用ペネトレータ分離機構の開発

#### ―ブレッドボードモデルによる検証試験結果について―

Preliminary test results of separation mechanism of lunar penetrator module for installation in a three-axis stabilized satellite

○白石浩章 小林直樹 早川雅彦 田中智 早川基 石井信明 小松敬治

(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)

月内部構造探査用に開発されたペネトレータモジュールは地震計、熱流量計などの科学観測機器を搭載したペネトレータ本体のほか、月周回速度成分をキャンセルする軌道離脱モータと月面への垂直貫入のために 90 度姿勢変更するラムライン制御システムから構成されている。さらに、ペネトレータを月や惑星などの表面に投下設置するためにはクルージング中には周回衛星に把持され、天体の周回軌道から放出・分離するための機構が必須となる。この把持・分離機構については、月のような大気のない天体ではペネトレータモジュールの形状中心軸と長手方向の重心軸のズレ、重心位置・慣性能率の調整量のほか、周回衛星搭載時の取り付けアライメント誤差、軌道離脱モータの推力軸誤差と分離直後のティップオフ量が突入時の貫入迎角と衝撃荷重に大きな影響を与えることが分かっている。また、スピン衛星用として開発した過去の把持・分離機構（2Hz に高速スピナップした衛星からフリスビー状に放出する方式）ではフルサイズのペネトレータモジュールを用いた End-to-End 試験を地上で実施することが極めて困難であったことから、新たに開発する 3 軸姿勢制御搭載用の分離機構については具体的な地上検証方法もあらかじめ検討しておく必要がある。

複数の分離方式について LUNAR-A 型ペネトレータモジュールとのインターフェース要求条件を機能・性能的に満足するかどうかを解析等で評価し、2つの方式案（モータスプラインとダブルヘリカルスプリング統合方式とラックアンドピニオン方式）に絞り込んだうえで主要な技術要素部分のみを抽出したブレッドボードモデルを製作して検証試験を実施した。その結果、モータスプライン部（ペネトレータ先端に十字型インローと 4 つ爪把持部を設けてギアモータに連結させる）については、模擬ペネトレータモジュールに調整実績を超える重心軸ズレを与えた場合でも目標スピンレート（ $\sim 2\text{Hz}$ ）および許容コーン角度以下で安定して回転駆動できること、モジュール機軸の初期静定位置とスプライン軸を意図的にずらした場合でもスピン駆動を開始した直後に幾何中心に位置復帰して回転することが確認できた。一方、ラックアンドピニオン部（モジュールに取り付けた円形歯車を歯切りした平板状ラックとより短いラックに挟んで転がりと水平移動を与える）についてはスピンレートと放出速度（ $\sim 1\text{m/sec}$ ）の目標値をそれぞれ満足したものの、軸スピンに比較してより長周期のコーニング運動が検出されたためラックとピニオンの歯車諸元について再設計が必要であることが分かった。本発表では BBM 検証試験の結果詳細と残存する技術要素の追加試験および実機相当モデルを使った End-to-End 試験の地上検証方法等について報告する。

### 月面観測機器の越夜技術: SELENE-2 サバイバルモジュールの開発状況 Development status of SELENE-2 Survival Module for scientific instruments on lunar surface

○小川 和律<sup>1</sup>, 飯島 祐一<sup>1</sup>, 坂谷 尚哉<sup>1</sup>, 大嶽 久志<sup>1</sup>, 田中 智<sup>1</sup>

○ Kazunori Ogawa<sup>1</sup>, Yu-ichi Iijima<sup>1</sup>, Naoya Sakatani<sup>1</sup>, Hisashi Otake<sup>1</sup>, Satoshi Tanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Aerospace Exploration Agency

月面着陸探査機 SELENE-2 では、月震計、磁力計、熱流量計、VLBI 電波源の 4 種の観測機器を月面に設置することを提案している。これらの機器は月の内部構造の調査を目的とするもので、地震波速度構造、電気伝導度構造、温度構造、慣性モーメントなどの情報を得て、内部の密度、物理状態、組成、地殻厚、コアの有無などについての制約条件を推定し、月の起源、熱史などの議論を発展することができる。上記の機器は、できるだけ長期に渡って観測を継続することでデータの質が向上し、より大きな理学成果に繋がる。

現在、我々は月面に設置する科学観測機器のための熱制御装置(月面サバイバルモジュール)の開発を進めている。月面は粒径が 50  $\mu\text{m}$  程度の粉体で覆われており、真空のため熱伝導率が極めて低いのが特徴である ( $\sim 0.01 \text{ W/mK}$ )。このため、地表温度が昼と夜で  $-200$  から  $100^\circ\text{C}$  程度と大きく変動し、それぞれが 2 週間続く。そのような環境の中で機器を正常に保つには、適切に機器温度を制御する機構、すなわち昼間は熱を効率よく排熱し、かつ夜はなるべく断熱して暖めるという矛盾する機構が不可欠であり、熱設計上極めて困難である。開発中の装置は、上記の機構を持ち、月面の厳しい温度環境下でなるべく長期間にわたって観測を可能にすることを目的とする。これは SELENE-2 において 長期観測機器の成功を左右する重要な開発課題である。

現在まで、我々が提案する月面サバイバルモジュールについて、熱数学モデルによる評価、熱性能評価用試作機を用いた熱パラメータの確認を柱として熱設計の有効性を示してきた。サバイバルモジュールは機器と周囲の地面を山形の多層断熱膜 (MLI) で覆い、内部機器を地下の温度安定層と積極的に熱結合させるという、環境をうまく利用する手法により、昼夜の温度変動を  $0$  から  $40^\circ\text{C}$  までの範囲に抑える。

本発表では、モジュール内サブシステムの開発状況を報告する。現在、今後の EM 開発のため熱設計の最適化とあわせて構造設計を進めている。本モジュールは着陸機上に外部搭載を検討しており、インターフェイス部分分離機構が必要かつ重量が大きい。また内部筐体の断熱性を考慮するなど熱設計上の制約があり、十分な強度・剛性を持たせることが重要な開発課題である。

## SELENE-2 の着陸地点評価

○佐伯和人<sup>1</sup>、荒井朋子<sup>2</sup>、荒木博志<sup>3</sup>、石原吉明<sup>4</sup>、大竹真紀子<sup>5</sup>、唐牛譲<sup>5</sup>、  
小林直樹<sup>5</sup>、春山純一<sup>5</sup>、杉原孝充<sup>6</sup>、本田親寿<sup>7</sup>、佐藤広幸<sup>8</sup>、武田弘<sup>2</sup>、  
諸田智克<sup>9</sup>、栗谷豪<sup>10</sup>、三谷烈史<sup>5</sup>、大嶽久志<sup>5</sup>、田中智<sup>5</sup>

<sup>1</sup>大阪大学、<sup>2</sup>千葉工業大学、<sup>3</sup>国立天文台、<sup>4</sup>国立環境研究所、<sup>5</sup>宇宙航空研究開発機構、

<sup>6</sup>海洋研究開発機構、<sup>7</sup>会津大学、<sup>8</sup>アリゾナ州立大学、

<sup>9</sup>名古屋大学、<sup>10</sup>大阪市立大学

日本の次期月着陸探査計画 SELENE-2 が、2010 年台半ばの打ち上げを目指して宇宙航空研究開発機構において計画されている。目的は、（１）着陸・移動・長期滞在技術の開発と実証、（２）月の科学探査と月の利用可能性調査、（３）国際貢献と国際的地位の確保、の三点である。月の表側、中・低緯度地域への着陸をめざしており、着陸機、ローバー、周回衛星から構成される予定である[1]。2010 年 3 月に月着陸地点検討会議が SELENE-2 プリプロジェクトのサブチームとして発足した。本検討会議の役割は、月惑星科学における第一級の課題解決のため、SELENE-2 探査が目指す科学目標を明確に設定し、目標達成のためにはどこに着陸し、どのような戦略で観測を行うべきかについて議論・提案することである。2010 年 6 月に日本惑星科学会をはじめ、広く月科学に関心のある地球惑星科学関連の研究者に呼びかけ、21 グループから、35 件の科学テーマと約 70 箇所の着陸地点の提案が寄せられた。提出された提案を検討会議から選出されたコアメンバーで検討し、月科学の課題として「太陽系初期における月・地球系の形成過程の解明」および、「集積後の月の水平垂直構造の進化過程の解明」の二大テーマを設定した。そして、二大テーマのいずれかの解明に貢献する着陸地点をコアメンバーで抽出した。これらの過程を経て、今日もっとも優先すべきサイエンスを実行するための着陸候補地点 10 地点が選ばれた。Copernicus、Mare Humorum、Marius Hills、Hansteen Alpha、Zucchius、縦穴、Reiner Gamma、Tycho、Apollo14、Ina、である。さらなる詳細検討をするには 10 地点という着陸候補地点数は多すぎる。そこで、現在の科学技術レベルで実現可能な観測装置で SELENE-2 を構成した時に総重量が許容範囲を超えないという新たな縛りを設けて、さらなる絞り込みを行うことにした。また、この際に、想定される科学シナリオの妥当性、および、「月の起源と進化」に関わるキーとなるイベントに対してモデル拘束力の高いデータが得られるかどうかをより詳細に評価した。10 地点の比較評価結果の詳細を報告する。

引用文献[1] T. Hashimoto, T. Hoshino, S. Tanaka, M. Otsuki, H. Otake, and H. Morimoto (2010) Japanese moonlander SELENE-2 – Present status in 2009, Acta Astronautica.



## 月惑星熱流量精密測定に向けての伸展式プローブの開発 —ガラスビーズを用いた熱伝導率測定試験—

○堀川 大和<sup>1</sup>、田中 智<sup>2</sup>、坂谷 尚哉<sup>3</sup>、滝田 準<sup>1</sup>、小川 和律<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学、<sup>2</sup> ISAS/JAXA、<sup>3</sup> 総研大

月惑星での地殻熱流量は、惑星・衛星内部の温度分布や熱的な形成・進化の歴史を推定する上で大きな制約条件となる。地殻熱流量は表層レゴリスの熱伝導率と垂直温度勾配を測定することで求めることができる。我々はペネトレータなどの貫入プローブに温度計や熱伝導率計を搭載して地下に埋設させ、これら 2 つのパラメータを直接測定するシステムを開発してきた。しかし、これまでの貫入プローブには構体表面上にヒーターやセンサーが搭載されているため、埋設時の周りのレゴリスへの圧密の影響や、レゴリスと貫入プローブの熱伝導率の違いによる熱屈折の影響を受けやすく、惑星本来の熱流量値を求めるのに不確定性を有している。そこで本研究では、貫入プローブの側面から細いプローブを伸展させることで圧密や熱屈折の影響の少ない条件を実現し、高精度（測定精度 5・10%）で熱流量計測が可能な計測システムを検討している。今回は伸展式プローブを用いた熱伝導率測定の開発を進めた。

これまでの検討からペネトレータに搭載した伸展式プローブを構体表面から 10cm 離すことによって、伸展式プローブ自身による熱屈折の影響が構体表面約 82% と比べて約 53% 減（惑星本来の温度勾配を深さ方向に 1K/m と仮定し熱屈折の影響を 0% とする、0K/m では 100%）となることが分かった。そこで本研究では数 m の深さのレゴリス中に伸展可能な強度を考慮して、外径 2mm、内径 1.6mm、長さ 10cm のステンレス（SUS304）製のパイプ中に、ヒーター線および熱電対を挿入し、エポキシ樹脂で充填したニードルプローブを製作した。一般的なニードルプローブとの相違点は、測温点とペネトレータなどの貫入プローブとの距離を離したために測温点をヒーター端点に配置していることである。製作した伸展式プローブの性能を評価するためにガラスビーズを充填した容器に伸展式プローブを挿入し、測定位置とほぼ同位置を線加熱法によって比較測定した。測定条件は大気圧及び真空中（約 0.12-0.17Pa）で行い、線加熱法による測定と比べて 1.4-1.7 倍程度で伸展式プローブの測定と一致していることが分かった。今回の計測では測温点をヒーター端点に変更した影響を考慮していないために、両者の差異が大きいと考えられる。現在、測温点の違いの影響および熱伝導率の測定精度についての検討を進めており、講演ではそれらの結果を発表する。

## 火星における 2 種類の火山活動と内部ダイナミクス

## Two styles of volcanism of Mars and their implication to internal dynamics

O 栗田敬<sup>1</sup>、大森聡一<sup>2</sup>、野口里奈<sup>1</sup>、David Baratoux<sup>3</sup><sup>1</sup>東京大学地震研究所、<sup>2</sup>放送大学校、<sup>3</sup>Midi Pyrenees Obs.

火星は地球と比べてサイズが小さいために内部活動は地球ほど活発ではなく、特に最近の数億年は表層近傍の表層環境の変動に起因するものを除けば静穏な天体であると考えられてきた。また過去においても地球と異なりプレートテクトニクスが稼働した痕跡はなく、プレートテクトニクスの存在しない天体の進化の最終段階であるとの見方もあった。これを支持するものとしてタルシスなどの巨大火山体を形成する火成活動が初期の Noachian にピークを持ち、徐々に衰退してきたという惑星地質学的証拠が挙げられる。しかしながら近年の高解像度画像の解析によりこのような見方と相反するような証拠がみつき、火成の進化の描像や内部ダイナミクスについて従来の見方が大きく揺らいでいる。火星は現在活動を停止した天体ではなく、たいへん活動的な天体である。本講演では火成の進化に関する現在の問題点をまとめ、今後の探査に於いてどのような点に注目すべきかを論じる。

**2 種類の火山活動の存在：**

MRO が取得した高解像度画像から様々な場所で多数の小型コーン地形が発見された。コーン地形の起源として、1) 溶岩流と水・氷層との相互作用による 2 次爆発火山砕屑丘 (Rootless Cone)、2) 周氷河地形の一つであるピンゴ、3) 揮発性物質・流動体の噴出による泥火山などが想定されている。Noguchi & Kurita(2011,2012)は Central Elysium Planitia (CEP) に分布する小型コーン地形を詳細に解析し、溶岩流起源であると結論した。CEP では広域的な供給源（多くは割れ目）から流動性に富んだアスペクト比の小さな高温の溶岩が流出したと解釈される。類似のコーンの存在が溶岩流の存在を示していると考え、巨大な火山体を形成する固定源からの長期間にわたる継続的なマグマ活動とは別種の火山活動の存在が示唆される。この分布は Dichotomy 境界の低地側に集中して分布しており、きわめて新しい時代を示すものも存在する。巨大火山体の活動が Amazonian では衰退してきており、入れ替わるように一過性の広域溶岩流の活動が生じているようにも見える。又データが限られてはいるが CRISM による化学組成データからは両者の間には明らかな違いが存在し、溶岩の組成そのものが異なっている可能性もある。

**Delamination-Induced Volcanism：**

巨大火山体の形成に関わる火成活動はマントル深部に由来する熱組成ブルームであると考えられているが、Rootless Cone を作り出した溶岩流の起源は何であろうか？ この火成活動の特徴は、1) 低粘性溶岩流、2) マグマの噴出源が比較的広範囲に分布、3) 一過性の活動、4) Dichotomy 境界近くに存在、などであるが、われわれはこれらの事実から、厚くなった地殻下部が Basalt-Eclogite 転移を引き起こし、この部分がマントルとの密度逆転から剥離・沈降し、マントルの補償流が断熱上昇・融解を経たもの (delamination-induced volcanism) であると提案する。火星では天体サイズが小さく、内部圧力が高くないために地殻下部では Basalt-Eclogite 転移は生じないと考えられてきたが、火星の地殻が鉄に富んでいることを考慮すると転移圧力は低圧側に大きく移動することが熱力学的計算により明らかにされ、火星の地殻下部においても相転移は起きることが示された (Ohmori & Kurita, 2012)。類似の火成活動は地球においても Pyrenees 山脈東側や Carpathia 山脈東側の地殻の厚さが急激に薄くなる地域に見られる。

**プレートテクトニクスとは異なる様式の物質循環ダイナミクス：**

プレートテクトニクスは、火成活動によるマントルの分化による地殻の形成と沈み込みによる分化物質のリサイクリングという物質循環のダイナミクスを支配するユニークな存在であり、熱的進化と物質的内部構造進化をコントロールしている。プレートテクトニクスが表層部のレオロジーの制約から存在できない天体ではどのような物質循環が可能であるか、その一例が火星に見られる 2 つの火山活動：深部由来の熱組成ブルームと Delamination-induced volcanism ではないか、というのが我々の提案である。

## 火星生命探査提案： 細胞、アミノ酸、メタン検出を目的とした

○山岸明彦<sup>1</sup>, 吉村義隆<sup>2</sup>, 長沼毅<sup>3</sup>, 宮川厚夫<sup>4</sup>, 出村裕英<sup>5</sup>, 豊田岐聡<sup>6</sup>, 本多 元<sup>7</sup>,  
小林憲正<sup>8</sup>, 三田肇<sup>9</sup>, 大野宗祐<sup>10</sup>, 石丸 亮<sup>10</sup>, 石上玄也<sup>11</sup>, 佐々木晶<sup>12</sup>, 宮本英昭<sup>13</sup>

<sup>1</sup>東京薬科大学, <sup>2</sup>玉川大学, <sup>3</sup>広島大学, <sup>4</sup>静岡大学, <sup>5</sup>会津大学, <sup>6</sup>大阪大学, <sup>7</sup>長岡技術科学大学, <sup>8</sup>横浜国立大学, <sup>9</sup>福岡工業大学, <sup>10</sup>千葉工業大学, <sup>11</sup>宇宙科学研究所, <sup>12</sup>国立天文台, <sup>13</sup>東京大学

火星におけるメタンの発見と[1]、地球におけるメタン酸化鉄還元細菌の発見[2]から、我々は火星表面において現在もまだメタン酸化鉄還元細菌（化学合成微生物の一種）が生存しているのではないかと推定するに至った[3]。この菌はメタンを生成するメタン菌とは全く別の菌である。メタン菌はメタン生成に必要な栄養源である水素を地下起源とするので地下深部に生育する可能性が高い。それに対してメタン酸化菌は、メタンがありその他の条件を整えばどこでも生育可能である。メタンは地下で生成して、地表を通過するはずである。したがって、メタン酸化菌は微生物生存条件が満足されれば表層付近で生育する可能性がある。

ただし、メタンの存在は確定しているわけでは無く、その測定結果の報告に対する疑問も報告されている[4, 5]。しかし、Viking 探査結果の再解釈がすすみ、欧米は有機物と生体関連物質、メタンの探査を Mars Science Laboratory mission (MSL) および ExoMars 等において推進している。

また、近年火星には最近地下から流出した水らしき特徴が複数回撮影されている[6-9]。水があれば、メタンのあるなしにかかわらず、そこに微生物が生存している可能性は極めて高い。

こうした状況から、我々は火星地下深部を掘削する必要性が無いという点を世界で初めて指摘するとともに、火星において生命を直接探査することを、現在の技術レベルでも十分に実現可能な手法を用いて、世界に先駆けて提案することとした。なお計画の特性から、火星表面における有機物や地質探査も同時に行うことができると考えている[3]。

### 【文献】

- 1, Mumma, M. J. et al., 2009, Science 323, 1041. 2, Beal, E. J. et al., 2009, Science 325, 184. 3, Yamagishi, A. et al., 2010, Biol. Sci. Space 24, 67.
- 4, Lefèvre, F. 2009, Nature 460, 720. 5, Zahnle, K., 2011, Icarus 212, 493. 6, Miyamoto, H., et al., 2004, J. Geophys. Res. Planets 109(E6).
- 7, Miyamoto, H., et al., 2004, Geophys. Res. Lett. 31(13). 8, Malin, M. C. et al., 2006, Science 314, 1573. 9, McEwen, A. S., et al., 2011, Science 333, 740.

# 木星系探査衛星 JUICE 搭載レーザ高度計の開発

Development of a laser altimeter aboard Jupiter Icy Moon Explorer JUICE

○野田寛大<sup>1</sup>, Hauke Hussmann<sup>2</sup>, 荒木博志<sup>1</sup>, Juergen Oberst<sup>2</sup>, 木村淳<sup>3,4</sup>, 佐々木晶<sup>1</sup>,  
田澤誠一<sup>1</sup>, 並木則行<sup>5</sup>, Kay Lingenauber<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, <sup>2</sup>German Aerospace Center (DLR) Institute of Planetary Research, <sup>3</sup>北海道大学大学院宇宙理学専攻, <sup>4</sup>惑星科学研究センター, <sup>5</sup>千葉工業大学 惑星探査センター

欧州宇宙機構 (ESA) は次期大型計画として木星系探査衛星 JUICE (Jupiter Icy moon Explorer) を選定した。打ち上げは 2022 年、最終目的地のガニメデに到着し周回を開始するのは 2032 年である。我々は、ドイツ DLR が主導するグループの一員として JUICE に搭載するレーザ高度計 (GAnymede Laser Altimeter : GALA) を提案している。レーザ高度計は JUICE のモデルペイロードの一つである。レーザ高度計は探査機と天体の間の距離をレーザの飛行時間を用いて測定する機械であり、探査機の位置を地上からのレンジおよびドブラー観測で詳細に決定することによって、高度計で測定した距離から天体の地形を求めることができる。

主たる探査天体であるガニメデの表層は水の氷におおわれており、ガリレオ探査機等で得られた平均密度 (1.935 g/cc)、慣性率比 ( $0.3105 \pm 0.0028$ )、固有磁場の存在などから、内部に液体の海と流体の金属核が存在すると考えられている。GALA の科学目標は第一に、ガニメデの表層に存在する溝やクレータ等の地形を詳細に求めて衛星の進化過程を制約することである。第二に、以下のいずれかの方法により、内部海の存在に制約を与えることである。i) 高度計データを探査機の詳細軌道決定に用いることにより、重力場と内部構造に感度のある潮汐ラブ数  $k_2$  を求めること、ii) 内部海がある場合には潮汐変位の大きさは最大 7m 程度と見積もられているので、高度計データから潮汐変位を直接観測すること、iii) ガニメデの偏平率が大きい場合には、カメラが撮影する画像と高度計データを比較することにより秤動 (libration) を検出すること、である。他に、送受光パワーをモニターすることによって、衛星表面反射率を同じ入射・反射角条件で求めることができ、明るい場所と暗い場所の二分性の研究に役立つ。

2012 年 10 月に搭載機器提案を ESA に対して行い、採択されると 2013 年から開発が始まる。ガニメデの観測は 20 年後の 2032 年であるため、JUICE ミッションを日本惑星科学会の長期計画の一つとして位置づけ、惑星形成・進化論から物質科学に至る幅広いコミュニティの知見を集積・錬磨し、最終的に木星の衛星系のデータを用いて様々な成果を生み出すための継続的な研究活動が求められる。

## 水星探査計画「BepiColombo」における ダスト計測器の開発現状

○柴田裕実<sup>1</sup>, 野上謙一<sup>2</sup>, 藤井雅之<sup>3</sup>, 大橋英雄<sup>4</sup>, 小林正規<sup>5</sup>, 佐々木 晶<sup>6</sup>, 矢野 創<sup>7</sup>, 木村宏<sup>8</sup>, 武智誠次<sup>9</sup>, 岩井岳夫<sup>10</sup>, 長谷川 直<sup>7</sup>, 平井隆之<sup>11</sup>, 服部真季<sup>10</sup>, 宮地 孝<sup>5</sup>, Ralf Srama<sup>12</sup>, Eberhart Grün<sup>12</sup>

京大<sup>1</sup>, 獨協医大<sup>2</sup>, FAM サイエンス<sup>3</sup>, 東京海洋大<sup>4</sup>, 千葉工大<sup>5</sup>, 国立天文台<sup>6</sup>, 宇宙研<sup>7</sup>, 神戸大<sup>8</sup>, 大阪市大<sup>9</sup>, 東大<sup>10</sup>, 総研大<sup>11</sup>, マックス・プランク核物理研<sup>12</sup>

現在、日欧共同水星探査計画「BepiColombo」が進められており、MP0（ESAが担当）、MMO（JAXAが担当）の2機の水星周回衛星が2015年に打ち上げられる。水星及び内惑星領域におけるダスト環境の観測のため、MMO探査機に圧電素子を用いたダスト検出器を搭載するので開発を行っている。水星に関する観測対象としては宇宙風化作用や水星大気の起源に関するダスト、水星起源ダスト等があり、ダスト環境に関する観測対象としては太陽系内ダスト、彗星起源ダスト、 $\beta$ -メテオロイド、星間ダスト等があげられる（図1）。速度2~100km/s、質量1fg~1ngのダストで、計数のみでなく、飛来方向、運動量等を計測することを目標としている。

用いる圧電素子は4枚のジルコン酸チタン酸鉛（PZT）のセラミック素子（40mm×40mm×2mm）で応力を加えると電荷が誘起される。この性質を利用し、超高速ダストの衝突による波形から粒子の運動量を推定する。本検出器への水星近傍でのダストの衝突頻度はこれまでの観測から1日0.5回程度と見積もられている。検出器は太陽光に曝されると温度が上昇するが、検出器の特性上250℃以下に保つ必要があるため、太陽光反射用に約100 $\mu$ m厚のポリイミド白色塗料を塗布した（図2）。

検出器の較正はマックス・プランク核物理学研究所（MPI-K：ドイツ）の2MV静電加速器からの超高速鉄微粒子を用いて調べられ、衝突によるPZT素子の応答を計測した結果、計測できるダストの最小運動量は、白色塗料の塗布によって感度が若干低下したが、およそ6 $\times 10^{-12}$  kg $\cdot$ m/sである。

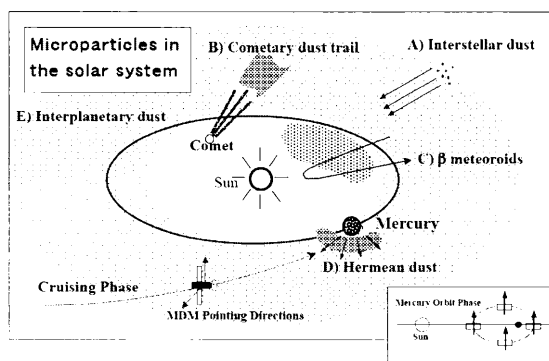


図1 水星周りのダスト環境

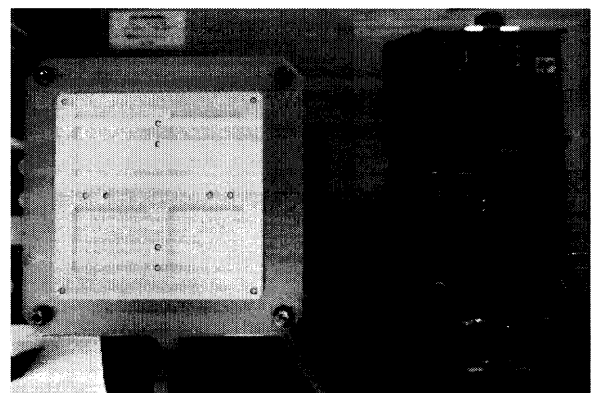


図2 ピエゾ検出器と計測回路  
(Flight Model)

## はやぶさ 2 の現状とサイエンス

### Hayabusa2 current status and its science

○安部正真、田中智、飯島祐一、中澤暁、津田雄一、南野浩之、吉川真 (JAXA)、  
はやぶさ 2 プロジェクトチーム

Masanao Abe, Satoshi Tanaka, Yuichi Iijima, Satoru Nakazawa, Yuichi Tsuda,  
Hiroyuki Minamino, Makoto Yoshikawa (JAXA), and Hayabusa2 project team.

はやぶさでは S 型小惑星イトカワの近傍観測とサンプルリターンに成功した。はやぶさ 2 は探査対象を C 型小惑星とし、S 型小惑星では調べることでできなかった低温凝縮物である有機物や水と、鉱物との相互作用について明らかにする。また新たに衝突装置を搭載し、クレータ生成実験を行うと同時に、表層地下物質を露出させ、リモセンによる観測と表層地下物質のサンプルリターンを目指す。ミッションを通して、原始惑星系円盤から現在の小惑星への進化に伴う物質の変遷の解明と、微惑星と小惑星の構造的・力学的成り立ちの解明に貢献する。

Hayabusa succeeded to in-situ observation and returned the sample from the S-type asteroid Itokawa. Hayabusa2 will go to the C-type asteroid and investigate the interaction between organic material and water, which are low temperature condensation materials, and rocky materials. Small carry-on impactor, which is a new device of Hayabusa2 mission, will make an experiment of crater formation on the asteroid surface and reveal the subsurface materials. We can observe them by remote sensing instruments and try to bring back the subsurface materials to the earth. Through the Hayabusa2 mission, we will contribute to the investigation of the material evolution and dynamical evolution in the early solar system.

## はやぶさ 2 近赤外分光計 NIRS3 の開発状況

○ 北里宏平<sup>1</sup>, 岩田隆浩<sup>2</sup>, 安部正真<sup>2</sup>, 大竹真紀子<sup>2</sup>, 松浦周二<sup>2</sup>, 津村耕司<sup>2</sup>,  
高木靖彦<sup>3</sup>, 平田成<sup>1</sup>, 本田親寿<sup>1</sup>, 仲内悠祐<sup>2</sup>, 松永恒雄<sup>4</sup>, 高遠徳尚<sup>5</sup>, 廣井孝弘<sup>6</sup>

<sup>1</sup>会津大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup>愛知東邦大学, <sup>4</sup>国立環境研究所,

<sup>5</sup>国立天文台, <sup>6</sup>ブラウン大学

小惑星探査機はやぶさ 2 に搭載する近赤外分光計 NIRS3 は、小惑星表面を空間分解して 1.8–3.2 $\mu$ m の波長域の反射スペクトルを取得するリモートセンシング機器である。とくに水酸基の伸縮振動 (2.8 $\mu$ m) と水分子の変角振動 (3.0 $\mu$ m) の吸収強度を測ることによって小惑星表面の水の存在量や鉱物組成の情報を得ることを目的としている。

はやぶさ 2 の探査対象天体である C 型小惑星は、地球の水の起源物質の候補とされる炭素質コンドライトの母天体と考えられているが、太陽系における形成当時の分布やその後の変成作用、軌道進化の過程については未知な部分が多い。その主要な要因として C 型小惑星と炭素質コンドライトのサブグループ間の対応関係が未解明であることが挙げられる。これは C 型小惑星の反射スペクトルに明瞭な吸収がみられにくい点やこれまでの観測が点光源に限られる点から宇宙風化や熱変成などの二次的な影響を除いて比較することができていないことによる。NIRS3 は地形的な特徴から露出年代の若いと推定される表面や衝突装置によって形成されるクレータを観測することで、C 型小惑星の反射スペクトルにおける二次的な影響を解明することを目指す。さらに、小惑星表面の水及び水酸基の存在形態と存在量の分布を明らかにすることにより、天体あるいはその母天体の経験した水質変成の履歴を探ることを考えている。

機器の開発は現在 EM (Engineering Model) の検証試験を実施している段階であり、部分的に FM (Flight Model) の製造も開始している。本発表では、これまでに実施してきた要素試験や EM 試験の結果、それらから予想される観測性能、想定している運用計画についても報告する。

## はやぶさ2 Optical Navigation Camera (ONC)による

### サイエンス観測

#### Science observations with Optical Navigation Camera (ONC) onboard Hayabusa 2

○杉田精司<sup>1</sup>、本田理恵<sup>2</sup>、亀田真吾<sup>3</sup>、諸田智克<sup>4</sup>、澤田弘崇<sup>5</sup>、本田親寿<sup>6</sup>、鈴木秀彦<sup>3</sup>、小川和律<sup>5</sup>、飯島祐一<sup>5</sup>、白井慶<sup>5</sup>、山田学<sup>7</sup>、平田成<sup>6</sup>、出村英裕<sup>6</sup>、道上達広<sup>8</sup>、中村良介<sup>9</sup>、中村智樹<sup>10</sup>、佐々木晶<sup>11</sup>、野口高明<sup>12</sup>、廣井孝弘<sup>13</sup>

1 東大新領域 2 高知大 3 立教大 4 名大 5 JAXA 6 会津大 7 千葉工大

8 近畿大 9 産総研 10 東北大 11 国立天文台 12 茨城大 13 ブラウン大

はやぶさ2には、直下視の望遠カメラ(T)と広角カメラ(W1)、側方視の広角カメラ(W2)の3つを搭載する。Tは8つフィルタを持ち、探査対象小惑星の表面物質の可視光領域でのスペクトル特性の計測を大きな任務とする。W1, W2は、無限遠から1 mまで焦点が合うため、タッチダウン時の表面詳細な撮像を期待されている。本講演では、これらのカメラを用いた撮像計画の概要を紹介する。

Hayabusa-2 spacecraft will carry Optical Navigation Camera (ONC) consisting of three cameras, nadir-viewing telescopic (T) and wide-angle (W1) cameras, and a side-viewing wide-angle camera (W2). The camera T has 8 filters to map the spectroscopic properties of the asteroid 1999JU3. Both T and W1 will map the surface morphologies of 1999JU3. The wide-angle cameras W1 and W2 can image objects as close as 1 m, allowing detailed surface images at the time of touchdown. We will cover the highlights of the ONC science observation plans.



## 小惑星イトカワ粒子のサイズ分布・鉱物比率について

○矢田達<sup>1,2</sup>、安部正真<sup>2,1</sup>、岡田達明<sup>2,1</sup>、上相真之<sup>1</sup>、唐牛譲<sup>1</sup>、石橋之宏<sup>1</sup>、八亀彰吾<sup>3</sup>、

白井慶<sup>1</sup>、中村智樹<sup>4</sup>、野口高明<sup>5</sup>、岡崎隆司<sup>6</sup>、藤村彰夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構月惑星探査プログラムグループ、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、<sup>3</sup>東京大学大学院理学系研究科、<sup>4</sup>東北大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、

<sup>5</sup>茨城大学理学部、<sup>6</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学専攻

小惑星探査機はやぶさは 2005 年 11 月に小惑星イトカワ上で2回のタッチダウンによる試料採集を行い、回収された試料を再突入カプセルに封入し、2010 年 6 月に地球に帰還させた[1-2]。試料を収めたサンプルキャッチャーは2室(A, B 室)に分かれており、それぞれの部屋から粒子が回収されている。これらキャッチャー内部から見つかったケイ酸塩鉱物粒子は小惑星イトカワ起源である事が先行研究から確認されている[3-8]。

このサンプルキャッチャーの A 室と B 室の内部から回収したケイ酸塩鉱物からなる粒子は長径 10-310 $\mu$ m であり、現在のところ A 室で 200 個強、B 室で 80 個超に達している。これらの粒子のサイズ分布を比較したところ、A 室の粒子の方が B 室よりもピークの粒径が大きかった。これは B 室の方が粒子数が少なく、拾い出しの達成度が高かった事に起因していると思われる。また、初期記載の過程で行う FESEM-EDS 観察・分析による粒径、定性元素分析の結果に基づき、イトカワ粒子の鉱物比率を求めたところ、LL4-6 コンドライトの鉱物比率と比較してかんらん石に富み、斜長石に乏しい傾向が見られた。キャッチャー内部をテフロンへらで掻いて捕獲された微粒子(1~10 $\mu$ m)の分析から求めた鉱物比率は LL コンドライトと概ね一致し[3]、今回の結果で粒径の大きい粒子については鉱物比率の偏りが生じていることが分かった。さらに A 室と B 室に分けて鉱物比率を比較したところ、A 室はかんらん石が多く、斜長石が著しく少ないのに対して、B 室では斜長石の比率が LL コンドライトより高く、かんらん石が少ない傾向が見られた。B 室の鉱物比率と全体の比率が矛盾するのは、B 室の粒子が少なく、かつ小さい為だと思われる。A、B 室の鉱物比率の違いについては、A 室(2回目タッチダウン時採集試料)と B 室(1回目タッチダウン時採集試料)の採集地点の、鉱物分布や採集過程の違いに起因する可能性が指摘される。今後、鉱物比率の算出法の精細化や試料数をより増やしての確認が必要である。

参考文献:[1] Yano H. et al. 2006. Science 312: 1350-1353 [2] Abe M. et al. 2011. Abstract #1638. 42nd Lunar & Planet. Sci. Conf. [3] Nakamura T. et al. 2011. Science 333: 1113-6. [4] Yurimoto H. et al. 2011. Science 333: 1116-9. [5] Ebihara M. et al. 2011. Science 333: 1119-21. [6] Noguchi T. et al. 2011. Science 333:1121-5. [7] Tsuchiyama A. et al. 2011. Science 333: 1125-8. [8] Nagao K. et al. 2011. Science 333: 1128-31.

# 微小隕石試料における衝突変成組織の観察と イトカワ帰還粒子との比較

○八亀彰吾<sup>1,2</sup>, 上相真之<sup>2</sup>, 唐牛譲<sup>2</sup>, 石橋之宏<sup>2</sup>, 矢田達<sup>2</sup>, 岡田達明<sup>2</sup>,  
安部正真<sup>2</sup>, 藤村彰夫<sup>2</sup>

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

小惑星探査機「はやぶさ」によって持ち帰られた小惑星イトカワの表層物質はこれまでの所、数～数百マイクロメートルの微粒子であることが確認されている。初期分析の結果からイトカワ粒子は鉱物の化学組成、鉱物比や酸素同位体比が LL4～LL6 の普通コンドライトによく一致することが分かっている。また現在のイトカワよりも大きな母天体が存在し、衝突による破壊と再集積の過程を経て現在のイトカワを形成していることが示唆されている。そしてイトカワ粒子の形状から小惑星表層での隕石衝突や衝突現象による惑星振動によって粒子が摩耗し細粒化されていることも分かってきた。しかし先行研究では隕石等の岩石試料を用いた衝突実験において破碎された微粒子の形状分布やサイズ分布の算出、また隕石中に見られる衝突変成組織の記載や室内実験での衝突変成組織の生成条件の見積もり等に焦点が当てられてきたため、イトカワ試料のような破碎された微粒子内にどのような組織や特徴が保持されるのかは明らかにされていない。

本研究はLL6普通コンドライト隕石のキラボ隕石を用い、衝突変成組織に焦点を当て研究を行なった。薬包紙中に存在するキラボ隕石の100マイクロメートル程度の微粒子と数ミリメートルの粒子の研磨試料を作成し、それぞれの粒子に観察できる衝突変成組織を顕微鏡観察にて記載し比較を行った。また研磨試料の顕微鏡観察の他に、二次電子像を用いて研磨をしていないキラボ隕石の表面観察も合わせて行い、イトカワ粒子の初期分析における反射電子像やX線CT像のデータとの比較を行なった。

現在までの結果、100マイクロメートルの微粒子には数ミリメートルの試料と比べて、衝突組織の1つであるPlanar Fractures (PFs) とFeS and Metal Deposits (FeS-Deps) が高い割合で観察されることが分かった。またFeS-Depsは粒子表面の破碎面にもその特徴が観察され、イトカワ粒子の反射電子像による粒子表面やX線CT像による粒子内部にも同様の特徴が見受けられる。さらにミリメートルサイズのキラボ隕石試料の中にはこれらの衝突組織は偏って分布していることから、特定の衝突組織密集部が破碎されやすく、選択的に破壊が起きていることが示唆される。

またこれらの結果に加え、衝突を模擬した衝撃を隕石試料に与え破碎した試料に対して同様の分析を行う予定であり、30～50マイクロメートル程度まで試料サイズを落とし、イトカワ粒子との正確な比較を行い、これまでの結果と合わせて議論する。

## イトカワレゴリスと月レゴリスの比較による粒子表面の進化プロセスの考察

○松本徹<sup>1</sup> 土山明<sup>2</sup> 松野淳也<sup>2</sup> 永野宗<sup>1</sup> 島田玲<sup>1</sup> 中野司<sup>3</sup> 上杉健太郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 <sup>2</sup>京都大学 <sup>3</sup>産業技術総合研究所 <sup>4</sup>高輝度光科学研究センター

大気のない固体天体表面にある物質は、宇宙空間と固体惑星との界面において存在する現象の影響を受けた特徴を持っている。小惑星探査機はやぶさにより S 型小惑星イトカワ表層のレゴリス粒子が回収されており、イトカワのレゴリス粒子表面近傍には、太陽風や宇宙塵衝突により生成したナノ Fe 粒子の存在が報告された[1]。また、一部の表面のエッジ部分は丸みを帯び[2]、破断面のステップなどの細かな構造が摩耗されたような組織が見られた[3]。この原因として、太陽風による粒子表面のスパッタリングや、イトカワへの天体衝突によりイトカワに誘起された地震波による粒子同士のこすれ合いによる機械的摩耗の可能性が示唆されている[2]。また、表面には微細な溶融付着組織も観察された[4]。一方、アポロ計画により回収された月面表層のレゴリス粒子はイトカワ粒子と類似するナノ Fe 粒子が見られる[5]が、機械的摩耗の形跡は報告されていない。また、月面ではイトカワよりも高速の衝突現象により、ジュール熱による溶融・蒸発が引き起こされ、レゴリス粒子として多孔質のガラスである agglutinate が存在する。このようにイトカワと月のレゴリス粒子ではその形態や粒子表面の特徴に異なる点が存在する。月と小惑星の重力には大きな違いがあり、天体の衝突速度も異なることで、表層に存在するレゴリス粒子の挙動、レゴリス粒子の進化も異なると考えられる。そこで、天体による表層のレゴリス粒子の進化の違いを明らかにするために、イトカワのレゴリス表面と月のレゴリス表面の特徴を体系的に比較することは重要である。本研究では、イトカワと月のレゴリス粒子に対し、電解放出形走査型電子顕微鏡(JSM-7001F)による表面構造の観察を行った。さらに表面微細組織と内部構造との関連性を調べるため、大型放射光施設 Spring-8 にて放射光を用いた X 線マイクロトモグラフィによる 3 次元内部構造の観察を行った。また、振とう機による機械的摩耗実験から回収したオリビン粒子表面や、高エネルギー粒子線照射を受けたオリビン粒子表面とレゴリス粒子の比較も行った。

文献 [1] Noguchi T. et al. 2012. Abstract #1896. 43rd Lunar & Planetary Science  
[2] Tsuchiyama, A. et al. 2011. Science, 333, 1125-1128. [3] Matsumoto T. et al.  
2012. Abstract #1969. 43rd Lunar & Planetary Science Conference. [4] Nakamura E.  
et. al. 2012 Proc. Nat. Acad. Sci. 109: E624-E629. [5] Keller and McKay 1993.  
Science, 261, 1305-1307

## 小惑星イトカワ粒子中の空隙の微細構造

○土山 明<sup>1</sup>、松本 徹<sup>2</sup>、永野 宗<sup>2</sup>、松野淳也<sup>1</sup><sup>1</sup>京都大学理学研究科、<sup>2</sup>大阪大学理学研究科

はやぶさ探査機によりSタイプ小惑星イトカワの表面粒子が地球に持ち帰られた[1-2]。初期分析により、サンプルはLL4-6コンドライトの混合物であることがわかった[1-3]。放射光マイクロCTを用いた3次元構造より、イトカワ粒子(30-180  $\mu\text{m}$ )だけでなく、LL5,6コンドライトにも、空隙が普遍的に存在することがわかった[2, 3]。これらの粒子の表面微細構造はFE-SEMにより観察された[4]。本研究では、マイクロCTとFE-SEMで観察した空隙の3次元分布と詳細な微細構造を明らかにし、空隙の成因を議論した。

イトカワ粒子およびLLコンドライトには、3つのタイプの空隙が共通に認められる[3]。  
 (1) 大きな空隙(数 $\sim$ >10  $\mu\text{m}$ )：ポーラスな粒子には比較的大きく、不定形でしばしば粒子の外部に通じる空隙が存在している。周囲の鉱物には衝撃による組織は認められない[5]。  
 (2) 小さな空隙(<数  $\mu\text{m}$ )：ほとんどの粒子は比較的小さな空隙をもつ。多くの空隙は平板状でファセットをもち(負晶)、単結晶中に面状に並んでいる。  
 (3) チューブ状の空隙(径<数mm、長さ>10  $\mu\text{m}$ )：いくつかの空隙はチューブ状に伸長しており、小さい空隙がつくる面からは離れて存在している。

大きな空隙やチューブ状の空隙の壁には、成長ステップあるいは蒸発ステップに類似した平行(あるいは多角形状)ステップ群が観察される。またポーラスな粒子の空隙内には、ファセットをもつ自形結晶に類似するが3次元的には固体内部から連続した物体が存在し、その表面にはステップが観察される。

面状に分布する小さな空隙(負晶)は、熱変成作用時のクラックのアニーリングにより生成されたことを示している。また空隙壁のステップ群も、熱変成時の鉱物の蒸発や成長により生成されたと考えられる。空隙に一般的にみられるこのような特徴は、熱変成が蒸発-再凝縮による鉱物の粗大化により進んだことを示唆している。イトカワ粒子の熱変成の最高温度は1100 K程度であり、カンラン石と平衡なSiO<sub>2</sub>の蒸気圧は約 $10^{-10}$  Pa、これより求められる蒸発速度は数nm/yrとなる。鉱物の蒸発と元素拡散を比較したペクレ数を用いて議論することにより、熱変成は従来考えられているよりも早く進んだ可能性が指摘できる。

文献 [1] Nakamura, T. et al., 2011. *Science*, 333, 1113-1116. [2] Tsuchiyama, A. et al., 2011. *Science*, 333, 1125-1128. [3] Tsuchiyama A. et al., Submitted to *Meteoritics & Planetary Science*. [4] Matsumoto T. et al. 2012. Abstract #1969. 43rd Lunar & Planetary Science Conference. [5] Noguchi T. et al. 2012. Abstract #1896. 43rd Lunar & Planetary Science Conference.

## 自転運動と円軌道運動を考慮に入れた球状小天体の温度分布の逐次近似解

○関谷 実, 下田 昭仁

九大・理・地球惑星科学

固体の天体が、中心星の照射を受けながら自転・公転運動をするときの温度分布を求めるというのは、惑星科学の基本的な問題であるにもかかわらず、体系的な解が得られていなかった。天体内部の熱伝導度、比熱や密度が一定の場合は、熱伝導方程式の一般解を容易に導出できる。しかし、表面の放射冷却が絶対温度の4乗に比例して非線形であるために、中心星照射加熱と放射冷却、および天体内部への熱伝導がつりあうという表面境界条件を満たす解を、解析的に求めることはできない。Vokrouhlicky (1999) は、平均温度からの温度差について線形近似した場合の解析解を求めていた。しかし、天体がよほど小さくない限り、現実の温度差は線形近似が成り立つほど小さくはない。今回、球状天体が自転しながら円軌道運動する場合について、表面境界条件を満たす解を求める逐次近似法を開発したので紹介する。

本研究に先行して、我々は、公転運動を無視して自転のみ考慮した場合について、温度分布を求める逐次近似法を開発していた (Sekiya et al. 2012)。公転を無視した場合は、温度分布は定常解になる。それに対して、公転を考慮する場合は、時間とともに中心星の照射方向と天体の自転軸のなす角度が変化することを考慮に入れなければならない。我々は、中心星の方向の変化による加熱項の時間変化を、球面調和関数の変換公式 (Wigner 1959) を用いて求めた。

得られた解は、4つの無次元パラメータで特徴づけられ、相似則が成り立つことがわかった。すなわち、天体の半径や軌道半径が異なっても、無次元パラメータのセットが同じならば、平均温度で規格化した温度分布は、夏至を基準とした公転角の関数として、等しくなる。4つの無次元パラメータの内の1つは自転軸の傾きである。それ以外の3つの無次元パラメータや、解の性質の詳細については、発表の際に紹介する。

### 参考文献

- Sekiya, M., Shimoda, A.A., Wakita, S. (2012) Planet. Space Sci., **60**, 304.  
 Vokrouhlicky, D. (1999) Astron. Astrophys., **344**, 362.  
 Wigner, E.P. (1959) Group Theory and Its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra, Academic Press.

## Sub-km サイズ地球近傍小惑星 2011 XA3 の高速自転

○浦川 聖太郎<sup>1</sup>、阿部 新助<sup>2</sup>、大塚 勝仁<sup>3</sup><sup>1</sup>日本スペースガード協会, <sup>2</sup>台湾中央大学, <sup>3</sup>東京流星観測網

自転周期が2.2時間より速い小惑星の多くが、直径100m以下の小型小惑星である。(図1)。これは、自転速度の遅い小惑星が、複数の岩塊が重なり合い、重力で弱く維持されたラブルパイル構造を取り得るのに対し、高速自転をする小惑星は、遠心力に打ち勝つことができる、強い構造をもった単一岩塊からなるためである。どのくらいの直径の小惑星までが高速自転をするのか知る事は、小惑星を構成する岩塊の大きさや強度の上限値、小惑星の衝突破壊過程を知る手がかりとなる。

地球近傍小惑星2011 XA<sub>3</sub>は2011年12月15日にPan-STARRSで発見された。地球接近可能性を評価するため、即座に世界各地の観測所で位置測定が行われた。一方、この天体は~16等級という明るさであったため、中小口径望遠鏡を用いて、自転周期や小惑星スペクトル型を求めることが可能であった。我々は、小惑星2011 XA<sub>3</sub>に対し、美星スペースガードセンター0.5m及び1.0m望遠鏡、Tenagra天文台0.81m望遠鏡を用いて2011年12月16日、19日に可視測光観測を行った。その結果、この小惑星が自転周期約44分の高速自転をしていることが判明した(図2)。また、多色測光の結果、S型小惑星の可能性が高いことも分かった。アルベド0.20を仮定したとき、明るさから推定した直径は約250mであった。直径200mを超える小惑星が、これほどの高速自転をしている例はほとんどなく、これまでになく巨大な岩塊からなる小惑星と考えられる。また、その軌道は $a=1.492$  AU,  $i=28.3^\circ$ ,  $e=0.928$ ,  $\Omega=273.5^\circ$ ,  $\omega=323.9^\circ$ であり、小惑星(3200)Phaethonの軌道( $a=1.271$  AU,  $i=22.2^\circ$ ,  $e=0.890$ ,  $\Omega=265.3^\circ$ ,  $\omega=322.1^\circ$ )と類似している点があった。そのため、小惑星(155140)=2005 UD( $a=1.274$  AU,  $i=28.7^\circ$ ,  $e=0.872$ ,  $\Omega=19.8^\circ$ ,  $\omega=207.6^\circ$ )のようなPhaethon関連天体である可能性も否定できない。本講演では、観測結果とともに軌道進化についても報告する。

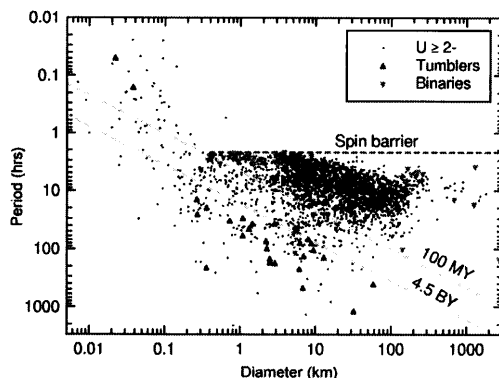


図1 小惑星の直径と自転周期の関係  
(Warner et al. 2009)

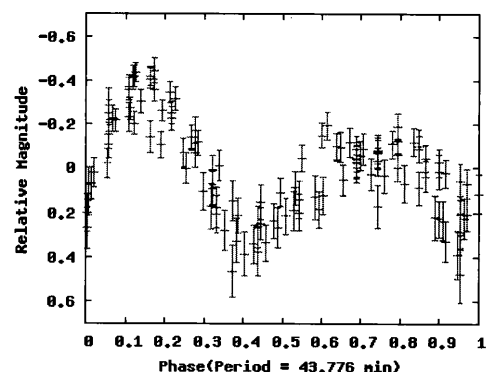


図2 2011XA3 のライトカーブ  
(周期 43.776 分)

## 土星リングの遠赤外線スペクトロスコピー

○森島 龍司<sup>1,2</sup>、エジントン スコット<sup>2</sup>、スピルカー リンダ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア大学ロサンゼルス校、<sup>2</sup>ジェット推進研究所

土星のリングは1センチから10メートル程度の無数の浮遊粒子からなっている。その粒子一つ一つはさらに小さいレゴリス粒子に覆われていると考えられる。レゴリス粒子の組成やサイズについて様々な波長のスペクトルから研究がなされており、組成は少なくとも純度90%以上の氷であることは分かっているが、不純物の組成や粒子サイズはまだ良く分かっていない。

本研究では、カッシーニ赤外分光計器(CIRS)によって得られた土星のリングの遠赤外線スペクトル( $10\text{--}650\text{cm}^{-1}$ )の解析を行い、レゴリス粒子の性質を調べた。観測される放射輝度スペクトルはリングの放射率(エミッシビティ)、リングの幾何学的充填率、プランク関数の積で表される。放射率のモデリングでは、まず、ミー散乱理論からレゴリス粒子の単散乱アルベドを求め、回折光成分を Delta-Eddington 近似で取り除いた。そして、その修正アルベドの値を等方散乱レゴリス放射輸送モデル(Hapke, 1993)の解析解に代入することにより放射率を求めた。リングの幾何学的充填率はカッシーニ紫外線撮像スペクトロメータの掩蔽観測から求めたものを使用し、リングの温度は二成分近似をした。今回は、組成は純粋な結晶氷とし、レゴリス粒子のサイズ分布をモデルフィットから見積もった。

その結果、サイズ分布の幅は非常に広く、1 マイクロンから 10cm 程度でベキは-3 程度であることが分かった。これは最も大きなレゴリス粒子と最も小さな浮遊粒子のサイズが同程度であり、レゴリス粒子と浮遊粒子のサイズ分布のベキが同程度であることを意味する。

土星に最も近い C リングでは温度が高くなるほどサイズ分布の傾きが大きくなる(小さい粒子が相対的に多い)現象がみられ、これは次の様に説明され则认为られる。C リングは土星の陰の中で冷却する時間が長いことから、公転運動に伴う温度変化が大きい。温度変化する表面層の厚みは熱慣性の値(Morishima et al. 2011)から 1 mm 程度と見積もられ、これは大きなレゴリス粒子のサイズより小さい。つまり、大きなレゴリス粒子は小さい粒子に比べ温度変化しづらく、浮遊粒子の温度が高い場合、見かけ上大きなレゴリス粒子からの熱輻射の寄与が小さくなっていると考えられる。

講演では得られたレゴリス粒子のサイズ分布の物理的意味や不純物の効果についても議論する。

# 飛騨天文台 HOPS による金星上層雲偏光観測

○佐藤毅彦<sup>1</sup>・中串孝志<sup>2</sup>・仲谷善一<sup>3</sup>・木村かおる<sup>4</sup>・榎本孝之<sup>5</sup>・細内麻悠<sup>6</sup>・大月祥子<sup>7</sup>

<sup>1</sup>宇宙科学研究所・<sup>2</sup>和歌山大学・<sup>3</sup>京都大学飛騨天文台・<sup>4</sup>科学技術館

<sup>5</sup>総合研究大学院大学・<sup>6</sup>東京大学・<sup>7</sup>専修大学

2011年3月に金星探査機「あかつき」がちょうど太陽と金星の間を通過しながら行った測光観測は、興味深い結果をもたらした。すなわち「あかつき」からはほぼ満月状の（太陽位相角の小さな）金星が見えていたわけであるが、その輝度一位相角曲線はそれ以前に報告されていたもの（Mallama, et al., 2006）とだいぶ異なっていたのである。当然、その位相曲線を解析して得られた雲層構造も標準モデルから変わっており、主には最上層のもやが薄いこと、中程度のサイズ（半径1ミクロン強）の雲粒子が位相曲線に強く寄与しているらしいことが推定されている（Satoh, et al., submitted）。この変化を追跡し、いつどのように起きるのか、あるいはどのようにして消えてゆくのかをとらえることが重要である。これを動機として、われわれは上層雲の性質に敏感な偏光撮像観測の継続的实施を計画した。

飛騨天文台には、2000年頃に65cm屈折望遠鏡に装着して用いるHOPSと呼ばれる惑星専用二次元偏光撮像装置がある。CCDカメラの不調もあって休眠していたこの装置を使用することとした。事前の準備として、新しいCCDカメラ（SBIG STL-1001E）の装着、画素ピッチの違いに対応するため光学系の一部交換を行った。改修後の初期観測を2012年5月に実施し、5月9日に金星および火星の偏光撮像データ（波長436, 548, 647nm）取得に成功した。本講演では、この5月データを処理して得られた金星面偏光度マップを示し、その解釈を論じる。また、8月下旬（金星の西方最大離角）にも観測を計画しており、データ取得できた場合にはそれも合わせて報告する。



## 惑星大気探査を見据えた大気大循環モデルの構築に向けて ー 火星大気の場合

\* 高橋芳幸 (惑星科学研究センター (CPS) / 神戸大学),  
地球流体電脳倶楽部 dcmmodel プロジェクト

### はじめに

将来の火星探査実現に向けて、現在、JAXA/ISAS にワーキンググループが設置され検討が進められつつある。その大気探査計画においては、地球大気観測では既に常識となっているような、探査計画の立案からデータ取得後の解析 (データ同化) までを担う、惑星大気科学のための数値モデルと利用環境の開発提供 (チームの確立) が必要とされている。実際、欧州では、惑星大気大循環モデル開発グループが中心となり火星シミュレーションデータをコンパイルすることで構築したデータベースが、様々な火星観測の設計およびデータ解析に利用され、火星の表層環境の理解の促進に貢献している。さらに、近年では欧米の複数の研究機関において、火星大気探査の結果を用いたデータ同化が行われるようになっており、これら再解析データを用いた研究も行われつつある。

このような状況を踏まえ、我々は火星大気大循環モデルの構築を進めている。現状のモデルは未だ構築の途上にあり、過去の観測結果との比較を地道に行っている段階である。これは、モデルをゼロから地道に構築し、惑星大気の特異性や普遍性を考察・確認しておくことが、今後の探査計画立案に必須であるためである。

本講演では、火星大気大循環モデル構築の現状、および計算結果と観測との比較の例をいくつか紹介することにする。

### モデル

火星大気大循環モデルの構築は、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/>) の一実装として実現する予定である。dcpam は、プリミティブ方程式をスペクトル変換法で解く力学過程と、地球大気および火星大気の計算のための放射過程、乱流混合、積雲対流パラメタリゼーション、大規模凝

結過程、CO<sub>2</sub> の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、地球大気用と火星大気用では異なる放射モデルで計算され、火星大気用のモデルでは、CO<sub>2</sub> と大気中のダストによる吸収と散乱の効果を考慮している。

火星大気の計算のために用いる地形、アルベド、熱慣性の分布は、Mars Global Surveyor (MGS) によって観測されたものを使用する。また、現在の計算では、大気中のダスト分布は仮定しており、本研究では MGS の観測結果に基づいて作成した平均的分布を与えることにする。

このような条件で、水平格子点間隔  $\sim 3.75^\circ$ 、鉛直 32 層の解像度 (スペクトル法で計算する大気モデルの標準的表現における T31L32) で 5 火星年間の積分を実行した。5 火星年目には、質量収支も含めておおよそ規則的な季節変化を示すようになる。解析には、積分 5 火星年目の結果を用いる。

### 計算結果

現在、モデルの結果と観測結果の比較を進めている。ダストストームが発生していない年における MGS による観測値と比較した結果、モデルは、温度が最大となる緯度の季節変化や、最大温度の季節変化といった季節変化の特徴をおおよそ表現している。見られる違いのいくつかは、モデルで仮定しているダスト分布と実際のダスト分布との違いに起因していると考えられるが、実際の原因を突き止めるためには他の物理量を含めてさらに検討する必要があるだろう。

今後は、大気温度など他の物理量についての比較や、他の探査機のデータを用いた比較、または、モデルの解像度を上げた感度実験などを行いたい。

## 火星境界層乱流の LES 実験

○西澤誠也<sup>1</sup>, 八代尚<sup>1</sup>, 宮本佳明<sup>1</sup>, 小高正嗣<sup>2</sup>, 高橋芳幸<sup>3,4</sup>, 林祥介<sup>3,4</sup>, 富田浩文<sup>1</sup>,

竹広真一<sup>5</sup>, 石渡正樹<sup>2,3</sup>, 中島健介<sup>6</sup>, 佐藤陽祐<sup>1</sup>, 杉山耕一郎<sup>2,3</sup>,

Team SCALE, 地球流体電脳倶楽部

<sup>1</sup>RIKEN/AICS, <sup>2</sup>北海道大学, <sup>3</sup>CPS, <sup>4</sup>神戸大学, <sup>5</sup>京都大学, <sup>6</sup>九州大学

### 1. はじめに

火星大気の地表面付近では、太陽加熱により活発な対流（乱流）活動が生じる境界層が存在する。大気と地表面との間の熱や運動量、物質の授受は、地表付近の大気状態に依存するため、大気大循環にとって、境界層が及ぼす影響は大きい。また、地表付近の乱流は、地表面の砂を巻き上げ、ダストストームを発生させ、大循環に大きな影響を及ぼす。したがって、境界層内の運動を理解することは火星大気を理解する上で欠かすことができない。境界層内の流れの時間および空間スケールは非常に小さいため、その再現のために、近年、ラージエディシミュレーション（LES）による実験が行われている。しかしながら、実験設定の違いにより、再現された変動には違いが生じる。本研究では、解像度およびドメインサイズに対する、再現される境界層乱流の依存性を調べる。

### 2. モデルおよび実験設定

使用したモデルは、RIKEN/AICS で開発された SCALE-LES ver. 3 である。SCALE-LES は、超並列計算機において高い計算効率を出すことを目的に開発された LES 用のモデルであり、高い並列化効率が特徴である。

本研究では、各種パラメータを火星の値を用いて計算を行った。湿潤過程は考慮せず、乾燥大気による実験を行った。放射過程は、Odaka et al. (2001) による一次元放射対流平衡モデルで得られた日変化する加熱・冷却分布を与えた。地表温度は、Odaka et al. (2001) で得られた地表面温度を与え、バルク法によりフラックスをモデル最下層に与えた。ダストの光学的厚さ( $\tau$ )として、0.0, 0.3, 1.0 の3通りの値を与えた。解像度および鉛直ドメインサイズをそれぞれ 200m, 20km に固定し、水平ドメインサイズを 20km および 40km の2通りに変えた実験、および、ドメインサイズを水平・鉛直ともに 20km にとり、解像度を、200m, 100m, 50m, 25m の4通りに変えた実験を行った。

### 3. 結果

対流混合層の深さは、 $\tau$  が小さいほど深く、持続時間も長い。 $\tau=0.0$  の場合、対流混合層は 10km 程度まで成長している。既存の LES 実験では、ドメインサイズは、混合層の深さ程度(~10km)にとられているものが多い。しかしながら、ドメインサイズ 20km 実験の結果をみると、上昇・下降域のセル構造は、計算ドメインの影響により、波数 2（波長 10km）の四角い構造をとっている。ドメインサイズを 40km にした結果では、セルのサイズがやや大きくなっており、波数 3 程度である。セルの形は、四角形や六角形に近いものが見られるが、依然として、ドメイン境界の方向にそった構造が見られており、計算領域サイズが十分ではないことが示唆される。次に、高度 2km における鉛直速度の確率密度分布をみると、鉛直速度の分布は負の方向に歪んでいる（正の歪度をもつ）ことが分かる。解像度 200m および 100m の結果では、正の方向にほぼ一定の割合で頻度が下がっているのに対し、解像度 50m および 25m の結果では、分布に肩が見られ、正負ともに強い鉛直流の割合が増加している。解像スケールの物理量は、格子サイズで平滑化された値であるため、解像度が粗い場合は、強い鉛直流が現れにくくなっていると考えられる。

### 4. 議論と今後

再現された混合層内の変動は、実験のドメインサイズおよび解像度に強く依存しており、本研究の実験範囲（ドメインサイズ 40km, 解像度 25m）ではまだ十分に収束していないことが示唆された。今後さらなる実験を行い、火星境界層乱流の再現に必要な解像度・ドメインサイズを明らかにする。

# 薄い回転球殻対流により引き起こされる表層の帯状流

\* 佐々木 洋平 (京大数学), 竹広 真一 (京大数理研), 中島 健介 (九大院理), 林 祥介 (CPS)

## はじめに

木星と土星の表層の流れは赤道周辺の幅の広い順行ジェットと、中高緯度で交互に現われる幅の狭いジェットによって特徴づけられる。この表層のジェットが深部領域の対流によって生成されているのか、表層の流体運動の結果なのかは未だに明らかになっていない。

最近 Heimpel and Aurnou (2007) はこれまでに考えられていたものより薄い球殻領域内の深部対流運動を考え、レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットを数値的に再現している。しかしながら、彼らの研究では経度方向に 8 回対称性を仮定しており、全球の 1/8 の領域の運動しか解いていない。

そこで本研究では、計算機性能の制約から Heimpel and Aurnou (2007) に比して幾分遅い回転角速度と粗い解像度ながらも、薄い球殻対流の数値計算を全球で行うことで、赤道域および中高緯度領域の帯状流が形成されるか否かを吟味した。

## モデルと実験設定

モデルは回転する球殻中のブシネスク流体の方程式系から構成される。方程式系に現われる無次元数は、プランドル数  $Pr = 1$ , エクマン数  $E = 10^{-4}$ , 球殻の内径外径比を  $\chi = 0.75$  に固定し、レイリー数を  $Ra = 10^5, 10^6$  の場合の二通りについて計算を行なった。境界条件は、温度固定、応力無し条件である。初期には静止場に水平構造が球面調和関数の  $Y_4^4$  成分からなる温度擾乱を加えた。数値解法として、水平方向に球面調和関数変換、鉛直方向にチェビシェフ多項式によるスペクトル法を用いた。計算に用いたパラメータと、出力パラメータであるロスビー数  $Ro$  およびレイノルズ数  $Re$  を表 1 に示す。

## 結果

図 1 に、異なる  $Ra^*$  での平均帯状流の分布を示す。図 1 上段は球殻表層での分布であり、 $Ra^* = 0.1$  の場合は中高緯度に東西風が交互に出現しているのに対し、 $Ra^* = 0.05$  の場合は現われていない。図 1 下段は子午面断面での様相である。帯状流は回転軸に沿っているものの、 $Ra^* = 0.1$  の場合には内球接円筒内部の流れ場が球殻下端から上端まで届いており、接円筒内部でより活発な対流が発生してい

る。したがって、調べたパラメータの下では、全球計算の場合でも 1/8 対称性を仮定した場合と同様に、レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが出現した。

表 1 計算に用いた  $\chi, E, Ra, Pr$  の値と、得られた  $Re, Ro$  の値。  $Re, Ro$  は平均帯状流の最大値で見積った。

| Control parameter                           |                                            |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $\chi = r_i/r_o$                            | 0.75                                       |
| $E = \nu/\Omega D^2$                        | $10^{-4}$                                  |
| $Pr = \nu/\kappa$                           | 0.1                                        |
| $Ra = \alpha g_o \Delta T D^3 / \kappa \nu$ | $5 \times 10^5, 10^6$                      |
| $(Ra^* = Ra E^2 / Pr)$                      | (0.05, 0.1)                                |
| Output parameter                            |                                            |
| $Re$                                        | $3.59 \times 10^2, 1.13 \times 10^3$       |
| $Ro$                                        | $3.59 \times 10^{-2}, 1.13 \times 10^{-1}$ |

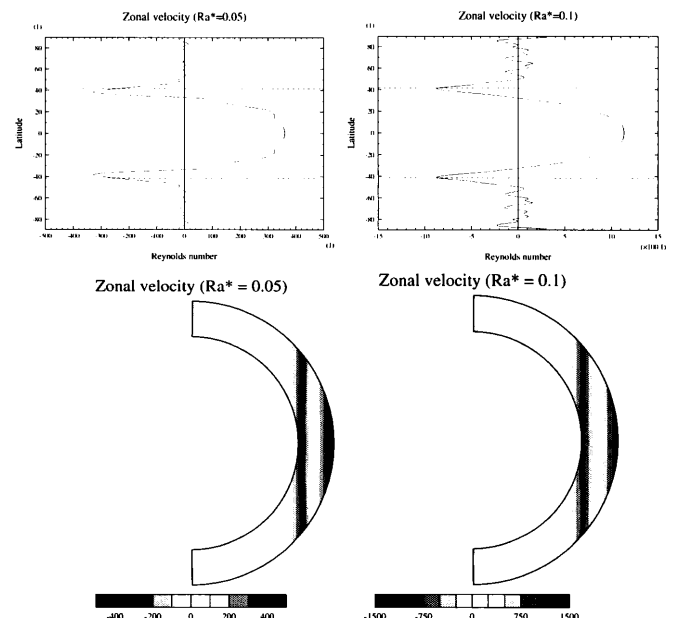


図 1 平均帯状流の様相。上段が球殻表層での分布、下段が子午面断面での分布である。それぞれ左が  $Ra^* = 0.05$  の場合、右が  $Ra^* = 0.1$  の場合である。

## 参考文献

Heimpel, M.H. and Aurnou, J.M., 2007 *Icarus*, **187**, 540–557.

## 木星の対流圏界面高度はどのように決まっているのか： 放射対流平衡モデルを用いた解析

○高橋 康人<sup>1</sup>, 倉本 圭<sup>1,2</sup>, はしもと じょーじ<sup>2,3</sup>, 大西 将徳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北海道大学, <sup>2</sup>惑星科学研究センター(CPS), <sup>3</sup>岡山大学, <sup>4</sup>神戸大学

木星は水素を主体とした極めて厚い大気を持っており、その対流圏には複数の凝結性成分が含まれている。これまでに行われた Voyager1,2 による電波掩蔽観測および Galileo による大気プローブ観測から、木星の対流圏界面はおおよそ 0.1bar 付近に存在し、圏界面直下には  $\text{NH}_3$  の雲が、より下層には  $\text{NH}_4\text{SH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  の雲が存在すると考えられている。

その一方で、我々はこれまでに木星を模した  $\text{H}_2$ -He 大気における平均的な大気構造を放射対流平衡計算から求める数値モデルを構築し、これを用いたパラメータスタディおよび Galileo プローブによる観測結果との比較を行ってきた。その結果、Galileo プローブによって観測された 2bar 面での温度を境界条件とした場合、対流圏界面の高度が 0.3-0.5bar の範囲となることがわかった。この高度は従来考えられてきた対流圏界面高度よりも低いため、深部大気中の  $\text{NH}_3$  混合比によっては  $\text{NH}_3$  の凝結が起こらず、観測と整合的でない。このことは  $\text{H}_2$ , He 以外の大気成分が圏界面高度の決定に重要な役割を果たしている可能性を示唆している。一方で、圏界面下での放射加熱率に関しては、Galileo プローブデータの解析結果と 0.5-1.5bar の領域でおおよそ似たようなピークが見られたことから、 $\text{H}_2$  と He によって放射加熱率の大部分が決定されている可能性があることもわかった。

本発表では、より改良したモデルを用いて対流圏界面高度を決める要因について考察を行う。特に  $\text{H}_2$ , He 以外の成分として  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  を導入することで、これらの分子が持つ線吸収によって大気の光学的厚さが増し、対流圏界面が上昇することが期待される。また放射加熱率についても、新たに導入する成分の寄与の大きさを見積もり、これまでの研究と比較を行う。

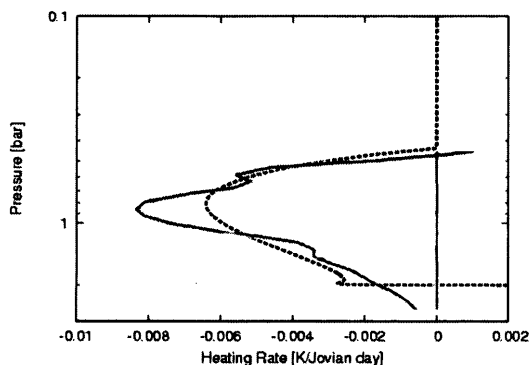


図:放射加熱率分布。実線は Galileo プローブによるフラックス観測値の解析結果(Sromovsky et al. 1998 掲載図より一部抜粋)、点線は本研究で得られた放射対流平衡大気における計算結果(大気全体で  $\text{H}_2$ :He 分圧比=9:1 と仮定)。縦軸は圧力、横軸は 1 木星日あたりの温度変化を示す。対流圏界面が 0.45bar 付近となっており、またそれ以下の高度において放射冷却率の特徴がおおむね一致している。

## 粉体層への衝突貫入の数値シミュレーション

○和田 浩二<sup>1</sup>, 中村 昭子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup>神戸大学大学院理学研究科

近年の小惑星探査によって、小惑星表層は細かい粒子からなるレゴリス層に覆われ、衝突クレーターと思しき窪み地形や衝突破片（イジェクタ）と思われる巨礫が多数存在し、さらには窪みを伴ういかにも衝突で埋め込まれたような岩石が存在するなど、天体衝突特有の地形・構造の存在が確認されている。これらの地形・構造の形成条件を明らかにするためには、小惑星における衝突クレーター形成過程やイジェクタ放出・再堆積過程に関する理解即ちスケーリング則が必要であるが、その確立には至っていない。レゴリス層で覆われた小惑星表層およびラブルパイルである小惑星自体は破片の集合体すなわち粉粒体と考えられ、さらに微小重力であることから高い空隙率を保持していると推定される。つまり小惑星は微小重力下にある高空隙粉粒体と考えられるが、そういった環境下での衝突過程についてのスケーリング則が確立されていないのが現状である。

本研究では、小惑星表層に刻まれた衝突過程を理解するべく、粉体層への天体衝突を想定した数値シミュレーションを行う。具体的には、粒子法的一种である離散要素法 (DEM) を用い、直径  $410\mu\text{m}$  の球形粒子からなる粉体層へ直径  $6\text{mm}$  の弾丸を比較的低速度 ( $70\text{m/s}$ ) で衝突させる。今回はとくに、弾丸の貫入過程とその抵抗則に注目して解析を行った。これまでの実験的研究によって砂層やエアロジェルへの貫入抵抗則は得られているが[e.g., 1,2], 小惑星表層を想定した粉体層への天体衝突における貫入抵抗則は明らかになっておらず、これを求めることが今回の目的である。加えて本シミュレーション設定は、我々が行っている室内実験を模擬するものでもあり、実験結果の確認と解釈を可能とするものである。貫入抵抗則は、将来の小惑星探査におけるアクティブな衝突実験やペネトレーター探査を計画するにあたって重要な検討要素でもある。

結果として粒子間相互作用を記述するパラメータにはほとんど依らず貫入速度の 2 乗や 1 乗に比例する抵抗の存在が示唆された。これは我々の行っている室内実験結果とも調和的な結果である。また標的粒子にかかる力を調べることにより、衝撃波・応力分布など貫入時の力学過程が明瞭になりつつある。本発表ではこれらの結果をもとに粉体層への貫入現象について議論する。

[1] Katsuragi, H. and Durian, D. J., 2007, *Nature Physics* 3, 420.

[2] Niimi, R. et al., 2011, *Icarus* 211, 986.

## 高速粒子衝突による高空隙率ターゲットにできる

### トラック形状：弾丸強度と初期動圧との対応

○岡本 尚也<sup>1</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 黒澤 耕介<sup>2</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>, 池崎 克俊<sup>3</sup>, 土山 明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>宇宙科学研究所,

<sup>3</sup>大阪大学大学院理学研究科, <sup>4</sup>京都大学大学院理学研究科

高い空隙率を持つ小天体にインパクターが衝突するときどのような物理過程が起こるのかを知ることは、インパクター物質が作る表層地形や表面組成を理解する鍵となる。我々はこれまで 80, 87, 94%と非常に空隙率の高いガラスビーズ焼結体を作成し、秒速数キロメートルの弾丸貫入実験を行ってきた。弾丸の貫入深さは弾丸速度の二乗に比例する項とターゲットの強度に比例する項を用いて表すことができた。弾丸が壊れない条件では、空隙率 90%のカイパーベルト領域の氷天体にシリケート弾丸が衝突するとおよそ弾丸直径の 100 倍程度潜り込むことを示した(日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会)。このときの衝突痕(トラック)の形状は細長いニンジン型のトラックとなるが、衝突速度が増すとそのトラック形状は変化し、太短く尾を持ったカブ型のトラックとなる。この大別される 2 つのトラックの型は、同じく低密度で高空隙なターゲットであるエアロジェルへの衝突でも観察され (Hörz et al., 2006)、Burchell et al. (2008) によりトラック最大径/トラック長さをを用いて分類されている。エアロジェルはスターダスト計画で Wild2 彗星のダストを捕獲するために使用されたもので盛んな研究が行われていたが、このカブ型のトラックが弾丸破壊のためか揮発性成分の膨張のため形成されるのかは混沌としていた。我々の実験と解析により、揮発性成分のない弾丸でもカブ型のトラックができることと、トラックの 2 つの型が初期動圧/弾丸強度で対応づけられることがわかった。また揮発性成分を持つ隕石弾丸 (Murchison)もこの対応関係の中にあり、カブ型トラックの形成には揮発性成分の膨張よりも弾丸破壊の影響が大きいと示唆される。

## 同一面への事前衝突を受けた氷試料の衝突破壊強度

○羽山遼<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>神戸大学自然科学系先端融合研究環

### はじめに

氷天体同士の衝突合体と再集積は、氷惑星・氷衛星、カイパーベルト天体の形成・進化に重要な役割を果たしたと考えられている。実際の氷天体は、カタストロフィックに破壊する以前に、複数回に及ぶ衝突を経験し、その時のクレーター形成に伴って内部にクラックが生じ、その結果、衝突破壊強度 $Q^*$ が無傷の状態から変化している可能性がある。そのため複数回の事前衝突を経験した標的の $Q^*$ を研究することは重要である。そこで、我々はこれまでに同一氷試料を用いた複数回衝突実験を行い、事前衝突が $Q^*$ に与える影響を明らかにすることを試みてきた。その結果、異なる面に衝突を行った実験の場合、複数回衝突を受けたターゲットの規格化最大破片質量 ( $m_f/M$ ) と事前衝突のエネルギー密度の積算値 ( $\Sigma Q$ ) の関係は無傷の氷の結果 (Kato et al., 1995; Arakawa et al., 2002) によく一致し、事前の衝突回数によらないことがわかった。今回の研究では同一面への複数回衝突実験を行うことで衝突面の選択の違いによる $Q^*$ の変化について調べた。また、以前の研究では同一サイズの標的を用いた実験が多かったので、本研究では、標的のサイズを変化させることで、弾丸と標的のサイズ比が $Q^*$ に及ぼす影響も考慮した $m_f/M$ と $\Sigma Q$ の関係式を求めた。さらに、事前衝突後に時間おいた標的の衝突実験を行い、クラックの焼結によるクラック密度の変化と計測して、衝突後の時間経過が $Q^*$ に及ぼす影響について考察した。

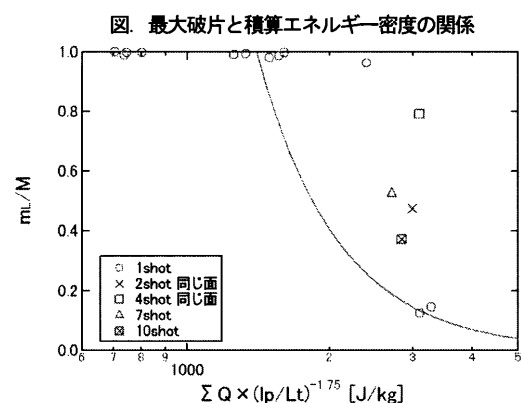
### 実験方法

複数回衝突実験 (最大10回) には北海道大学低温科学研究所の低温室に設置したガス銃を用いた。なお、衝突面の違いによる $Q^*$ への影響を考察するために氷弾丸を氷試料の異なる面に衝突させる場合と同一面に衝突させる実験を行った。実験温度は約 $-10^\circ\text{C}$ で、衝突速度は $140\sim 480\text{m/s}$ の範囲で変化させた。氷弾丸は円柱形で、その質量は $1.6\text{g}$ である。氷ターゲットは立方体多結晶氷で、その質量は $240\sim 2500\text{g}$ である。実験後、回収した衝突破片の質量を計測した。また、カタストロフィックに破壊されなかったターゲットは、クラック密度を定量化するために衝突点からの距離が異なる3点で縦波速度と横波速度の測定を行った後、次の衝突実験の標的とした。

### 実験結果

図は積算エネルギー密度と最大破片のグラフである。曲線は、異なる面に複数回衝突を行った場合の実験データのフィッティングを示し、氷標的の衝突破壊に関して  $m_f/M = 1.0 \times 10^8 \{Q \times (l_p/L_t)^{-1.8}\}^{-2.5}$  という経験式が得られた。 $l_p$ と $L_t$ はそれぞれ弾丸とターゲットのサイズである。同一面に衝突を行った実験では、異なる面に衝突を行った場合に比べ $Q^*$ が上昇し、4回衝突の場合、同程度の積算エネルギーで異なる面に衝突した標的と比較すると最大破片が4倍近く大きくなった。これは衝突点近傍の領域では事前衝突により形成したク

ラックの存在により衝撃圧力が急速に減衰し、効率的に破壊が進行しなかったためと考えられる。一方、クラック密度の増加に伴い物質中の音速は減少することが知られており、O'Connell and Budiansky (1974) によってクラック密度と弾性率の関係式が理論的に示されている。この式を実験試料に適用した結果、クラック密度は衝突点からの距離が増加するに従って減少し、 $\Sigma Q$ の増加に伴い線形に増加することが分かった。また、事前衝突後の経過時間を変化させた実験から、クラック密度は時間経過とともに減少するが、破壊の程度にはほとんど影響しないということがわかった。



## レゴリスに対するインパクターの衝突破壊の程度

○長岡宏樹、中村昭子、三軒一義

神戸大学大学院理学研究科

**はじめに：**多くの隕石は小惑星のかけらであり、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。また、隕石は母天体ごとに、さらに化学組成ごとに分類される。しかし、様々な母天体由来と思われる岩片が混じっているものがある。これらの隕石は異なった天体由来の物質が破片として集まってできた角礫岩化したものであり、普通コンドライトの20%程度が角礫岩化しているという報告もある。これら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の隕石が衝突し、破片が捕獲されて形成されたと考えられている (e.g. Rubin et al. 1983)。

そのような角礫岩化した隕石の形成過程を知るために、まずはレゴリスに他天体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、本研究では弾丸の破壊の程度を調べた。

**実験方法：**岩石を隕石模擬弾丸として小惑星のレゴリスを模擬した砂状の物質に撃ち込む。弾丸の加速には主に神戸大学の火薬銃を使用し、神戸大学の小型ガス銃も使用した。これまで衝突速度 5-961 m/s でパイロフィライトと玄武岩を弾丸物質として用いた実験を行い、破片を 500 $\mu$ m サイズのふるいを用いて回収した。また、パイロフィライトにアルミニウムを衝突させた先行研究(Takagi et al. 1984)と比較するためにアルミニウムへのパイロフィライトの衝突実験も行った。

**結果：**本研究では弾丸の単位質量当たりの弾丸の運動エネルギーと定義した衝突エネルギー密度と最大破片質量割合との関係を調べた。最大破片質量を元の弾丸質量で割った最大破片質量割合が 0.5 となる時のエネルギー密度はカタストロフィック破壊が起こる条件であり、パイロフィライトが 41.6 kJ/kg、玄武岩が 82.7 kJ/kg で、玄武岩の圧縮強度の方が大きいことと調和的だった。パイロフィライトのその値はエネルギー密度を系(弾丸と標的)の単位質量当たりの弾丸の運動エネルギーと定義した先行研究(Takagi et al. 1984)の値と比べると2桁大きくなった。パイロフィライトをアルミニウムに衝突させた実験では先行研究のデータと最大破片質量割合とエネルギー密度の関係はほぼ一致した。

今後は標的となる砂の粒径の違いによる衝突破壊への影響についても実験を行い、結果を議論する。



## カンラン岩ターゲットを用いた衝突実験破片の微細構造

○島田玲<sup>1</sup>、土山明<sup>2</sup>、道上達広<sup>3</sup>、門野敏彦<sup>4</sup>、長谷川直<sup>5</sup><sup>1</sup>大阪大学理学研究科、<sup>2</sup>京都大学理学研究科、<sup>3</sup>近畿大学工学部、<sup>4</sup>産業医科大学医学部、<sup>5</sup>JAXA

太陽系の歴史の中で、衝突現象は小惑星や小衛星といった小天体の形成や進化に重要な役割を果たしてきた。小惑星表面に存在するレゴリスも、小天体や宇宙塵などの物体が小惑星表面に衝突したことにより生成したと考えられている。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では、マイクロX線CTにより粒子のサイズ分布、3次元形状分布が明らかになった[1]。また、FE-SEMによる粒子表面の観察により微細構造が観察されている[2]。

本研究では、微細な衝突破片とはやぶさサンプルの比較を目的として、宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を用いてカンラン岩ターゲットへのクレーター生成破壊実験をおこなった。プロジェクティルは直径1mmのTi球を用い、衝突速度は5.1km/sとした。放出された破片の回収はターゲットの正面に発泡スチロール製の緩衝材(40cm x 40cm x 3cm)を置き、破片を貫入させることによりおこなった。この手法は以前に大理石および石灰岩を用いておこなった実験[3]と同じであり、放出された破片のうち、緩衝材に貫入した破片を高速度破片とし、貫入できずチャンバー底面に落下した破片を低速度破片として回収した。

回収された高速度破片、低速度破片それぞれについて、京都大学の高分解X線CT装置(Elescan)を用いて解析し、100 $\mu$ m程度の微細な領域までのサイズ分布及び3次元形状分布を求めた。さらに、高速度破片3粒子、低速度破片3粒子、W乳鉢での粉碎破片2粒子について大型放射光施設SPring-8のマイクロCTを用いて測定し、粒子の内部構造を観察した。また、これらの粒子についてFE-SEMを用いて表面の微細構造の観察をおこなった。

サイズ分布に関してはべき近似をおこない、べき指数を求めたところ、低速度破片が-2.7、高速度破片が-4.0となった。また、3次元形状分布に関しては、Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定を用いてサンプル間の相違の評価をおこない、低速度破片と高速度破片は有意に異なる分布を持つことが分かった(有意確率  $P=0.00$ )。さらに、それぞれについてイトカワレゴリスの3次元形状分布と比較をおこなったところ、高速度破片とイトカワレゴリスの分布は有意に異なるが( $P=0.00$ )、低速度破片とイトカワレゴリスの分布は有意に異なるとは言えないことが分かった( $P=0.11$ )。今後、衝突実験破片の表面微細構造観察をFE-SEMを用いておこない、イトカワ粒子のそれ[2]と比較する予定である。

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

[2] Matsumoto T. et al. (2012) Abstract #1969. 43rd Lunar & Planetary Science Conference.

[3] Shimada A. et al. (2012) Abstract #PPS21-05 Japan Geoscience Union Meeting 2012

## 焼結雪への衝突におけるエジェクタ速度計測

○鈴木絢子<sup>1,2</sup>, 荒川政彦<sup>2</sup>, 保井みなみ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>惑星科学研究センター, <sup>2</sup>神戸大学

氷小天体上での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、氷小天体のレゴリス形成や表層構造の進化、さらに惑星系のデブリディスクの進化を考える上で重要である。そこで強度を変化させた雪試料へ氷弾丸を衝突させ、エジェクタカーテンの形状や飛び出すエジェクタ粒子の速度に対する強度の影響を調べた。

実験は北海道大学低温科学研究所の低温室にて行い、室内気温は-10℃であった。標的雪試料は、直径 250~710 μm の氷粒子を直径 14 cm、高さ 10 cm の容器に詰めて作成した。試料容器中の雪試料の質量を測定して求めたバルク密度と空隙率はそれぞれ 0.508 g/cm<sup>3</sup>, 44.6%であった。-10℃の環境下では、氷粒子は急速に焼結して強度を持つようになるため、氷粒子を容器に詰めてから弾丸衝突までの時間を 15 分~15 時間に変化させて実験を行った。強度と焼結時間の関係は、衝突実験とは別に計測した。ただしこのときの強度は、金属円柱をある高さから試料表面に垂直に落下させたときのくぼみの深さから求めた値[木下, 1960]を用いた。弾丸は直径 1 cm、高さ 0.7 cm、質量 0.52 g の氷円柱で、軽ガス銃を用いて 43~111 m/s に加速した。遅い速度のエジェクタ粒子まで計測するため、弾丸は水平に発射し、鉛直にした標的表面に衝突させた。衝突の様子は高速度ビデオカメラを用いて、3000fps で記録した。

エジェクタカーテンは、始めは砂など重力支配域でのクレーター形成で典型的に見られるコーン状に発達し、数~数 10 ms 後にピラー状へと時間的に変化することがわかった。スポール破片はエジェクタカーテンがコーン状からピラー状に変化する時刻を中心に、クレーター外縁部で観測された。エジェクタ放出速度と位置の関係は、高速度ビデオでのエジェクタ粒子の軌跡から求めた。ただしカメラの視線方向に速度成分を持たないエジェクタカーテンの端部の粒子のみに着目した。放出位置  $y$  と放出速度の関係は、 $v_{\text{放出}}/v_{\text{衝突}} = k\{y/r_{\text{弾丸}}(\rho_{\text{弾丸}}/\rho_{\text{標的}})^{1/2}\}^{1/(1+\mu)}$  と近似することができる ( $v, \mu$  はカップリングパラメータのべき、 $k$  は係数) [Housen & Holsapple, 2011]。実験結果より、雪試料において、木下式で測定した標的強度が 11~59 kPa、衝突速度が 43~111 m/s のとき、 $k = 0.18 \pm 0.03$ ,  $-1/\mu = -2.0 \pm 0.2$  となることがわかった (ただし  $v = 0.4$ )。また、クレーター外縁近傍ではこの関係にオフセットが生じて放出速度が遅くなるが、速度一定 ( $v_{\text{衝突}} \sim 105 \text{ m/s}$ ) で強度を変化させたとき、オフセットが効き始める点での放出速度は強度と共に増加し、 $v_{\text{放出}} = (0.21 \pm 0.03) \sqrt{Y/\rho_{\text{標的}}}$  となることがわかった。この関係は  $Y \propto \rho_{\text{標的}} v_{\text{放出}}^2$  と表すことができ、クレーター外縁においてエジェクタ粒子は雪の強度を振り切ることができずに飛び出せなくなるという、強度支配域のクレーター形成モデルとよく一致している。

## 同サイズ微惑星の衝突破壊における破片速度分布

○河本 泰成<sup>1</sup>, 保井 みなみ<sup>2</sup>, 鳶生 有理<sup>3</sup>, 荒川 政彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学自然科学系先端融合研究環, <sup>3</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

太陽系の惑星は多孔質の微惑星同士が衝突破壊、再集積を繰り返すことで原始惑星へと成長したと考えられている。林モデルによると、太陽系の成長過程において、ダストの重力不安定により太陽からの距離に応じて同質量の微惑星が多くできる。また、衝突速度は天体の脱出速度(数 m/s-数 10m/s)以上になり、正面衝突に限らず様々な角度での衝突が起きたと考えられる。本研究では、岩石微惑星と氷微惑星を模擬した試料を用いて、低速度での同サイズ球試料同士の正面衝突および斜め衝突実験を行った。そして、衝突破壊強度と破片の飛翔速度を測定し、同サイズ衝突における衝突破壊の特徴を明らかにすることを試みた。

実験は一段式軽ガス銃を用いて行った。試料は氷と空隙率 55%の石膏を用い、氷微惑星と岩石微惑星をそれぞれ模擬した。試料は全て直径 30mm の球であり、これを弾丸と標的に用いた。石膏試料を用いた実験は神戸大学で行い、氷試料を用いた実験は北海道大学・低温科学研究所の大型低温室(-10°C)で行った。衝突速度( $v_i$ )は正面衝突では 12.5-90m/s と変化させた。一方、斜め衝突では 70(±5)m/s で一定とした。斜め衝突の衝突角度( $\theta$ )は 0~75°で、15°刻みとした。衝突の様子は高速度ビデオカメラを用いて毎秒 3000-8000 コマの速度で撮影した。

正面衝突を撮影した高速度カメラの画像から、氷球でカタストロフィック破壊が起こった場合、衝突直後に球全体が細かく破壊され、2つの氷球が合体して1つの球となる様子が観察された。その後潰れて薄い円盤となり、衝突方向と直角の方向に広がっていった。氷球が潰れる速度は衝突速度によらず約 10m/s であり、潰れた円盤が広がる最大速度は衝突速度程度であった。カタストロフィック破壊が起きない場合、ほとんどの破片の速度は重心速度程度となったが、衝突点付近からは衝突速度と同程度の細粒破片の放出が見られた。

石膏球の場合、衝突速度が 30m/s 以下では、破壊が起こらず衝突後に 1m/s 程度で跳ね返りが起こった。衝突速度が増加して 40m/s を超えると石膏球の片方のみが破壊され、壊れなかった球の速度は重心速度程度となった。さらに衝突速度が増加し、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て、数個の破片ができた。破片は、衝突方向と直角に飛び出し、その速度は 10m/s 程度であった。

衝突破壊強度  $Q^*$  は、正面衝突の場合、氷では Arakawa et al. (1995b) と Arakawa (1999) から、弾丸・標的質量比 0.003-0.13 で  $Q^*=89\text{J/kg}$  が、石膏では Yasui and Arakawa (2011) より、弾丸・標的質量比 0.027-0.56 で  $Q^*=446\text{J/kg}$  が得られている。今回の実験の結果、同サイズ球の衝突でも氷・石膏共にこれらの先行研究と同じような衝突破壊強度を示した。斜め衝突の場合、氷・石膏共に衝突角度に比例して規格化最大破片も大きくなり、氷の場合  $m_p/M=0.044(\cos\theta)^{-1.4}$ 、石膏の場合  $m_p/M=0.44(\cos\theta)^{-0.62}$  が実験結果から得られた。

この様に <100m/s の衝突速度では石膏より氷の方が破壊されやすく、それらの破片が衝突方向に直角に広がる速度も氷の方が数倍から10倍速いことがわかった。

【参考文献】 Arakawa et al.(1995) Icarus, **118**, 341. Arakawa(1999) Icarus, **142**, 34. Yasui and Arakawa (2011) Icarus, **214**, 754.

## 月、火星の縦穴と斜め衝突実験

○道上達広<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 近畿大学 工学部

月や火星の地下には東京ドームにも匹敵するような天然の大規模な空洞が存在している可能性が以前から指摘されていた。それは溶岩チューブと呼ばれる空洞で、地球では火山などから噴出した溶岩が、穴を作って流れていくことによってできたものである。このような巨大な空洞は将来の人類の基地として有力な候補の1つである。

近年、月の「マリウス丘」と呼ばれる火山活動が非常に活発だった地域に、地下空洞に関する縦穴が発見された。Haruyama et al(2009)では縦穴周辺に溶岩が流れた痕跡が存在することから、この縦穴には地下空洞が存在していると考えている。また、この縦穴は隕石の衝突によって形成されたと推定している。

同様の縦穴は、近年、火星でも発見が相次いでいる。それらの縦穴の形は当初予想していたよりも様々な形があり、楕円形の縦穴も多い。そこで今回は、溶岩チューブを模擬した斜め衝突実験を行い、そのような楕円形の縦穴ができるかどうか調べた。標的は豊浦標準砂を少量のセメントと水で固めたモルタルを作製した。大きさは縦と横が30cm、厚さ5cmで中心近くの縦20cmの領域の厚さは1cmに加工した（溶岩チューブを模擬した加工）。標的の圧縮強度は3.2MPa、引張強度は0.8MPaである。弾丸には直径7mmのナイロン球を用い、衝突速度約2.5km/sで衝突角度（標的表面からの仰角）2度から90度の角度で衝突実験を行った。高速度カメラは標的の側面と上面に設置し共に1秒当たり数千コマの割合で破片の飛び出す様子を撮影した。

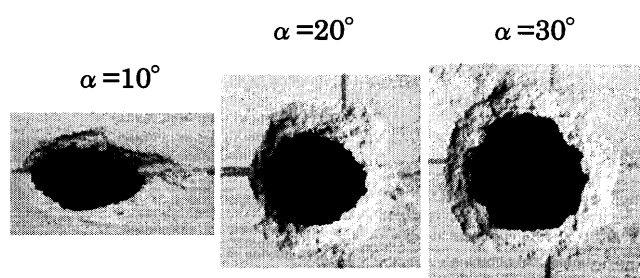


図1 溶岩チューブ斜め衝突模擬実験。  
衝突角度 $\alpha$ と形成された縦穴。弾丸は左側から衝突。

図1に今回の実験で形成された縦穴の一例を示す。縦穴の形は、衝突角度20度から徐々に楕円形になることが分かった。これらの形状は、月、火星の楕円形の縦穴形状とよく似ている。より詳細な実験結果について本研究会で発表を行う。

## Experiments on the Size Segregation on Small Rubble-Pile Asteroids

ラブルパイル小惑星上のサイズ偏析に関する実験

O Carsten Güttler<sup>1,2</sup>, Akiko M. Nakamura<sup>1</sup>, Jürgen Blum<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, Japan

<sup>2</sup> Institute for Geophysics and extraterrestrial Physics, University of Braunschweig, Germany

From the pictures of the small asteroid 25143 Itokawa, taken by the Hayabusa spacecraft in 2005/06, we can identify it as a rubble pile of large rocks, small pebbles, maybe some dust, and an unknown interior. It is therefore a stunning example for a granular material under exotic environmental conditions. With its size of only 535x294x209m<sup>3</sup> and a porosity of 41%, the surface gravity is just around a 10<sup>-5</sup> fraction of Earth's gravity [1]. It must be expected that granular media under reduced gravity conditions show a significantly different behavior than in laboratory experiments under Earth gravity. Not only will all kinetic processes take much longer, also will the cohesion between the constituent grains play an enhanced role. While fine sand with particle sizes below approx. 100 micrometer shows the onset of cohesive behavior on Earth, this size would be shifted to 3 centimeter pebbles on Itokawa. It may be a coincidence but this is also about the size of the small surface grains on Itokawa as measured by the Hayabusa mission.

Small pebbles and large boulders are not randomly mixed on Itokawa: while the pebbles populate the smooth regions like MUSES-C or Sagami-hara in the low gravity potentials, boulders are dominant at the high potentials. It has been proposed that size segregation effects like the Brazil-Nut Effect or landslide-induced separation could be responsible for observed surface pattern [2]. Such effects could potentially transport boulders to the surface and distribute them accordingly. This has interesting consequences for the interior of Itokawa as well as to a continuous resupply of fresh material to the surface. Moreover, it is connected to the crater statistics on Itokawa or Eros since these rely on a seismic activity which is expected to be induced by impacts and not yet understood.

We will present experiments on granular media under a variation of gravity levels which aim for a better understanding of features observed on the surface of small asteroids. First, we want to study granular-media effects under enhanced gravity and therefore developed a small laboratory centrifuge, which so far achieved gravity levels between 1 and 20 Earth gravities. At the moment, we have two granular-media experiment payloads to study (1) the Brazil-Nut Effect in a shaking box as well as (2) angles of repose and size segregation in a tumbler. Sample sizes are in the order of 10x10x10 cm<sup>3</sup> and the samples currently used are sand and glass beads. While we can learn a general scaling from enhanced gravity experiments, these are also performed to prepare (more costly) reduced gravity experiments. These are scheduled on a parabolic flight later this year, Drop Tower next year, and possibly on suborbital flights in the future.

[1] Fujiwara et al. (2006). Science, 312:1330-1334. [2] Miyamoto et al. (2007). Science, 316:1011-1014.

## ASTERによるマルチスペクトルデータを用いた地球衝突クレータ搜索

○山本 聡<sup>1</sup>, 松永 恒雄<sup>1</sup>, 中村 良介<sup>2</sup>, 関根 康人<sup>3</sup>, 平田 成<sup>4</sup>, 山口 靖<sup>5</sup><sup>1</sup>国環研, <sup>2</sup>産総研, <sup>3</sup>東京大, <sup>4</sup>会津大, <sup>5</sup>名古屋大

現在地球上には182個の衝突クレータが認識されている[1]。この個数は月や火星等の固体天体上で見つかる衝突クレータの個数に比べて桁違いで少ない。これは地球において天体衝突の頻度が低いということではなく、発見されている衝突クレータの数自体が少ないことによる。衝突クレータと認識されるためには、(1)衝突クレータの特徴的構造(円形地形等)が認識され、かつ(2)衝撃変性鉱物など天体衝突の物的証拠が見つかることが必要であるが、地球の場合そもそも円形候補地形自体が少ない。その理由としては、地球表層では風化浸食作用や堆積作用の影響により古い地形の保存が良くないこと、また衝突クレータが表層付近に暴露されていたとしても植生や水の影響などにより認識が容易でないことが理由としてあげられる。一方で、地球観測衛星などを用いた衝突クレータ候補地形の全球搜索研究自体が乏しいため、実際に表層に残っている衝突クレータ自体が現在発見されている個数程度でしかないのか、それともたまたま発見されたものが182個程度なのかについてはよくわかっていない。

一方、最近の衛星リモートセンシング技術の向上により、高空間/高波長分解能の反射スペクトル画像の大量取得が可能となりつつある。そのため、今後地球観測衛星データに対するデータマイニング等を使った搜索研究により、これまで認識されていなかった衝突クレータの候補地形が多数見つかる可能性も考えられる。実際にGoogle Earthデータを使った搜索により、新しい衝突クレータが発見されたという報告もある[2]。

そこで、我々は昨年より衛星リモートセンシングによる反射分光データを使った、クレータ候補地形の搜索の可能性について研究を行ってきた。経済産業省が開発したASTER[3] (1999年打ち上げられたNASAの地球観測衛星TERRAに搭載)によるマルチスペクトル画像データを用いて、地球上で衝突クレータとして認識されているもののうち表層に暴露されているものについて解析を行い、それぞれの特徴の記述と分類を行った。その結果、堆積岩層領域に位置する衝突クレータの中に、クレータ中央丘およびリム周辺において、反射スペクトル特性の異なる多重円環構造が観測されることがわかった(図1左)。これらの多重円環構造は、複雑クレータ形成過程において中央丘が形成される時に、表層と異なるスペクトル特性をもつ深部物質が表層に露出したことで形成されたと考えられる(図1右)。このことから、マルチスペクトル画像における多重円環構造は、衝突クレータ特有の特徴である可能性が高い。もちろん、多重円環構造を持つ候補地形が、本当に衝突クレータであるかの最終判断においては、現地調査による詳細研究は必要である。しかし、本研究の第一段階の目標としては、まずこの多重円環構造に着目してASTERデータから衝突クレータ候補地形を探し出し、世界各地における候補地形リストの作成を行うことが重要である。そこで今回、この多重円環構造を手がかりに、世界各国の堆積盆地および砂漠地域に対するASTER画像データの解析を行った。本発表では、これらの解析結果を基に地球クレータの個数分布について議論を行う。

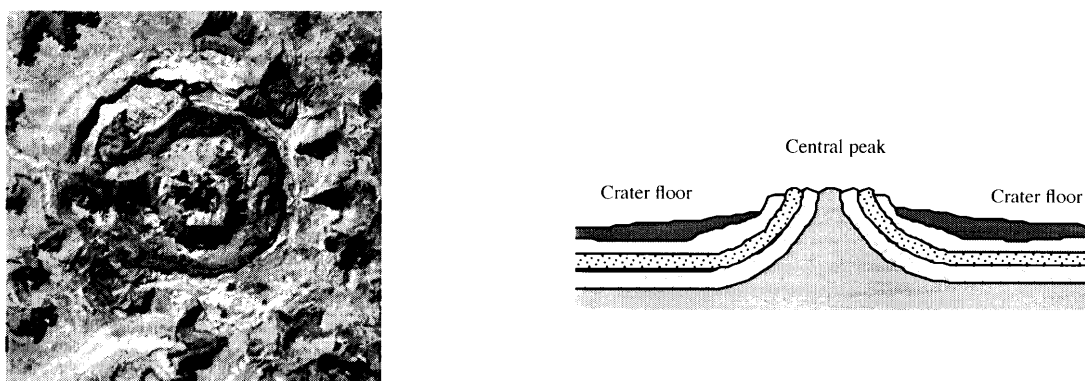


図1：(左)ASTERデータによる地球衝突クレータの一例。アメリカにあるアップヒーバルドーム。ASTERのSWIRによる擬似合成カラーマップ。(右)異なるスペクトル特性を持つ地層における中央丘形成と多重円環構造の関係。

[1] Earth Impact Database, <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>, Accessed: 21/Aug./2012. [2] Folco et al., Science, 329, 804, 2010. [3] Yamaguchi, Y., et al., IEEE TGRS, 36, 4, 1062-1071, 1998.

## 粉体の熱伝導率に関する実験的研究: 圧縮応力の影響

○坂谷 尚哉<sup>1,2</sup>, 小川 和律<sup>1</sup>, 飯島 祐一<sup>1</sup>, 津田 彰子<sup>1,3</sup>, 本田 理恵<sup>4</sup>, 田中 智<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙科学研究所, <sup>2</sup>総合研究大学院大学, <sup>3</sup>東京大学, <sup>4</sup>高知大学

月や小惑星のような固体天体はレゴリスで覆われている。真空下での粉体は 0.001 W/mK オーダーの超低熱伝導率を有していることが知られており、天体の熱的な状態や熱進化に与える影響は無視できず、その熱伝導率の値を正しく制約する必要がある。ただし、真空下におけるレゴリスのような粉体の熱伝導率は粒径や温度、空隙率、圧縮応力などの様々なパラメータに依存するため、熱伝導率を制約するためには、そのパラメータ依存性を理解し定量化しなければならない。特に、レゴリス層の熱伝導率の鉛直分布を決定する際に重要なパラメータが圧縮応力である。すなわち、深さが深いほど、自重により大きな圧縮応力を受けるため、熱伝導率は深さ方向に連続的に変化することが予想される。熱伝導率の応力依存性については、いくつかの理論的研究はあるものの (Halajian and Reichman, 1969; Pilbeam and Vaišnys, 1973)、実験的研究は見られない。そこで、本研究では真空下において粉体の熱伝導率の圧縮応力依存性を調査し、その依存性を実験的に定量化することを目指す。

我々はこれまでに、縦方向にいくつかの熱伝導率測定点を設けたサンプル容器を用いることによって、自重による圧縮応力がガラスビーズの熱伝導率に大きな影響を与えることを実験的に示した (Sakatani et al., 2012, ICARUS submitted)。しかし、容器に充填されたガラスビーズ中の応力分布に大きな不定性があることや、応力範囲が 0~2 kPa 程度であったことから、より正確な広範囲の応力コントロールが求められる。そこで、サンプルの自重ではなく、能動的にサンプルを加圧することによって応力をコントロールする機構を開発した。応力のコントロール範囲は自重による応力 (~300 Pa) から月面レゴリス層の深さ 5 m 相当の圧力 15 kPa までである。

本研究で構築した圧縮応力コントロール機構の概念図を図 1 に示す。線加熱法による熱伝導率測定容器の上には糸で繋がれたいくつかのおもりがあり、モーターにより順にサンプル上面に乗せることによって、サンプル中の応力をコントロールする。応力の値は応力センサで直接同定する。

本発表では上記の実験装置を用いて、ガラスビーズに対して調べた熱伝導率の圧縮応力依存性の結果を報告する。

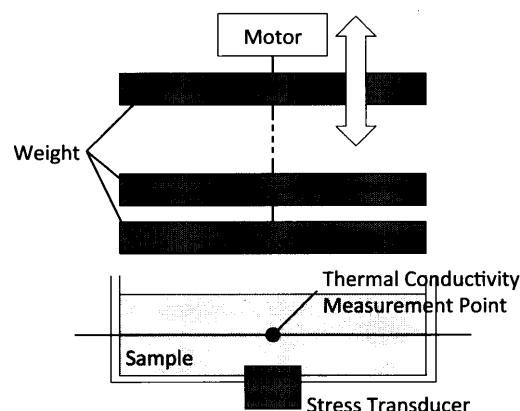


図 1: 装置の概念図。

## 岩石の表面形状と反射スペクトルとの関係

○鳥居大亮 佐伯和人

大阪大学 理学研究科

次段階の月着陸探査計画として SELENE2 が検討されている。SELENE-2 の科学運用として、ランダに搭載した眺望分光カメラで遠方にある中央丘露頭から着陸機周辺に隕石衝突ではじき出されている岩石を同定し、ローバーに搭載したマクロ分光カメラでその場観察することを提案している。この眺望カメラでの同定のためには様々な粗さをもった岩石表面の光散乱特性の理解が必要である。そこで月面において代表的な岩石である玄武岩、斜長岩について 3 種類の表面粗さを変えた試料を作り、入射光にハロゲンランプ、検出器に冷却 CCD を用いた位相角可変式分光装置で入射角と観測角を変化させ反射スペクトルの測定を行った。分光はグリズムを用いている。3 種類の試料はアイソメットで適当な大きさに切りだした岩石を研磨粉、ダイヤモンドペーストを用いて研磨し作成した。さらに岩石の粒径を月面上のレゴリスと同様の粒径( $75\text{--}100\mu\text{m}$ )となる粉体試料を作成した。

岩石はハワイ島の玄武岩、米国ポーマウンテンの斜長岩を使用した。斜長岩は集積構造を持つ物と再結晶した物の 2 種類を使用した。これら作成した試料を入射角、観測角を可変させた様々な条件で反射スペクトルの測定を行った。

粉体試料に関しては玄武岩、斜長岩どちらの粉体でも反射率が観測角に依存しない完全拡散反射に近い結果となった。さらに粉体試料での測定結果から反射率は異なるが玄武岩、斜長岩どちらの粉体試料も同じような散乱となり、種類に依存しないと思われる。

一方で岩石の鏡面では正反射が最大の反射率を持つ光散乱特性となった。これは斜長岩、玄武岩のどちらにも見られた。その他 2 種類の表面粗さの岩石の光散乱特性は鏡面のように正反射で最大とはならず、反射率の変化が少ない粉体と似た反射特性となった。

ただし表面粗さと散乱角度分布の関係は岩石種類や元の岩石組織によってわずかに差があり、岩石を構成する鉱物の大きさの影響があることが予想される。



## カンラン石の粉体とカンラン岩との 反射スペクトルの比較

○丸山薫<sup>1</sup>, 佐伯和人<sup>1</sup>, 大井修吾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 理学研究科, <sup>2</sup>京都大学 人間・環境学研究科

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。月表面の大部分はレゴリスで覆われており、粉体の反射スペクトルは詳しく研究されているが、岩石の反射スペクトルの研究例はほとんどない。クレーター中央丘では深部岩石が露出しているとされており、月地殻情報が得られると注目されている。本研究の目的は、岩石表面のスペクトル解釈のため、粉体と岩石との反射スペクトルの違いについて調べることである。

そこで、カンラン石の粉体と焼結体(擬似岩石)、カンラン岩とその粉体の反射スペクトルを様々な観測幾何条件で測定した。用いた試料はサンカルロス産のカンラン石、長野県下伊那郡大鹿村鹿塩川産のダンカンラン岩である。焼結体はカンラン石を砕いたものをふるいでいくつかの粒径のグループに分け、ピストンシリンダー型高圧発生装置で1GPa, 1400–1500°Cで加圧焼結して作成した。焼結体はアイソメットで断面を出した後、表面を鏡面にしたもの、粗い面にしたものを用意した。また、カンラン岩は断面を出した後、表面を鏡面にしたもの、2種類の粗さの粗い面にしたものを用意した。焼結体とカンラン岩は薄片の偏光顕微鏡観察により粒径を測定し、焼結体では焼結による粒成長が見られないことを確認した。カンラン石とカンラン岩の粉体はふるいでいくつかの粒径のグループに分けた後、エタノールで洗浄した。スペクトル測定には、光源はハロゲンランプ、検出器はCCDカメラを用いた位相角可変反射スペクトル測定装置を用いた。試料からの反射光はグリズムを用いて分光している。また、反射率を求める際の基準にはスペクトラロンを使用した。各試料において、様々な観測幾何条件で反射スペクトルの測定を行った。焼結体の反射スペクトルはカンラン石の粉体と大きく異なり、反射率が下がった。焼結体とカンラン岩では反射スペクトルの形は似ていた。

岩石の反射スペクトルの特徴を調べるために焼結体がアナログ物質として有効であることがわかった。また、岩石の散乱特性は表面の状態によって大きく変化することが分かったもので、表面状態との関係性を調べるのが今後の課題である。

## マグネタイトの高圧下磁気ヒステリシス測定実験： 火星地殻磁気異常のソースについて

○佐藤雅彦<sup>1</sup>，山本裕二<sup>2</sup>，西岡孝<sup>3</sup>，小玉一人<sup>2</sup>，綱川秀夫<sup>1</sup>，望月伸竜<sup>4</sup>，臼井洋一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻，<sup>2</sup>高知大学海洋コア総合研究センター，<sup>3</sup>高知大学教育研究部自然科学系理学部門，<sup>4</sup>熊本大学大学院先端機構，<sup>5</sup>独立行政法人海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

Recent magnetic field observations of Mars revealed that there are many magnetic anomalies originated from the Martian crust, which have the potential to give the important information concerning the magnetic field and the crustal structure. We have conducted *in-situ* magnetic hysteresis measurement of magnetite under high pressure up to 1 GPa, using high-pressure cell specially designed for a Magnetic Property Measuring System. Based on our experimental results, systematic rock magnetic properties of magnetite were obtained for high pressure up to 1 GPa for the first time. Taking into account the new results of the pressure dependences, relaxation time of remanent magnetization in the Martian crust was calculated as a function of depth and time. The result revealed that remanent magnetization carried by coarse grain magnetite would have been demagnetized within 4 Gyr after the cessation of dynamo, while small magnetite could stably retain its magnetization in the entire crust. Therefore, it suggests that chemical composition and redox state prevailing in the Martian crust would be suited for bearing fine grains of magnetite about 4 billion years ago.

近年の惑星探査から、火星には多くの磁気異常が存在する事が明らかになった<sup>[1]</sup>。ここで磁気異常とは、地殻岩石の磁化を起源とする磁場の事である。火星では、金属コアのダイナモ作用が約40億年前に停止したと考えられ、現在、グローバルな磁場は存在していない<sup>[1]</sup>。従って、観測されている火星磁気異常を説明するには、40億年前以前に磁化した地殻残留磁化が現在まで保持されている必要がある。本研究では磁気異常のソースを明らかにするために、“火星地殻内で40億年間安定に残留磁化を保持することが出来る磁性鉱物の種類”を実験的に決定した。磁場データの解析<sup>[2,3]</sup>や熱史モデル計算<sup>[4]</sup>の結果から、磁気異常ソースは約50km程度までの地殻深部に分布していると考えられている。地殻深度に応じて温度・圧力が変化するため、磁気異常ソース鉱物の決定には、残留磁化安定性の指標となる磁気パラメータ（保磁力、飽和磁化）<sup>[5]</sup>の温度・圧力依存性を知る必要がある。磁気パラメータの温度依存性は、系統的な実験が行われ、多くのデータが得られている<sup>[5]</sup>。一方で、その圧力依存性は、測定実験技術等の困難からほとんどデータが得られていない<sup>[6,7]</sup>。そこで本研究では、高感度磁化測定が可能なMPMS帯磁率計と、MPMS帯磁率計専用開発した非磁性高圧セル<sup>[8,9]</sup>を組み合わせる事で、高圧下その場磁気ヒステリシス測定実験を行った。火星地殻中に存在する主要な磁性鉱物と考えられる磁鉄鉱を実験試料として用いた。磁性鉱物の磁気的性質は、その粒径に対応して系統的に変化する事が知られているため、多磁区(MD)、擬似単磁区(PSD)、単磁区(SD)試料に対応する粒径の磁鉄鉱を使って実験を行った。実験の結果、MD及びPSD試料の保磁力は1GPaまでの圧力範囲で単調に増加し(+90%/GPa)、一方で、SD試料の保磁力は1GPaまでの圧力範囲で一定値であることが分かった。飽和磁化は、1GPaまでの圧力範囲で一定値であった。本実験から得られた磁気パラメータの圧力依存性及び、過去の研究から得られている温度依存性を用いて、火星地殻内での残留磁化緩和時間の計算を行った。火星地殻内での温度・圧力変化は、観測等から制約されている適当な物理パラメータを使って計算した。計算の結果、粗粒磁鉄鉱(MD及びPSD)の残留磁化は40億年間の間に消磁されてしまうが、細粒磁鉄鉱(SD)は40億年間安定に残留磁化を保持可能である事が分かった。従って、火星地殻磁気異常のソースはSD磁鉄鉱であり、過去の火星地殻は細粒磁鉄鉱を晶出するのに適した化学組成・酸化還元状態であった事が示唆される。

[1] Acuña, M. H., et al. (1999), *Science*, 284, 790-793. [2] Voorhies, C. V., et al. (2002), *J. Geophys. Res.*, 107(E6), 5034. [3] Nimmo, F., and M. S. Gilmore (2001), *J. Geophys. Res.*, 106, 12,315-12,323. [4] Dunlop, D. J., and J. Arkani-Hamed (2005), *J. Geophys. Res.*, 110, E12S04. [5] Dunlop, D. J., and Ö. Özdemir (1997), *Rock Magnetism: Fundamental and Frontier*, 573 pp., Cambridge Univ. press, New York. [6] Carmichael, R. S. (1969), *Geophys.*, 34, 775-779. [7] Gilder, S. A., et al. (2002), *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 1392. [8] Kodama, K., and T. Nishioka (2005), paper presented at JpGU. [9] Sato, M., et al. (2012), *Geophys. Res. Lett.*, 39, L04305.

## 彗星衝突によるアミノ酸の重合 ー化学進化の原動力としてー

○菅原春菜<sup>1</sup>、三村耕一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院 環境学研究科

生命の誕生に必要な有機物はいかにしてもたらされたのか？初期地球への有機物の供給方法は大きく分けて以下の3つが考えられている (Chyba and Sagan, 1992)。1つ目は大気放電や海底熱水噴出口など初期地球環境を利用して生成するというもの、2つ目は彗星や小惑星などの地球外物質による供給、そして3つ目はこれらの地球外物質が地球に衝突する際に地球大気や海洋との反応によって生成するというものである。これらの供給方法については多くの議論がなされているところであるが、本研究では特に地球外物質による供給に注目した。その理由は、彗星や隕石などの分析から多種多様な有機物が見つかったこと、そして初期地球は現在よりもはるかに高かったことである。

地球外物質中に含まれる有機物の中でも特に重要な物質がアミノ酸である。アミノ酸は生命を形作るタンパク質の構成成分であり、アミノ酸がつながってペプチドとなりペプチドがさらにつながっていくことでタンパク質になる。そのため、アミノ酸は生命の誕生に不可欠な物質であると考えられている。炭素質コンドライトの分析から、70種以上のアミノ酸が含まれていることがわかっており (Botta *et al.*, 2007)、彗星の塵からも最も単純なアミノ酸であるグリシンが見つかった (Elsila *et al.*, 2009)。しかしながら、これらのアミノ酸が地球に供給されるためには考えなければならない問題がある。それは、彗星や小惑星が地球に衝突する際に被る衝撃波の影響である。そこで、本研究では、衝撃波が中に含まれるアミノ酸にどのような影響を及ぼすのかを調べるために、彗星衝突を想定して、アミノ酸・ケイ酸塩・氷の混合物に衝撃を与える実験を行った。

衝撃を与えるアミノ酸として選んだのはグリシンとアラニンの2種である。アラニンはグリシンの $\alpha$ -水素がメチル基に置き換わったもので、炭素質コンドライト中にも多く含まれる (Cronin and Pizzarello, 1983)。これらのアミノ酸を1種類ずつカンラン岩粉末、および水に1:10:8の割合で混合した後に凍結し、衝撃を与える試料とした。低温環境 (77 K) で衝撃を与えるため、試料を詰めた反応容器は液体窒素を満たした発泡スチロール容器に入れ、それを一段式火薬銃のチャンバーの中に設置して衝撃を与えた。本実験で与えた衝撃圧力は2.3-23.0 GPaである。回収した試料については、アミノ酸およびペプチドの分析を行った。その結果、アミノ酸はその多くが分解されずに残存すること、そして3量体までのペプチドが生成することがわかった。この結果は化学進化の重要なステップであるペプチド生成が彗星衝突により引き起こされた可能性を示唆している。

## タイタン液体圏での有機物凝集体生成可能性の検証

○河合純, Seema Jagota<sup>2</sup>, 大林由美子<sup>1</sup>, 金子竹男<sup>1</sup>, Seema Jagota<sup>2</sup>, Bishun N. Khare<sup>2</sup>,  
David W. Deamer<sup>3</sup>, Christopher P. McKay<sup>2</sup>, 吉村義隆<sup>4</sup>, 小林憲正<sup>1</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学工学府, <sup>2</sup>NASA Ames Research Center,

<sup>3</sup>University of California, Santa Cruz, <sup>4</sup>玉川大学 農学部

タイタンは、窒素やメタンを含む分厚い大気を有している。大気中には様々な有機物が検出されており、紫外線や土星の磁気圏に捉えられた電子、宇宙線がエネルギーをして考えられている。カッシーニやホイヘンスの調査によりタイタンの表面温度が 93.7K であり、液体エタン、メタンの存在を示した。また、地下にアンモニア水があることが示唆されている。我々は、複雑有機物(ソーリン)を生成し、タイタンの液体の相互作用が考えられる液体圏を模擬した実験を行い、化学進化について検討した。特にタイタンソーリンの自己集合体に注目した。本実験では、液体エタン・メタンの代わりに室温でも存在する非極性溶媒であるヘキサンと微極性であるクロロホルムを用いた。

ソーリン自体は、非極性溶媒である液体エタン・メタンにはほとんど溶けなく、極性溶媒であるアンモニア水に溶解する。少しでも極性を持っている溶媒には溶解することができる。また、ソーリンは両親媒性の性質をもっており、親水基であるアミノ基(-NH<sub>2</sub>)、疎水基である炭化水素をもっていることが分かった。そこで、ソーリンをクロロホルムに溶かしスライドガラスに加え、アンモニア水を加えたところ、ソーリンの自己集合体が蛍光顕微鏡にて確認できた。この実験結果はタイタンにて地上に存在する液体エタン・メタンの非極性が地下に存在するであろう極性溶媒のアンモニアと相互作用を起こし、原始膜ができる可能性を示唆した。

## 太陽系における基本鉱物の定義: 三状態変化を示す鉱物

### Definition of fundamental minerals in the Solar System materials:

#### Minerals with three state changes

三浦保範 (山口市; 非常勤)

1. はじめに: 太陽系物質における物質状態の基本単位である鉱物の定義については、水惑星地球におけるマクロな鉱物やその集合体の岩石を基本として、そのまま月・小惑星・火星の物質に利用されている。本件では、太陽系全体に応用できる鉱物物質の考え等を説明する。
2. 地球惑星の鉱物: 最初に欧州で記載された地球鉱物は水晶(Rock crystal)の大結晶であり、水惑星での海水圏と沈み込み後に出できた大きな大陸地殻における基本の物質である。最初の地表物質が海底堆積物から熔融しているため、比較的若い年代で大きな地殻を構成する物質が地球の自然鉱物の定義である。その鉱物固体が資源産業材料として広く利用されているので、地球上の鉱物定義はそのままである。無海水圏の地球外天体における鉱物に適用できるかは広く天体物質解析が必要であるが、地球型鉱物が応用されている(Miura, 2012)。
3. 太陽系の地球型天体の古期物質: 創世期地球や地球型天体(月・小惑星・火星)の物質は微粒子から小惑星サイズの物質衝突集合した衝突表面物質が基本である。それらは地球上で採取された隕石等の衝突混合組織から直接的な地球型大陸地殻岩石組織でないといわれる。
4. 月面の岩石形成モデル: 月面のクラスト表面物質は、アポロ探査の月岩石の同位体比の特徴などから軽い斜長岩が浮遊したマグマオーシャンモデルで説明されているが、破砕的岩石組織における解析であり、地球型大陸地殻物質からではない。また、地球型大陸岩石では衝突時に地下深部まで軽元素を移動できなく、海やプレートの運動を前提している。しかし、衝突固化時の空隙やガラスが多い衝突表面物質で、衝突時に地下深部まで軽元素を移動するモデルを提案している。このモデルでは、Euが多い月の斜長岩が衝突時に炭素がCaやEu(REE)と結合しやすいため、無大気月面で衝突固化し粗大化した破砕状物質が説明できる。
5. 小惑星の鉱物と微細組織: 小惑星は、衝突が惑星より少なく軽元素もあまり濃縮していない衝突と微細化の集合体と考えられる。そのため、鉱物も微細集合体(仁保隕石の大隅石族鉱物)で、微細組織も衝突粗大化中の3状態混合物のバブル組織等(仁保隕石、月面アポロ、小惑星イトカワ等)を示していることが電顕観察等で説明可能である(Miura, 2012)。
6. 太陽系物質鉱物の状態変化的定義: 太陽系における鉱物は「物質三状態間変化で一時的に固体状態の物質」として幅広く動的定義すると地球内外の鉱物物質で利用できる。
7. その他: 地球上の海底衝突は、柔らかいターゲットによる飛翔体や衝突物の地下貫入とその後の海底破壊活動等と各種の元素等が濃縮する過程が説明可能である(Miura, 2012)。

引用文献: Miura Y. (2012): LPSC 43<sup>rd</sup> (LPI)#1203. 2920. NTMS-2012(Houston) #3100. Miura Y. (2012): CAMS-2012 (LPI) #4035. CCTP (LPI) #8038. ELS-2012(DRL), 76-79. Miura Y. (2012): An.Met.Soc.Meet. 75th (Cairns) #5115, 5002 (in press). Miura Y. (2012): Carbon-separating method (JPA-PAO No. 2009-160562).

ショックを受けた普通コンドライト隕石の U-Pb システムティックス

○寺田健太郎<sup>1,2</sup>、伊勢田大輔<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>大阪大学・理、<sup>2</sup>広島大学・理)

一般に、岩石試料中のウラン-鉛の2つの放射壊変系 ( $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  系、 $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$  系) を精査する事により、結晶化年代のみならず変成年代の情報を引き出す事が原理的には可能である。本研究では、広島大学の高感度イオンマイクロプローブ SHRIMP を用い、明瞭な shock vein を含む断面積が約  $1\text{cm}\times 1\text{cm}$  の L5/6 コンドライト隕石 Mable 中のリン酸塩鉱物の U-Pb システムティックスについて報告する。予察的な分析の結果、約 45 億前の結晶化年代に加え、ショックベイン中のリン酸塩鉱物は  $8\pm 7$  千万年の変成年代を、ベイン周辺のリン酸塩鉱物は約 5 億年の異なる変成年代を得る事に成功した。後者の年代は、スウェーデンや中国の堆積岩中に多数産出する隕石シャワー起源の L コンドライト隕石群の Ar-Ar 年代(480Ma, Schmitz et al. 2001)と整合的であり、Mable 隕石の母天体は約 45 億前に形成され、約 480Ma には一連の L コンドライト隕石シャワーを引き起こす変成を受け経験した後、さらに  $81\pm 71\text{Ma}$  にベインを形成する 13Gpa 以上(Chen et al. 1995)の強いショックを経験したことが明らかになった。

発表では、熱変成・衝突・角礫化・再集積など、より複雑なプロセスを経験している多種混合角礫岩質 LL コンドライト隕石の分析結果についても報告し、はやぶさが回収したイトカワ微粒子から年代情報が引き出せる可能性があるかについて議論する。

## CV, CO 隕石中のネフェリン・ソーダライトの 形成過程と水質変成作用の関係

○松本恵<sup>1</sup>, 留岡和重<sup>1</sup>, 瀬戸雄介<sup>1</sup>, 三宅亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大・院理・地球惑星科学, <sup>2</sup>京都大・院理・地球惑星科学

コンドライト母天体における水や熱による変成作用は、太陽系初期の物質進化過程を理解する上で重要な現象である。これまで、母天体における水質変成の生成物としては、含水の層状ケイ酸塩（サーペンティンやス멕タイトなど）が多く研究されてきた<sup>[1]</sup>が、本研究では Na に富むケイ酸塩鉱物であるネフェリン ( $[\text{Na}, \text{K}]\text{AlSiO}_4$ ) やソーダライト ( $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$ ) に注目した。これらは、CV、CO コンドライトの難揮発性包有物 (CAI) 或いはコンドリュール中に一般にみられる鉱物であり、初生の斜長石やメリライトを置換して二次的に形成したと考えられている<sup>[2]</sup>。このような変成作用は Na 交代変成と呼ばれている。近年の CO コンドライトの研究<sup>[3]</sup>から、Na 交代変成は隕石の熱変成度と正の相関関係があることがわかり、隕石母天体における Na に富む熱水と初生鉱物との反応過程であった可能性が示唆されている。Na は水溶性が高く流体によって移動し易いため、その挙動は隕石の水が関わる変成の重要な指標となり得る。本研究では、母天体での Na 交代変成過程を解明するため、Ningqiang (CV-like)、Warrenton (CO)、Allende (CV) 隕石について、電子顕微鏡 (SEM, EPMA, TEM) および放射光 X 線回折装置 (SR-XRD) を用いて詳細に調べた。

Ningqiang 隕石のコンドリュール (直径: 平均~460  $\mu\text{m}$ ) 中のオリビン、ほとんど Fe-Mg 拡散の痕跡を示さないため、隕石の熱変成程度は非常に低いと考えられる。一方で、コンドリュールメソスタシス (斑晶の間を埋める物質) に含まれる斜長石の大部分は、ネフェリンとソーダライトに交代されており、大規模な Na 交代変成が起きていることがわかった。また、細粒 (直径: <1-20  $\mu\text{m}$ ) な鉱物の集合からなるマトリックスにも多量のネフェリンが含まれていることがわかった。SEM-EDS による元素マッピングおよび SR-XRD 実験によるマトリックス中の構成鉱物の比 (vol.%) は、オリビン 82、ネフェリン 10、マグネタイト 5、単斜輝石 2、ヘルシナイト 0.6、ソーダライト 0.4 であった。これまで、マトリックス中に 10 vol.% に及ぶネフェリンやソーダライトを含む隕石は報告されていない。ネフェリンとソーダライトの粒子はマトリックス全体にほぼ均質に分布しており、粒子内部に微小 (~500 nm) なオリビン包有物を含んでいる。この包有物は、マトリックスの大部分を構成するオリビン粒子と粒径、形状、組成がほぼ同じである。このことは、ネフェリンとソーダライトがマトリックス中で形成し、その成長途中で周囲のオリビンを取り込んだことを示している。以上の結果から、Ningqiang 隕石の Na 交代変成は比較的低温の条件下で全岩的に進行したと考えられる。また、マトリックスの Na 含有量は他の CV, CO 隕石に比べ非常に高い (Na/Si: 5-11 倍)<sup>[4]</sup>にも関わらず、全岩としての Na 含有量はほぼ等しい (1.0-1.2 倍)<sup>[5,6]</sup>ことから、Ningqiang 隕石の Na 交代変成は隕石母天体内の閉じた系の中で起こったと考えられる。

Warrenton 隕石中の暗色包有物 (DI) は主に細粒 (~5  $\mu\text{m}$ ) のオリビンからなり、ネフェリンとソーダライト (<5  $\mu\text{m}$ ) を含んでおり、Ningqiang 隕石のマトリックスと特徴が似ている。また、これら DI と Ningqiang 隕石中のネフェリンの組成はほぼ等しい。Allende 隕石中の DI も同様の特徴を持っており、水質変成とその後の脱水過程を経て形成したと考えられている<sup>[7]</sup>。すなわち、Ningqiang 隕石が経験した Na 交代変成過程はこれらの DI が経験した変成過程と非常に似ており、その変成作用の結果、マトリックスや DI 中に多量のネフェリンやソーダライトが形成した可能性がある。

参考文献: [1]Breatly (2006) *Meteorites and the Early Solar System II*, 587.[2]Ikeda and Kimura (1995) *Meteorites*, 8, 97.[3]Tomeoka and Itoh (2004) *MAPS*, 39, 1359.[4]McSween and Richardson (1977) *GCA*, 41, 1145.[5]Kallemeyn et al. (1996) *LPS XXV II*, 635.[6]Wang and Hsu (2009) *MAPS*, 44, 763.[7]Kojima and Tomeoka (1996) *GCA*, 60, 2651.

## Tagish Lake 炭素質隕石中の細粒コンドリュールリム： 母天体上のプロセスによる形成の検証

○高山 亜紀子, 留岡 和重

神戸大学 理学研究科

太陽系進化過程の初期情報を得るためには、熱による情報の上書きが少ない未分化な小惑星を対象とするのが最適である。Tagish Lake 隕石は熱による影響が特に少ない D 型含水小惑星を起源とすると考えられる最初のサンプルである。Tagish Lake 隕石中のコンドリュールは厚い細粒リムを一般的に持つことが報告されている (e.g. Zolensky et al., 2002)。コンドリュール・リムは始原的隕石中に一般的に存在し、その形成過程は太陽系の初期進化過程を知る上で重要な情報を与えると考えられ、これまで多くの人達によって研究されてきた。しかし、リムの成因については、星雲の塵の集積 (e.g. Metzler et al., 1992)、母天体上の角礫岩化による形成 (e.g. Tomeoka & Tanimura, 2000) などの説が提出されており、未だ議論の渦中である。

我々は、Tagish Lake 炭素質隕石の組織、鉱物・化学組成について詳細に調べた結果、リムは母天体上における水質変成及び角礫岩化作用により形成されたことを示す証拠を見出した。

Tagish Lake 隕石薄片中の粗粒構成物 (コンドリュール, CAIs, Forsterite aggregates) の 97% は主に層状ケイ酸塩からなるリムを持ち、その組織、鉱物・化学組成は周囲のマトリックスと異なる。コンドリュールの 93% はその周縁部が水質変成の際に層状ケイ酸塩によって交代された「変成ゾーン」を持つ。変成ゾーンとリムには割れ目が走っているが、それらはマトリックスとの境界で途切れる (図中矢印)。他に、コンドリュールを持たない多数の小さなクラストと、コンドリュールと Forsterite aggregates を複数含む一個の大きなクラストが見つかった。この大きなクラスト中のコンドリュールは変成ゾーンを持つが、コンドリュールと Forsterite aggregates はどちらもリムを持たない。クラストのマトリックスは、ホストマトリックスと異なる組織、鉱物・化学組成を持ち、コンドリュール・リムと同一の物質からなる。

以上の観察結果から、Tagish Lake 隕石中の粗粒構成物とそのリムは、ホスト隕石と異なる、共通の前駆領域で水質変成を経験し、その後、角礫岩化作用によって形成されたクラストであり、リムは、実は前駆領域のマトリックスであると考えられる。

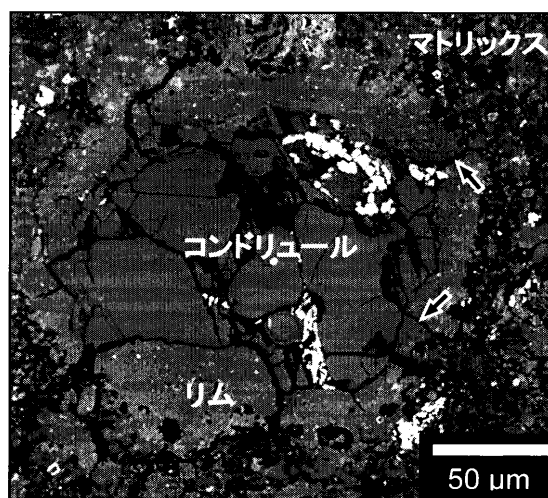


図1. Tagish Lake 隕石中のコンドリュールとリム (反射電子像)



## X線CTによる炭素質コンドライトの三次元構造と化学組成の分析

○上相 真之<sup>1</sup>, 上杉 健太郎<sup>2</sup>, 竹内 晃久<sup>2</sup>, 鈴木 芳夫<sup>2</sup>, 土山 明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>高輝度光科学研究センター, <sup>3</sup>京都大学,

炭素質コンドライトは地球に飛来する隕石の中で最も始原的であるとされており、はやぶさ2はこの炭素質コンドライトの母天体であると考えられている C-type 小惑星でのサンプルリターンを計画している。炭素質コンドライトは岩石鉱物の他に有機物や水など、地球外の多くの貴重な物質を含んでおり、この隕石をできるだけ非破壊、非汚染で詳細に分析する手法を確立することは重要である。

X線CT法は組織の観察だけでなく、X線の吸収量から物体内部の構成要素を非破壊で調べることができる。Uesugi et al. (2010)ではこれを利用してヒストグラムから様々なタイプの隕石内部の構成鉱物およびその組成を調べた。本研究ではクラスタラベリング等の画像処理を解析に導入し、この炭素質コンドライトをより詳細に調べた。まずCTデータから得られるX線吸収係数のヒストグラムを元にコンドリュールとマトリクスの吸収係数の閾値を求め、画像処理を用いてそれぞれを抜き出した。このデータを元にコンドリュール、マトリクスそれぞれの吸収係数を調べた結果、これらを構成する鉱物に含まれる鉄の濃度に相関があることがわかった。

さらにコンドリュールの形状をクラスタラベリングによって抜き出した後楕円体近似し、その三軸の平均を用いてコンドリュールのサイズ分布を調べた。炭素質コンドライトはクラスによってコンドリュールの平均サイズが大きく異なることが知られているが、それを三次元で統計的に調べた例はこれまでに無かった。この解析の結果、積算粒径分布の傾きはCV3コンドライトが-1.5から-1.8であり、CM2が-2.1から-2.7、C03が-1.9から-2.9と、その範囲はそれぞれのコンドライトで違う値を示した。

これらの結果は、コンドリュールとマトリクスは同じ前駆物質から作られたことを示唆するとともに、形成後、太陽系内での大規模な混合によりサイズや化学組成が平均化されていないことを示している。また、スライス画像を用いた組織観察と併せて、非破壊で定量的に炭素質コンドライトを分類することが可能であることがわかった。

## コンドリュール形成条件： H<sub>2</sub> 解離を含む微惑星弧状衝撃波

○山崎布美香<sup>1</sup>、中本泰史<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

コンドライト隕石中に含まれる球状の珪酸塩粒子であるコンドリュールは、実験や岩石組織の観察などから、原始太陽系星雲中のダストが短時間の加熱・溶融を経たあと固化して形成されたことが分かっている。しかし、コンドリュールが形成された年代の原始太陽系星雲の温度は数百 K であるとされており、ダストの融点は約 2000 K であることから、コンドリュール形成時には何らかの加熱イベントが発生したと考えられるが、その形成プロセスは未だに明らかになっていない。これを明らかにすることはコンドリュールが形成された時代の原始太陽系星雲内の様子を知ることに関わり、非常に重要である。

コンドリュール形成シナリオのひとつとして有力であるのが、星間衝撃波によるダスト摩擦加熱である (Iida et al., 2001)。その衝撃波として、高離心率あるいは高軌道傾斜角の軌道をもつ微惑星のまわりに発生する弧状衝撃波を考えた研究が今までにされてきた (Ciesla et al., 2004, Morris et al., 2012)。これらの微惑星弧状衝撃波の先行研究では、星雲ガスの流体計算において断熱を仮定しており、化学反応や輻射の効果は無視されていた。しかし、弧状衝撃波が起きるような状況では微惑星前面は非常に高温になるため、H<sub>2</sub> の解離などの化学反応によるガス温度の変化は無視できないと考えられる。

そこで本研究では、(1) 化学反応の中でも特に重要と考えられる H<sub>2</sub> の解離・再結合を含んだ 2 次元流体計算を行った。結果として、微惑星速度・星雲ガス密度によってはガス温度が大きく変わり、ガス密度、流れのパターンにも変化が見られることが分かった。(2) さらに (1) の流体計算結果を元に、その中を流れるダストの軌跡・熱履歴を計算し、微惑星弧状衝撃波による加熱モデルのもとでコンドリュール形成可能な微惑星速度・星雲ガス密度を求めた。講演ではこの結果を提示し、化学反応以外の輻射等の効果についても議論する。

## コンドリュールメルトの多成分凝固数値実験： コンドリュールは急冷したのか？

○三浦均<sup>1</sup>，塚本勝男<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理

カンラン石(olivine,  $(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{SiO}_4$ )は、地球を始めとする岩石型惑星や宇宙から飛来する石質隕石を構成する代表的な珪酸塩結晶である。石質隕石に含まれる mm サイズの球状組織であるコンドリュールには、幅が約数  $10\ \mu\text{m}$  の棒状カンラン石 (bar) が結晶方位を揃えて平行に並んでいる凝固組織 (barred-olivine, BO) が見られる<sup>[1]</sup>。これは、珪酸塩メルト内でカンラン石の結晶が成長する際、固液界面が不安定化して生じたと考えられている。我々は、急冷するカンラン石組成の珪酸塩メルトからカンラン石結晶が成長する過程をフェーズフィールド法<sup>[2]</sup>によって数値計算し、結晶成長に伴う鉄成分の分配に伴って界面不安定が引き起こされる可能性を示した<sup>[3]</sup>。本講演では、空間 2 次元計算を行ない、界面不安定から棒状オリビンが生じる様子の再現、及び、bar の幅と冷却速度の関係について調べた。

今回は、Bi & Sekerka の二成分系フェーズフィールドモデル<sup>[2]</sup>に基づき、カンラン石組成メルトからの凝固をモデル化した。初期に平坦な固液界面を置き、温度を一定の冷却速度で低下させることでカンラン石結晶を成長させた。その結果、初期に平らだった固液界面が成長と共に不安定化し、多数の棒状カンラン石 (bar) が生じることが分かった。冷却速度が  $2000\ \text{K/s}$  のとき、bar の幅は約  $10\ \mu\text{m}$  程度であった。Bar の幅は冷却速度と負の相関を示し、これは他の binary alloy の数値計算結果で得られた傾向<sup>[4]</sup>と一致した。この傾向を冷却速度が遅い条件に外挿した結果、コンドリュールに見られる典型的な bar の幅 ( $< 100\ \mu\text{m}$ ) を再現するために要求される冷却速度は、 $10\ \text{K/s}$  もしくはそれ以上であることが分かった。これは、従来コンドリュール再現実験<sup>[5]</sup>で推測されていた冷却速度 ( $\sim 0.3\ \text{K/s}$ ) と比べると、1 桁以上大きな値である。本結果と従来の実験結果との矛盾の理由は、現時点では明らかではない。BO 組織の形成条件を明らかにするには、本研究のような理論的研究に加え、結晶成長学的データ (kinetic 係数、固液界面自由エネルギー、及び、これらの物性値の過冷却度・方向依存性) を実験的に取得する必要があるだろう。

参考文献：[1] M. K. Weisberg, *J. Geophys. Res.*, **92** (1987) E663. [2] Z. Bi & R. F. Sekerka, *Physica A*, **261** (1998) 95. [3] 三浦，塚本，日本惑星科学会 2011 年度秋季講演会 S35-06P. [4] T. Takaki et al., *J. Crys. Growth*, **283** (2005) 263. [5] A. Tsuchiyama et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68** (2004) 653.

### 惑星形成における衝突破壊の重要性

名古屋大学理学研究科 小林 浩

固体微粒子と気体からなる原始惑星系円盤のなかで惑星系形成は起こる。まず、固体微粒子が集まり、キロメートルかそれ以上の大きさの微惑星が形成される。この微惑星は十分に大きいため重力によって引き合い、衝突・合体をくり返して成長する。この結果、原始惑星が形成され、幾度かの原始惑星同士の衝突も経験し、地球型惑星が形成される。また、原始惑星が10倍の地球質量程度よりも大きくなると、原始惑星系円盤中のガスを大量に降着し木星や土星のようなガスが主成分となるガス惑星を形成する。

微惑星から原始惑星の形成、また原始惑星の成長は、地球型惑星やガス惑星の形成を決める非常に重要な過程である。この過程は詳細に調べられており、どのような惑星系が形成されるのかを予想するのが可能になりつつある。しかし、これまでの研究では**簡単化のため微惑星は衝突に伴い破壊がおこらないという非常に強い仮定を用いていた**。微惑星が最初に成長するときは、微惑星円盤を乱す機構がないため衝突速度は小さい。そのため、衝突・合体をくり返し大きな天体を形成する。大きな天体の方が重力が強いため、衝突頻度が高くより早く成長する。その結果、円盤の各領域ごとに1つずつ原始惑星が形成されていく。そのとき、最初のサイズからほとんど成長していない微惑星が原始惑星の周りを取りまき、微惑星の総質量の方が原始惑星の質量よりも大きい。その後、原始惑星はとりまきの微惑星と衝突・合体をくり返しながらか成長する。原始惑星が大きくなるにつれて、その重力が大きくなり微惑星をふりまわすため、微惑星のランダム速度が上昇する。原始惑星が火星程度になると衝突が激しくなり、破壊がおこる。微惑星と原始惑星が衝突して破壊が起きても原始惑星の重力は大きいため破片を再集積するため、破壊の影響はほとんどない。しかし、微惑星同士が衝突して、破壊が起きると多くの破片が放出され、微惑星の質量が小さくなっていく。ガス円盤の公転速度は天体の公転速度より遅いため小さな破片は向かい風をうけガス抵抗により角運動量を失い中心星に向かってらせん軌道を描きながら落ちていくので、原始惑星のとりまきの天体の総質量は小さくなる。その結果、原始惑星の成長は衝突・破壊によって止められる。上記のように衝突・破壊は原始惑星の成長によって促されるので、**原始惑星の最終質量は衝突・破壊により自律的に決まることになる**。

このように惑星形成において衝突・破壊は非常に重要であるが、定量的に議論されてこなかった。**本研究では衝突・破壊の効果を定量的に評価し、破壊の結果の様々な物理量のうちどれが惑星形成に重要であることを明らかにすることに成功した**。その結果、一回の衝突により放出される破片の総質量が非常に重要で、その破片の最大質量や質量分布はほとんど重要でないことがわかった。また、過去の研究で無視されてきたほとんど破片が放出されないような弱い衝突が衝突・破壊を決める重要な機構であることも明らかにした。これらの重要な点を押さえ、衝突・破壊を考慮した原始惑星の形成、成長のシミュレーションを行ったところ、原始惑星の最終質量はやはり大きくなれず10倍の地球質量のような大きな原始惑星をつくることは難しい。しかし、**観測されている上限程度の重い原始惑星系円盤の中で、比較的大きい100km程度の微惑星からならこのように大きな原始惑星がつくれることを示した**。このような大きな微惑星は小惑星帯の天体のサイズ分布から予測される微惑星の大きさとよく合っている。木星形成はこのような環境で行われたのだろう。一方で、土星の固体核は木星に比べて大きいため、土星の形成は非常に速く行われなくてはならないという制約がある。木星ができて原始太陽系星雲にギャップがあく。その結果、ギャップに近い円盤の端では圧力極大ができる。そこでは破片とガスの公転速度が一緒になり、ガス抵抗をほとんど受けないため、破片は落下しない。その結果、**原始惑星は破片を集積し、数百万年という短時間で土星の惑星核のような大きな天体が形成される**。

このように衝突・破壊は惑星形成過程で大きな役割をはたす。このほかにも地球型惑星形成や小惑星帯や太陽系外縁天体やデブリ円盤形成でも重要である。これらを包括的に理解するには、衝突・破壊を考慮した惑星形成理論の構築が不可欠であり、それを目指していく。

## 軟 X 線照射による 模擬星間有機物の疎水化と生命の起源

○ 小林憲正<sup>1</sup>, 川本幸徳<sup>1</sup>, 岡部拓人<sup>1</sup>, 江藤碧<sup>1</sup>, 金子竹男<sup>1</sup>, 大林由美子<sup>1</sup>,  
三田肇<sup>2</sup>, 神田一浩<sup>3</sup>, 吉田聡<sup>4</sup>,  
○<sup>1</sup> 横浜国大院工, <sup>2</sup> 福岡工大工, <sup>3</sup> 兵庫県立大 LASTI, <sup>4</sup> 放医研

[緒言] 隕石や彗星中にアミノ酸前駆体を含む様々な有機物が含まれていることが知られている。安定同位体比から、これらの有機物が低温環境で生成したことが推定されていることから、その起源として分子雲の星間塵アイスマントル中での生成が議論されている。星間塵アイスマントルをモデルとした水・一酸化炭素（またはメタノール）・アンモニア等からなる氷に紫外線や粒子線を照射することにより、アミノ酸前駆体を含む複雑な有機物が生成することが確認されている。しかし、模擬星間塵実験で生成する有機物は、一般的に親水的であり、隕石中の有機物の多くが不溶性の疎水的有機物であることと異なる。これは、太陽系生成後に、星間起源の有機物が惑星間もしくは隕石母天体内で変成したためと考えられる。本研究では、惑星間での変成の可能性を調べるため、アミノ酸・核酸塩基などの生体関連分子や、模擬星間物質から合成した複雑有機物に軟 X 線を照射し、その変性を評価した。

[実験] 遊離のアミノ酸 (Gly, L-イソバリン(Ival), L-Ala) と、アミノ酸前駆体 (Hyd, DL-エチルメチル Hyd)、模擬星間物質(CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O)から陽子線照射により合成した複雑態アミノ酸前駆体(CAW), 核酸塩基(Ade, Gua, Cyt, Ura)をガラス板上に蒸発乾固した固相試料に、NewSUBARU BL-6 (兵庫県立大) にて、高真空状態で、赤外～軟 X 線領域の連続光 (以後、軟 X 線と表記) を照射した。試料の前に CaF<sub>2</sub> 窓を置くことにより、軟 X 線～極端紫外光をカットした実験 (VUV 照射) も行った。照射後、超純水を用いて試料を基板から回収し、HPLC によりアミノ酸分析を行った。また、Ival と CAW の固体試料に軟 X 線照射した試料を、NewSUBARU BL-5b にて C-XANES 測定を行い、照射による試料の構造変成について評価した。また、同様な試料への重粒子線照射 (放医研 HIMAC 使用) も行った。

[結果と考察] 今回用いた試料は、いずれも親水的な分子であるが、軟 X 線照射により疎水的な (水不溶性の) 生成物が確認された。C-XANES 解析結果よりこれらの疎水性生成物は照射前の試料のカルボニル基の減少や C=C 結合の増加が起因していると考えられる。一方、VUV 照射では水不溶性有機物の生成は認められなかった。なお、軟 X 線照射後の回収率から、アミノ酸前駆体は遊離のアミノ酸よりも安定であること、核酸塩基はアミノ酸やアミノ酸前駆体より軟 X 線照射に対して安定であることがわかった。また、重粒子線照射によるこれらの有機物の分解・変成はほとんど認められなかった。

Stardust 計画で回収された彗星塵中の有機物の XANES 測定から、彗星ダスト中には、芳香族性の高い粒子と低い粒子が共存することがわかった。一方、一般に隕石有機物はきわめて芳香族性が高い。このことは彗星は太陽系内で多様な変成を受けた粒子の集合体である可能性が示唆される。原始太陽系星雲に取り込まれた星間塵起源有機物が、彗星や微惑星に取り込まれる前に、原始太陽からの軟 X 線を浴びることにより変成したとすると、各粒子の原始太陽との位置関係により変成の度合いが大きく異なることが説明できる。今後、隕石母天体内での熱変成・水質変成の模擬実験を行い、放射線変成との比較を行う予定である。

# 分子動力学シミュレーションにおける 水分子の凝縮過程の再現と付着確率の評価

Nucleation process from vapor due to molecular dynamics simulations and  
evaluation of the sticking probability

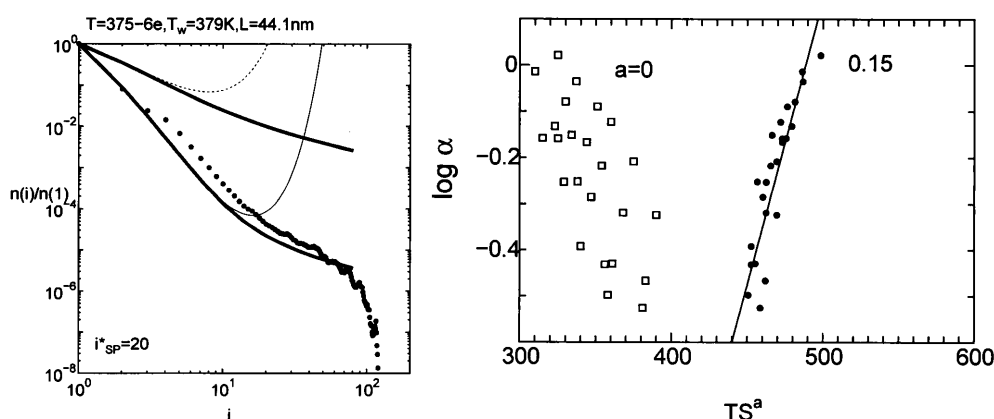
○ 田中今日子<sup>1</sup>、河野明男<sup>2</sup>、田中秀和<sup>1</sup>

Kyoko K. Tanaka<sup>1</sup>, Akio Kawano<sup>2</sup>, and Hidekazu Tanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学低温科学研究所, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋開発機構

<sup>1</sup>ILTS, Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

凝縮過程は星周ガスや原始惑星系円盤中に高温ガスが冷却する際に起き、宇宙ダストの起源や進化を知る上で重要なプロセスである。古典的核生成理論は宇宙ダストの凝縮研究で広く用いられているが、核生成率が実験と桁で合わないという問題がある。近年の研究では分子動力学計算を用いた理論の検証が行われている。これまで分子間相互作用が単純なレナード・ジョーンズ分子（アルゴン）の MD シミュレーションによる検証が行われ、第2ビリアル係数を用いて古典的理論を補正した半現象論的核生成理論（SP モデル）が MD のシミュレーションから得られた核形成率やクラスター分布を非常に良く再現することが示された（Tanaka et al. 2005, 2011）。本研究では、宇宙ダストの重要な材料物質となる水分子を用いて MD シミュレーションを行い核生成過程について調べた。計算には 4000 の水分子（SPC/E モデル）と温度制御のため 4000-8000 のキャリアガス分子（アルゴン）を導入し、幅広い温度（ $T=250-375$  K）と初期過飽和比（ $S=3-20$ ）の条件下でシミュレーションを行った。MD シミュレーションから得られた核形成率およびクラスターサイズ分布と核生成理論との比較を行ったところ、水分子に対して SP モデルの有効性を示すことに成功した。更に、MD 計算により得られたクラスター成長率から気相分子のクラスターに対する付着確率を評価した。水分子のクラスターへの付着確率の値は 0.1-1 程度の範囲になった。付着確率は温度だけでなく過飽和比にも依存し高過飽和の場合には付着確率が大きくなることが示された。



図：（左） クラスター分布例。黒丸が MD 計算から得られたクラスター分布（ $i$  クラスターとモノマーの数密度比）。上の実線は古典的核生成理論、下の実線は SP モデルから得られるクラスター分布を表す。（右） 温度  $T$  と付着確率  $\alpha$ （および過飽和比  $S$ ）の関係を示す。四角プロットは MD 計算から得られた付着確率である。横軸を  $TS^{0.15}$  とした場合（黒丸）、データはフィッティングできる（実線）。

References: [1] Tanaka, et al. J. Chem. Phys., 122, 184514 (2005), [2] Tanaka, et al. J. Chem. Phys., 134, 204313 (2011)

## ダスト生成に重要な吸着係数と 表面自由エネルギーの同時決定

○木村勇氣<sup>1</sup>、田中今日子<sup>2</sup>、三浦均<sup>1</sup>、塚本勝男<sup>1</sup>、稲富裕光<sup>3</sup>

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

吸着係数と表面自由エネルギーは、核生成理論から凝縮温度(核生成温度)や最終的な粒子サイズ、数密度を見積もる際に大きな不定性を与えることから、宇宙ダストの生成過程を理解するのに最も重要なパラメーターである。従来、理論計算にはバルクの表面自由エネルギーが用いられ、吸着係数は多くの場合“1”を仮定しており、理論モデルを構築する上で大きな不定性を与える要因になっている。例えば、酸化チタンのナノ粒子の表面自由エネルギーはバルクに比べて30%も大きな値をとる(Zhang et al. 2009)。吸着係数においては、微小重力実験中でガスから亜鉛粒子を生成した際の値が $10^{-5}$ と見積もられている(Michael et al. 2003)。

均質核生成によって大きな過冷却下で形成する宇宙ダストは、臨界核の大きさが原子数個から数十個のクラスターの領域であると考えられ、その実効的な表面自由エネルギーを知る必要がある。ナノ粒子(ダスト類似物)が、ガスから均質核生成を経て生成する環境を干渉計を用いて計測した実験的研究の結果と核生成理論を組み合わせることで、ナノメートルサイズの固体粒子の吸着係数と表面自由エネルギーを同時に決定することに成功した成果を報告する。

マンガン粉末をアルゴンガス中で加熱蒸発させてナノ粒子を生成する。蒸発したマンガンのガスは冷却して直ちに過飽和状態となる。周囲に不均質核生成できる下地は存在していないことから、過冷却が大きくなっていき、やがて均質核生成を経て凝縮する。凝縮直前の屈折率をマッハツェンダー型干渉計で検出することで、温度と濃度を求めて凝縮温度と過飽和度を決定した。凝縮は蒸発源周囲で3次元的に起こる。ある1方向に着目すると、1965 Kで蒸発したマンガンは、分圧と温度がそれぞれ $2736 \pm 87$  Paと $1100 \pm 7$  Kの時に凝縮した。この分圧でのマンガンの平衡温度は1760 Kであることから、核生成は660 Kの高過冷却環境下で起こったことが分かる。また、1100 Kでのマンガンの平衡蒸気圧( $4.4 \times 10^{-2}$  Pa)を考えると、 $6.1 \times 10^4$ もの高過飽和になっていた。この時の初期濃度(分圧)と冷却のタイムスケールを核生成理論に与えて、非平衡凝縮計算をおこなった。ここで、凝縮温度と生成粒子サイズは表面自由エネルギーと吸着係数に依存することから、実験で得られた凝縮温度と透過電子顕微鏡観察により決定した生成粒子サイズ(半径13.7 nm)を同時に説明することで二つの物性値を同時に決定できる。半現象論的核生成モデルによる計算の結果、表面自由エネルギーと吸着係数は、それぞれ $1.57 \pm 0.35$  J/m<sup>2</sup>と0.42であった。表面自由エネルギーの値は、マンガン溶液の1.1 J/m<sup>2</sup>と比べて4割程度大きい。今後、同様の実験を鉄や炭素などについて行い、宇宙ダストの核生成の素過程を明らかにしていく。

# Subaru/HiCIAO による観測で明らかになった原始惑星系円盤の非軸対称構造

○武藤恭之<sup>1</sup> C. A. Grady<sup>2</sup> 橋本淳<sup>3</sup> 深川美里<sup>4</sup> 他 SEEDS/HiCIAO/IRCS/A0188 チーム

<sup>1</sup> 工学院大学

<sup>2</sup> Goddard Space Flight Center

<sup>3</sup> 国立天文台

<sup>4</sup> 大阪大学

惑星は星の周囲の原始惑星系円盤から生まれると考えられている。原始惑星系円盤のうち、その中心部分において塵粒子やガスの成分が少なくなっているという特徴を持つ天体を「遷移円盤」という。遷移円盤は、原始惑星系円盤の進化の途中段階にあると考えられ、惑星形成過程を考える上で重要な天体である。

本発表では、すばる望遠鏡を用いた遷移円盤天体の最新の観測結果の一つを報告する。本観測では、すばる望遠鏡に搭載された装置「HiCIAO」を用い、原始惑星系円盤の詳細な構造をHバンド（波長 1.6 ミクロン）の偏光撮像観測により捉えることに成功した。これは、中心星の光が原始惑星系円盤の表面で散乱した光を観測しているものである。観測の結果、Hバンドの偏光強度分布において、大きさが 100 天文単位程度の渦巻き状の構造が存在していることが分かった。また、K' バンド（波長 2.1 ミクロン）の撮像観測によっても、（偏光ではない）強度分布の画像で渦巻き状の構造を観測することができた。したがって、Hバンドの偏光強度で得られた渦巻き構造は、円盤上の偏光度の変化に起因するのではなく、明るさの変化に起因するものであることが強く示唆される。

遷移円盤天体において渦巻き状の構造が発見されたのは、SAO 206462 (Muto et al., ApJ, 748, L22, 2012) に続いて二例目である。本発表では、以前の研究で行われたように、渦巻き構造の密度波理論によるモデルを適用し、得られる原始惑星系円盤の温度などについて議論する。また、観測された円盤の全体的な構造について、輻射輸送計算に基づくモデルを紹介する。そして、他の波長の観測も踏まえながら、渦巻き構造の成因や原始惑星系円盤中に存在するかもしれない惑星に対する制限などについて議論する。

本研究の観測結果の一部は、すばる望遠鏡戦略枠プロジェクト SEEDS の一環として取得されたものである。



## 乱流円盤中における水の重水素比進化

○古家健次<sup>1</sup>、相川祐理<sup>1</sup>、野村英子<sup>2</sup>、Franck Hersant<sup>3</sup>、Valentine Wakelam<sup>3</sup>

<sup>1</sup>神戸大学、<sup>2</sup>京都大学、<sup>3</sup>Bordeaux University

分子の重水素比は形成された物理環境、中でも温度に強く依存する。これまで7つの彗星について水の重水素比 ( $\text{HD0}/\text{H}_2\text{O}$ 比) が観測されており ( $(1-5) \times 10^{-4}$ )、いずれも星間空間における元素としての重水素比 ( $1.5 \times 10^{-5}$ ) と比べ、1桁程度大きな値を持つことが知られている。彗星の水が太陽系進化のどのステージ (分子雲、星形成コア、円盤) で形成されたかを重水素比を手掛かりに探るのが本研究の目的であり、今回は乱流の発達した原始惑星系円盤に注目する。

紫外線から遮蔽された円盤赤道面付近では、効率的に $\text{H}_2\text{O}$ 氷を再形成する化学的プロセスがないため、乱流のない円盤では星間空間起源の低温環境下 ( $\sim 10$  K) で形成された高い重水素比 ( $\sim 10^{-2}$ ) を持つ $\text{H}_2\text{O}$ 氷がそのまま保持されと考えられる (Willacy et al. 2009)。乱流円盤では、赤道面付近の $\text{H}_2\text{O}$ 氷が円盤上空に運ばれ、紫外線により解離され酸素原子となる一方、円盤上空の酸素原子は赤道面付近に運ばれ、 $\text{H}_2\text{O}$ 氷を再形成すると考えられる。この再形成プロセスが効率的に起こるならば、 $\text{H}_2\text{O}$ 氷は円盤の温度を反映した重水素比を持つだろう。

我々は円盤乱流が $\text{H}_2\text{O}$ 氷の重水素比に与える影響を定量的に調べるため、乱流による拡散を考慮した反応速度式を、典型的なT Tauri型星周りの軸対称円盤モデルの上で解いた。講演では重水素比の半径依存性や乱流強度に対する依存性を議論する。

## 原始惑星系円盤におけるダストの静的圧縮過程

○片岡章雅<sup>1</sup>、田中秀和<sup>2</sup>、奥住聡<sup>3</sup>、和田浩二<sup>4</sup><sup>1</sup>総合研究大学院大学/国立天文台, <sup>2</sup>北海道大学, <sup>3</sup>名古屋大学, <sup>4</sup>千葉工業大学

原始惑星系円盤において、メートルサイズのダストの中心星落下問題は未解決である。近年、衝突圧縮によるダスト内部密度進化を考慮することでこの問題を解決する案が提案されてきたが (Okuzumi et al. 2012)、そこでは、天体がキロメートルサイズを越えても高空隙状態のままで、なかなか圧縮が進行しないことが問題であった。圧縮過程は、従来衝突による圧縮は考慮されていたが、ダストが受けるガス抵抗や自己重力による圧縮は考慮されてなかった。これらによる圧縮は、衝突過程に比べて長い時間で進行するため衝突圧縮の場合と圧縮しやすさが大きく異なる可能性があり、高空隙天体の圧縮に効くと期待される。

そこで我々は、ダストの直接相互作用 (Wada et al. 2007) を考慮したN体計算によって高空隙率ダストの準静的圧縮過程を調べた。得られた高空隙ダストの準静的圧縮時の圧力は、ダスト構造が主に各接触点の回転運動によって支えられていると考えると説明できる。この解釈をもとにし、多くの数値計算結果を再現する高空隙率ダスト状態方程式のモデルを構築した(図1)。更に本結果を用いて原始惑星系円盤におけるダストから微惑星へと成長する過程における天体内部密度進化についても議論する。

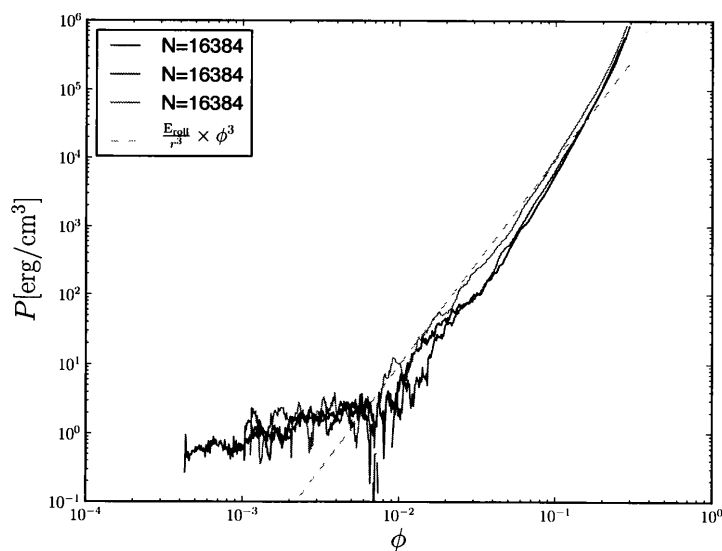


図1 静的圧縮時の圧力変化。縦軸は圧縮圧力、横軸は充填率を表す。実線は粒子数16384体の計算を表し、破線は本研究で得られた高空隙ダストの状態方程式を表す。

## 円盤磁気乱流による微惑星離心率の増幅と微惑星成長への影響

○奥住 聡<sup>1</sup>, Chris Ormel<sup>2</sup>, 廣瀬 重信<sup>3</sup><sup>1</sup>名古屋大学 大学院理学研究科<sup>2</sup>University of California, Berkeley<sup>3</sup>海洋研究開発機構

原始惑星系円盤中で生じる乱流は、固体のランダム運動を誘起し、それらの衝突成長や軌道進化に影響を与える。乱流によるガス速度の揺らぎは、メートルサイズ以下の小さな固体に対して影響を及ぼすことは良く知られている。一方、乱流のつくるガス密度揺らぎは、ガス中の重力場揺らぎをもたらし、メートルサイズよりもはるかに大きい微惑星のランダム速度（離心率）の増幅を引き起こす (Nelson 2005; Yang et al. 2009, 2012; Nelson & Gressel 2010; Gressel et al. 2011, 2012)。この「乱流密度揺らぎ駆動の離心率増幅」は、微惑星成長・原始惑星形成を阻害しうることが指摘されている (Ida, Guillot, & Morbidelli 2008)。

しかしながら、乱流中での微惑星離心率の増加は、これまで体系的には調べられておらず、このため離心率増幅の円盤環境依存性を議論することが不可能であった。我々は、離心率の上昇を、ランダム力を受ける固体の運動方程式によってモデル化し、乱流密度揺らぎによるランダム力の一般形を重力場のポアソン方程式から推定した。さらに、近年の磁気流体シミュレーション (Gressel, Nelson, & Turner 2012; Yang et al. 2012) で得られている乱流統計量と離心率増幅率のデータを解析し、我々の理論予想が流体シミュレーションの結果を統一的に説明することを実証した (図1)。

さらに、この理論公式と、磁気拡散を考慮した円盤磁気乱流モデル (Okuzumi & Hirose 2011) を併用し、微惑星が衝突破壊を免れて成長することが可能な円盤環境条件を調べた。その結果、磁気乱流の種となる大局的鉛直磁場の強度が10 mG程度以下であれば、微惑星の衝突破壊が抑制され、さらに大局鉛直磁場強度が1 mG程度以下であれば、1~10 kmサイズの微惑星の重力暴走成長も許されることを明らかにした (図2)。

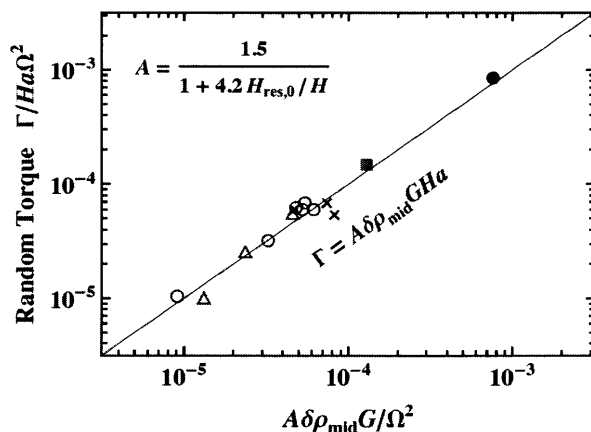


図1: 磁気流体シミュレーション (Gressel et al. 2012) で得られている乱流重力トルク  $\Gamma$  および乱流密度揺らぎ  $\delta\rho_{\text{mid}}$  を、適切な円盤物理量でスケールし (データ点)、我々の理論予想 (実線) と比較したもの。

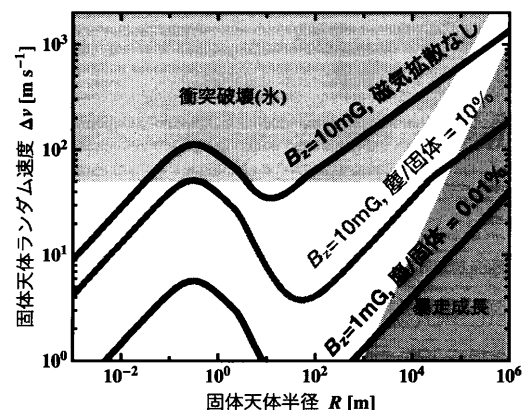


図2: 最小質量円盤の軌道長半径5AUにおける、乱流駆動の固体天体ランダム速度  $\Delta v$  を、固体天体半径  $R$  の関数としてプロットしたもの。3つの線は、異なる大局鉛直磁場強度  $B_z$ ・異なる塵の量に対する結果を表す。

## 温度上昇イベントにともなう氷ダストアグリゲイトの進化

城野 信一<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

若い星の活動度はFU Orionis イベントによって急増することが知られている。もしこのような加熱イベントが発生すると、原始惑星系円盤の温度は上昇し、氷は昇華する。氷の昇華にともない、シリケートグレインが放出されることになる。温度が高い期間内で、シリケートグレインが主としてブラウン運動により相互運動を行い、付着凝集しシリケートアグリゲイトが形成される。加熱イベントが終了すると温度が低下し、氷が再凝縮する。

本研究では、氷が再凝縮したダストアグリゲイトのサイズ分布を数値シミュレーションによって明らかにした。Coagulation equation を数値的に解くことでシリケートアグリゲイトのサイズ分布を求めた。Kuroiwa & Sirono (2011) の結果を用いることで、シリケートアグリゲイト上に再凝縮する氷の量を求めた。その結果、氷凝縮アグリゲイトのサイズはスノーライン近傍であると10ミクロン程度までになることが明らかとなった。氷の再凝縮は大きなサイズのアグリゲイトに選択的に進行するため、氷の凝縮していない小さなシリケートアグリゲイトが数多く生成される。氷をまとったアグリゲイトと氷をまとっていないアグリゲイトの表面積の比をとると、氷をまとっていないシリケートアグリゲイトの表面積が卓越することがわかった。ここから、加熱イベント終了後にさらに付着成長が進行すると、アグリゲイトの表面はシリケートで覆われることが示唆される。表面物質が氷からシリケートに変化することになり、その後の付着成長に大きな影響を与えることが予想される。

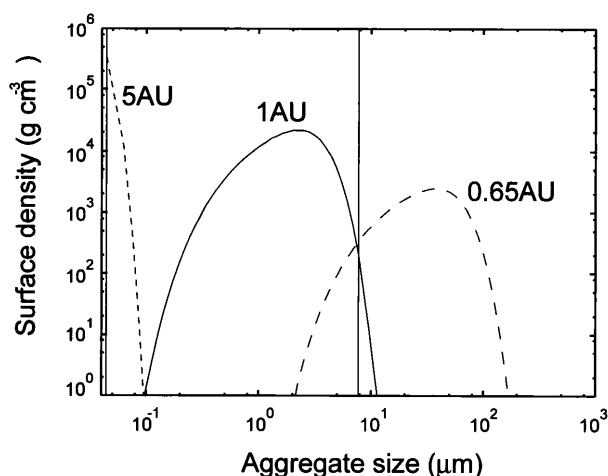


図 1: 加熱イベント後のアグリゲイトサイズ分布。1AU の分布において、縦線より右側のアグリゲイトのみ氷をまとっている。

## 原始惑星系円盤内の氷微惑星の熱進化

○脇田 茂<sup>1</sup>, 関谷 実<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト, <sup>2</sup>九州大学 大学院理学研究院

微惑星とは原始惑星系円盤に存在したと考えられる km サイズ以上の小天体である。微惑星形成・進化過程の解明の一環として、微惑星の熱進化の研究を行った。惑星形成初期には、ガスとダストからなる原始惑星系円盤が存在したと考えられている。その円盤内で、ダストが微惑星へと成長する過程については諸説あり、10 km ~ 1000 km サイズの微惑星が急速にできるという説もあるが、未だ完全には解明されていない。本研究では幅広いパラメーター（サイズや熱源の量）を持つ原始惑星系円盤に存在した様々な微惑星の熱進化の解明を目的とした。

氷と岩石から構成されている氷微惑星に注目し、化学反応やコア形成モデルといった物質進化の効果も取り入れた熱進化の数値計算を行った。初期温度は H<sub>2</sub>O 氷のみが存在する 130 K ~ 70 K とし、この温度は原始惑星系円盤である原始太陽系星雲の 4 AU ~ 16 AU (1 AU は太陽から地球までの距離) に相当する。主な熱源は過去の隕石母天体の熱進化の研究 (e. g., Miyamoto et al. 1981) で用いられた短寿命放射性元素(半減期 72 万年の <sup>26</sup>Al) の壊変熱とした。始原的な隕石に含まれている太陽系最古(45. 67 億年前)の難揮発性物質である Ca-Al-rich Inclusions (CAIs) が持っていた <sup>26</sup>Al の量(太陽系の最大値)を熱源の量の基準値にとった。微惑星の形成時期が CAIs 形成時期よりも遅くなるほど、初期に持つ熱源の量(<sup>26</sup>Al)が減っていくことになる。太陽系の元素存在度を持つ氷微惑星を考えると、氷/岩石質量比は 1. 7 と氷の方が多く氷に岩石が含まれている状態となる。そこで、次のようなコア形成を含む氷微惑星の熱進化モデルを仮定した。(1) 岩石に含まれる <sup>26</sup>Al の壊変熱によって温度が上がり、273 K に達した時点で氷が融けて水ができる。(2) 氷が完全に融け切るまでは氷・水・岩石が共存する層ができる。(3) 氷が完全に融けた時点で岩石が沈殿し岩石コアと水マントルが形成される。このモデルに加え、水の存在による化学反応として水質変質と脱水反応を考え、それぞれ 273 K、873 K で起こると仮定し、その反応熱・鉱物進化も取り入れた。

数値計算結果から、太陽系の元素存在度を持つ氷微惑星で氷の融解・水質変質が起こる温度に達するためには、50 km ~ 1000 km サイズでは CAIs 形成後 200 万年以内に、10 km サイズでは CAIs 形成後 50 万年以内に形成される必要があることがわかった。また、脱水反応が起こる温度に達するためには、CAIs 形成後 100 万年以内に半径 50 km~1000 km サイズの氷微惑星が形成されなければならないことも判明した。今回の研究により、氷微惑星の形成時期(熱源の量)が化学反応の発生の可否とその時期を決定づけていることが示された。

## 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

○前島直彦<sup>1</sup>、渡邊誠一郎<sup>1</sup><sup>1</sup>名古屋大学大学院環境学研究科

惑星形成論において、低質量（＜数地球質量）惑星が円盤ガスからトルクを受け自身の軌道長半径を変化させるプロセス「タイプ I 軌道移動」により、惑星が円盤の寿命内に中心星へ落下してしまうという問題が存在する。ただしこれは等温的な円盤を想定した場合におこる現象であり、非等温円盤においてはエントロピーの勾配に依存して惑星の軌道移動は外向きにも起こることが分かっている。

Lyra et al. (2010)により、非等温円盤におけるタイプ I 軌道移動の数値計算が行われた。円盤内には惑星に働くトルクがゼロになる「平衡半径」ができる。この平衡半径は円盤の降着と共に移動していくため、平衡半径に到達した惑星は円盤が十分散逸するまで平衡半径と共に円盤進化のタイムスケールで中心星方向へ移動していく。

ただし Lyra et al. (2010)の計算では中心星放射による円盤の加熱は考慮されていない。そこで我々は中心星放射を加味した計算を行った。円盤の加熱機構は、中心星に近いほど粘性加熱が、遠方ほど中心星加熱が主体となる。前者による温度勾配は比較的大きく惑星は外向きの軌道移動を行い、それに対して後者による温度勾配は小さいため惑星は内向きの軌道移動を示す。そのため平衡半径のうちの 1 つは円盤加熱の主体が粘性加熱から中心星加熱へ遷移する領域にできる（図 1）。更に円盤の進化と共に温度分布が変化すると、この平衡半径は中心星方向へ移動していく。

本発表では、平衡半径の移動だけでなく惑星の軌道移動の数値計算結果も議論する。

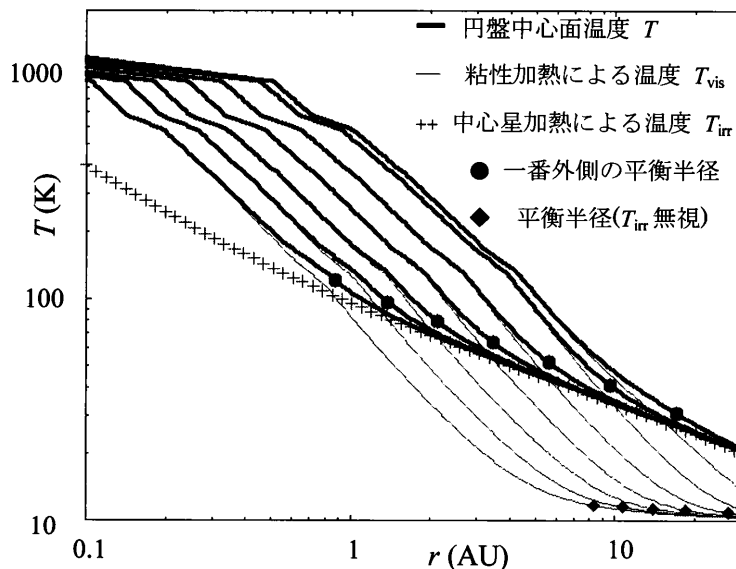


図 1. 円盤の温度分布

円盤中心面温度  $T$ 、粘性加熱による温度  $T_{\text{vis}}$  (背景温度 10K の寄与含む) は時間と共に減衰しており 0~2.4Myr の値を 0.4Myr おきにプロットしている。中心星放射による温度  $T_{\text{irr}}$  は時間変化しないと仮定。 $T^4 = T_{\text{vis}}^4 + T_{\text{irr}}^4$  の関係がある。また、円盤加熱の主体が粘性加熱から中心星加熱へと遷移する領域にできる平衡半径と、中心星放射を無視した場合の平衡半径もプロットしている。

## 09-01

### ホットジュピターが存在する系での微惑星集積の N 体計算

○押野翔一、堀安範<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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。

## 中間質量星周りの惑星分布：ガス惑星砂漠とホットジュピターの起源について

○堀 安範<sup>1</sup>, 大宮正士<sup>2</sup>, G. Laughlin<sup>3</sup>

(1) 国立天文台 理論研究部, (2) 東京工業大学, (3) カリフォルニア大学サンタクルーズ校

多種多様な系外惑星系の姿は、原始惑星系円盤の時間進化や異なる恒星周りでの惑星形成過程の違いを知る重要な手掛かりとなる。これまでの視線速度観測から、ガス惑星の存在頻度は中心星質量とともに増加することが分かって来た。一方で、FGK型星で知られている0.1-1AUのガス惑星 欠乏領域と同様に、より大質量なB,A型星周りでも0.5AUより内側にガス惑星砂漠が見られる。しかしながら、両者の欠乏領域の違いは観測バイアスであるのか、中心星に依存した異なる形成過程を反映しているのかは未だ議論の余地がある。

そこで、本研究では、Keplerの惑星候補天体を用いて、中間質量星(B,A型矮星)周りの惑星分布を検証した。Kepler宇宙望遠鏡は白鳥座方向にある約17万個の天体を測光観測し、約2,320個の惑星候補天体を発見している。この数的な利点を活かして、今回は中間質量星、とりわけA型矮星周りの惑星頻度を評価した。本講演ではまず、Keplerの惑星候補天体に基づいた中間質量星周りの惑星頻度を示す。次に、これまでの視線速度観測の結果と比較し、中間質量星周りの惑星分布について議論する。最後に、FGK型星および中間質量星で見られるガス惑星の二峰性分布から、ガス惑星砂漠およびホットジュピターの起源について考察する。

### Planet Frequency around Intermediate-Mass Stars From the Kepler: On the Origins of Gas Giant Deserts and Hot Jupiters

○Y. Hori<sup>1</sup>, M. Omiya<sup>2</sup>, and G. Laughlin<sup>3</sup>

(1) Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan

(2) Tokyo Institute of Technology, (3) University of California, Santa Cruz

The diversity of planetary systems outside the Solar System afford an important clue to understanding of disk evolution and planet formation around a variety of stars. Exoplanet census from RV surveys shows that planet frequency of gas giants increases with stellar mass, whereas it is also known that gas giants within 0.1-0.5AU are lack around intermediate-mass stars (BA-types stars); the planet desert is similar to “period valley” of 0.1-1AU as is known for Sun-like stars. However, whether the difference between the two starved regions reflects observational biases or some formation processes is not obvious.

The Kepler space telescope has monitored about 170,000 stars near the sky area in the constellation Cygnus and found about 2,320 planetary candidates. In this study, we take advantage of a large number of samples to examine planet frequency around intermediate-mass stars, using Kepler candidates. In this talk, we present planet occurrence rates around intermediate-mass stars from the Kepler. We also compare our results to planet frequency estimated from RV surveys. Finally, we discuss the origins of gas giant deserts and hot Jupiters based on bimodal mass-semimajor axis distributions of gas giants around FGK stars and intermediate-mass stars.



## 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 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される。

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このような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、現実的な散乱過程を考えると連惑星の形成確率は初期軌道長半径によらず 100 回の計算中約 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きつつ長い時間を過ごせるような状態にはなりにくいためである。本研究では、連惑星は軌道不安定が生じ始めるごく初期の段階で形成されるため、初期に惑星を置いた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もわかった。

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。連惑星の軌道分離が小さいため、重力レンズによる連惑星の分離発見も厳しそうである。ただ、連惑星が中心星の前を横切るときに惑星同士が起こす相互食をトランジット法で観測できれば連惑星の発見につながることから、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だと考えられる。

## 原始惑星系円盤中における固体原始惑星へのダスト降着流

○谷川 享行<sup>1,2</sup>、小林 浩<sup>3</sup>、町田 正博<sup>4</sup><sup>1</sup> 惑星科学研究センター、<sup>2</sup> 北大低温研、<sup>3</sup> 名古屋大理、<sup>4</sup> 九大理

木星のような巨大ガス惑星は、原始固体惑星が臨界コア質量に達することでガス捕獲を開始して形成するが、臨界コア質量に達するまでの時間は円盤ガスが散逸する典型的時間に比べて長いと理論的に予測されており、巨大ガス惑星の形成の大きな困難となっている。しかし、惑星集積過程に円盤ガスの存在を考慮することで、この臨界コア質量に達するまでの時間が大きく変化する可能性が指摘されている。例えば、固体原始惑星が大気を持ち始める程度まで成長すると、大気とのガス抵抗により微惑星などの被捕獲天体の捕獲率が上昇し、臨界コア質量に達するまでの時間が短縮する。一方で、被捕獲天体のサイズがさらに小さくなるとガス抵抗がさらに効果的に効くため、固体コアを避けるように運動するガスに流されて被捕獲天体が固体コアに降着できなくなる可能性がある。実際、固体原始惑星が成長する際には、微惑星などの固体物質の衝突合体が繰り返し起こるが、この過程で同時に破壊により小さい破片も大量に生じると考えられているため、円盤ガスが固体集積に与える影響を調べることは巨大ガス惑星形成問題には重要である。そこで本研究では、サイズが比較的小さくガス抵抗が効く固体が、円盤ガス中にある固体コアに降着する過程を数値シミュレーションにより調べた。

固体の運動は、惑星周りの局所近似回転座標系であるヒル座標系の上で運動方程式を数値積分により解いて求めた。運動方程式中のガス抵抗の項は、数値流体シミュレーションを別途行い得られた定常流の密度・速度場を用いて求めた。今回は簡単のため、固体の運動は原始惑星系円盤の中心面のみの2次元に限定して計算を行った。計算の結果、大きいサイズの極限ではガスがない場合の降着率に漸近するが、サイズが小さくなるにつれて降着率が増加し、あるサイズを境に降着率が低下する様子が見られた。本講演では、数値計算により得られた被捕獲天体の個別の運動や、それらの総和としての降着率を解析し、降着率が最大となるサイズとそのときの降着率が決まる物理を解明し、このプロセスが惑星系形成シナリオに及ぼす影響を議論する予定である。

## 周惑星円盤へのダスト降着

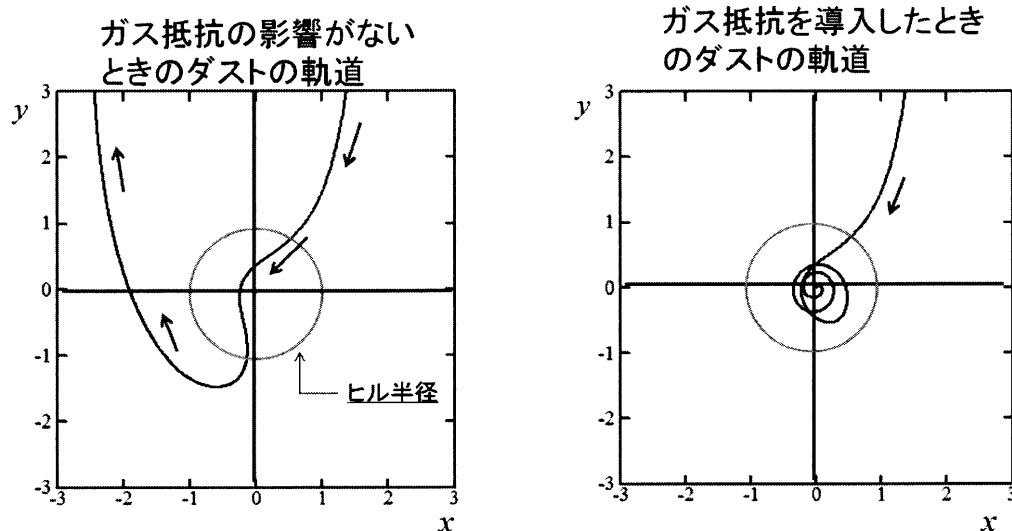
○丸田有希人(九大) 谷川亨行(北大) 町田正博(九大)

木星の周りには質量の大きな4つの規則衛星が存在する。この4つの衛星の軌道傾斜角は小さく、また離心率も非常に小さい。そのため、これらの衛星は太陽系の原始惑星系円盤のようなガス円盤内で形成されたと考えられている。

Canup & Ward(2002),ApJ,124,3404 では原始惑星系円盤から周惑星円盤へガスが供給され続けることによって衛星が形成するモデルを考案している。このモデルでは、流入したガスとダストは周惑星円盤内を経由して木星に降着する。そして周惑星円盤内をダストが通る過程において衛星が形成する。

この研究では、最初に流体計算を行い、円盤のガスの速度と密度を決定した。その後、衛星形成の材料となるダストがどのようにして周惑星円盤に流入するかについて8次精度のルンゲクッタ法による数値シミュレーションを用いて調べた。次に流体計算から得られたガス密度と速度からガス抵抗を導出して、ダストの軌道運動を計算した。そして周惑星円盤に捕獲されるダストのサイズの依存性について調べた。

### 結果のグラフの一部



## 巨大惑星による微惑星一時捕獲過程

○ 末次竜<sup>1</sup> 大槻圭史<sup>1,2</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科 2. 惑星科学研究センター

微惑星が惑星近傍を通過すると、微惑星は惑星重力によって遠方へとばされる。しかしながら稀に惑星の重力によって微惑星が一時的に捕獲され、惑星を中心にしばらく公転した後、遠方へ飛ばされてゆくことがある。この現象を一時捕獲という。近年、この一時捕獲が短周期彗星の力学進化や不規則衛星の形成において重要な役割を担っている可能性が示唆されている。我々はすでにローカル軌道計算を用いて微惑星が初期に楕円軌道の場合での一時捕獲軌道や一時捕獲頻度などを詳細に調べた (Suetsugu et al. 2011)。その結果、一時捕獲軌道は離心率とエネルギーによって四つの型に分類できることがわかった。初期の離心率が小さいと惑星の重力圏付近を逆行で公転するが、離心率が大きいと重力圏の外で逆行に公転する一時捕獲軌道になる。一方、順行の長時間の一時捕獲は特定の離心率でエネルギーが非常に低い場合に、ラグランジュ点から重力圏に入ることによって起こることがわかった。一時捕獲が起こる頻度は離心率の増加とともに増加し続けることが示された。一方、順行の一時捕獲の頻度は上述の長時間の一時捕獲が起こる特定の離心率においてピークをもつことがわかった。

しかしながら Suetsugu et al. (2011) では微惑星と惑星の質量が中心星に比べ十分小さいと仮定したヒル近似下で三体問題軌道計算を行ったため、木星程度の質量をもつ巨大惑星の場合には結果が異なる可能性がある。そこで今回、円制限三体問題下で三体問題軌道計算を行い、微惑星の一時捕獲が惑星の質量にどのように依存するのかを調べた。

木星程度の質量の巨大惑星による一時捕獲の場合においても、四種類に一時捕獲軌道を分類できることがわかった。また離心率が増加するにつれて一時捕獲頻度が増加することや、順行の一時捕獲頻度がピークをもつ傾向はローカル軌道計算の場合と同じであった。しかしながら順行の一時捕獲頻度は惑星の軌道の曲率によるラグランジュ点のエネルギーの違いから L1 経路によるものが起こり易くなることが分かった。

## 周惑星円盤から受けるガス抵抗による微惑星捕獲

○藤田 哲也<sup>1</sup>, 大槻 圭史<sup>1</sup>, 谷川 享行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究, <sup>2</sup>北海道大学低温科学研究所

惑星の形成過程において、惑星はその重力により原始惑星系円盤からガスや固体微粒子を得て、周惑星円盤を形成する。ガリレオ衛星のような巨大惑星の規則衛星は、順行の円に近い軌道を持っているため、周惑星円盤の中で固体粒子が衝突合体して形成したと考えられている。大量のガスと固体粒子が周惑星円盤を通して成長途中の巨大惑星に供給されるため、周惑星円盤中の固体粒子の量は、衛星だけでなく、巨大惑星の形成や構成する重元素の起源に対しても重要な役割を果たす。円盤に供給される固体微粒子がメートルサイズ以下であると仮定すると、ガス抵抗を強く受けるためにガスとともにやってくると考えられる。一方、大きい微惑星はそのランダム速度に依存した軌道で接近し、ガス抵抗を受けることで周惑星円盤に捕獲されることが考えられる。我々は巨大惑星に接近する微惑星の軌道進化を計算し、周惑星円盤への降着確率を調べた。

円盤を通過する微惑星はガス抵抗を受けるため、エネルギーを失う。ガスは円運動しているために、微惑星の運動方向がガスに対して順行か逆行かによりエネルギー散逸量が異なる。逆行の場合は順行に比べてガスに対する相対速度が大きいため、強くガス抵抗を受ける。したがって、エネルギー散逸は逆行の方が大きいことが分かった。また、ガス抵抗によってエネルギーが大きく散逸されるのはガス密度が大きい円盤内側の領域を通過したときであるため、2次元の場合は微惑星の惑星に対する最接近距離を考えることで、エネルギー散逸量を見積もることができる。エネルギー散逸量が無限遠での微惑星のエネルギーの値と等しくなるときの惑星からの距離を捕獲半径と定義すると、この解析解を得ることができる。さらに、ランダム速度が大きい場合については捕獲確率も解析的に得られる。実際に、捕獲確率の計算結果は解析解によく一致することが分かった。

3次元の場合は、微惑星が円盤をどのように通過するかは軌道傾斜角や近点経度によるため、解析的な見積もりは困難である。しかし、捕獲頻度の計算結果を2次元と3次元とで比較すると、3次元では軌道傾斜角が大きくなると円盤を突き抜けガス抵抗によるエネルギー散逸量が小さくなるため、捕獲頻度も2次元のときより小さくなることが分かった。

## 地球型惑星形成における巨大惑星の移動と共鳴クロッシングの影響

Terrestrial Planet Formation During the  
Migration and Resonance Crossings of the Giant Planets○Patryk Sofia Lykawka (パトリック ソフィア リカフィカ)<sup>1</sup>, Takashi Ito (伊藤 孝士)<sup>2</sup><sup>1</sup> Astronomy Group, Faculty of Social and Natural Sciences, Kinki University (近畿大学 総合社会学部 天文学分野) \*  
patryksan@gmail.com<sup>2</sup> Astronomy Simulation Project, National Observatory of Japan (NAOJ) (国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト)

地球型惑星形成は微惑星（巨大微惑星※ = “embryos”も含む）の相互衝突により形成されたと考えられている。この形成過程の解明により地球の形成や、小惑星帯の軌道構造、木星と土星の軌道進化などに関する重要な手がかりを得られと考えられる。今回の研究では、地球型惑星の創成のメカニズムを包括的に理解できるように力学的に数値計算を実施した。研究の遂行に当たっては国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの共同利用計算機の汎用 PC システムを大いに活用した。（※ 少なくとも準惑星クラスの質量を持つ天体）

地球型惑星となる材料として多数の微惑星と embryos 及びコンパクトな軌道構成での巨大惑星といった原始システムの衝突進化・軌道進化を 10 億年間にわたり数値計算で調べた。主に、木星/土星の移動速度（速い・遅い）及びシステムの不安定に引き起こす木星と土星の相互 1:2 平均運動共鳴 crossing のタイミングといった 2 つのパラメータを検証した。まず、システムは一時的に不安定な状態になっても 1~2 億年間程度経過すると惑星の軌道と質量という基準に基づき、水星、金星、地球のような惑星が一般的に形成される状況が見られた。それらの結果は上記のパラメータが異なってもあまり変わらないということが分かった。また、惑星系円盤における微惑星/embryos の軌道進化について、木星/土星の重力と共鳴の摂動を受けて円盤の外側領域 (1.5 ~ 2.0 AU) は空間的に枯渇状態になったということが分かった。しかし、同じ領域に存在する火星のような軽い惑星の形成はあまり見られなかった。一方、crossing のタイミングの期間と木星/土星の離心率がいずれか高ければ高いほど、円盤の外側領域はもっとも枯渇状態になって、より軽い火星が形成されたということがわかった。しかし、金星と地球のような惑星がまだ力学的に過度に励起された状態で残ってしまうことが問題である。

要するに、巨大惑星の進化は地球型惑星形成に影響し重要な役割を果たしたという。今後 4 つの地球型惑星の現在の軌道及び質量をよりもっと正確に再現できるようにモデルを改善し、他のパラメータも検証したい。

This research was supported by the “H23 NAOJ Research Collaboration Small Grant” (平成 23 年度国立天文台共同研究)。

## N体シミュレーションによる巨大惑星存在下での 地球型惑星集積過程の研究

○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

近年注目を集めている惑星系形成ハイブリッド・シナリオ (Inutsuka 2010) は、重力不安定モデルによる (巨大) 惑星形成とコア集積モデルによる惑星形成を複合させたシナリオである。このシナリオでは、重力不安定で形成した巨大惑星存在下での惑星コア集積が本質的に重要である。また、観測技術の進展に伴い、太陽系外の地球型惑星の検出数が増加しており、巨大惑星と地球型惑星を共に含んだ系の軌道的性質が観測から議論可能になってきている。このような近年の動向を踏まえ、本研究では、巨大惑星存在下での地球型惑星集積過程を重力N体シミュレーションによって調べる。

原始惑星系円盤中に存在する巨大惑星はその重力により、周囲のガス円盤にリング状の密度ギャップを形成する。この密度ギャップのすぐ外側、およそガスの圧力勾配が正になる領域では、微惑星や原始惑星が受けるガス抵抗による軌道移動やタイプI移動の方向が、中心星から遠ざかる正方向になると考えられる。つまり、局所的に圧力が極大値を取る位置付近に天体の軌道が収束し、微惑星形成や惑星集積が促進され得ると予想される。Kobayashi et al. (2012)は、木星が形成した密度ギャップの外側において惑星コアが急速に成長し得ることを指摘した。

本研究では、巨大惑星外側領域での惑星集積を微惑星からの重力N体計算により調べる。数値シミュレーションには、ガスの局所的なプロファイルに応じて、微惑星の離心率・軌道長半径を変化させる力を組み込む。先行研究(Kobayashi et al. 2012)との主な違いは、本研究では全ての粒子の重力相互作用を直接に計算していることである。従って本研究の第一義的目的地は、微惑星や原始惑星の速度分散の進化を明らかにし、巨大惑星の外側に最終的に形成される惑星の分布や軌道性質、またそれらの集積時間を解明することにある。また、ガス圧力極大値付近に原始惑星の軌道が収束してきた結果、それらが互いの平均運動共鳴や1:1の共回転軌道に捕捉される確率や、その軌道状態が原始惑星や微惑星の重力散乱により乱される可能性などについても注目して議論を行う。

## 恒星遭遇によるオールト雲彗星個数の減少

○樋口有理可<sup>1</sup>, 小久保英一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学理学部, <sup>2</sup>国立天文台理論研究部

長周期彗星の観測より、太陽系を球殻状に取り囲む長周期彗星の貯蔵庫が存在すると考えられている(オールト雲)。オールト雲に貯蔵されている彗星核が、銀河潮汐力や恒星からの摂動という外力をうけて太陽系内部に落ち込んだものが長周期彗星として観測される。オールト雲に貯蔵されている彗星核は星間空間へ放出されることで個数が減少していると考えられる。減少させるものは惑星や銀河系・恒星といった、オールト雲を形成した天体の影響である。

本研究では主に恒星遭遇が彗星核個数の減少に与える影響を評価した。具体的には、惑星散乱で遠方まで広がった微惑星円盤が、恒星遭遇によってどのような分布へ進化するか、その過程で星間空間に放出される微惑星の割合の時間進化、恒星パラメタなどへの依存を明らかにした。本学会では、微惑星個数の減少に絞って発表する。微惑星個数の減少率を一般の exponential decay と Kohlrausch formula を使って近似した。その結果、微惑星の減少率は exponential decay よりも Kohlrausch formula を使ったほうがよりよく近似されることがわかった。これらの彗星核個数の減少率を支配するのは、無数の遠方の恒星ではなく、太陽の潮汐半径内を通過する恒星であることを示した。また、Kohlrausch の  $\beta$  パラメタの値より、オールト雲の安定性は太陽からの距離によって大きく異なることが分かった。これらの結果には銀河潮汐力はほとんど影響しないこともわかった。

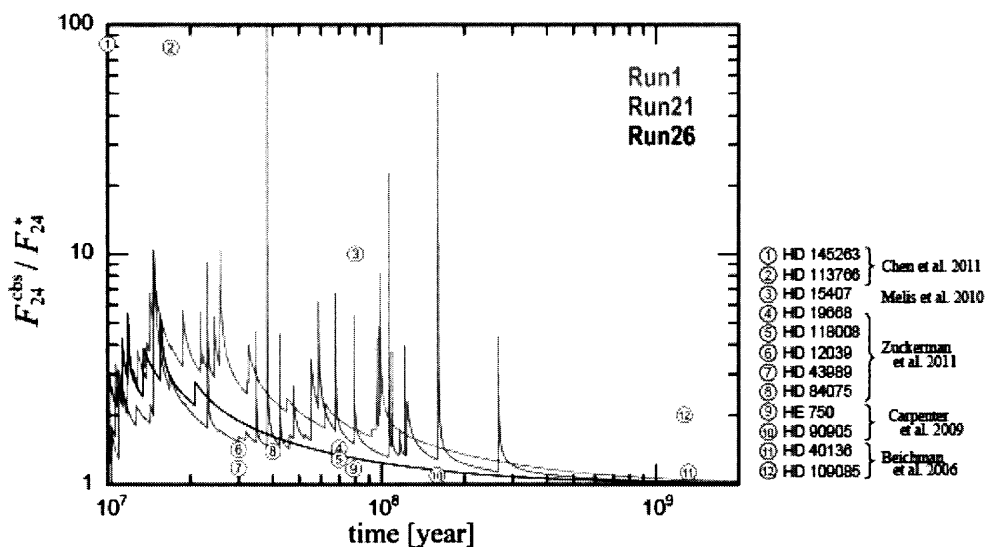


## 地球型惑星形成後期の衝突デブリ円盤について

玄田英典（東大）、小林浩（名大）、小久保英一郎（国立天文台）

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することがわかっている。これらの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れば、赤外超過として観測されるはずである。最近の Spitzer 宇宙望遠鏡の観測で、非常に多くの赤外超過を示す星が発見されている。そのなかでも、いくつかの若い星 ( $10^{7-8}$  年) で温度の高い (150K 以上) デブリ円盤が観測されている。そのような温度の高いデブリ円盤の存在は、地球型惑星形成の最終ステージで起こる巨大天体衝突起源のデブリ円盤を示している可能性がある (Jackson & Wyatt 2012)。

本発表では、巨大天体衝突ステージでバラまかれる物質の総量および最大破片質量を高解像度の流体コードを用いて定量的に求め、生成された破片の衝突進化を解析的なモデルを用いて追い、デブリ円盤の明るさの時間変化を計算した。その結果、巨大天体衝突ステージを通じてバラまかれる物質の総量は、積算値で平均 0.4 倍の地球質量にもおよび、その量は極めて多いことがわかった。また形成されたデブリ円盤の衝突進化を簡単な解析モデルで計算したところ、巨大天体衝突ステージ（1 億年）を通じて十分赤外超過を示すことがわかった（下図）。この結果は、これまでに Spitzer 宇宙望遠鏡の観測で報告されている温かいデブリ円盤の多くを説明する。



## 隕石重爆撃期における金星、地球、火星の大気進化

黒澤耕介<sup>1</sup>, 濱野景子<sup>2</sup>, 杉田精司<sup>3</sup>, 門野敏彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>東大 理, <sup>3</sup>東大 新領域, <sup>4</sup>産業医科大 医

46-38 億年前の内惑星には、少なくとも現在の 1000 倍以上の頻度で天体衝突が起きていたことがわかっており、“隕石重爆撃期”と呼ばれている。本研究では隕石重爆撃期に起こる大気組成・全圧の変化に注目する。以前、我々は最新の実験結果を基にして天体衝突による大気剥ぎ取り過程を再評価した[黒澤ら、連合大会 2012]。その結果、 $<10$  気圧の初期大気は隕石重爆撃期に全散逸する可能性があることがわかった。今回はこのモデルを改良し、隕石重爆撃期に進行する揮発性成分の変動を取り込んだ確率論的大気進化モデルを構築した。具体的には大気の減少要因として(1)衝突蒸気雲による大気の剥ぎ取り、(2)水素の流体力学的散逸、(3)衝突放出物による  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  の除去、(4) $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  の凝結を、大気の増加要因として衝突天体中の揮発性成分供給を考慮した。初期条件として最新の惑星形成理論から予測される 10-100 気圧の希ガスに富んだ円盤由来大気を与えた。ここで金星は暴走温室状態にあった可能性が高いため、さらに 300 気圧相当の水蒸気大気を与えた。計算に組み込んだ化学種は  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$  である。衝突天体は CI 隕石、衝突速度、サイズ分布は小惑星帯からの衝突に対応するものを用いた。その結果、(1)円盤由来大気の主成分である水素の流体力学的散逸は隕石重爆撃の時間スケールよりも速く進行し、円盤由来大気圧は円盤ガスの散逸と共に数気圧( $\text{CO}$  と希ガスの大気)まで減少しうること、(2)水素の“鎧”の消失に伴い、火星、地球では衝突による大気の剥ぎ取りが進行するが、金星は分厚い水蒸気大気の“鎧”によって円盤由来の  $\text{CO}$  と希ガスが保持されること、(3) 衝突体が CI 隕石の場合は、衝突による大気剥ぎ取り量よりも揮発性成分の供給量の方が多いが、衝突放出物による  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  の除去が化学量論的に許される範囲で効率良く働くと仮定すれば、大気圧を現在の値近くの平衡状態に保つことができ、円盤由来希ガス成分の剥ぎ取りが続くこと、(4) 隕石重爆撃期に続く、少量の彗星の付加、 $\sim 40$  億年に渡る IDP の連続的な付加も考慮すれば、金星の  $\text{Ne}$  を除く金星、地球、火星の希ガスパターンを説明できる可能性があること、がわかった。まだまだ不定性は多いものの、本研究の結果は円盤由来大気の流体力学的散逸、隕石重爆撃期、彗星、IDP の付加という惑星形成論の自然な流れの中で内惑星の大気組成・全圧進化を説明できる解があり得ることを示唆するものである。

## 水の散逸を考慮した地球型惑星の進化

○小玉 貴則<sup>1</sup>、玄田 英典<sup>1</sup>、阿部 豊<sup>1</sup>、Kevin Zahnle<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院 地球惑星科学専攻、<sup>2</sup>NASA Ames Research Center

生命の誕生と進化を考える上で、液体の水の存在は重要であると考えられている。液体の水が惑星表面に存在できる中心星からの距離の範囲をハビタブルゾーン(HZ)と呼ぶ。Kastingらは、全球が海でつながった地球のような惑星(海惑星と呼ぶ)のHZを議論し、その範囲を現在の地球軌道での太陽放射の約90%から約110%の範囲と見積もった。

一方、阿部らは、惑星の保持する水量がごく少量の仮想的な惑星(陸惑星と呼ぶ)の気候について議論した。陸惑星は、惑星表面の水分布が大気中の水蒸気の循環にのみに支配される惑星であり、その重要な特徴は、降雨と蒸発が局所的にバランスし、水の局在化が起こることである。彼らは、大気大循環モデルを用いて、1気圧の空気からなる大気をもつ陸惑星のHZを現在の地球軌道の太陽放射の約77%から約170%の範囲と見積もった。その結果、陸惑星は、海惑星より広いHZを持つ可能性が示唆された。また、彼らは、海惑星のような水を多く保持している惑星が、水の散逸を経験することによって、陸惑星へ進化するだろうと考え、新しい地球型惑星の進化の経路を提案した。

両研究により、惑星表面の水量は、HZを議論する上で重要であることが示唆された。そこで我々は、まだ詳細に検討されていない海惑星から陸惑星への進化のメカニズムを明らかにするため、惑星表面に保持する水量変化をモデル計算し、海惑星から陸惑星への進化の詳細を検討した。

結果として、太陽型の恒星周りの地球サイズで軌道半径0.75[AU]の海惑星の場合、海惑星から陸惑星へ進化できる境界の初期水量は、0.15海洋質量(現在の地球の海洋質量の0.15倍)と見積もれ、惑星が初期に保持している水量がこれ以下の場合は、海惑星は陸惑星へ進化する可能性がある。

また、水の散逸量は、上層大気の温度に依存すると考えられる。そのため、様々な上層大気の温度を持つ惑星を仮定し、海惑星から陸惑星への進化について議論した。高い上層大気の温度を持つ惑星では、上層大気中の水蒸気が多いため、水の散逸量が多く、海惑星から陸惑星へ進化しやすい。よって、水の散逸を考慮した地球型惑星の進化を議論する上で、上層大気の温度は重要であることが示唆された。

本発表ではさらに、系外惑星に適用することを目的に、様々な恒星の種類の進化と惑星サイズを考慮した地球型惑星の進化を議論し、海惑星から陸惑星への進化を考慮したHZ内側境界を検討する。

## 惑星集積過程を伴うコア形成過程シミュレーションによって示唆される初期地球内部構造

古市幹人<sup>1</sup>、○中川貴司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

## **The interior structure of early Earth inferred from 3D core formation simulations with a growing planet**

Mikito Furuichi<sup>1</sup> and ○Takashi Nakagawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC

The differentiation process between metallic core and silicate mantle is an important process to form the layered structure of terrestrial planets. There have been several numerical simulations on such a process [Honda et al., 1993; Senshu et al., 2002] but their initial conditions were started from after completely accreted planets. In this study, we propose new interior structure of early Earth suggested from 3D core formation simulations with a growing planet due to many impacts of planetesimals. The heterogeneous anomalies generated from proto-planet material are found in the boundary region between metallic core and silicate mantle. If such anomalies could be survived from huge heating caused by the moon-forming impact, the source of deep mantle geochemical reservoirs with long residential time might include the proto-planet material.

コア-マントル間の分離過程は初期地球型惑星の内部構造の形成する重要なプロセスである。これまでに、いくつかのコア形成過程のシミュレーションによる初期地球型惑星の内部構造に関する研究があるが、いずれも惑星集積が終わった後にマントル-コア間の分離が起きているという仮定の下でのモデリングである。本研究では、微惑星衝突による惑星成長過程を含んだ3次元コア形成シミュレーションを用いて、新しい初期地球型惑星の内部構造モデルの構築を試みた。その結果、金属核とシリケートマントルの境界付近に原始惑星起源物質が生き残る可能性があることがわかった。もし、このような物質が地球-月形成の最後のイベントである「ジャイアントインパクト」を逃れることが出来たのであれば、地球化学的な分析によって推定されている滞留時間の長い始源的な深部マントルリザーバーの原因物質として、原始惑星起源物質の可能性があることが示唆できる。

## 地球型水惑星表層における気候

○門屋 辰太郎<sup>1</sup>, 田近 英一<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>2</sup> 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といった要因から議論がなされてきた。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、大気組成を仮定することで温室効果と気候を推定している。しかし、CO<sub>2</sub> 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の変動し、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要素の一つである CO<sub>2</sub> 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、これらの要素の時間変化を考えることで、惑星気候の進化の理解にもつながる。

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、CO<sub>2</sub> 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、これらの進化に由来する惑星気候進化を明らかにすることを目的とし、議論を行う。惑星気候の指標としては表層の温度分布を用い、温度分布は南北 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、CO<sub>2</sub> 脱ガスによる供給と風化による除去のバランスから大気中の CO<sub>2</sub> 量求め、温度の計算に使用した。また、中心星放射量及び CO<sub>2</sub> 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。

この結果、CO<sub>2</sub> 脱ガス率が現在の地球の 4 倍以下ではハビタブルゾーン内部であったとしても惑星は全球凍結に陥ることがわかった。また、中心星放射量が現在の地球の 1.3 倍以上あれば、炭素循環にはほとんどよらず、惑星の気候が決まることがわかった。本発表では、これらの要因に加え、惑星気候の進化について検討を行う。

## 地球型惑星が保持する内部海に対して 高圧氷が与える影響

○上田翔士<sup>1</sup>, 佐々木貴教<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

系外地球型惑星と思われる天体や宇宙空間を漂う浮遊惑星が発見されている昨今、生命居住可能な地球型惑星が存在するのかどうかということは非常に重要なテーマである。そういった状況の中で、表面が全球凍結しているが氷の内部が惑星内部からの地熱によって溶けて、表面が氷によって覆われた海（内部海）が出来ることが分かっており、内部海に生命が存在する可能性があることが示唆されている。本研究では、惑星内部からの熱フラックスによって惑星進化のタイムスケールで内部海を保持する系外地球型惑星・浮遊地球型惑星について議論した。先行研究の手法を応用することで新たに、惑星表面の水の量・放射性熱源の量の依存性も調べた。また、高圧下においては内部海の底に氷（高圧氷）が生じ、岩石部分からの栄養塩の供給の遮蔽が起きることを考慮した。本研究により、惑星質量に応じた、内部海を持つために必要な放射性熱源の最低限の量を見積もることが出来た。また、先行研究では惑星がある質量以上であれば内部海を保持することが可能な領域が大きく広がることが示唆されていたが、本研究によって、高圧氷による内部海への栄養塩供給の遮蔽によって、生命居住可能性のある内部海を持つ条件に対して惑星の水の量や惑星サイズについての大きな制約が加わることを新たに示唆された。

## 水に富むスーパーアースの質量-半径関係に対する 熱進化と質量散逸の影響

○黒崎健二<sup>1, 2</sup> 生駒大洋<sup>2</sup> 堀安範<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 <sup>2</sup>東京大学 <sup>3</sup>国立天文台

近年の観測技術の発達により、検出された系外惑星の数は 700 を超えた。地球質量の 30 倍以下という比較的小質量の惑星（以降「スーパーアース」と表記する）の発見数も増加しており、31 個のスーパーアースについては質量に加えて半径も推定されている（2012 年 8 月 23 日現在、[www.exoplanet.eu](http://www.exoplanet.eu) より）。それらのスーパーアースの中には、水に富むと考えられるスーパーアース（例えば GJ1214b）もある（e.g. Rogers & Seager 2010; Nettelmann et al. 2011）。発見された系外惑星を質量-半径関係図上に表してみると、温度の効果を考慮しない状態方程式を用いて求めた理論的な質量-半径関係（e.g. Seager et al. 2007）と比べて、質量とともに半径が増加するという傾向は同じだが、発見された系外惑星の方がその増加率が大きいことに気づく。その違いを説明するためには、状態方程式に温度の効果を考慮して惑星半径の膨張について調べる必要がある。一方、これまでに発見されたスーパーアースは中心星近傍に存在しているため、強烈な X 線や UV (XUV) の照射に晒され、質量散逸（大気散逸）を経験してきたはずである。しかし、その効果に対する質量-半径関係図上での系統的な議論はこれまでにされていない。今後、多数発見されると期待されるスーパーアースの質量と半径の傾向を理解することは、惑星の組成や起源を考察する上で重要である。

本研究では水に富むスーパーアースに注目し、岩石コアを水のマントルが覆う惑星の熱進化計算を行った。そして、(i) 中心星放射による加熱の効果を考慮した惑星の質量-半径関係と、(ii) 質量散逸を考慮した場合の質量-半径関係をそれぞれ求めた。本研究では、中心星は G 型星とし、XUV のモデルは Ribas et al. (2005) を用いた。また、数十地球質量の惑星が中心星近傍で発見されていることを考慮し、軌道長半径は 0.05AU として計算を行った。その結果、(i) 中心星放射による加熱の効果を考慮した理論的な質量-半径関係と発見された系外惑星のそれを比較すると、軽い惑星ほど水成分が少ない傾向にあることがわかった。また、(ii) 質量散逸を考慮した場合、初期に低質量で半径が大きかった惑星は、水成分が散逸して質量が小さくなりやすいことがわかった。このことから、惑星の水成分が散逸することで岩石成分の割合が大きくなり、水成分の層が薄くなって惑星半径が小さくなることもわかった。これらの結果は、惑星の質量-半径関係図上で水に富むスーパーアースが存在しうる領域に制限をあたえる。また、惑星の初期条件として巨大衝突を考慮し、惑星形成過程に対する示唆についても議論する。

## スーパー地球のマントル対流：断熱圧縮の効果

○立浪千尋<sup>1</sup>、小河正基<sup>2</sup>、土屋卓<sup>3</sup>、亀山昌典<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学、<sup>2</sup>東京大学、<sup>3</sup>愛媛大学

近年宇宙望遠鏡の観測などにより発見が相次いでいる太陽系外の大型地球型惑星（以下スーパー地球）に注目が集まっている。これまで太陽系内には地球よりも大きな岩石惑星は存在していなかったため、このような大きなスーパー地球たちがどのような姿、環境をしているのかという点は非常に興味深い問題である。一方、地球型惑星の長期的な進化を支配する現象の一つとして、マントル対流が挙げられる。マントル対流とは地球型惑星の岩石マントルが主に熱的な浮力によって運動する現象であり、惑星内部の長期的な物質循環や冷却を支配する過程であるため重要である。本研究では、様々な質量の系外スーパー地球の内部におけるマントル対流に着目し、非弾性体近似の元で線形安定性解析と非線形流体シミュレーションを用いて対流安定性と熱輸送効率を調べた。これまでのマントル対流の研究においては非圧縮流体近似が用いられるなど、断熱圧縮は無視されることが多かったが、我々は断熱圧縮の効果について着目し、非弾性体近似を採用し、断熱圧縮の効果を正確に計算に取り入れた。

本研究で得られた結果は主に次の二つである。線形安定性の結果からマントルの熱膨張率の圧力依存性がないとした場合、惑星が大きいほどマントルは対流安定となり、例えば10地球質量の惑星ではマントル対流が起こらないという結果を得たが、圧力依存性を考慮すれば安定性は大きく下がる事もわかった。このことから熱膨張率の圧力依存性がスーパー地球のマントル対流において本質的に重要であることが分かった。次に対流シミュレーションを行い、各パラメータセットに対してNu-Ra 関係式を求めることで、熱輸送効率を評価した。この計算から、惑星が大きいほど、また表面温度が高いほど熱輸送効率が下がることが分かった。また対流が発達するまでのタイムスケールに関して、惑星が大きくなるほど長い時間がかかることが分かった。本発表では、これらの結果を定量的に評価した上で、このような依存性が惑星の進化において、どのような影響があるかについても議論したい。



## ドップラー法による重い G-K 型巨星の惑星探索

A precise Doppler survey for giant planets around massive G-K type giant stars

○大宮 正士<sup>1</sup>, 比田井 昌英<sup>2</sup>, 佐藤 文衛<sup>1</sup>, 泉浦 秀行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻

<sup>2</sup>東海大学 総合教育センター

<sup>3</sup>国立天文台 岡山天体物理観測所

ドップラー法によって 600 個を超す恒星の周りに惑星が発見・確認されてきたが、これらの大半が太陽に似た特徴を持つ太陽型星での発見であり、それ以外の恒星の惑星系の性質はまだ十分に示されていない。しかしながら、近年、中質量（1.5～5 太陽質量  $M_{\odot}$ ）星が進化した巨星の周りの惑星探索が進んだことによって、太陽型星よりも重い星の惑星系が明らかにされ始め、そのような星の惑星は太陽型星の惑星とは異なる特徴を持つことがわかってきた。例えば、主星質量が大きくなると、巨大惑星の頻度も高くなり、惑星の質量も大きくなる、などである。

その傾向は、中質量星の中でもより重い星（1.9  $M_{\odot}$  以上）の惑星系の特徴に“より重い星により重い substellar companion（褐色矮星質量の天体を含む）が存在する”ことを示し、重い星（特に 3  $M_{\odot}$  以上の星）の 3AU 以内を公転する巨大惑星の欠乏を示唆する。ただし、惑星探索が行われている 3  $M_{\odot}$  以上の星の数は少なく、重い星における巨大惑星の欠乏は観測バイアスの可能性がある。そこで、我々は、国立天文台岡山天体物理観測所 1.88m 望遠鏡と高分散分光器 HIDES による視線速度精密測定を用いて、ドップラー法による 3～4  $M_{\odot}$  の質量を持つ 70 個の G-K 型巨星の惑星探索を進めている。本探索は、惑星探索が行われている 3～4  $M_{\odot}$  の星のサンプルを増やし、重い巨星における巨大惑星の欠乏を十分なサンプルで検証することを目的としている。これまでに、2.5 年間の視線速度モニター観測を行ってきており、一部のサンプル星で軌道長半径 3AU（周期 1000 日程度）の惑星の公転周期をカバーできるところまできた。本講演では、我々の惑星探索の進捗状況とサンプルの特徴を報告し、本サーベイにおける巨大惑星の検出可能性を議論する。

We are carrying out a precise Doppler survey to search for giant planets around G-K type giants with 3-4 solar masses. The aim of this survey is to verify the existence of the giant planet desert, the lack of giant planets in orbits within 3 AU, which is suggested around massive G-K type giants with >3 solar masses by results of past planet search programs. In this presentation, we report the current status of our planet search program and discuss the detectability of giant planets in our precise Doppler survey.

# O10-10

## スーパーアース GJ1214b の近赤外線 3 色同時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)、永山貴宏(名古屋大学)、末永拓也(総合研究大学院大学)、  
福井暁彦(国立天文台)、生駒大洋(東京大学)、中島康、西山正吾、田村元秀(国立天文台)

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 の距離にあつて、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、このような太陽系に存在しないタイプの惑星がどのような大気を持っているのかは非常に興味深い研究対象である。

そこで我々は、南アフリカ天文台に設置された IRSF1.4m 望遠鏡の近赤外線 3 色同時撮像カメラ SIRIUS を用いて、2011 年 8 月に GJ1214b の 3 色(JHKs バンド)同時トランジット測光観測を行った。近赤外線 3 色同時のトランジット測光観測は世界で初めて行われたものであり、このように同時に多波長で観測を行うことには、主星自身の光度変化(黒点などの影響)によって見かけのトランジットの深さが毎回変化してしまうという現象に影響されないという利点がある。

本講演では 2011 年 8 月の観測結果と、先行研究による観測結果および今年度我々が行った新しい観測の結果も踏まえて、これまでの観測から得られた GJ1214b の惑星大気組成とそこから推測される惑星の形成過程への考察について発表する。

## 月の海の玄武岩組成の時空間変化

○加藤 伸祐<sup>1</sup>, 諸田 智克<sup>2</sup>, 大嶽 久志<sup>3</sup>, 大竹 真紀子<sup>4</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学理学部, <sup>2</sup>名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>3</sup>JAXA/JSPEC, <sup>4</sup>JAXA/ISAS

月のマグマオーシャンの固化過程や、その後にマントルオーバーターンの様な大規模な構造変化が実際に起こったのかについては、未だに解明されていない。それを解決するための手がかりとして表面の玄武岩の組成は有用である。年代ごとの玄武岩の組成を調べることで、マントル組成の鉛直分布に関する情報が得られる可能性があり、それは月マントルの形成と進化過程を探る上で重要である。本研究では、マントル組成の三次元的分布に制約を与えるため、海ごとに玄武岩のチタン含有量と年代との関係を調べた。

玄武岩のチタン含有量の測定には、月周回衛星「かぐや」マルチバンドイメージャの 415nm、750nm 反射率データから Lucey 法 (Lucey et al. 2000) によって得られたチタン含有量マップ (Otake et al. 2012) を用いた。また、玄武岩の年代はクレータ年代を用いた (e.g., Hiesinger et al. 2000; 2003; Haruyama et al. 2009; Morota et al. 2011)。

図 1 は玄武岩のチタン含有量と噴出年代の関係を示す。全球的な傾向としては、チタン含有量と年代との間には明確な相関関係は見られない。しかし、Procellarum と Imbrium のように若い噴出が起こっている領域において、30~15 億年の玄武岩にチタン含有量の増加傾向が見られた。

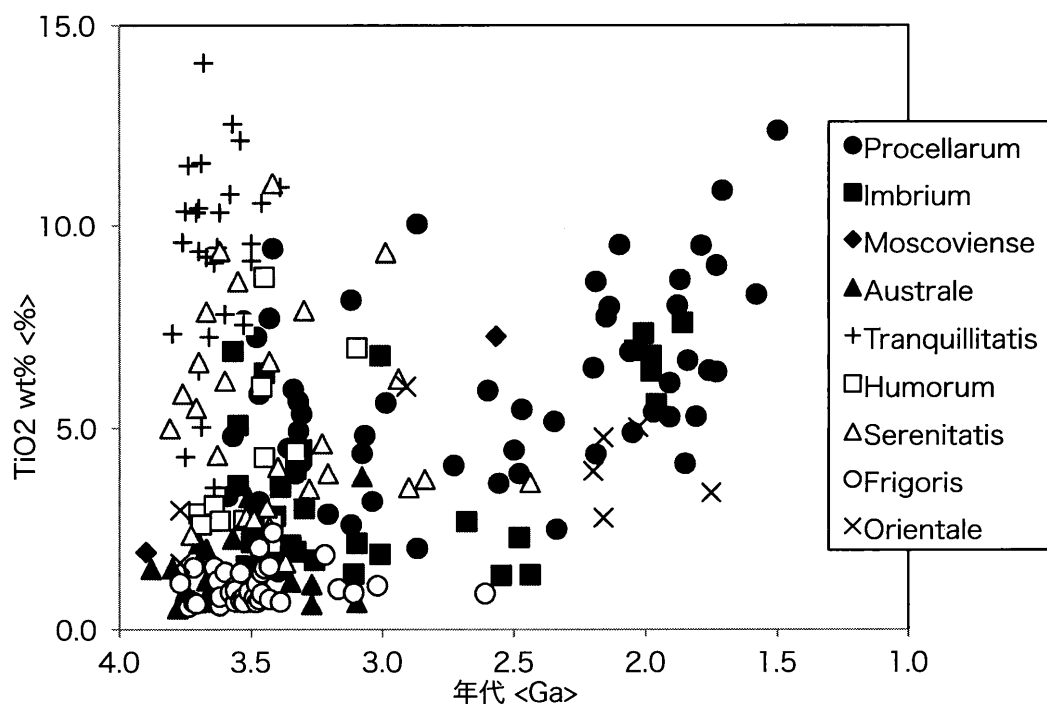


図 1 玄武岩の年代とチタン含有量の関係

## SELENE による衝突クレーターの観測に基づいた 月玄武岩層の誘電率と空隙率の推定

○石山謙<sup>1</sup>, 熊本篤志<sup>1</sup>, 小野高幸<sup>1</sup>, 山口靖<sup>2</sup>, 春山純一<sup>3</sup>, 大竹真紀子<sup>3</sup>,  
加藤雄人<sup>1</sup>, 寺田直樹<sup>1</sup>, 押上祥子<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東北大学, <sup>2</sup>名古屋大学, <sup>3</sup>ISAS/JAXA, <sup>4</sup>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。かぐや衛星搭載月レーダーサウンダーは複数の海領域において地下エコーを検出し、地下数百 m において地下構造を同定した[e.g., Ono *et al.*, 2009]。しかしながら、月レーダーサウンダーで直接観測される見かけの深さは、媒質中の電磁波の伝搬速度に依存するため、これらの観測から玄武岩質溶岩の堆積量を見積もろうとした場合、媒質の誘電率を特定する必要がある。また、誘電率は媒質の組成・空隙率にも依存して変化する物理量であるため、月表層の地質構造を議論するための手がかりともなりうる。そこで、本研究では、月玄武岩層の誘電率の推定方法の開発およびその評価を行った。

玄武岩層の誘電率推定は、衝突クレーターを利用した方法であり、4 つの過程からなる。最初に、マルチバンドイメージャで作成された FeO と TiO<sub>2</sub> のマップデータを使用し、クレーター周辺のイジェクタ組成から、2 種類のクレーター（底面が異なる組成の地下層に到達したもの・到達していないもの）を同定する。2 番目に、これらのクレーターを用いてある地下境界の深さを決めるため、地形カメラデータからそれらのクレーターの深さを決定する。3 番目に、月レーダーサウンダーデータから、クレーター周辺で、地下エコーの見かけの深さを決定する。この研究では、地下エコーは 2 種類のクレーターの深さで決めた地下境界で反射されたものと仮定する。最後に、地下エコーとクレーターで決めた地下境界の深さの比から誘電率を計算する。

推定された誘電率値は、湿りの海の Unit 85[Hackwill *et al.*, 2006]で 3.3–6.0、晴れの海の Unit S13[Hiesinger *et al.*, 2000]で 1.8–6.3 であった。さらに、本研究では月の玄武岩層の地質状態を調査するため、推定された誘電率を基に空隙率を推定した。結果として、14%以上の空隙率をもった多孔質な玄武岩層が推定された。この空隙率は、ラージスケールの空隙構造や細い溶岩チューブ、埋まったレゴリス層によるものと考えられる、同様の空隙率は、月震データに基づく地下構造の解析からも示唆されている [e.g., Cooper and Kovach, 1974]。本研究で開発した方法は、他の惑星や衛星での将来のレーダーサウンダー観測に応用できるものと考えられる

## 月面swirl地域の分光解析と特徴量マップの作成

～月探査機かぐや/SPスペクトルから鉱物情報を抽出・可視化した  
新しいデータの作成に向けて～

○小川佳子<sup>1</sup>, 春山純一<sup>2</sup>, 松永恒雄<sup>3</sup>, 中村良介<sup>4</sup>, 廣井孝弘<sup>5</sup>, 横田康弘<sup>3</sup>, 山本聡<sup>3</sup>

大竹真紀子<sup>2</sup>, 寺藺淳也<sup>1</sup>, 林祐樹<sup>1</sup>, 佐々木晶<sup>6</sup>

<sup>1</sup>会津大CAIST/ARC-Space <sup>2</sup>ISAS/JAXA <sup>3</sup>国立環境研究所 <sup>4</sup>産総研 <sup>5</sup>ブラウン大 <sup>6</sup>国立天文台

月探査衛星かぐや(SELENE)に搭載されたスペクトルプロファイラ(SP)は可視・近赤外域(500-2600 nm)で月面の連続分光観測を行った。高い波長分解能(6-8 nm)とSN比(～2300)から、月表面に分布する鉱物組成や宇宙風化に関する情報を得ることが可能となった。本講演ではSPのスペクトルデータとさらに同じく月探査衛星かぐや(SELENE)に搭載されたマルチバンドイメージャ(MI)の分光画像データを用いて、swirlと呼ばれるアルベド構造/磁気異常について調べた結果を報告する。また、解析結果とあわせて、月面における可視-近赤外分光特徴量を抽出・可視化した新しいデータの作成とマップ化に向けた取り組みも紹介する。

月面“swirl”とは、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のことを指す。これまで月面で10個あまりのswirl構造が観測されている。これらのswirlは、渦のスケールや具体的な形は実に様々で、分布域もばらばらであり、規則性は見られていない。しかし、いずれも比較的強い磁気異常を示すことが共通して観測されている。この奇妙なswirl構造の成因については、彗星起源、隕石swarm衝突、あるいは巨大ベイスン形成に伴うmagnetic shielding等、諸説あるが、いずれも観測される特徴をまだ十分統一的に説明できておらず、謎とされてきた。特に、月面裏側のswirlについては、かぐや以前において、分光データがほとんど得られておらず、アルベドコントラストの実体は何なのか、わからないままであった。本研究では、SPの連続分光データとMIのバンド画像を用いて、アルベドの違いが風化度の違いを示すのか、組成差を示すのか、に制約を与えることを目指す。

解析領域は、Reier Gamma, Mare Ingenii, Gerasimovich, Mare Marginisの4つのswirl地域を対象とした。海と高地の対比を見るため、海と高地からそれぞれ2つのswirl地域を選択し、裏側と表側からそれぞれ2つという対応になっている。

それぞれのswirl地域について、まず、MI同時観測画像を参照しながらアルベドの異なる区分：うねったような明るいアルベド部分、それに挟まれた暗い線状部分(ダークレイン)およびバックグラウンドを同定した。その後、各区域におけるSPスペクトルを比較した。750nm反射率の変化とスペクトルの赤化度の変化の関係から、アルベドコントラストと風化度の相関性を評価することが可能となる。さらに、各区域におけるSPデータにModified Gaussian Model(MGM)を適用し、スペクトルに見られる吸収帯の中心波長、半値幅、深度を算出した。このMGMの解析結果を用いて、アルベド変化量と鉱物組成の相関性を定量的に評価することができる。また、MGM解析の出力データを月面画像上に可視化し、1次的な鉱物分布指標マップの作成も試みた。

抽出した可視-近赤外分光特徴量の可視化マップを、750nm反射率月面画像上に投影することにより、swirlのアルベドコントラスト、と、風化度あるいは鉱物組成との相関性の傾向を各swirl地域で面的に捉えた上で、地域性の差異も含め、swirlの成因について議論したい。

## かぐや LRS データに基づく 月表側の火成活動の再解釈

○押上 祥子<sup>1</sup>, 渡辺 志穂<sup>2</sup>, 山口 靖<sup>2</sup>, 山路 敦<sup>3</sup>, 小林 敬生<sup>4</sup>,  
熊本 篤志<sup>5</sup>, 小野 高幸<sup>5</sup>

<sup>1</sup>国立天文台, <sup>2</sup>名古屋大学, <sup>3</sup>京都大学, <sup>4</sup>韓国地質資源研究院, <sup>5</sup>東北大学

月の海の玄武岩相の体積や年代を明らかにすることは、海の火成活動の特徴、さらには月の熱史に制約を与える上で非常に重要である。しかしながら、各玄武岩相の体積、すなわち、一連の噴火活動で流出した総溶岩量を直接見積もった研究例はこれまでにない。月探査衛星「かぐや」に搭載された月レーダサウンダ（LRS）は、表側の海において、水平方向に広域に分布する地下反射面を検出した[Ono et al., 2009]。これらの地下反射面は、誘電率の不連続面の存在を示しており[Ono and Oya, 2000]、推定される深さは最大でも数百 m である[Oshigami et al., 2009]。また、これらの地下反射面は FeO 含有量の異なる玄武岩相境界に一致する可能性が高い[Oshigami et al., 2012]。したがって、LRS データから地下反射面の分布を詳細に解析することで、個々の玄武岩相を形成した玄武岩溶岩の総量を見積もることができると考えられる。

我々は、SAR 処理を施した LRS データ[Kobayashi et al., 2012]を用い、表側の海の 27 億年から 38 億年の年代の岩相について、その厚さを見積もった。さらに、地下反射面分布と表面岩相年代図[Hiesinger et al., 2000; 2003; 2010; Kodama and Yamaguchi, 2003; Morota et al., 2011]とを比較することによって、各玄武岩相の体積や、その時間的、空間的变化について議論することができる。推定される玄武岩相の厚さは数十 m から数百 m で、年代との相関が見られる。アポロ 11 号、12 号、15 号サイトにおける個々の溶岩流の厚さは 10 m に満たないと推定されている[Brett, 1975]。したがって、一つの岩相を形成する一連の火成活動において、数回から十数回の溶岩流出が起こっていたことになる。また、推定される玄武岩相の体積は、1,000 km<sup>3</sup> から 10,000 km<sup>3</sup> のオーダーであり、各々の海において、時間の経過に伴う明らかな減少傾向が見られる。この体積範囲は、月の sinuous rilles 形成に対する熱浸食モデルの数値計算から得られる溶岩流出量の推定値[Hulme, 1973]と一致している。また、地球の始生代におけるコマチアイト噴出量の見積もりとも一致する[Williams et al., 2001]。このことから、今回検討した年代（27-38 億年）における月の表側のマグマ溜まりのスケールは、同時代の地球のマグマ溜まりのスケールに匹敵することが示唆される。

## かぐやによる 5MHz での月表面アルベドの全球マッピング

### Global mapping of the lunar surface albedo at 5 MHz by Kaguya

○熊本篤志<sup>1</sup>, 中川広務<sup>1</sup>, 小野高幸<sup>1</sup>, 小林敬生<sup>2</sup>, 春山純一<sup>3</sup>

○A. Kumamoto<sup>1</sup>, H. Nakagawa<sup>1</sup>, T. Ono<sup>1</sup>, T. Kobayashi<sup>2</sup>, J. Haruyama<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 韓国地質資源研究院, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,

<sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

Global distribution of the lunar surface albedo in at 5 MHz has been investigate based on the data obtained by Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the Kaguya (SELENE) spacecraft. It is well known that the surface echo power depends mainly on the surface roughness, and secondarily on the permittivity of the surface. We therefore compared the obtained global distribution of the surface echo power with the global distribution of the surface roughness, which was derived from digital terrain model (DTM) based on Kaguya Terrain Camera (TC) observation. From the comparison, we could identify the enhanced regions of 5MHz albedo in western part of Mare Imbrium, and the eastern part of Oceanus Procellarum, which are however not due to the differences of the surface roughness and the permittivity.

かぐや衛星に搭載された月レーダサウンダ(LRS)のデータを用いて、5MHz での月表面アルベドの全球分布を調べた。月面からのエコー強度は、主に表面のラフネスに、次いで誘電率に依存することが知られている。我々は、得られた表面エコー強度の全球分布を、表面ラフネスの全球分布と比較した。表面ラフネスは、かぐや地形カメラ (TC) データに基づく数値地形モデルより導出した。これらと比較した結果、雨の海西部・嵐の大洋東部の領域では、5MHz のアルベドが他の海領域に比べ 5dB 程度増大しているのに対し、表面ラフネスには顕著な差異が見られないことが明らかとなった。このことは、この領域のアルベドの増大が表面ラフネス以外の要因によるものであることを示唆している。分光イメージャの観測から、この領域にはイルメナイトが多く存在していることが明らかにされている。しかしながら、イルメナイトの存在量をもとに誘電率を求め、フレネル反射率を導出したところ、その差異は 5dB には及ばなかった。表面ラフネス・誘電率以外で、アルベドに差異を生じうるメカニズムとして、月表面のレゴリス層上端・下端で生じる反射波の干渉が考えられる。この場合、レゴリス層の厚さが薄いほど上端と下端の反射波の位相が一致して反射波同士が強め合う。アルベドの増大は、その領域の年代が若く、レゴリス層の堆積期間が短いことによるものである可能性がある。

## 月の速中性子分布と平均原子質量数分布

○晴山 慎<sup>1</sup>, 藤林 ゆかり<sup>2</sup>, 唐牛 譲<sup>1</sup>, 小林 進悟<sup>3</sup>, 山下 直之<sup>4</sup>, Robert C. Reedy<sup>4</sup>,  
Olivier Gasnault<sup>5</sup>, 長谷部 信行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>早稲田大学, <sup>3</sup>放射線医学総合研究所,

<sup>4</sup>Planetary Science Institute, <sup>5</sup>Universite' de Toulouse/CNRS

月の核ガンマ線分光観測は、月面上の元素組成を明らかにすることができる[例えば 1]。月面から放出される核ガンマ線は、銀河宇宙線が月面で作り出した中性子が月物質中の原子核を衝突によって励起させることで生成され、核ガンマ線強度は中性子強度に依存する。したがって、月の核ガンマ線分光では、月からの中性子を同時に観測することが重要である。また、その中性子強度は、月面物質の原子の平均質量数を反映することが知られている[2]。

月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計 (KGRS) は、月面の元素組成を明らかにするため月の核ガンマ線を観測した。KGRS は高純度 Ge 検出器を使用しており、ガンマ線だけでなく中性子も同時に検出が可能である。そこで、本研究では高純度 Ge 検出器を用いた速中性子解析法を開発し、月の速中性子分布を導出することを目的とした。

速中性子の測定は、観測されるガンマ線エネルギースペクトル上の、“Sawtooth” と呼ばれる通常とは異なる三角ピークを解析することによって行った。このピークは、速中性子と検出器中の Ge 核が衝突することによって生成され、Ge 核の励起準位に依存して、いくつかのピークを出現させる。これらのピークを解析して、月面からの速中性子の時間変動と月面分布を求めた。

速中性子の時間変動は、宇宙線の時間変動とよく一致していること、ピーク強度比が速中性子の衝突断面積比とほぼ一致していることから、開発した方法が正しいことが示された。得られた月面分布は、過去の中性子観測の結果[3]とほぼ一致しているが、詳細な違いが見いだされた。また、アポロサンプル[4]および比較的組成が一定と考えられている裏側高地起源と推定される隕石[5]をグランドトゥルースとして原子質量数分布を推定した結果、過去の結果より平均原子質量数がわずかではあるが小さいことが明らかになった。

本報告では、速中性子分布の推定法、得られた速中性子の月面分布および速中性子分布から推定される平均原子質量数分布について報告する。

[1] T.H. Prettyman et al., J. Geophys. Res., 111 (2006) E12007..

[2] O. Gasnault et al., Geophys. Res. Lett., 28 (2001) 3797.

[3] S. Maurice et al., J. GeoPhys. Res., 105 (2000) E20365.

[4] P. Lucey et al., “New View of the Moon” ed. J. J. Rosso (2006) 83.,

[5] H. Takeda et al., Earth. Planet. Sci. Lett., 247 (2006) 171.



## 次期月探査計画SELENE-2の検討状況(3)

### Current status of the Lunar Landing Mission : SELENE-2(3)

○田中 智<sup>1</sup>, 三谷 烈史<sup>1</sup>, 大嶽 久志<sup>1</sup>, 小川 和律<sup>1</sup>, 小林 直樹<sup>1</sup>, 飯島 祐一<sup>1</sup>, 橋本 樹明<sup>1</sup>,  
星野 健<sup>1</sup>, 大槻 真嗣<sup>1</sup>, 木村 淳<sup>2</sup>

○Satoshi Tanaka<sup>1</sup>, Takefumi Mitani<sup>1</sup>, Hisashi Otake<sup>1</sup>, Kazunori Ogawa<sup>1</sup>, Naoki Kobayashi<sup>1</sup>, Yuichi Iijima<sup>1</sup>,  
Tatsuaki Hashimoto<sup>1</sup>, Takeshi Hoshino<sup>1</sup>, Masatsugu Otsuki<sup>1</sup>, Jun Kimura<sup>2</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>2</sup>

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

1, ISAS/JAXA, 2, CPS/Hokkaido University

月周回衛星「かぐや」プロジェクト続く月探査計画として、JAXAでは月惑星への着陸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。2010年代半ばの打ち上げを目指すべく2007年にプリプロジェクト(フェーズA)がスタートした。本講演では2011年度秋季講演会以降の主な進捗状況について報告する。

2011年度の最大の目標はシステム要求審査(SRR)およびシステム定義審査(SDR)を実施し、2012年度にプロジェクト化する意向で準備を進めていたが、プロジェクト化予算の目処がつかないなどの理由で実施は見送られた。現在、2012年度内の実施にむけた準備を進めている。

プリプロジェクト活動としてはプロジェクト化後のリスク低減のためにローバ走行系の試作試験、着陸脚試作試験、電源の耐環境性など重要な要素技術の先行開発を進めた。搭載機器については機器候補の開発課題を整理し、優先度を決定した。その中で特に優先すべき先行技術として分光カメラCCD、岩石研磨装置の月環境への適用性検討および月震計試作などを選定して開発を支援した。搭載機器候補についてはSRR実施前までに絞り込みを確定し、システム要求に反映させる。

一方、実現可能なプロジェクト提案を行うために、コスト低減策を検討した。国際協力を推進し、システムの一部を外部負担にすることでの低減化だけでなく、打ち上げロケットやシステム構成の変更(例えば周回機をなくす)も含んでいる。これらの変更案の中にはサイエンスシナリオにも大きな影響を及ぼす可能性もあり、慎重な検討を要する。

2011年から開始された着陸地点検討WGの検討結果は本講演会中の佐伯らによる詳細な発表を参照されたいが、5地点程度にまで絞り込みまで実施される予定である。選定された着陸地点については着陸可能性などシステムレベルでも詳細に検討を実施しシステム要求に反映させる予定である。

## SELENE-2 月探査ローバ搭載用 LIBS の設計・開発

○亀田真吾<sup>1</sup> 石橋高<sup>2</sup> 小林正規<sup>2</sup> 並木則行<sup>2</sup> 荒井朋子<sup>2</sup> 坂本進<sup>1</sup> 奥村裕<sup>1</sup> 前田憲吾<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 立教大学 <sup>2</sup> 千葉工業大学

現在、我々は SELENE-2 月探査ローバ搭載用の表面組成分析器としてレーザ誘起絶縁破壊分光器 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, 以下 LIBS) の開発を進めている。LIBS は測定対象となる岩石表面で高エネルギーのパルスレーザを集光させ表面の一部をプラズマ化し、脱励起に伴う発光を分光測定し、岩石に含まれる元素組成を測定する装置である。

2012 年 8 月に火星に着陸した Mars Curiosity は初めて LIBS を搭載した探査ローバであり、既に火星の岩石の測定に成功している。現時点では組成自体は明らかではないが、公開された分光スペクトルを見ると、鉄、マグネシウム、ケイ素、アルミニウム、カルシウム、チタン、ナトリウム、酸素、ケイ素、アルミニウム、カリウムといった主要元素が検出されたことは明らかであり、それらに加え、水素、炭素も検出された。このように複数種の元素量の測定できる事に加え、測定対象から数 m ほど離れた地点から、数分程度と短時間で測定できる事も LIBS の利点である。

我々は SELENE-2 月探査ローバへの搭載に向けた LIBS の設計を進めてきた。本計画では、パルスレーザの製造を ChemCam 用のレーザを担当したフランスが担当し、分光器を ExoMars 搭載用のラマン分光器を開発中のスペインが担当し、その他の部分と機器全体の設計を日本が担当する予定である。日本が開発を担当する部位の中で特に新規開発が必要となるのは、レーザ照射用・プラズマ分光用の光学系である。昨年度までは ChemCam と同様に 2 つの光学系を共通化した反射光学系を採用していたが、Mars Curiosity に比べ小型な SELENE-2 ローバに搭載するためには、設計を大きく変更し重量を削減しなければならないことが明らかになった。そのため、ローバへの取り付け位置をマストの回転ジンバル上から本体側面に変更し地面に近づける事でレーザの集光効率を上げその分光学系を小口径化した。また、測定対象周辺を撮像するために、視野を広げにくい反射光学系から屈折光学系に変更した。取り付け位置を回転ジンバルから本体側面に変更すると、測定対象となる岩石に光学系を向ける事が難しくなるため、LIBS 内に最小限の駆動部を搭載する必要があるが、これらを加えても総重量は減らす事ができ、最新の設計結果では SELENE-2 への搭載の可能性が充分にある重量となっている。

本発表では、最新の設計結果と LIBS による岩石表面の元素組成測定方法を紹介する。

## SELENE-2 に向けた その場元素分析のための ガンマ線・中性子分光計の開発状況 (2)

○ 三谷 烈史<sup>1</sup>、小林 進悟<sup>2</sup>、唐牛 譲<sup>1</sup>、荒井 朋子<sup>3</sup>、武田 弘<sup>3</sup>、長谷部 信行<sup>4</sup>、GNS チーム

1: 宇宙航空研究開発機構 2: 放射線医学総合研究所 3: 千葉工業大学 4: 早稲田大学

月の起源と進化を理解するためには月表層の物質組成は有用な情報であり、さらに月深部物質の情報が得られると月の三次元的な物質分布を推定することにつながり、月起源に関わる月バルク組成や月初期進化を解明する上で重要なマグマオーシャンとその後の月火山活動のメカニズムに対して制約を与えることができる。月周回衛星 *Kaguya* 搭載のガンマ線分光計 (GRS) による遠隔探査では、月探査史上最高の精度で月全球の表層元素分布データを取得した (e.g. Hasebe et al 2008、Kobayashi et al 2010、Yamashita et al 2010)。しかし、周回軌道からの観測では空間分解能に限界があり、様々な解析手法を駆使したとしても 40km 程度の空間分解能でしか元素定量ができない。今後、月深部物質の情報を獲得するためには、月深部が露出していると考えられている特徴的な地点 (クレータ中央丘、南極エイトケン盆地、溶岩流上) に着陸し、表面のレゴリスや岩石を調査し、周回軌道からの観測では実現不可能な空間スケールでの元素定量を行なうことが重要である。

そこで我々は、月着陸実証を中心とした次期月探査計画 SELENE-2 に搭載するために、ガンマ線・中性子分光計 (GNS) の開発を進めている。GNS では、月進化過程で特徴的な挙動をする自然放射性元素 K, Th の量を測定し、表側に広がる Th に富む領域 Procellarum KREEP Terrain (PKT) 地域の形成過程や月の火山活動、バルク組成に対して重要な制約を与えることができると考えている。月を構成する主要元素についても、銀河宇宙線を励起源として利用することにより能動的な励起源を使用しなくても計測でき、岩石の同定ができる。一方、月面から放射される中性子強度は月の鉄やチタン量に大きく依存することが知られている。中性子では、ガンマ線のように個々の元素を同定することはできないが、ガンマ線に比べて検出感度が高いために中性子線束の変化を計測しやすく、バルクレゴリスで深さ約 1 m 程度を構成するものが玄武岩質の岩石か斜長岩質な岩石なのかが同定できる。さらに、ガンマ線強度は、中性子強度と深く関連することからガンマ線計測の精度を向上できる。また、GNS の特徴の 1 つとしてサンプルの切断・研磨の必要が無い点は、計測そのものが容易でリスクが低い点で特徴的である。そのため 将来のサンプルリターン時のその場における岩石サンプルの分析・判定に有用であり、SELENE-2 GNS はその技術検証という意味も持つ。

GNS は表面移動探査機 (ローバ) に搭載し常に測定モードを保つことを想定している。ローバで移動しながら着陸点周辺のレゴリスを数メートルの空間分解能で計測し、元素組成を決める。検出器には、ガンマ線センサとして LaBr<sub>3</sub> 結晶、熱・熱外中性子検出器として中性子コンバータと Si 半導体、を用いることを検討している。LaBr<sub>3</sub> 検出器は、*Kaguya*-GRS で使用した Ge 半導体検出器には及ばないものの、Apollo、Lunar Prospector、Chang'E-1 に搭載されたガンマ線分光計よりも優れたエネルギー分解能を有し、元素弁別能力や最小検出感度が高い。さらに LaBr<sub>3</sub> は、Ge 検出器よりも小型軽量・低消費電力で温度・放射線・振動環境に対する強い耐性という点で優れている。我々は、月面の厳しい温度環境下において元素の定量精度を得られることを実証するために、できる限り衛星搭載に近い状態を模擬し、温度試験を進めている。

本発表では、サイエンス目標、目標感度について整理し、こうした検出器の開発状況、技術的な実現性の見通しについて報告する。特に、機器の検討の最新状況として、LaBr<sub>3</sub> 結晶と光電子増倍管の組み合わせで -30°C から 100 °C で実施した試験結果を報告する。また、GNS 取得データが最大限に活用される着陸地点として、SELENE-2 着陸候補地点検討の中で、PKT 内にある直径 90km 程度のコペルニクスクレータと月最初期の斜長岩地殻の元素組成計測を目指した Zuccius クレータ近傍が挙げられている。この地域で GNS 取得データにより展開できるサイエンスについて紹介する。

## SELENE-2 月広帯域地震計の開発状況

○小林直樹<sup>1</sup>, 白石浩章<sup>1</sup>, 小川和律<sup>1</sup>, 山田竜平<sup>2</sup>, 飯島祐一<sup>1</sup>, Tanguy Nebut<sup>3</sup>, Sebastien de Raucourt<sup>3</sup>, Marco Bierwirth<sup>4</sup>, Roll Reinhard<sup>4</sup>, Philippe Lognonne<sup>3</sup>, 鹿熊英昭<sup>5</sup>, セ

レーネ 2 月広帯域地震計チーム

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>RISE/NAOJ, <sup>3</sup>IPGP, <sup>4</sup>MPS, <sup>5</sup>中央大学

SELENE2 ミッションは我が国初の月着陸探査である。着陸機に搭載する科学観測機の有力な候補として我々は広帯域地震計を提案している。本発表では日仏独瑞の4カ国協力が開発が進められている SELENE-2 の開発状況を報告すると共に、特に 2012 年 7 月にドイツの Black Forest Observatory (BFO) での短周期計、長周期計およびレベリングシステムの噛み合わせ試験の結果について報告する。

SELENE-2 月広帯域地震計 (LBBS) は主に 5 つの要素から構成されている。センサー部は短周期地震計 (日) と長周期地震計 (仏) からなる。前者は Lunar-A 計画で、後者は欧州の ExoMars 計画において開発が進められてきたものである。それに、レベリング装置 (独)、集録や制御関係の電子回路 (瑞) と月面の極端な温度環境に耐えるためのサバイバルモジュール (日) からなる。他にも、電源や通信機能を備え、それ自体独立した月面地震観測システムを目指している。

このように各要素は既存の探査計画で開発が進められて来たものであり、新規開発部分を極力減らしており、2010 年代半ばの打上げを目指した SELENE-2 計画での搭載が現実的なシステムである。しかし、月震の規模は大変小さく ScS の長周期成分の期待される信号レベルも  $3 \times 10^{-11}$  m/s 程度と大変厳しいものである。現在、長周期センサーのノイズレベルを下げるため、変位検出のためのコンデンサーの極板面の改良など低ノイズ化対策を行なっている。短周期センサーも月面での熱環境に耐えるために、Lunar-A では衝撃耐性能を上げるために用いた接着材を使用しない熱構造モデルを製作している。レベリングシステムは月震の震源関数の解明のために、構造体の共鳴振動が 200 Hz 以上という高い剛性と斜度 20 度でも動作可能なシステムとして開発を進めている。こうした各要素自体の改善もさることながら、微小信号の検出のためにはセンサー間やセンサーとレベリングシステム間での相互干渉も要求レベル以下に抑えておく必要がある。

2011 年には制御回路、集録電子装置とのインターフェース試験を行なったが、今回は SP, LP センサーとレベリングシステムを組み合わせた要素間の干渉やインターフェースについて調査した。センサーをレベリングシステムに搭載し、中立出しをした後、地動の並行観測を行った。月震計センサー以外に比較のため STS-2 の記録も得ている。現在これらのデータを解析しており、本講演においてその結果を報告する。

## 惑星探査機搭載に向けた LIBS の開発

○坂本進<sup>1</sup>・奥村祐<sup>1</sup>・前田憲吾<sup>1</sup>・亀田真吾<sup>1</sup>

石橋高<sup>2</sup>・並木則行<sup>2</sup>・荒井朋子<sup>2</sup>・小林正規<sup>2</sup>

1:立教大学 2:千葉工業大学 惑星探査研究センター

LIBS は、高出力パルスレーザーを測定対象に照射し、プラズマを発生させ、プラズマ光を分光分析することで測定対象の元素組成を測定する一連の装置である。我々が開発を進めているのは月・惑星探査機搭載用 LIBS であり、惑星表面に存在する岩石の元素組成を測定する。惑星探査機搭載用 LIBS の例として、2012 年 8 月に火星に到着した NASA の火星探査機 MarsCuriosity の ChemCam が挙げられる。ChemCam は LIBS が惑星探査に使用された最初の例であり、火星の岩石の元素組成の測定に成功した。

惑星探査機搭載用 LIBS の利点として次のような点が挙げられる。

- ・惑星表面に存在する岩石の元素組成が短時間で判別できる。
- ・惑星探査機から離れた岩石に対しても元素組成の測定が可能である。

LIBS を惑星探査機に搭載することにより、探査する惑星の鉱物分布を、より効率的に測定できる。

惑星探査機搭載用 LIBS は軽量であることが求められる。また惑星における測定では、惑星表面を移動し LIBS で様々な岩石の元素組成を測定することが想定されており、LIBS と岩石の間の距離は変化することが想定される。プラズマを発生させるためには高出力パルスレーザーを岩石表面に集光させる必要があり、高出力パルスレーザーの集光点を調整できる機能が求められる。また通信の制約上、手動で集光点を合わせていくのは時間を多く必要とするので、自律的に集光点を調整していく機能も求められる。

現在 JAXA が開発中の移動探査ロボット Micro6 の走行試験が 2012 年 10 月の伊豆大島で予定されており、ここで我々は LIBS の運用模擬試験を実施する予定である。この試験に向けて開発した惑星探査機搭載用 LIBS 試作機について紹介する。

## 木星系探査ミッション JUICE と日本の貢献

Exploration of Jupiter System by ESA-JUICE and Japanese Contribution

○佐々木晶<sup>1</sup>, 藤本正樹<sup>2</sup>, 国際共同木星総合探査ワーキンググループ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所

欧州宇宙機構 (ESA) の木星系探査ミッション JUICE が今年 5 月に選定された。エウロパ、カリストのフライバイ観測、木星観測の後、ガニメデ周回観測を行う。ガニメデは、太陽系最大の衛星で、氷を主成分とする天体でありながら自励磁場を保有する。中心部には溶融した金属コアがあり、さらには氷マントルの中に地下海が存在すると考えられている。太陽系外惑星で存在が議論されている氷惑星のモデルとしても、重要な存在である。

当初は、ヨーロッパと日本のコミュニティから立ち上がった国際共同計画 LAPLACE にはじまり、アメリカが加わり EJSM という形を経て、探査計画の議論を続けてきた。アメリカはエウロパ周回機、日本は磁気圏探査機を提供する計画であったが、いずれも実現にいたらず、ESA のガニメデ周回機が、エウロパフライバイ、高緯度観測のシナリオを加える形で、プロジェクトとして承認された。ESA 側の機器開発候補グループからの誘いがあり、2012 年 8 月現在で、モデルペイロードの 7 つの機器に開発を一部担当する形での参加が検討されている。この背景には、日欧が密接に協力を続けてきた、水星探査 BepiColombo があり、今回の共同開発グループは何らかの形で、BepiColombo の機器開発から継続している。

さらに新たな機器の提案、モデルペイロード以外の提案機器への参加、機器開発を伴わないサイエンス Co-I 参加を含めた形で、ISAS/JAXA が開発資金支援を含めた主導的な枠組を作り、日本チームとして、Galileo、JUNO に続く、木星系探査計画に参加する予定である。

### 開発参加予定機器

レーザ高度計

サブミリ波サウンダー

紫外分光撮像

低エネルギー粒子計測

高エネルギー粒子計測

中性粒子計測

電波・電磁波動・電子密度温度計測

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

○早川 基<sup>1</sup>； 前島 弘則<sup>1</sup>； BepiColombo MMO プロジェクトチーム

<sup>1</sup> 宇宙研・宇宙機構

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であった。過去の探査は、本年3月に米国 MESSENGER が周回軌道に入るまでは、同衛星の3回(2008-2009)、米国マリナー10 号による3回のフライバイ観測(1974-5)のみであった。これらの探査は、この小さな惑星にはあり得ないと考えられていた磁場と磁気圏活動の予想外の発見をもたらしたが、その究明は 30 年以上続く夢に留まってきた。耐熱技術の進展に代表される技術革新が、ようやく大きな壁を取り除きつつある。「ベピ・コロombo(BepiColombo)」は、欧州宇宙機関(以下、ESA)との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査＝「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらす。また、磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核など水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。

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

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004 年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、日本側は昨年 3 月よりサブシステムレベルでの詳細設計審査(CDR)を開始しシステムの詳細設計審査が本年 6 月に行われたところである。ESA 側の予備設計審査は平成 21 年 10 月末に終了し、2013 年 1 月に予定されている詳細設計審査にむけて準備を進めている。JAXA の開発する MMO は昨年末に FM の 1 次噛み合せ試験が終了し、現在は単体各機器の環境試験および最終のキャリブレーションを実施中である。また、MMO 構造モデルを ESA/ESTEC に輸送し、スタックレベル(MCS:Mercury Cruise System)の機械環境試験に参加している。MMO の構造モデルを使用した試験は 9 月に終了する予定である。MMO 単体の総合試験は今年末より開始する予定である。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する「BepiColombo 科学ワーキングチーム」(年1回程度開催)で立案・実施される。本講演では、これから科学観測に関連した状況及び、日本側が製作を担当する MMO について最新状況を報告する。

## MGS 電波掩蔽観測データを用いた火星大気 CO<sub>2</sub> の過飽和現象に関する研究

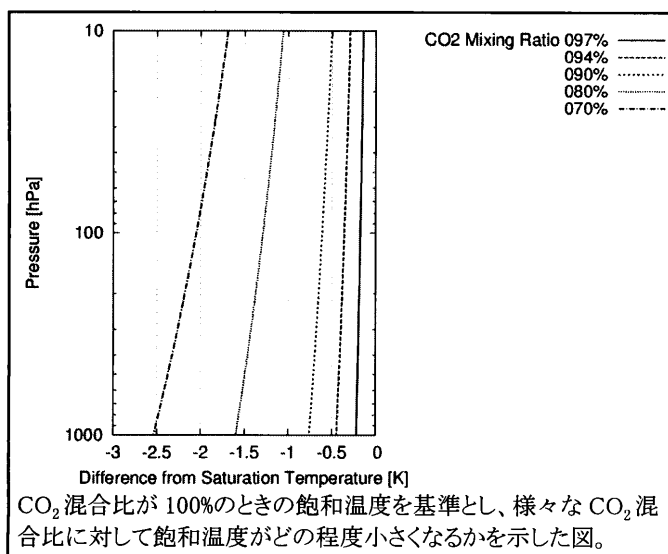
CO<sub>2</sub> supersaturation observed in the Martian atmosphere with the MGS radio occultation measurements

○野口克行（奈良女子大学）

火星大気の主成分は、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) である。地上観測や探査機観測によって、火星では CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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。火星大気を模した実験では、水 (H<sub>2</sub>O) 氷核への CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 過飽和発生の条件や、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。

本研究では、気温と気圧の高度分布を精度よく測ることが可能である電波掩蔽観測に着目し、米国が 1997 年に打ち上げた Mars Global Surveyor (MGS) の気温の高度分布データを詳細に解析した。その結果、過飽和度が 34% を超えるような高過飽和イベントが極夜の下層大気（高度約 35km 以下）で発生していることがわかった。このような高過飽和イベントは、北半球よりも南半球で多く観測されており、北半球では過飽和イベント全体数の 3% がそのような高過飽和イベントであったのに対し、南半球では 12% に達していた。

過去の観測において、南半球の冬の極域ではアルゴン (Ar) の混合比が 6% 程度まで上昇することが知られている。前述の解析においては、電波掩蔽観測で得られる全圧を CO<sub>2</sub> の分



圧と仮定していたが、もし Ar が含まれているとすると CO<sub>2</sub> の分圧は全圧よりも小さいことになり、実際の CO<sub>2</sub> の飽和温度もより低いことになる。そこで、Ar の影響を見積もって見たところ、Ar 混合比が 6% (CO<sub>2</sub> が 94%) のときの飽和温度と CO<sub>2</sub> 混合比 100% の飽和温度の差は、0.5K よりも小さかった。この程度の温度差では、南半球での高過飽和イベント数の優位性は変わらないことが明らかにになった。



# オールト雲起源新彗星の力学進化

Dynamical evolution of the new Oort Cloud 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. The eventual purpose of these integrations is to calculate the collision probabilities of the Oort Cloud comets with each of planets, and compare the values with those of the main belt and the near-Earth asteroids.

本発表ではオールト雲の理論的な形成モデルを元にして、オールト雲から落下する新彗星の力学進化を計算する。現時点までに以下の結果が得られつつある。(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 万年の桁に留まり、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する。(2) 新彗星の軌道傾斜角が小さな太陽系初期段階ではいわゆる惑星バリアが有効に働く。

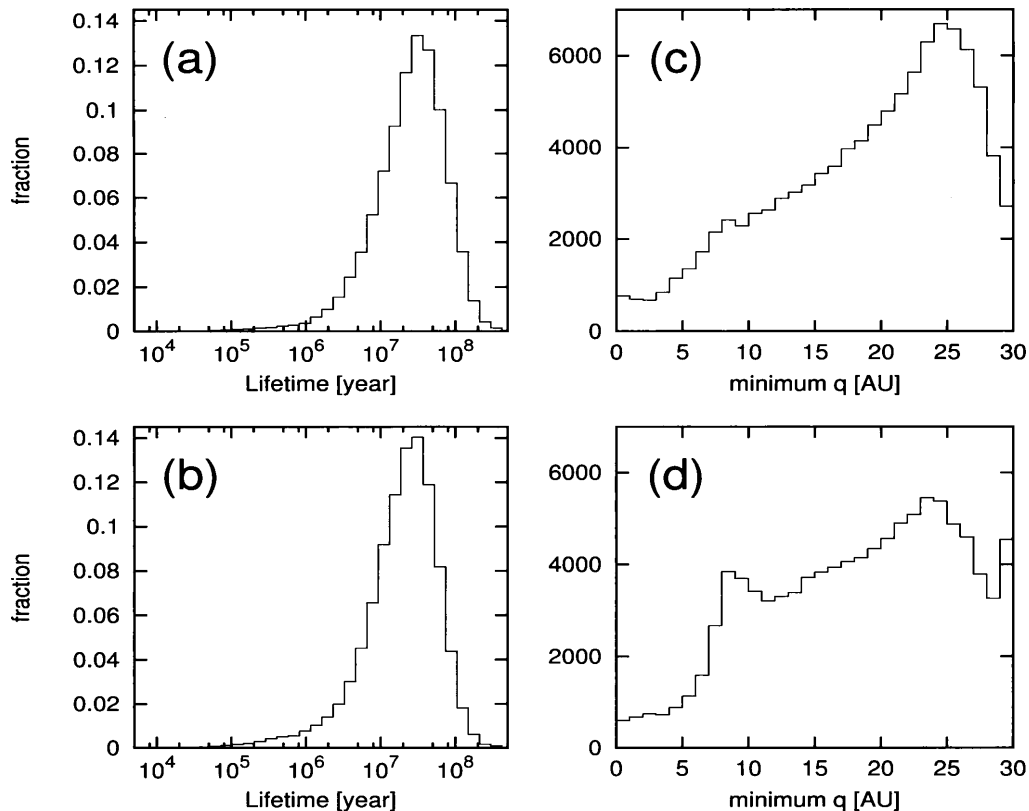


図 1: (a) と (b) はオールト雲起源新彗星の力学的寿命。(c) と (d) は新彗星が示した最小の近日点距離。(a) と (c) は太陽系形成から 40 億年を経過した時点のもの、(b) と (d) は太陽系形成初期から 10 億年のもの。(d) に於いては土星-木星によるバリアが見て取れる。

# 「はやぶさ 2」 中間赤外カメラ (TIR) の科学観測

○岡田達明<sup>1</sup>, 福原哲哉<sup>2</sup>, 田中智<sup>1</sup>, 田口真<sup>3</sup>, 中村良介<sup>4</sup>, 今村剛<sup>1</sup>, 関口朋彦<sup>5</sup>, 長谷川直<sup>1</sup>, 小川佳子<sup>6</sup>, 北里宏平<sup>6</sup>, 松永恒雄<sup>7</sup>, 和田武彦<sup>1</sup>, 荒井武彦<sup>8</sup>, 滝田隼<sup>9,1</sup>, 坂谷尚哉<sup>10,1</sup>  
はやぶさ 2・TIR チーム<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>北大, <sup>3</sup>立教大, <sup>4</sup>産総研, <sup>5</sup>北教大, <sup>6</sup>会津大, <sup>7</sup>国環研, <sup>8</sup>NAOJ, <sup>9</sup>東大, <sup>10</sup>総研大

小惑星探査機「はやぶさ 2」に搭載する中間赤外カメラ (TIR) は小惑星表面からの熱赤外放射を 2 次元撮像する観測装置である。金星探査機「あかつき」搭載の中間赤外カメラ (LIR) と同設計であり、小型軽量かつ短期開発を実現する。8~12 ミクロンの波長帯、320 × 240 画素の非冷却 2 次元ボロメータアレイにより、視野 12° × 16°、解像度 0.877mrad (高度 10km から 10m 解像度) で熱撮像する。TIR は現在フライトモデルの製作・試験中であり、2013 年度からの噛合せ試験に供する予定である。単体評価試験では小惑星昼側温度に相当する 250~400°C の範囲での温度較正を行う準備も進めている。2014 年打上、2018 年に小惑星到着後に 1 年以上にわたって小惑星の観測を行う。

対象天体 1999JU3 は C 型の近地球型小惑星である。表面温度は表層の熱伝導率(k)、比熱(ρC)から決まる熱慣性 (kpC)<sup>0.5</sup> や自転速度に依存する。小惑星の自転に伴う温度変化のプロファイルから、各地域から熱慣性を調べ、さらに熱放射量を予測できる。一般に細粒の砂上だと熱慣性は MKS 単位系で 100 以下、砂利 (1cm) だと 200~400、高空隙の石だと 1000~2000、空隙の少ない岩だと 2000 以上となる。

「はやぶさ 2」の主目的は C 型小惑星からのサンプルリターンであり、リモセン機器の主任務はサンプル採取の地点選定、運用条件の提供、サンプル採取地点の産状把握である。TIR は地点選定に必須な表層状態 (レゴリス、砂利、岩)、探査機の安全な降下運用に必須な熱環境、サンプル採取地点付近の熱物性についての遠隔探査で貢献する。

TIR の科学観測としては表層物理状態の把握がある。C 型小惑星の平均密度は一般に S 型小惑星よりも低い (Britt et al., 2006) が、岩塊どうしの隙間が多い構造なのか、岩塊自体が高空隙なのかは分かっていない。イトカワ表面に見られるような巨大岩塊や、巨大クレータ内に露出する構造の熱物性から空隙率情報を得る。イトカワにみられる平原は微小重力下での堆積過程で形成されたが、その堆積の状態を熱観測により推定する。クレータ堆積物や、小型インパクト SCI の衝突実験において、クレータ検出やイジェクタ堆積調査に活用する。軌道・自転変化を引き起こす Yarkovsky 効果や YORP 効果、地形観測 (夜側含む) や衛星探索、ダストクラウド調査など TIR の特性を活かした観測を行う。他の観測機器やランダ、サンプル分析結果とも合わせて、小惑星探査を通じて太陽系初期進化の解明に挑む。

### 小惑星 1999JU3 の熱慣性に対する TIR の観測精度と天体表層状態の推定について

○滝田 隼<sup>1,2</sup>、田中 智<sup>2</sup>、岡田 達明<sup>2</sup>、坂谷 尚哉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東大・理 <sup>2</sup>ISAS/JAXA <sup>3</sup>総研大

はやぶさ2計画では熱赤外撮像装置を用いて対象天体である小惑星 1999JU3 の表面温度観測が実施される。本研究は、この中間赤外カメラの温度分解能を基に推定した観測運用の結果期待される熱慣性の精度を見積もることを目標とし、数値計算を実施した。

今回の検討では小惑星の持つ軌道6要素と自転軸の向きを考慮して天体の表面温度の計算を実施した。自転および公転を同時に考慮し1公転分の表面温度を基本的なデータとして時系列に算出したが、このときに 1999JU3 が持つ自転軸の向きとして、地上観測をもとに推定された中で代表的な2ケース(黄経、黄緯=( $73^{\circ}$ ,  $-62^{\circ}$ ), ( $331^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ))を採用した。計算スキームに関して、今回は対象天体の詳細な形状モデルは採用せず、球体を仮定した場合の天体表面上の1点に入射する太陽光強度を境界条件の1つとする非定常1次元熱伝導方程式を解くことで表面温度を計算し、上記目標に対する観測精度を推定した。熱媒体の物性に関しては、深さ方向に一様な熱慣性値を持つ1層モデルを想定した。

上記数値モデルで計算した温度差から熱慣性を推定した場合、自転軸の傾斜(黄緯)が大きい場合は観測時期の違いで推定できる熱慣性の精度が大きく変わってくるが、観測時期を適切に選定すれば10~20%程度で決定できるとの結果を得た。地上観測でなされている表面熱慣性の決定精度は高くても50%程度であることから地上観測との比較の点においても有用なデータ取得が期待される。小惑星表層に存在する岩塊やレゴリスの物理的状態の違いを反映する表面熱慣性値について有意な差を確定するためには、取得データ点数と観測機器が持つ推定精度についての詳細な検討が必要である。現時点で計画されている撮像サンプリングレートとこれに対する表面熱慣性の観測精度に関して、数値計算を基に推定し、期待できる観測精度をさらに高くできると考えられ、その成果については講演会にて発表する予定である。

はやぶさ2では衝突装置によって、人工クレータを生成する実験が計画されている。この衝突で発生したイジェクタの観測可能性について2層構造モデルを仮定して検討した結果、厚さ1mm程度の薄い層が表面を覆った場合でも熱慣性が数%異なることで十分に観測可能である結果を得た。イジェクタの飛散状況を精密に観測可能にするだけでなく、人工クレータの大きさが小さい場合にその周辺に薄いイジェクタが広く散乱した場合には遠距離からの観測でも衝突痕を容易に探索できる可能性が高いことがわかった。

はやぶさ 2 サンプラー開発の現状と  
リターンサンプルの科学

○橘 省吾<sup>1</sup>・澤田 弘崇<sup>2</sup>・岡崎 隆司<sup>3</sup>・はやぶさ 2 サンプリングチーム

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻 <sup>2</sup>JAXA <sup>3</sup>九州大学理学府地球惑星科学専攻

「はやぶさ 2」計画では、C 型小惑星 1999JU3 のリモートセンシング観測、表面リターンサンプルの地上分析から、1) 微惑星から小惑星に至るまでの熱変成とそれに伴う物質進化の紐解き、2) 衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き、3) 小惑星での鉱物・水・有機物相互作用による有機物複雑進化過程の探索、4) 原始太陽系円盤内での高温物質から揮発性物質までの物質混合・循環の解明 をめざす。回収試料分析では、これらの 4 つの目標の下に、銀河・分子雲、初期太陽系円盤、微惑星、メインベルト小惑星、近地球型小惑星といった進化ステージごとの物質進化を追うことをめざしたいと考えている。銀河物質や初期太陽系円盤物質を保存しつつ、かつ、母天体での変成・変質作用、軌道変化による表面変質などさまざまな物質進化過程を経た物質が混在していることが予想される近地球 C 型小惑星からのリターンサンプルだからこそ実現可能なサイエンスの展開をめざす。本講演では、各ステージでの物質進化プロセスとそれを抽出するための分析、プロジェクト科学目標との関連、ならびにそれを実現するためのサンプラーの開発・汚染管理項目の現状について、報告する。

| 銀河・分子雲                                                                                                                                                                                           | 円盤                                                                                                                                                                                                                                                          | 微惑星 (母天体)                                                                                                                                                                                                                                                                                           | メインベルト小惑星                                                                                                                                                                                 | 近地球型小惑星                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 恒星内元素合成<br>質量放出風ダスト形成<br>銀河化学進化 (年代)<br>*プレソーラー粒子<br><br>分子雲有機物低温進化<br>*分子雲有機物 D, <sup>15</sup> N濃集,<br>構造<br><br>*IDPレベルの存在度やIDPレベルの多様性が<br>あれば、情報量・質が飛躍的に上がる可能性<br>(コンドライトのサンプリングバイアスの<br>可視化) | 円盤内高温プロセス・年代<br>CAI, コンドリュール, メタル,<br>酸素同位体, Pb-Pb年代, Al-Mg<br>年代<br>↓<br>母天体形成以前のプロセス+母<br>天体形成年代への制約<br><br>母天体形成範囲・プロセス<br>円盤内物質循環<br>バルク化学組成, 酸素同位体,<br>金属元素同位体, 構成物組織<br>(コンドリュール, CAI)<br><br>円盤有機物進化<br>*円盤有機物<br>*特微的構造・組成・同位体<br>*母天体の新学術領域での利用の一例 | 水質変成・年代・条件<br>含水鉱物・組織<br>Mn-Cr年代, 酸素同位体,<br>元素組成<br>プレソーラー粒子・分子雲有機<br>物残存率<br><br>熱変成・年代・条件<br>鉱物共存種, 組織, 温度<br>Al-Mg年代, Pb-Pb年代<br>プレソーラー粒子・分子雲有機<br>物残存率<br><br>衝撃変成<br>溶融脈, 高圧鉱物<br>I-Xe年代 (脈 or バルク)<br>有機物IOM<br>角礫岩化組織<br><br>有機物多様化<br>含水鉱物・Lee相関<br>バルク組成, 官能基存在度<br>カルボン酸・アミノ酸<br>CHON 同位体 | 衝撃変成<br>溶融脈, 高圧鉱物<br>K-Ar年代 (脈)<br>有機物IOM<br><br>ラブラバイル形成年代 (制約)<br>* <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> Ne などGCR生成核種<br>*母天体からの試料などが高圧帯に閉じ込<br>められていることが予想されるサンプル<br><br>回収試料バルク密度<br>小惑星内部構造 | 宇宙風化・年代 (宇宙環境との相<br>互作用)<br>鉱物表面宇宙風化層<br>粒子表面構造・組織<br>太陽風希ガス<br><br>小惑星表面地質活動<br>複数表面試料の宇宙風化度<br>SCIイジェクタサンプルの宇宙風<br>化度, 宇宙線生成各種量・比・<br>年代<br>粒子形状<br><br>近地球型小惑星表面熱変成<br>回収試料変成度 (鉱物, IOM, 揮発<br>性有機物)<br>・宇宙風化度・年代・SCR, GCR<br>・回収場所 (赤道/極, レゴリ<br>ス/岩盤, 表面/SCIイジェクタ)<br><br>NEA年代<br>・SCR生成核種 ( <sup>10</sup> Be, <sup>26</sup> Al, <sup>36</sup> Cl,<br><sup>41</sup> Ca, <sup>53</sup> Mn, <sup>81</sup> Kr) 相対存在度<br>*0.1, >3Myr 程度<br><br>微粒子浮遊・剥離 (宇宙環境との<br>相互作用)<br>宇宙風化年代, GCR年代<br><br>宇宙環境 新鉱物 |
| 母天体サイズ・母天体プロセス (水・熱・衝突)・年代円盤内物質進化 (移動, 微惑星形成)・年代<br>上記項目に関する回収試料内/採取地点内のバリエーション<br><br>物質進化過程の普遍性・特殊性<br>OSIRIS-REx 回収試料・リモセン観測との比較, 隕石・IDPとの比較                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## はやぶさ 2 SCI（小型搭載型衝突装置）で目指す 衝突の科学

○荒川政彦<sup>1</sup>，門野敏彦<sup>2</sup>，高木靖彦<sup>3</sup>，和田浩二<sup>4</sup>，平田成<sup>5</sup>，小林正規<sup>4</sup>，本田理恵<sup>6</sup>，  
白井慶<sup>7</sup>，早川雅彦<sup>7</sup>，岡本千里<sup>7</sup>，小川 和律<sup>7</sup>，矢野創<sup>7</sup>，中澤 暁<sup>7</sup>，飯島祐一<sup>7</sup>，  
佐伯孝尚<sup>7</sup>，今村裕志<sup>7</sup>，澤田弘崇<sup>7</sup>

<sup>1</sup>神戸大学，<sup>2</sup>産業医科大学，<sup>3</sup>東邦大学，<sup>4</sup>千葉工業大学，<sup>5</sup>会津大学，<sup>6</sup>高知大学，  
<sup>7</sup>宇宙航空研究開発機構

はやぶさ 2 には小惑星表面に人工クレーターを形成し，深さ 1m までの試料採取を可能にするために小型衝突装置（SCI）が搭載されている．この SCI が小惑星表面に衝突する際に発生するイジェクタは，分離カメラ（DCAM）により撮影される予定である．我々は，DCAM の取得映像から，衝突点，イジェクタの形状，そしてその進行速度を調べる予定である．さらに衝突後のクレーターを観測してその形状を決定することにより，クレータースケール則に対する微小重力の影響や小惑星の表層物質の物性を明らかにしていく予定である．

SCIは質量2kgの球殻状弾丸（銅製）を速度2km/sで小惑星1999JU3に向かって打ち出す．この衝突によって作られるクレーターサイズや形状は，小惑星の表面物性によって大きく変化する．特に，表面構成物のサイズ，空隙率（表層の空隙率と構成物質の空隙率），物質強度（表層の強度と構成物質の強度）などは，クレーター形状に影響を与える重要な物性である（表1）．これらの中で構成物のサイズはリモセンにより決定可能であるが，衝突点のローカルな空隙率や物質強度はリモセンから決定することは難しく，SCIを用いた衝突実験を通して明らかにしていく．一方，良く知られているように既存のクレータースケール則を用いると，クレーターサイズやエジェクタの速度分布に対する重力依存性や物質強度依存性を再現することができる．そこで，SCI衝突実験の第一の目標は既存のスケール則を小惑星上の衝突実験で検証・拡張することである．そのためにDCAMにより観測されるイジェクタの放出角度や速度分布，それにONC（可視カメラ）やTIR（中間赤外カメラ）により観測されるクレーター形状やイジェクタ堆積物の広がり的情報を総合してSCIクレーターの形成モデルを構築し，スケール則の検証と拡張を行う．このモデルの物理的解釈を行うために空隙率や物質強度を変化させた室内実験，さらにその室内実験の結果を元にして1999JU3を仮定したクレーター形成の数値シミュレーションを行う．その計算結果とSCIクレーターの形成モデルを比較してはじめて小惑星表面の物性や構造を推測することが可能となる．今後，SCIクレーターの形成モデルを構築するための具体的な手法を確立し，モデルの物理的解釈を行うための室内実験や数値シミュレーションを表1に掲げる表面地形に関して系統的に行っていく必要がある．

| 分類              | 細分類（Φ：空隙率）   | 対応スケール則               |
|-----------------|--------------|-----------------------|
| 一枚岩<br>>1.5m    | 高強度層         | 強度                    |
|                 | 弱強度層         | 強度+重力                 |
| 粒子層<br>1mm-1.5m | ガレ場15cm-1.5m | 強度                    |
|                 | 小石場5cm-15cm  | 重力                    |
|                 | 砂場 1mm-5cm   | 重力                    |
| 粉体層<br><1mm     | Φ=40-45%     | 重力+強度                 |
|                 | Φ=45-70%     | 重力+強度                 |
|                 | Φ>70%        | 強度+重力 <sup>天井崩落</sup> |

表1 表面地形の分類

## はやぶさ 2 ONC の較正試験準備状況と現状

立教大学大学院理学研究科

武井亮斗 亀田真吾 鈴木秀彦 佐藤允基

はやぶさ 2 ONC チーム

はやぶさは S 型小惑星イトカワからサンプルリターンを成功させた。その技術を元に、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 型小惑星の違いの一つは熱変成度である。C 型小惑星は熱変成が進んでおらず、含水鉱物や有機物を多く含んでいる可能性がある。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サンプルリターンを目指す。

はやぶさ 2 には ONC-W1、ONC-W2、ONC-T の 3 つの CCD カメラが搭載されている。ONC-T は 7 つのバンドパスフィルター(390nm、480nm、550nm、589.5nm、700nm、860nm、960nm)と 1 枚のガラスのフィルターからなるフィルタホイールがついている。ONC-T により分光測定を行うことでタッチダウンする場所を選定する。

選定は含水鉱物の存在を示す 700nm の吸収特性の有無を見て行う。1999JU3 の地上観測結果から表面に含水鉱物の存在が示唆されるものの、小惑星の表面全域には含水鉱物が分布していないと考えられる。含水鉱物のサンプルリターンが困難な場合は、熱変性の進んでいない場所を探すために紫外観測を行う。適切な着地点を決定するためには ONC-T で事前の観測が必要である。従って、打ち上げ前の ONC の較正試験が重要である。

我々は 2012 年 10 月からフライトモデルで較正試験を行う。その際に使用する積分球の較正を同年 8 月に筑波宇宙センターで行う。

8 月の較正試験に向けて行った準備

- ・筑波宇宙センターにある積分球は、レーザーの様な単色光を入射する事で微視的な輝度ムラが確認できた。そのため光を一様に散乱させ輝度ムラの発生を抑えられる材料を用いて積分球を作成した。これにより CCD の感度の不均一性を求める事ができる。
- ・搭載されるバンドパスフィルターと同じ波長域での 1999JU3 の輝度を計算した。これにより 8 月に行う較正試験で用いる積分球の輝度を決定した。

本講演では 10 月から始めるはやぶさ 2 ONC フライトモデルの較正試験の内容と、その途中経過を発表する。また 8 月の筑波宇宙センターの積分球の微視的な輝度ムラの較正方法も合わせて発表する。

# 小惑星の PSF 測光:はやぶさ 2 探査対象天体 1999JU3 のライトカーブの再評価

○松浦 隆裕<sup>1</sup>、北里 宏平<sup>1</sup>、黒田 大介<sup>2</sup>、関口 朋彦<sup>3</sup>、安部 正真<sup>4</sup>

<sup>1</sup>会津大学、<sup>2</sup>国立天文台、<sup>3</sup>北海道教育大学、<sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構

小惑星探査ミッション「はやぶさ」の後継ミッションとして「はやぶさ 2」が計画されている。「はやぶさ 2」は 2014 年に打ち上げが予定されており、対象天体は C 型の地球近傍小惑星 1999JU3 である。「はやぶさ」と同じくサンプルリターンを主な目的としている。サンプルリターンミッションのような小惑星表面に接地して探査を行うタイプのミッションでは、運用計画を作成する上で天体の自転軸の向きや形状などの物理特性情報が重要である。それらの物理特性は地上望遠鏡を用いた測光観測から小惑星の光度の時間変化（ライトカーブ）を測ることによって推定することができる。1999JU3 の自転軸と形状はこれまでに[1]や[2]によって求められているが、両者の結果には差異がある。それはライトカーブの振幅が小さく測光誤差が大きく影響していることが原因として考えられる。そこで本研究では、PSF (Point Spread Function) 測光の手法を用いて測光誤差を低減することを試みた。PSF 測光は画像中の複数の星のプロファイルから PSF モデルを作成し、対象天体のフラックスにスケーリングして測光を行うものである。過去研究など、従来用いられているアパーチャ測光に対して、PSF 測光は周囲の星のフラックスによるコンタミネーションの影響を受けにくい特徴があり、暗い星に対してより高精度の測光ができると期待される。本発表では、[1]の観測データと追観測のデータをもとに PSF 測光を用いて 1999JU3 のライトカーブを再評価した結果について示す。

### 参考文献

[1] 川上恭子 他, 2010, 遊星人, 19, 1.

[2] Mueller, T.G. et al., 2011, Astron. & Astrophys., 525, A145.

## はやぶさ帰還粒子の国際公募研究への配布状況と 今後の計画

安部正真<sup>1,2</sup>、<sup>○</sup>矢田達<sup>2,1</sup>、岡田達明<sup>1,2</sup>、上相真之<sup>2</sup>、唐牛譲<sup>2</sup>、石橋之宏<sup>2</sup>、八亀彰吾<sup>3</sup>、  
向井利典<sup>4</sup>、藤本正樹<sup>1</sup>、藤村彰夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構月惑星探査プログラムグループ、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究所、<sup>3</sup>東京大学大学院理学系研究科、<sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構

小惑星探査機はやぶさが 2010 年 6 月の再突入カプセルを地球に帰還させて以来、JAXA 惑星物質試料受入れ設備ではカプセル内のサンプルキャッチャーからの粒子の回収を継続的に実施している[1-3]。

キャッチャーからの粒子の回収方法として最も効率的なのが、キャッチャーに石英ガラス製の円盤を取り付けて、キャッチャーに振動を与えて粒子を石英円盤に落とし、その石英円盤から静電制御マニピュレーターを用いて一粒ずつ粒子をピックアップする、というもので、この方法で回収・記載された粒子の数はキャッチャーA 室、B 室から併せて 2012 年 8 月現在で約 350 個に達している。

キャッチャーから回収された粒子は FESEM-EDS による定性元素分析の結果から 4 つのカテゴリーに分類されている。このうちカテゴリー1と2は主にケイ酸塩鉱物からなっており(1と2の違いは不透明鉱物を含むか否か)、先行研究により小惑星イトカワ起源と確認されている[4-9]。その他、主に炭素からなる粒子はカテゴリー3に、アルミの破片など人工物と考えられる粒子はカテゴリー4に分類されている。現在のところ、カテゴリー1、2の粒子は約 300 個に上っており、そのうち 60 個強が昨年11月までに初期分析に、15 個が昨年12月に NASA に配布された。初期分析の科学的成果については[4-9]に詳しい。

今年1月に公募が開始された、第1回ははやぶさ帰還試料国際公募研究について、専門委員会により 6 月に 17 件の研究テーマが採択された。それ以降、JAXA 惑星物質試料受入れ設備では、研究テーマを採択された研究者への試料の配布作業を進めている。配布作業完了後、引き続きキャッチャーからの粒子の回収作業を進め、第 2 回 NASA 試料配分を 2012 年内に予定しており、第 2 回の国際公募研究のアナウンスは来年 1 月、研究テーマ採択・配布開始は来年度初頭を予定している。

参考文献:[1] Fujimura A. et al. 2011. Abstract #1638. 42nd Lunar & Planet. Sci. Conf. [2] Yada T. et al. 2011. Abstract #5386. 74th Annual Meteoritical Society Meeting. [3] Abe M. et al., 2012. Abstract #5251. 75th Annual Meteoritical Society Meeting. [4] Nakamura T. et al. 2011. Science 333: 1113-6. [5] Yurimoto H. et al. 2011. Science 333: 1116-9. [6] Ebihara M. et al. 2011. Science 333: 1119-21. [7] Noguchi T. et al. 2011. Science 333:1121-5. [8] Tsuchiyama A. et al. 2011. Science 333: 1125-8. [9] Nagao K. et al. 2011. Science 333: 1128-31.



## 固体天体内部探査用地中レーダーHGPRの開発状況

○松本岳大<sup>1</sup>, 宮本英昭<sup>1</sup>, 西堀俊幸<sup>2</sup>, 真鍋武嗣<sup>3</sup>, 春山純一<sup>2</sup>, 伊藤琢博<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学総合研究博物館, <sup>2</sup> ISAS/JAXA, <sup>3</sup> 大阪府立大学

将来の固体天体内部探査のための新手法として、私たちは地中レーダー（Ground Penetrating Radar）を用いた探査法の検討を行なっている<sup>[1]</sup>。固体天体の内部構造を知ること、その天体の集積過程や熱進化、さらには表層進化を理解する上で重要であるが、この手法は表層付近の構造を高解像度で明らかにできる利点がある。ここでは開発中のレーダーの概要と進捗状況、性能評価の手法について報告する。

地中レーダーの原理は、地中に向けて電磁波を送信し、電気的性質の異なる物質境界面で反射された反射波を計測することにより地下の情報を得るというものである<sup>[2]</sup>。この技術は地球だけでなく、火星の層状構造<sup>[3]</sup>や極冠の厚さ<sup>[4,5]</sup>の探査にも利用されはじめており、今後の小天体を含めた固体天体探査への応用が期待されている。私たちが現在開発している地中レーダーは、チャープ信号によるパルス圧縮方式を用いている。パルス圧縮とは周波数を広帯域で直線偏移させたチャープ信号を送信し、その受信波と参照波を相互相関処理することで、距離分解能とS/N比を改善させる方式である。開発中のレーダーの各パラメータは、送信電力 1W、送信周波数幅 300MHz~900MHz、パルス幅 330ns、送信繰り返し周期 1 $\mu$ s、パルス圧縮率 200 である。

媒質中の電磁波の伝搬速度は物質の誘電率により決定されるため、地中レーダー探査による有効性を正しく見積もるには、地中を構成する物質の誘電率の範囲を予め理解しておくことが望ましい。そこで私たちは、小惑星を構成する物質の誘電率を明らかにするために、地球のさまざまな岩石に加えて、隕石の誘電率測定をシステムティックに行う予定であり、現在この準備段階として標本の形状効果や粒子サイズなどの影響を誘電率がわかっていない物質を用いて検討を行なっている。

地中レーダーによる探査の評価手法として、マクスウェル方程式を時間と空間について差分的に取り扱う事で直接的に数値計算を行う、いわゆる FDTD 法<sup>[6]</sup>を採用した 3 次元電磁波伝搬シミュレーションを行うこととした。今回は、この手法を用いて地表面や地下境界面の起伏（ラフネス）や地中の不均質性を伴う場合に、多層媒質中の電磁波散乱がどのように生じうるかを解析を行った（図 1、2）。その結果、ラフネスや不均質性はクラッタを生じるが、パルスの減衰にはラフネスが大きな影響を与える事が明らかになった。興味深いことに、ラフネスの与え方によっては、減衰率がラフネスの標準偏差と波長で記述される一般的な理論値とは異なることに気付いた。これは、こうしたラフネスの形状の効果を考慮すると、電波の減衰に関するより詳細な知見が得られることを示唆しており、地中レーダー法を複雑な地質学的条件下において応用する上で、特に可探深度の推定に役立つと考えられる。



図 1 異なる媒質中の電界強度

滑らかな均質な媒質中（左）と粗く不均質な媒質中（右）における電界強度。媒質中と表面・境界面にランダムに散乱体を設置することで、ラフネスと不均質性をモデル化した。上図の比較より、粗く不均質な媒質中では媒質境界面からの反射強度は小さくなり、不要散乱波が生じていることがわかる。

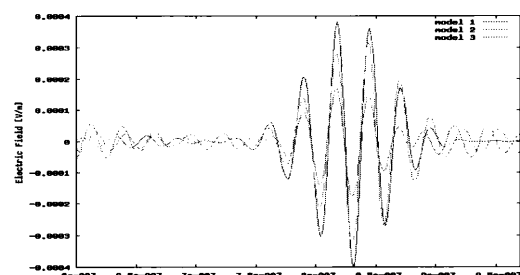


図 2 媒質のラフネス変化に伴う受信波の変化

model 1 (赤線)は滑らかな媒質であり、model 2 (緑線)は表面・境界面にのみ散乱体を設置した媒質である。model 3(青線)では model 2における散乱体の数を2倍にした。このグラフから、ラフネスの増加に伴い電波の減衰が増加することがわかる。

### References

- [1]Miyamoto et al., GRL, 32, L21316, doi:10.1029/2005GL024159, 2005; [2]Daniels, D. J., 1996, IEEE, 8, 165-182; [3]Holt, John W. et al., 2008 science 322, 1235; [4]Picardi, G. et al., 2005, Science 310, 1925; [5]Seu, R. et al., 2007, Science 317, 1715; [6]Yee, K. S., 1966, IEEE, 14, 302-307

### 小天体周りのダストの運動について

#### **Motion of dust grains around asteroids.**

千秋博紀<sup>1</sup>, 木村宏<sup>2</sup>, 山本哲生<sup>3</sup>, 和田浩二<sup>1</sup>, 並木則行<sup>1</sup>,  
小林正規<sup>1</sup>, 松井孝典<sup>1</sup>

H. Senshu<sup>1</sup>, H. Kimura<sup>2</sup>, T. Yamamoto<sup>3</sup>, K. Wada<sup>1</sup>, N. Namiki<sup>1</sup>,  
M. Kobayashi<sup>1</sup>, and T. Matsui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup>惑星科学研究センター (CPS),  
<sup>3</sup>北海道大学低温科学研究所

<sup>1</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology,

<sup>2</sup> Center for Planetary Science (CPS), <sup>3</sup>Institute of Low Temperature  
Sciences, Hokkaido University

大気を持たない天体表面が太陽紫外線の照射を受けると、エネルギーを受け取った電子がはじき出される。これを光電効果と呼ぶ。光電効果によって天体表面は正に帯電する。一方、光電効果によってのはじき出された電子は、電氣的に惑星表面に向かって引かれ、やがて落下する。この間に、正に帯電した天体表面と上空に弾き出された電子との間に、上向きの電場が作られる。この電場の特徴的なスケールは、太陽からの距離にもよるが、およそ数メートルである。

もし天体表面にダストが存在すると、ダストも天体表面と同様に光電効果によって正に帯電する。ダストのサイズが十分に小さければ天体との電氣的な反発が重力に勝り、ダストを上空に跳ね上げる。跳ね上がったダストは、天体上空の薄い電子層の中を運動する。その際ダストの電荷は、光電効果の他、電子層内の電子との衝突や太陽風電子の打ち込みの影響を受けて時間と共に変化する。ダストの電荷が変化すると、天体上空の電場から受ける力も変化するため、ダストは複雑な運動をする。

ダストの運動を予測するには、天体上空の電子の密度分布を正確に求める必要がある。しかし過去の研究で電子の密度分布を求めるために使われていたモデルにはいくつかの間違ひがある事がわかった。そこで本講演では、天体上空の電場を求めるモデルを改良した上で小天体上空のダストの運動を見直し、それが小天体の表層進化にどのような影響を持つのかについて議論を行う。

## 海王星衛星 Nereid の高精度測光観測

○寺居剛<sup>1</sup>, 伊藤洋一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立天文台, <sup>2</sup>兵庫県立大学

海王星の第2衛星 Nereid は、大きな長半径 (0.05 Hill 半径) と高い離心率 (0.75) の軌道を持つため、不規則衛星 (irregular satellite) に分類される。一般的に不規則衛星は日心軌道で公転する外部起源の小天体を惑星が捕獲したものと考えられているが、Nereid については別の説もある。Goldreich et al. (1989) は、Nereid は規則衛星 (regular satellite) と同じく海王星の周惑星円盤内で形成された衛星で、外部から捕獲された第1衛星 Triton からの摂動によって軌道が外側へ移動し、かつ軌道離心率が増大したというモデルを提唱した。

Nereid は比較的明るい衛星 ( $V \sim 19$  等) であるため、過去に多数の測光観測が行われたが、自転による光度曲線の振幅や周期はそれぞれの観測で異なる値が示されている。そのため、潮汐力によってカオス的な自転状態にあるという説 (Dobrovolskis 1995) や、自転軸の歳差運動によって自転状態が長期的に変化する (Schaefer et al. 2008) といった説が提案されている。これらはいずれも周惑星円盤起源モデルを支持する。一方、Grav et al. (2003) は口径 4m の望遠鏡を用いて精密な測光観測を行い、Nereid は周期 11.5 時間で自転しており、不規則な自転状態にある可能性は低いということを示した。このように Nereid は自転状態すら確定しておらず、その起源は未だ特定されていない。

我々はすばる望遠鏡を用いて Nereid の光度変動の高精度測定を実施した。得られた光度曲線は Grav et al. (2003) の結果と良く一致し、Nereid は安定的な自転状態にある可能性が極めて高い。自転速度が速いことから、少なくともカオス的な自転状態であることは否定される。また、Nereid は太陽系外縁天体の直径-自転周期関係や可視光カラー ( $B-V$ ,  $V-R$ ,  $V-I$ ) 分布と良い一致を示す。以上の結果から、Nereid は他の不規則衛星と同じく外部領域で形成され、海王星に捕獲された天体であり、その起源は外縁天体の一部と同一であると示唆される。このことは、一部の外縁天体は内側領域で形成されて外縁部へ運搬された微惑星が起源であるとするモデル (e.g. Gomes 2003) と整合的である。

### 引用文献

- Dobrovolskis, A. R. 1995 *Icarus*, 118, 181  
 Goldreich, P., Murray, N., Longaretti, P. Y., & Banfield, D. 1989, *Science*, 245, 500  
 Gomes, R. S. 2003, *Icarus*, 161, 404  
 Grav, T., Holman, M. J., & Kavelaars, J. J. 2003, *ApJ*, 591, L71  
 Schaefer, B. E., Tourtellotte, S. W., Rabinowitz, D. L., & Schaefer, M. W. 2008, *Icarus*, 196, 225

## 北大 1.6m ピリカ望遠鏡による大学教育用 太陽系天体分光カタログの作成

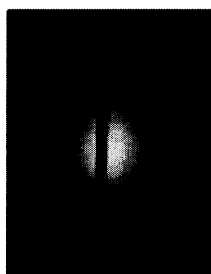
○関口朋彦<sup>1</sup>, 河北秀世<sup>2</sup>, 渡辺誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道教育大学, <sup>2</sup>京都産業大学, <sup>3</sup>北海道大学

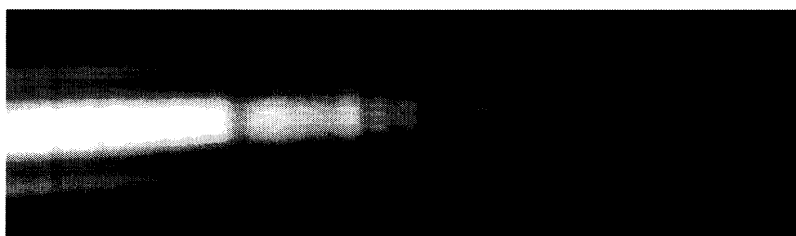
### Spectral Atlas of Solar System Objects using 1.6m Pirka Telescope

なよろ市立天文台に設置された北海道大学附属 1.6m ピリカ望遠鏡は、太陽系天体特に惑星観測を目的として建設され、2010 年度より本格運用に入っている。北海道教育大学では新規に開発した汎用の可視光低分散分光器をピリカ望遠鏡に搭載し観測を行っている。この分光器は反射型回折格子を用いた観測波長:500-900nm、波長分能: $R > 300$  の低分散可視光用である。

昨年度は各スペクトル型を代表する恒星や輝線星雲などの基本的な天文学分光データに加え、太陽系天体では惑星:水星、金星、火星、木星、土星、海王星、彗星:C/2001 P1 Gar-rad、小惑星:15 Eunomia のデータを取得した。これらの分光データを視覚化し、大学教育を目的した分光カタログ・アーカイブの作成を目指している。

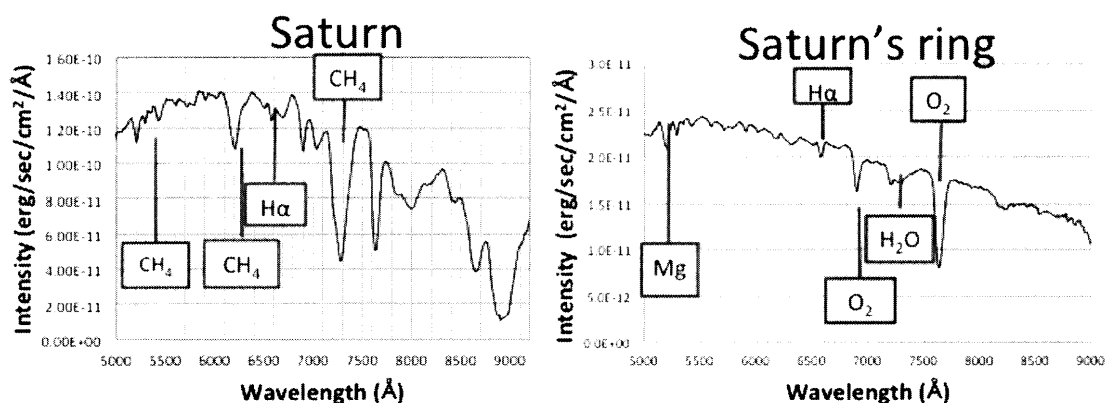


slit-viewer image



spectral image

### Spectral catalogue



## 小天体表面の岩塊の姿勢と砂礫の支持力の関係についての検討

○青木 隆修<sup>1</sup>、中村 昭子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻

探査機「はやぶさ」や「ニア・シューメーカー」により取得された小惑星イトカワやエロスの画像には、小惑星表面に存在する大小さまざまな岩塊や砂礫がとらえられている。岩塊の中には表面に一部貫入しているように見えるものもある。岩塊の貫入深さや堆積状態、岩塊の姿勢などは、小惑星表面の砂礫の粒径、形状と関係があると考えられる。そこで、本研究ではそれらの関係を求める模擬実験を行った。

まず十分大きな容器に小惑星表面の砂礫に見立てたガラスビーズとシリカサンドをそれぞれ満たし、高さ 10cm、直径 1cm、2cm、4cm の 3 種類のアルミ円柱を鉛直にある深さまで埋め込んだ。そして、円柱の上面をゆっくり水平に一定速度で引っ張り、円柱が倒れるときの円柱と粒子表面の間の角度及び円柱が埋まっている深さを計測した。

粒子に埋める深さが大きいほど円柱が倒れにくいことがどの円柱でも明らかだった。さらに、シリカサンドの方が円柱は倒れにくいことがわかった。また、直径 4cm の円柱は他の直径の円柱に比べて倒れる角度が埋まっている深さに影響されにくいこともわかった (Fig. 1)。これとは別に、円柱が倒れない場合に、深さと角度を測定し、安定な深さ・角度範囲を調べた。この結果もあわせて発表する。

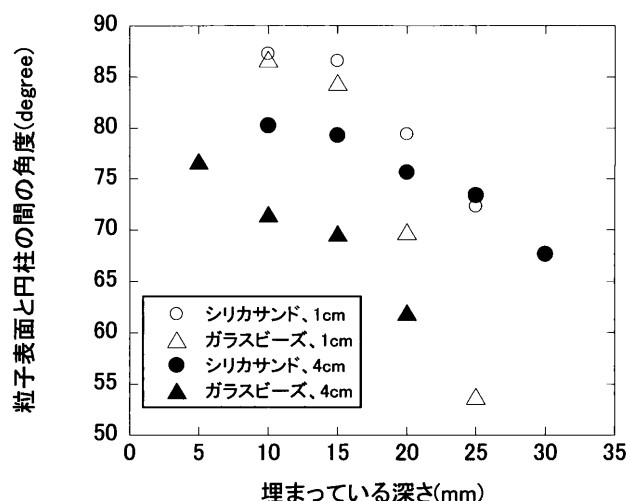


Fig. 1 直径が 1cm と 4cm の円柱の埋まっている深さと円柱が倒れた角度の関係

# レゴリス層への低速度斜め衝突実験

○木内真人<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科

小天体表面のレゴリス層へ外来天体が衝突すると、小天体表面の砂や岩の破片が放出される。その際、放出速度が小天体の脱出速度を超えないものは、再度地表に衝突することで、小天体表面の進化に影響を与える。再集積物の多くは地表に対して斜めに衝突する。また、再集積時の表面への衝突速度は、小天体の直径が数100Kmのものでも、数100m/s以下となる。このような低速度での斜め衝突に関する実験はあまり行われていない。そこで、これらの落下物が低速度で斜め衝突する際に、レゴリス層へどのような影響を与えるのかを調べることにした。

今回我々は、弾丸速度 60m/s で、レゴリス層を模擬したガラスビーズ層への斜め衝突実験を行った。弾丸の衝突角度を変えて、ガラスビーズ層にできる衝突クレーターの大きさや形状の違いを調べた。その結果、クレーター直径やクレーター深さは、衝突角度（水平方向からの角度）に対して線形的に大きくなることがわかった。また、高速度衝突の場合は数度以下の衝突角度の場合以外は、クレーターは円形となることが知られているが(Gault and Wedkind 1978)、本実験では、衝突角度 45° 程度であっても、弾丸の進行方向と垂直方向の直径の比が1にはならず、衝突角度によって変化した。また、高速度カメラを使い、弾丸の衝突後のふるまいを衝突角度ごとに比べた。結果として、一定以上の角度では弾丸は貫入し、小さい衝突角度では跳ね返ることがわかった。跳ね返る場合において、衝突後の弾丸の速度や角度は、衝突角度により様々な違いを見せた。講演では、砂層への斜め衝突実験結果も合わせて報告する。

## 分化天体模擬物質への衝突実験

○岡本千里<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup>名古屋大学

原始太陽系星雲において、固体天体は岩石微惑星の衝突破壊・合体成長により形成されたとされている。地球や火星などの固体惑星の形成や進化過程を知るには、惑星形成過程における微惑星の衝突進化・再集積過程を理解する必要がある。このような天体の衝突現象を理解するため、現在まで、様々な衝突銃を用いた天体模擬試料への室内衝突実験や、惑星衝突の数値シミュレーションが行われている [e. g. 1, 2]。また天体は成長とともに熱進化により内部に層構造を形成するため、天体衝突において、内部構造の及ぼす影響を考慮すべきである。分化天体として小惑星ベスタが挙げられ、現在、探査機ドーンにより詳細な調査が現在行われている。鉄隕石や M 型小惑星の母天体となったと考えられる分化天体の衝突破壊・破片の放出・再集積条件を調べることは、小天体の多様性や、分化天体のように熱進化した小天体の衝突進化を知る上で重要となる。このような分化天体の衝突現象は、主に数値シミュレーションにより研究が進められてきており [3]、系統的な実験はあまり進んでいない。そこで、本研究では、分化天体模擬試料を用いた衝突破壊実験を行い、分化天体模擬物質の内部構造を系統的に変化させて、衝突破壊・再集積条件に対する内部構造の影響を調べ、分化天体の衝突破壊・再集積条件を明らかにした。

分化天体として、小惑星ベスタのような内部まで冷却された天体を想定し、金属コア-岩石マントルからなる 2 層構造球形試料を作成した。ベスタが存在する小惑星帯域では、金属コアは低温脆性により、容易に破壊され金属コアから鉄隕石などを生成する。そこで、金属コアとして脆性の特性を持つ高炭素クロム鋼鉄を使用した。その動的破壊強度を調べたところ、衝突破壊強度は、先行研究により得られた低温下での鉄隕石の動的衝突破壊強度とよい一致を示すことが分かった [4]。またマントルとして、モルタルを使用した。モルタルは、岩石に比較的近い動的衝突破壊強度を示すことが分かっている [5]。試料直径は 25-65mm、内部の金属コアのサイズは 10-30mm、試料重量は 30-330g であった。衝突実験は、JAXA に設置された二段式軽ガス銃を用い、真空下（ $\sim 10$ Pa）で質量 $\sim 0.2$ g の球形のナイロン弾丸を速度 4-7 km/s に加速して行った。その過程はハイスピードカメラを 2 台用いて現象のその場観察を行い、衝突点付近の高速の破片（撮影速度: 1 コマ  $8 \mu s - 32 \mu s$ ）および衝突の反対点付近の低速の破片速度（撮影速度: 1 コマ 50-100  $\mu s$ ）の計測を行った。

分化天体の再集積条件を調べるために、試料の衝突破壊強度・生成する破片の放出速度を調べた。コアマントル試料では、コアとマントルへのエネルギー分配率により、衝突破壊結果が依存することが分かっている。マントルへのエネルギー分配率およびコア質量比から、マントルの破片速度を見積もったところ、マントルに与えられるエネルギー密度のべき乗で与えられることが分かった。一方、金属コアの反対点破片速度は、コア質量比および、コアに分配されるエネルギー密度および、金属球単体の破片速度より、予測することができる。試料破片速度の約 80%は、反対点破片速度の 2 倍以内ということが藤原らの研究から明らかにされている。よって、金属コア・岩石マントルにおける反対点破片速度が天体脱出速度の 2 倍以内ならば、それぞれの破片は母天体に再集積される。結果として、分化天体として知られている小惑星ベスタ（直径 $\sim 500$ km）にその質量の 1000 分の 1 のプロジェクタイトが衝突した場合、小惑星帯における天体衝突速度でも、十分に金属コアが破壊され、鉄隕石が放出できると考えられた。また、このような分化天体は、惑星形成初期に多数存在したため、鉄隕石が形成されたと考えられる。

[1]Fujiwara and Tsukamoto (1980) *Icarus*, 44, 142.153. [2] Asphaug et al. (1998) *Nature*, 393, 437.440. [3]Watts et al. (1991) *Icarus* 93, 159.168. [4]Holsapple et al. (2002) in *Asteroids III* (Univ. of Arizona Press, Tucson), pp. 443.462. [5] Okamoto et al. (2010) *LPSC XLI*, Abstract #2679.

## 等質量氷ダスト球の衝突破壊実験： 破片速度分布の空隙率依存性

○ 瀧生有理<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学 環境学研究科, <sup>2</sup>神戸大学 理学研究科

原始太陽系星雲の fluffy な氷ダストアグリゲイトは衝突速度 50m/s での衝突でも正味の成長が起こり、空隙率 99%以上の氷微惑星へ成長したと言われている[1]。一方、圧密焼結した氷ダストアグリゲイトは弾性的になり付着合体しにくくなるため[2]、空隙率 99%以上の氷微惑星の正味の成長は自己重力による再集積によってしか起こらないと考えられる。そこで本研究では、焼結した非常に高い空隙率を持つ氷微惑星の再集積条件を調べるために等質量氷ダスト球同士の衝突破壊実験を行い、破壊時の破片質量分布と破片速度分布の空隙率・衝突速度依存性を調べた。

実験は北大低温研の大型低温室（室温-10℃）で行った。微細水滴を液体窒素内に噴霧して平均 21μm の氷微粒子を作成した。氷ダスト球は氷微粒子を球形治具に入れ圧縮して作成し、密封袋で-10℃のもと焼結させた。氷ダスト球は直径 3cm、空隙率 45%-80%（質量 2.7-7.5g）とし、焼結時間を 15 分-3 日間とした。標的と弾丸を区別するため、標的は赤インクで着色した氷微粒子を用いて作成した。横撃ちガス銃を用いて弾丸を加速し、大気圧下で衝突速度  $v_i = 7.1-71.4\text{m/s}$  で衝突させた。衝突後の破片は回収袋とエアバッグを用いて回収された。衝突の様子は 2 台の高速度ビデオカメラで撮影し、衝突速度とインパクトパラメータを測定した。衝突後、破片質量分布と破片速度分布を測定した。

衝突実験の結果、衝突速度の増加とともに反発、片方破壊（標的のみカタストロフィックに破壊）、両方破壊が起こることがわかった。片方破壊が起こり始める衝突速度は空隙率 45%で 29m/s、空隙率 70%で 17m/s であり、このときの衝突エネルギー密度  $Q = v_i^2/8$  [J/kg] は弾丸質量／標的質量 $\sim 0.01$  での衝突破壊実験[3]で得られた衝突破壊強度  $Q^*$  と同程度であることがわかった。さらに、各空隙率での破壊された試料の規格化最大破片および破片質量分布と  $Q$  の関係も [3]と概ね調和的であった。重心系における破片速度分布は衝突点の接線方向が最大となり、空隙率 70%の場合は衝突速度の約 1/3 程度であったが、衝突反対点の破片速度は数 m/s となることがわかった。以上の結果から、高空隙率氷微惑星の再集積条件について考察を行った。

[1] Wada, K. et al., 2009. *Astrophysical Journal*, 702(2), pp.1490–1501. [2] Sirono, S., 1999. *Astronomy & Astrophysics*, 347(2), pp.720–723. [3] Shimaki, Y. & Arakawa, M., 2012. *Icarus*, 218(2), pp.737–750.



### 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（東京大学）、玄田英典、（東京大学）、小林浩（名古屋大学）、田中秀和（北海道大学）、阿部豊（東京大学）

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。一言に衝突現象といっても、大量の小破片を宇宙空間にばら撒くような破壊的なものから、天体の一部が削られる程度のものまで多様に存在し、極めて複雑である。したがって、衝突現象をよく理解することは、惑星形成過程、初期進化等において重要である。

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衝突エネルギー値  $Q_D^*$  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。しかし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くないような削られる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、天体スケールにおける様々な衝突エネルギーで衝突の流体シミュレーションを行い、衝突エネルギーに対する破片の総質量を系統的に調べた。まず物質強度が無視できる様な条件において衝突シミュレーションを行った。具体的には、火星質量サイズの天体に対して様々な質量の天体を衝突速度一定で衝突させ、様々な衝突エネルギーに対して飛び散る破片の総質量を求めた。すると、衝突エネルギー値が  $Q_D^*$  より小さい範囲では、破片総質量は衝突エネルギーに対して線形とはならず、無限平面に対する衝突から考えられる予想に反する結果となった。これは、ターゲット天体の曲率が影響しているためと結論付けることができた。

また、火星サイズよりも小さい天体に対しても同じ衝突シミュレーションを行い、その結果を先行研究(例えば、Benz and Asphaug 1999)と比較しつつ、破片総質量と衝突エネルギー値の関係を調べた。さらに、物質強度が影響するような、質量の小さな天体同士の衝突における破片総質量と衝突エネルギー値の関係についても発表する予定である。

## 火星氷河・凍土を模擬した高濃度岩石粒子を含む氷の 静的圧縮強度：強度に対する岩石粒子の粒径の影響

○保井みなみ<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学自然科学系先端融合研究環 <sup>2</sup>神戸大学大学院理学研究科

はじめに：火星表面は様々な粒径の砂塵や岩片で覆われていることが、これまでの探査によってわかっている。そのため、火星の凍土、極冠、中緯度域に見られる氷河地形を構成する氷にも、サイズ分布をもつ砂塵・岩石が含まれる。そのため、火星の氷河地形の形成（流動）過程を調べるには、構成する氷と固体粒子（砂塵、岩片）の混合物のレオロジー（静的圧縮強度、流動則等）が必須である。本研究では、氷・固体粒子混合物の変形実験を行い、静的圧縮強度に対する固体粒子の粒径依存性を系統的に調べた。著者らの先行研究から、岩石濃度が低い場合、粒径依存性が見られないことがわかっているため、今回は岩石濃度の高い氷・固体粒子混合物について調べた。

**実験方法：**試料は直径 1mm 以下の氷粒子と球形ビーズの混合物及び 0℃の水を、容器に少量ずつ交互に入れ固めて作成した。ビーズは直径 0.25μm から 3mm までの 10 種類を用意し、ビーズ質量含有率が 80wt.%の試料を作成した。実験は、北大低温研の低温室に設置された変形試験機を用いて等歪速度一軸圧縮実験を行った。歪速度は  $2.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  から  $2.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、温度は -10℃とした。

**結果：**応力-歪み曲線上の最大応力とビーズ粒径の関係を示したのが、図 1 である。実験の結果、ビーズ粒径によって振舞いが異なることがわかった。粒径が 20 μm 以下の場合、最大応力は純氷よりも大きくなった。これは、氷の変形に起因する転位の移動がビーズによって阻害されるためと推測される。粒径が 1mm 以上の場合、最大応力は純氷よりも小さくなった。これは、ビーズ周りにかかるせん断応力により微小クラックが発生し、ビーズが氷から剥がれ出るためと推測される。粒径が 100~500μm の場合、歪速度に依存せず各ビーズ粒径においてほぼ最大応力が等しくなった。回収試料には主応力軸に対して斜め 45°方向に大きなクラックが確認されるが、応力-歪み曲線は脆性破壊の様子は見られなかった。従って、クラック面がビーズの摩擦によって固着していることが原因と推測される。粒径が 50 μm の場合、歪速度が小さいと塑性変形が起こり、最大応力は純氷の 4 倍となった。一方、歪速度が大きいと脆性破壊を起こし、極端に破壊強度が大きくなり、他のビーズ粒径とは異なる振舞いを見せた。

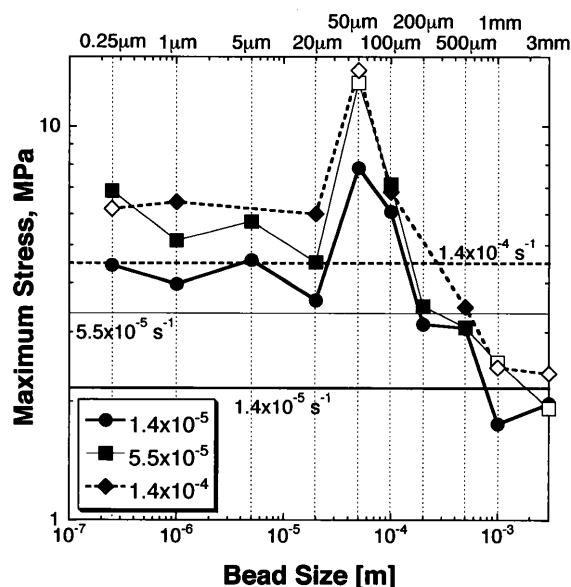


図1 ビーズ粒径と最大応力の関係。白抜きプロットは脆性破壊強度を示す。

## 鉛直加振による液状化と流体輸送の実験的研究： 浅部に低浸透率層がある場合

○安田奈央<sup>1</sup>、隅田育郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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に似た地形が見つかっている。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。そこで私たちは噴砂が起きる条件、その特徴的時間、長さスケールを理解するための室内実験を行った。

本実験では粒径の異なる2種類の球形のガラスビーズと水を封入したケース(図1)に鉛直振動を与えて液状化させる。ケースをよく振って一定時間放置させることでビーズは2層に成層するため、浅部に低浸透率層がある2層構造を仮定することができる。このケースに周波数-振幅の組み合わせを変えた鉛直方向の振動を加える。周波数5-50Hz、振幅0.095-8.8mmの範囲で実験を行った。実験の様子はハイスピードカメラで撮影し、加速度波形はオシロスコープに記録した。その結果、加速度が臨界値を超えると、下層粒子は火炎状の構造を形成した(図1)。また、加速度が大きくなるに従い、特徴的な波長をもつチャンネル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変化していくことが分かった。臨界となる加速度は、 $\sim 2(\Delta\rho/\rho)g$ であった( $\rho$ :ビーズの密度、 $\Delta\rho$ :ビーズと水の密度差、 $g$ :重力加速度)。

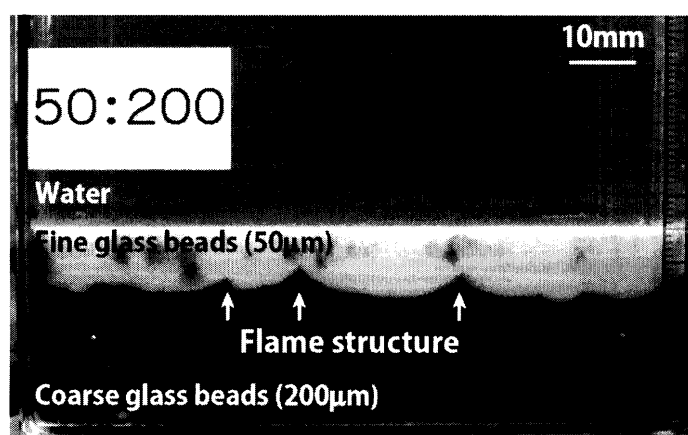


図1: 鉛直加振(加速度  $a = 44.2\text{m/s}^2$ , 周波数  $f = 40\text{Hz}$ )によって形成された火炎構造の例。上層(白)は  $50\mu\text{m}$ , 下層(赤)は  $200\mu\text{m}$  のガラスビーズである。ケース全体は水で飽和している。図は、5秒間振動を与えた後、約20秒放置させた時点における画像である。2つの層の界面は最初は水平であるが、振動が加わると不安定が生じ、火炎構造が形成される。

# 炭素質コンドライト母天体でみられる Na 交代変成に関する実験的研究

○市村 隼<sup>1</sup>、瀬戸雄介<sup>1</sup>、留岡和重<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学・大学院・理学研究科

炭素質コンドライト中の難揮発性包有物 (CAI) は、通常 Ca、Al といった元素に富む鉱物からなり、高温の星雲ガスが冷えていく過程で最初に凝縮した物質であると考えられている。しかし、一部の隕石の CAI の中には揮発性・可溶性の高い Na、K、Cl に富む鉱物 (ネフェリン (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), ソーダライト (Na<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>Cl)) が、CAI の初生鉱物 (とくにメリライト) を置き換えて存在することが知られている。これは、CAI が形成後に二次的な変成を受け、Ca が Na と入れ代わる反応 (Na 交代変成) が起きたことを示している。同様の変成は、コンドリュール中の斜長石についても確認されている。Na 交代変成は、これまで、コンドライト母天体が形成する以前の原始星雲中で、Na に富むガスと CAI 中の鉱物が直接反応して起きたと考えられていた。しかし近年の研究 [1-3] から、Na 交代変成は母天体における Na<sup>+</sup> に富む熱水と周囲の岩石との反応であると考えられるようになってきた。ただし、Na 交代変成の母天体上におけるプロセスを想定した実験的研究はほとんど行われておらず、未だに十分なデータが得られていない。そこで本研究では、ネフェリンの前駆物質であると考えられるメリライトと斜長石に焦点を当て、それらが異なる pH 条件の Na 溶液との反応でどのように変化するかを調べた。

全実験は、粉末試料と溶液 (36 mg/1.68 ml) を水熱変成装置に導入し、温度 200 °C、圧力約 15 気圧の条件下で 168 時間行った。粉末試料には、合成したメリライト (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>) と天然の斜長石 (Na<sub>0.5</sub>Ca<sub>0.5</sub>Al<sub>1.5</sub>Si<sub>2.5</sub>O<sub>8</sub>) を用いた。溶液は、HCl (pH 0), H<sub>2</sub>O (pH 7), 0.1N-NaOH (pH 13), 1N-NaOH (pH 14) の 4 種類を使用し、それぞれ NaCl を溶解させ Na<sup>+</sup> 濃度を 1 mol/l に調整した。またメリライトを用いた実験では、二酸化ケイ素を様々な量比で加えた。実験後、回収した試料は走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) と粉末 X 線回折装置 (XRD) を用いて、鉱物相を同定した。

結果を表 1 にまとめた。メリライトと pH 14-7 の溶液を用いた実験では、ハイドログロシュラーの生成が確認された (表 1-1)。メリライトと二酸化ケイ素 (重量比 10 : 6) の混合物と pH 14 の溶液を用いた実験では、ネフェリンハイドレート (Na<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>H<sub>2</sub>O) の生成が確認され、pH 13, 7 の溶液を用いた実験ではアナルサイム (NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>H<sub>2</sub>O) の生成が確認された (表 1-3)。しかし、溶液/試料 (W/R) 比を 10 倍にして実験を行ったところ、ネフェリンハイドレートの生成は確認されず、アナルサイムの生成量もわずかであった。また、pH 0 の溶液を用いた実験ではメリライトの大部分は液相に溶解し二酸化ケイ素だけが残った。斜長石と pH 14 の溶液を用いた実験では、ネフェリンハイドレートとアナルサイム両方の生成が確認されたが、それ以外の pH 13, 7, 0 の溶液を用いた実験では、メリライトと二酸化ケイ素 (重量比 10 : 10) の実験結果とほぼ同じであった。

実験結果から、Ca を含んでいるメリライトおよび斜長石は、200 °C で、Na に富む水溶液によって含水のネフェリンハイドレート、アナルサイムに容易に変成することがわかった。それらは、溶液の pH や SiO<sub>2</sub> 濃度により、変成生成物の種類や量が異なる。また、溶液/試料比が高いと変成が起こりにくくなる傾向があることから、変成には溶液/試料比が重要な要素の一つであると考えられる。以上の結果は、ネフェリン形成をともしう Na 交代変成は隕石の水質変成を解読する上で、重要な手がかり (pH、SiO<sub>2</sub> 濃度、溶液/岩石比などに制約) を与える作用であることを示している。

表1

| 出発物質                                          | pH 14 | pH 13 | pH 7 | pH 0 |
|-----------------------------------------------|-------|-------|------|------|
| 1) メリライト-SiO <sub>2</sub> (10:0)*             | △     | △     | △    | △    |
| 2) メリライト-SiO <sub>2</sub> (10:3)*             | ▲     | ○     | ○    | ▲    |
| 3) メリライト-SiO <sub>2</sub> (10:6)*             | ●     | ○     | ○    | ▲    |
| 4) メリライト-SiO <sub>2</sub> (10:10)*            | ○     | ○     | ▲    | ▲    |
| 5) メリライト-SiO <sub>2</sub> (10:3)*<br>W/R: 10倍 | ▲     | ○     | △    | △    |
| 6) メリライト-SiO <sub>2</sub> (10:6)*<br>W/R: 10倍 | ▲     | ○     | △    | △    |
| 7) 斜長石                                        | ●     | ○     | ▲    | ▲    |

●:ネフェリンハイドレート ○:アナルサイム  
△:ハイドログロシュラー ▲:Neh, Anlは生成せず \* : 重量比

References: [1] Kojima et al. (1995) *Proc. NIPR Symp. Antarc Meteorites* 8, 79. [2] Tomeoka & Itoh (2004) *MAPS*, 39, 1359. [3] Nomura & Miyamoto (1998) *GCA*, 62, 3575

## アエンデ隕石に含まれる 特異な暗色包有物の形成過程

○酒井 碧<sup>1</sup> 留岡 和重<sup>1</sup> 瀬戸 雄介<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大・院・理

CV, CO 炭素質コンドライト隕石は、しばしば光学的に透明度の低い包有物を含むことが知られている。これは一般に暗色包有物と呼ばれており、平均的な化学組成は CV3 コンドライトに似ていることが多い。また、その組織はコンドリュール・マトリックスが明瞭に識別できるコンドライト的なものから、Fe に富む細粒なオリビンからなるものまで様々である。この暗色包有物の成因について、かつては太陽系星雲粒子が集積して形成された極めて始原的な物質だと考えられていた<sup>[1]</sup>。しかし、暗色包有物中に繊維状や多孔質 (vesicular) のオリビンが含まれることや、コンドリュールの外形のみを残して内部が別の鉱物に置換されている組織 (仮像) が存在することなどから、近年ではホスト隕石と似た物質が水質変成とそれに続く熱変成を受けて形成されたと考えられている<sup>[2,3]</sup>。ただし、暗色包有物の前駆物質やその変成過程の詳細については統一的な解釈は得られていない。我々は代表的な CV タイプ隕石であるアエンデ隕石から、これまで CV 隕石から報告されている暗色包有物とは鉱物学的・組織的に多くの点で異なる暗色包有物を見出し、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) と電子線マイクロプローブアナライザー (EPMA-WDS) を用いて観察・分析を行った。

アエンデ隕石薄片 (~1066 mm<sup>2</sup>) 中に見つかった 2 つの暗色包有物 (~86 mm<sup>2</sup>, ~5 mm<sup>2</sup>) は、主に Fo60 の細粒 (<5 μm) なオリビン (~91 vol%) と Ca に富む輝石 (~6 vol%) からなる。また少量のネフェリンや不透明鉱物 (ペントランダイト, アウルアイト) も存在する。オリビンの多くは、その内部に気泡や Fe-Ni 硫化物などの不透明鉱物の包有物を含む vesicular オリビンである。暗色包有物中には、コンドリュールを交代したと思われる多数の仮像 (平均直径 ~0.17 mm) が存在する。これらの仮像は偏光顕微鏡下では容易に確認できるが、仮像とその周辺の構成粒子の大きさ・組成に明瞭な違いがないため、後方散乱電子像による識別は困難である。このような特徴は Krot et al. (1995a)<sup>[4]</sup> の分類よればタイプ B に相当する。先行研究<sup>[2,3]</sup>で報告されているタイプ B の暗色包有物では、仮像とホスト隕石中のコンドリュールのサイズ分布が類似していることから、暗色包有物の前駆物質はホストと同一の岩石であると考えられている。しかし、本研究の暗色包有物中の仮像 (最大 ~0.84 mm、平均 ~0.17 mm) は、ホストのコンドリュールや CAI (最大 ~3 mm、平均 ~0.49 mm) よりも有意に小さい。このことは、暗色包有物の前駆物質がアエンデ隕石とは異なっていたことを示唆する。

コンドリュール仮像の多くは光の透過率の低いリム (厚さ 20~300 μm) に囲まれている。これに対し、ホストのコンドリュールには明瞭に識別できるリムがない。殆どの仮像は、オリビンと Ca に富む輝石からなるが、ネフェリンを非常に多く含むものが少数ある。ネフェリンは斜長石やメリライトが Na 交代変成を受けて形成されることが知られており、この仮像は斜長石を主とするメソスタシスを多く含むコンドリュールを前駆物質としていたと考えられる。またスピネルやペロプスカイトを含む仮像も 1 つ見つかった。この仮像は CAI を前駆物質としていたと考えられる。

暗色包有物の周縁部および内部には脈が存在する。この脈は Ca に富む輝石がアンドラダイトを挟む層状の組織を示している。先行研究では、このような脈はアエンデ隕石全体が受けた水質変成作用によって形成されたものと解釈されている<sup>[5]</sup>。しかし、本研究の観察の結果、脈はホスト部分には存在せず、暗色包有物周縁部および内部にのみ見られることから、これらの脈はホストに取り込まれる前に形成されたかと推定される。また、この脈が暗色包有物を縦断していることから、暗色包有物全体が水・熱によって変成し細粒化した後に、脈が形成されたと考えられる。以上のことから、これらの暗色包有物が経た変成過程は複数回の水質変成を含む複雑なものであったと推定される。

### References:

[1] Kurat et al. (1989) Z.Naturforsch., 44a, 988-1004

[2] Kojima et al. (1993) Meteoritics, 28, 649-658.

[3] Kojima and Tomeoka. (1996) GCA, 60, 2651-2666.

[4] Krot et al. (1995a) Meteoritics, 30, 748-775

[5] Buchanan et al. (1997) GCA, 61, 1733-1743

## 始原的コンドライト Yamato81020 (CO3.0) に含まれる 水質変成の痕跡を示すクラスト

○森家智嗣<sup>1</sup>、留岡和重<sup>1</sup>、瀬戸雄介<sup>1</sup>、三宅亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学理学研究科、<sup>2</sup>京都大学理学研究科

はじめに Yamato81020 CO 隕石は、水・熱による変成程度が最も小さい岩石学的タイプ 3.0 に分類されており、衝撃指標は最も程度の小さい S1 である[1]。それゆえ、この隕石は原始星雲が集積して形成されてから、ほとんど水・熱・衝撃による変成を経験していない極めて始原的な隕石と考えられている[2-3]。しかし、我々はこの隕石から強い水質変成を受けた隕石に類似した組織を持つクラストを多く見出した。本研究では、これらのクラストの詳細な鉱物学的特徴を報告し、その成因を考察する。

**試料と実験手法** Yamato81020 隕石薄片（面積 119 mm<sup>2</sup>）の組織観察および化学組成分析には SEM-EDX および TEM-EDX を、結晶相同定には SPring-8 BL10XU の SR-XRD を用いた。

TEM、SR-XRD の試料作製には集束イオンビーム加工装置を用いた。

**結果と考察** Yamato81020 隕石のコンドライトのオリビン斑晶は、中心部から縁部まで化学的に均質で、ほぼ純粋なフォルスセライト組成（Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>）であることから、ほとんど熱変成の影響を受けていないと思われる。マトリックスは主に細粒なオリビン（~Fo<sub>55</sub>）の粒子からなり、その他に少量の斜方輝石、マグネタイト、トロイライト、金属鉄などの粒子を含む。TEM による観察では、マトリックス中のオリビン粒子の多くは大きさが~600nm で柱状の形態を示す。

Yamato81020 隕石のマトリックスについて特に詳細な観察を行ったところ、周囲に比べ、Mg, Si, Al に富み、Fe に乏しい、径 100-300 μm のクラスト（岩片）を合計 13 個見つけた。これらは、明らかにホストのマトリックスとは異なる起源を持つ外来のクラストと考えられる。これらのクラストがマトリックスに占める割合は < 1vol% である。ほとんどのクラストは主に細粒なオリビン（~Fo<sub>55</sub>）、斜方輝石、マグネタイト、金属鉄から構成されており、クラスト間の平均化学組成、構成鉱物種にはややばらつきがある。またクラストには、径が数十マイクロメートルのオリビンや CAI 構成鉱物などの包有物を含むものもある。さらに、一部のクラストはマグネタイトの球形微粒子の集合体（framboidal magnetite）を含んでいる。Framboidal magnetite は、強い水質変成を受けている CI 隕石に一般的に見られる典型的水質変成生成物である。Framboidal magnetite を含む クラストを SR-XRD で解析した結果、含水層状ケイ酸塩であるサーペンティンの層間間隔に相当する 7.1 Å にピークを示すものが見つかった。TEM による観察では、これらのクラストは繊維状のオリビンを含んでいることがわかったが、層状ケイ酸塩鉱物の同定には至っていない。

今回調べたクラストのうち、framboidal magnetite を含み、また、サーペンティンに相当する X 線回折ピークを示すクラストについては、明らかに水質変成を経験していると考えられる。クラストに含まれるオリビンの化学組成・形状もホストのものとは異なることから、これらのクラストがホストのマトリックスとは異なる場所あるいは時期に変成を受けたと推定できる。他のクラストには明瞭な水質変成の痕跡は見られないが、ホスト・マトリックスの鉱物学的特徴とは明らかに異なっており、内部の組織や包有物なども多様である。つまり、それぞれが異なる場所で、様々な変成プロセスを経た後に細かく砕かれ、ホストのマトリックスに取り込まれたと思われる。そして、ホストである Yamato81020 隕石 は、これらのクラストが取り込まれた後、大きな水・熱・衝撃による変成を受けなかったため、それらのユニークな組織が現在まで保持されてきたと考えられる。

Reference: [1]Scott et al. (1992) *GCA*, **56**, 4281. [2]Rubin & Wasson (2004) *GCA*, **69**, 211  
[3]Kunihiro et al. (2004) *GCA*, **68**, 3599

# カンラン石の水熱変成実験による コンドライト母天体の水質変成環境の推定

Hydrothermal alteration experiments of olivine and implications  
for aqueous alteration conditions in chondrite parent bodies

○宇津木綾香・森永慎也・留岡和重・瀬戸雄介（神戸大・院理）

○Ayaka Utsuki, Shinya Morinaga, Kazushige Tomeoka, Yusuke Seto (Kobe Univ.)

炭素質コンドライトは最も始原始的な隕石であるが、水による変成の痕跡を多く残している。炭素質コンドライト中の初生のカンラン石は、水質変成によって含水の層状ケイ酸塩鉱物に変化するが、その種類は隕石タイプによって異なる。すなわち、CM、CO タイプにはサーペンティン（以下 *serp*）が多く存在するが、CV タイプではスメクタイト（以下 *smec*）が、CI、CR では *serp* と *smec* が共存することが知られている。このような違いは隕石母天体中での変成条件の違いを反映していると考えられるが、その詳しい条件はわかっていない。そこで本研究では、隕石母天体中での変成条件の解明を目的として、様々な Fe 含有量のカンラン石を、異なる pH の溶液と反応させる実験を行い、カンラン石の変成程度や変成生成物を調べた。出発物質には 5 種類のカンラン石（Fo100, 80, 50, 20, 0）の粉末試料（粒径<50 μm）を用いた。各々の粉末試料を、1N-HCl（pH 0）、H<sub>2</sub>O（pH 7）、1N-NaOH（pH 14）溶液 0.1 ml と共に金チューブに封入し、水熱合成炉を用いて 300℃、500 気圧下で 1 週間反応させた。回収試料の組成分析および相同定は、SEM-EDX、TEM-EDX、粉末 X 線回折装置、SPRing-8 BL10XU の放射光 X 線回折装置を用いて行った。

本研究で得られた実験結果を表 1 にまとめる。全ての実験前後のカンラン石の回折ピーク強度を比較したところ、pH 7 では最大でも出発物質の 10 vol% 以下しか変成しなかったが、pH 0 では数 10 vol% 程度、pH 14 では 90 vol% 以上変成した。カンラン石の Fe 含有量が低いほど、あるいは溶液の pH が低いほど、*serp* が多く生成する傾向があることが分かった。*Serp* にはいくつかの多形が知られているが大部分は層間隔~7.3 Å の層がチューブ状あるいは渦巻き状に巻いたクリソタイルである（図 1a）。一方、Fo0、Fo20 を高 pH（=14）溶液と反応させた実験でのみ *smec* が生成した。*Smec* は、Fe に富む saponite あるいは nontronite に近い組成を持ち、フィルム状の形態を示す（図 1b）。Fo50、Fo20 かつ pH 0 の条件下では、~9 Å の面間隔を持つ層状ケイ酸塩が確認された。この物質はエチレングリコール処理による膨潤を示さないことから *smec* ではないと思われるが、正確な同定には至っていない。また、Fo20、Fo0 かつ pH 0 の条件下では、SiO<sub>2</sub> 成分に富む非晶質な物質が生成した。

本研究により、カンラン石の Fe 含有量と溶液の pH が、変成反応生成物の種類と量に大きく関係していることが分かった。すなわち、pH 14 で最も変成が進み、カンラン石の Fe 含有量が低いと *serp* が、高いと *smec* が形成される傾向がある。過去の熱力学計算（Zolensky et al, 1989, Icarus）および水熱変成実験（Ohnishi and Tomeoka, 2007, MAPS）は、炭素質コンドライトの水質変成は比較的高い pH 条件で起こったことを示唆している。本研究は、これら先行研究とも整合的な結果を示している。

|        | pH 0                        | pH 7                     | pH 14                    |
|--------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fo 100 | <i>Serp</i>                 | <i>Serp</i>              | <i>Serp</i> + <i>Bru</i> |
| Fo 80  | <i>Serp</i> + <i>Mgt</i>    | <i>Serp</i> + <i>Mgt</i> | <i>Serp</i> + <i>Mgt</i> |
| Fo 50  | <i>Serp</i> + <i>Phyllo</i> | <i>Serp</i>              | <i>Serp</i> + <i>Mgt</i> |
| Fo 20  | <i>Phyllo</i>               | 未反応                      | <i>Sme</i> + <i>Mgt</i>  |
| Fo 0   | <i>Serp</i>                 | 未反応                      | <i>Sme</i> + <i>Mgt</i>  |

表 1. 実験条件と反応生成物

*Serp*: サーペンティン  
*Mgt*: マグネサイト  
*Smec*: スメクタイト  
*Bru*: ブルーサイト  
*Phyllo*: 未同定の層状ケイ酸塩

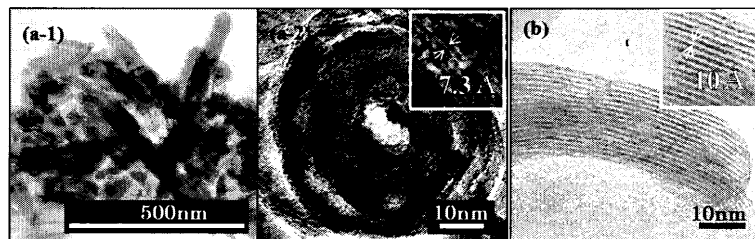


図 1. 反応生成物の TEM 観察結果。

(a-1)クリソタイルの集合体、(a-2)クリソタイルのチューブ断面、(b)スメクタイト。

## 陽子線照射による模擬星間物質からの アミノ酸前駆体生成とその安定性

○江藤碧<sup>1</sup>、金子竹男<sup>1</sup>、大林由美子<sup>1</sup>、小栗慶之<sup>2</sup>、福田一志<sup>2</sup>、吉田聡<sup>3</sup>、小林憲正<sup>1</sup>

<sup>1</sup>横浜国大院工、<sup>2</sup>東工大原子炉工研、<sup>3</sup>放射線医学総合研究所

[緒言] 隕石や彗星中のアミノ酸を含む複雑な有機物の起源として、分子雲の星間塵アイスマントル中での生成が議論されている。星間塵アイスマントルの主成分は水・一酸化炭素・アンモニア等と考えられる。本研究では、宇宙線中で最も多い陽子線を模擬星間物質に照射し、模擬星間物質の組成や照射量とアミノ酸前駆体生成との関係について調べた。さらに、生成したアミノ酸前駆体に重粒子線を照射することで、その安定性についても調べた。

[実験] 約 400 mL の Pylex 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、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O の系を CAW、CO、NH<sub>3</sub> の系を 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)及び GC/MS(JEOL JMS-600)でアミノ酸の分析を行った。

[結果と考察] 照射中、CAW 系においても CA 系においてもビームに沿って霧の生成が見られた。各照射生成物の加水分解物中に、Gly、Asp、Ser、 $\alpha$ -アミノ酪酸、 $\beta$ -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(図 1)。これより、CAW 系では二次的反応ではなく、照射により直接気相中で固体のアミノ酸前駆体が生成したと考えられる。CA 系においても、CAW 系とほぼ同じアミノ酸が得られた。NH<sub>3</sub> 分圧に対する Gly の生成量を図 2 に示す。Gly 生成量は、CO と NH<sub>3</sub> の分圧が 1:1 に近いほど、Gly 生成量が多くなった。現在、本実験で生成したアミノ酸前駆体の安定性について検討中である。

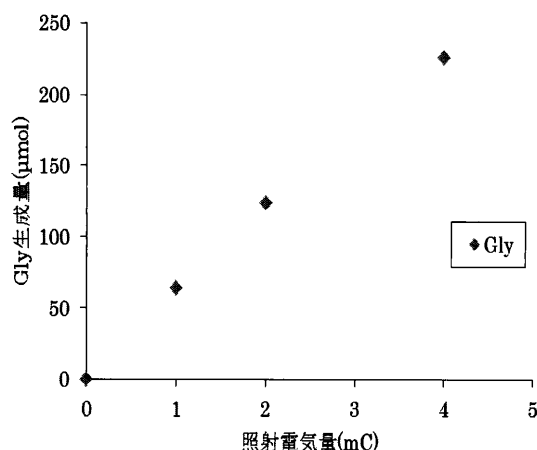


図 1 照射電気量と Gly の生成量の依存性

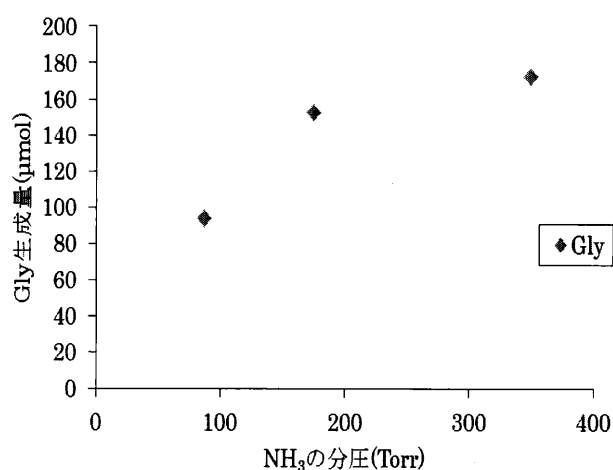


図 2 NH<sub>3</sub> 分圧と Gly の生産量の依存性



### 輻射流体計算に基づくファーストコアの化学的性質

○古家健次<sup>1</sup>、相川祐理<sup>1</sup>、富田賢吾<sup>2,3,4</sup>、松本倫明<sup>5</sup>、西合一矢<sup>3</sup>、富阪幸治<sup>2,3</sup>、

Franck Hersant<sup>6</sup>、Valentine Wakelam<sup>6</sup>

<sup>1</sup>神戸大学、<sup>2</sup>総合研究大学院大学、<sup>3</sup>国立天文台、<sup>4</sup>Princeton University、<sup>5</sup>法政大学、

<sup>6</sup>Bordeaux University

原始星形成以前にファーストコアと呼ばれる断熱的な天体が形成されると理論的に予想されている。しかし、コンパクトな構造(10 AU スケール)、短寿命(1000 年程度)、かつ濃いガスに埋もれていることから、未だ観測的に実証されておらず、今後の観測的研究の進展が期待されている。ファーストコアの分子組成(と物理構造)を理論的に研究することは、どのような分子輝線観測を行えばファーストコアの同定及びその物理構造を明らかにできるか、という点から重要である。また、ファーストコアは原始星形成後、星周円盤へと直接進化することが、近年の数値計算から明らかになってきたため、その組成は星周円盤の初期組成にも制約を与えうる。

本研究では、以下の2段階の計算を行った。

1. 3次元多重格子輻射流体計算により、分子雲コアから原始星形成直前までの物理進化を計算した。同時に、計算領域に仮想的な流体素片を撒き、その軌跡を計算した。
2. ポストプロセスとして、その軌跡に沿って化学反応ネットワークを解き、注目する進化段階における分子組成の空間分布を得た。

主要な結果は以下のとおりである。

1. ファーストコア外層( $T < 500$  K)のガス組成は、分子雲コア時代に作られた氷の昇華によって主に決まることを明らかにした。また、ファーストコア内層では、重元素は単純な構造のガス分子(一酸化炭素、水、窒素分子など)として主に存在することを示した。
2. これまで原始星コアを特徴づけると考えられてきた大型有機分子(メタノール、ギ酸メチルなど)が、ファーストコア時代にすでに中心コア周辺のコンパクトな領域(10 AU 程度)でガス中に存在していることを示した。これは大型有機分子の観測からファーストコアを同定できる可能性を示唆しており、観測的にも重要である。

## 原始惑星系円盤からの水分子輝線モデル

○野村 英子 (京大理宇宙物理)、Catherine Walsh (Queen's University Belfast)、  
D. Heinzeller (MetService)、T.J. Millar (Queen's University Belfast)

スピッツァー、ハーシェル宇宙望遠鏡により、原始惑星系円盤から中間および遠赤外線における水分子輝線が近年検出された。これらの輝線は、円盤半径 1AU-200AU 程度の中・表層部における温度数 100-数 10K のガスをトレースしていると考えられる。

本研究では、中心星に照射された円盤のガス・ダスト温度を求め、さらにこの物理構造をもとに非平衡な化学反応の時間発展を計算し、円盤内の水分子の分布を求めた。計算によると、円盤内縁表層部の高温領域では水分子は主に水素分子と酸素原子から気相反応により生成され、円盤外縁部では気相での中性・イオン反応による生成、ダストへの凍結、紫外線によるダストからの脱離などの過程が気相水分子の存在量に影響を及ぼす。

ここで、円盤内における (i) 乱流拡散および (ii) ダスト成長が、水分子の分布および中間・遠赤外線水分子輝線に及ぼす影響を調べた。その結果 (i) 乱流拡散は、円盤内縁表層部の高温な中間赤外線水分子輝線放射領域においては水分子の存在量を上昇させるが、円盤外縁部の比較的低温な遠赤外線水分子輝線放射領域においては、水分子の存在量にほとんど影響を及ぼさなかった。一方で (ii) 円盤内でダストが成長すると、ダスト上の光電加熱率の減少に伴いガス温度が低下し、円盤内縁表層部の水分子が豊富な領域が縮小した。また円盤外縁部においては、ダスト吸収係数の減少に伴う紫外線透過量の増加とダストへの吸着率の減少により、気相中の水分子の存在量が特に赤道面付近で増加した。さらに、中心星が小質量星の場合と中質量星の場合の違いを調べたところ、中心星の光度が大きくまた紫外線の強い中質量星では、気相水分子が豊富な領域は円盤外縁方向に拡大するが、円盤表層部においては紫外線の影響で水分子が減少した。また化学素過程の影響としては、暖かいダスト上での水素分子の生成率が円盤内縁上層部の気相水分子の存在量、また中間赤外線水分子輝線強度に特に大きく影響する。本ポスターではさらに、水分子輝線観測への影響についても議論する。

# 原始惑星系円盤の非一様密度分布による ダストの捕獲とその最大密度

○瀧哲朗<sup>1</sup>, 藤本正樹<sup>2</sup>, 井田茂<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学, <sup>2</sup>宇宙科学研究所

本研究では、原始惑星系円盤に非一様なガス密度分布が存在する場合のダストと円盤ガスの時間進化を、ダスト-ガス間の摩擦相互作用を考慮した局所モデルを用いて調べた。

現在の惑星系形成理論における重要な未解決問題の1つに、メートルサイズダストの落下問題がある。半径方向に一様な密度構造の円盤を考えた場合、ダストとガスの回転速度差によってダストは角運動量を失い、中心星に急速に落下してしまうことが知られており、その速度はダストがメートルサイズのときに最大となる。

これに対して円盤ガスに非一様なガス密度分布が存在するときは、その圧力勾配の変化により、圧力が最大となる点の周囲でダストが捕獲される。このような非一様ガス密度分布が準定常に存在する場合、落下するダストが次々に捕獲されることで、円盤内に高密度のダスト濃集領域ができる。やがて密度が十分に上昇するとダスト濃集領域は自己重力不安定を起こして一気に微惑星に成長し、ダストの落下問題を回避できるというシナリオが考えられてきた。しかし捕獲されることで高密度になったダストが、周囲のガス密度分布に与える影響はこれまで十分に調べられていなかった。

今回の1次元計算（半径方向）の結果によると、濃集したダストはガスの非一様な密度分布を均してしまい、ダスト-ガスの質量比は初期に与えた圧力勾配の大きさに関わらず~1.0までしか上昇しなかった。一方で、質量比が~1.0である領域はダストの降着とともに広がり、その濃集領域の寿命は~100 軌道周期に達する場合もあることが分かった。

また、本研究ではこのようにして維持されたダスト高密度領の進化に注目して半径-鉛直方向の2次元計算を行い、ダストが引き起こす不安定による更なるダスト濃集の可能性についても議論した。

# 原始惑星系円盤内ダスト層における ストリーミング不安定性による乱流状態

○石津尚喜<sup>1</sup>、犬塚修一郎<sup>2</sup>、関谷実<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台、<sup>2</sup> 名古屋大学、<sup>3</sup> 九州大学

原始惑星系円盤では動径方向の圧力勾配のため、ガスはケプラー速度以下で中心星の周りを公転する。一方、ダストはケプラー速度で公転しようとする。そのため、ダストはガスの向かい風を受けてトルクを失い中心星に落下する。円盤中心面へのダストの沈殿が生じると、ダストとガスの角運動量の交換の結果としてダストは中心星に落下し、ガスは円盤外側へ移動する。このようにダストとガスが異なる方向に運動する状況ではストリーミング不安定性が生じる。また、円盤鉛直方向にダスト密度分布があると、方位角方向速度に鉛直方向のシアが生じる。このためシア不安定性も生じうる。ストリーミング不安定性やシア不安定性によって生じる乱流の理解はダストの成長及び微惑星の形成過程を調べる上で重要である。

本研究ではダストとガスの2流体3次元数値シミュレーションを行い、ストリーミング不安定性とシア不安定性によって生じる乱流の解析を行った。今回ダストの摩擦時間とケプラー角速度の比が0.01の場合を取り扱う。本発表では乱流エネルギーの飽和状態に関しても議論する。乱流の飽和状態は、ガスとダストそれぞれの動径方向速度、方位角方向速度のレイノルズストレスによるエネルギーの生成と粘性、ガス抵抗によるエネルギー散逸のつり合いで決まることが分かった。

# ガス・ダスト二相流体の熱的不安定とダスト集積

○渡辺圭亮<sup>1</sup>、中本泰史<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学

原始惑星系円盤内において、バウショック後面などガス温度が上昇している領域では、ガスはダストより高い温度になる状況が発生する。このようなガス温度がダスト温度より高いという状況のもとではガス・ダスト間の衝突による熱のやり取りから、ガスはダストに対する冷却剤としての役割を果たす。

本研究では、ガスとダストの温度差による冷却の効果と抵抗力に着目し、ガス・ダスト2相流体の定常モデルに対する線形安定性解析を行う。ガスとダストは抵抗力により力学的に相互作用し、衝突によりエネルギーのやり取りを行うとする。

線形安定性解析の結果、ガスがダストよりも高温であるような定常モデルの下で、ガス・ダスト流体が凝縮する熱的不安定のモードと、振幅が時間的に増大する密度波のモードが存在することがわかった。これらの不安定は、Field(1965)型の熱的不安定のモードに相当する。

凝縮の不安定モードでは、ダストによる冷却がガスの熱的不安定を起こす。さらに抵抗力の効果により、ガスの収縮にともなってダスト流体もガスの収縮領域に引き込まれ、ダストの集積が起こる。

密度波のモードにおいても抵抗力の効果から、増幅するガスの密度波に引きずられた増幅するダスト密度波が現れる。

本発表ではこれら不安定のメカニズムの理解とともに、分散関係によって得られる不安定の成長時間や不安定の空間スケールより与えられるダスト凝縮体のサイズ、不安定を起こす条件などを示す。

## 渦における微惑星形成が起こるタイムスケールと渦によってもたらされるダストのサイズ分布変化

○河村恵里<sup>1</sup>, 渡邊誠一郎<sup>1</sup>, 稲葉知士<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>早稲田大学

惑星形成過程において、原始惑星系円盤ができた時に存在していたと考えられる数 $\mu\text{m}$ サイズのダストから、衝突合体による成長が充分可能と考えられる数 $\text{km}$ サイズの微惑星という小天体にまで成長する過程は、そこにダスト落下問題などの様々な障壁が指摘されており、未だ解明されていない。

その微惑星形成過程に対し、渦における微惑星形成というシナリオが先行研究により提唱されている\*<sup>1</sup>。原始惑星系円盤内に充分強い乱流があった場合に、その乱流からケプラーシアによって大きな渦構造ができる。その渦構造は逆行・高気圧性・長寿命という特徴を持ち、渦の中心部にダスト粒子を集める性質を持つので、ダストから微惑星への成長を助ける働きを持つのではないかと指摘されている。

本研究ではこれまでに、渦の中に集まるダストの運動を解析的に解き、ダストのサイズと渦の中でのダストの面密度の増加にかかる時間の関係式を導いた。また、先行研究においては、渦の流れ自体は大分解明されてきた\*<sup>2</sup>が、まだ円盤ガスの擾乱から微惑星形成までの全体を定量的に議論されるまでには至っていない。そこで、今回は円盤ガスの擾乱から微惑星形成までにかかるタイムスケールを、先行研究の結果も用いて議論する。その結果、渦の形成が円盤の動径距離に依存するモデルを考えると、円盤の外側領域では渦ができること自体に時間がかかりすぎ、渦における微惑星形成は円盤の内側でのみ有効な方法であることが示唆される。タイムスケールの議論には、渦のモデルが強く依存するため、現在提唱されている代表的な渦形成モデルを挙げ、それぞれに関して、どこでどのような場合に渦における微惑星形成過程が有効なものと考えられるか示す。

また、本研究の結果から、渦の中のダストの面密度分布進化に対するダストのサイズ依存性が明らかになっており、例えば、渦の中では抵抗係数が1に近いダストが渦の中心部に多くなり、抵抗係数1から離れるほど渦の外側に存在するような、渦の中でのダストのサイズ分布の再配置が起こることが示唆される。円盤中のダストにサイズ分布があった場合に、渦がダストのサイズ分布に与える影響や、逆にサイズ分布が渦における微惑星形成に与える影響についてを議論する。

\* 1 Inaba, S. & Barge, P. 2006, ApJ 649, 415 など

\* 2 Meheut et al. 2012, A&A 542, A9 (三次元の渦の流れ) など

## 火星の寡占的成長の N 体計算と Hf-W システムへの応用

○森島 龍司<sup>1</sup>、ゴラベック グレゴア<sup>2</sup>、サムエル アンリ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア大学ロサンゼルス校、<sup>2</sup>リヨン高等師範学校、<sup>3</sup>パイロイト大学

惑星集積理論において、まず火星サイズの原始惑星が暴走成長および寡占的成長を経て形成され、その後原始惑星同士の衝突を通して地球型惑星が形成したと考えられている。火星はそのサイズやハフニウム-タングステン (Hf-W) 同位体システムから示唆される集積年代から、巨大衝突ステージを経なかった原始惑星の生き残りと考えられる。Dauphas and Pourmand (2011) は火星隕石の W 同位体比から火星の成長時間を 180 万年と求めた。彼らは原始惑星への微惑星衝突時の金属-ケイ酸塩の完全平衡を仮定しているが、衝突天体が小さい場合は原始惑星マントルが、衝突天体が多い場合はその金属コアが完全平衡に至らないと考えられる。これらの非平衡の効果は見積もられる集積時間を長くする傾向がある。本研究では高精度の N 体計算を行い、原始惑星の成長時間および衝突天体のサイズ分布を調べ、その結果を用いて W 同位体比の進化を計算した。

N 体計算では、現在の火星軌道 (1.5 AU) 周辺に 5000 体の微惑星を置き、それらの衝突による成長を星雲ガスありと無しの場合の二通り計算した。微惑星とガスの面密度は最小質量モデルとほぼ同じとし、微惑星の軌道半径に関する周期境界条件 (Kokubo and Ida, 2000) を採用した。ガスありの計算の場合、原始惑星の成長曲線は Chambers (2006) の解析解と良く合うことが分かったが、集積後期は境界条件の影響により N 体計算は成長率を低く見積もってしまうことが分かった。また、寡占的成長段階においても、同質量程度の原始惑星同士の衝突が起こっており、最終的な原始惑星の質量への寄与は約 1/3 であることも分かった。

N 体計算の結果を用いた W 同位体進化の計算では Nimmo and Agnor (2006) のモデルを拡張したものを用い、また後期集積段階での原始惑星の成長率が不正確であることによる影響は Chambers (2006) のモデルを使って大まかに見積もった。計算の結果、非平衡の効果は小さいことが分かった。原始惑星のマントルが部分平衡する場合、その部分平衡する部分の衝突天体に対する体積比が W の金属-ケイ酸塩分配係数よりも十分大きければ、完全平衡の場合と結果が変わらないことが分かった。Hf/W 比から推測される火星の W 分配係数は低いため、この非平衡の効果は小さいと考えられる。衝突天体のコアが部分平衡することについては、原始惑星は主に小さい天体の衝突により質量が供給され、それらは原始惑星のマグマオーシャン中でほぼ完全平衡することが Samuel (2012) によって示されていることから、非平衡の度合い自体が小さいと考えられる。

計算結果は火星の成長速度は最小質量モデルの場合よりも大きいことを示し、これは原始太陽系星雲のガスや固体面密度が最小質量モデルでの値より高かったことを意味すると考えられる。

## 原始惑星系円盤内における惑星捕獲によるスーパーアース系の形成

○松本侑士<sup>1</sup>, 長沢真樹子<sup>1</sup>, 井田茂<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 地球惑星科学専攻

観測されたスーパーアースは、中心星から $\sim 0.05\text{AU}$ で多く発見されている。これは惑星の軌道移動により説明することができる。スーパーアースサイズの惑星はタイプI軌道移動と呼ばれる、原始惑星系円盤と惑星の角運動量交換によって中心星方向への軌道移動をする。タイプI軌道移動は円盤がなければ止まるため、円盤内縁のある $\sim 0.05\text{AU}$ に惑星は集まり、この近辺に惑星が多く存在するようになったと考えることができる。一方で、Hasegawa & Pudritz (2011)では、タイプI軌道移動の向きがいくつかの点で外向きになることを示した。これらの点では惑星の軌道移動が止まるため、円盤内縁と同様に惑星が集まると考えられる。しかし、Hasegawaらの指摘した点にスーパーアースが多く分布しているのかどうかは、スーパーアースの観測数が少ないことから観測的には明らかではない。また、軌道移動トルクの向きが逆転する点で惑星が捕獲されるかどうかを考えた軌道計算は存在しておらず、どのようなときにどれくらいの惑星がこれらの点で捕獲されるのかはわかってはいない。

そこで本研究では軌道移動トルクの逆転する点での惑星捕獲を、軌道移動トルクが外向きになる点を置き、タイプI軌道移動を加えた軌道計算を行うことで調べた。タイプI軌道移動トルクの逆転は、円盤のガス面密度を滑らかに上昇させることで設定した。

計算の結果、惑星が落下してきた場合、必ずしも全ての惑星がトルクの逆転する点で捕獲されはしないということがわかった。惑星の軌道移動の速さ、円盤の面密度の上昇幅をパラメータとして振った計算を行い、複数の惑星が落下してきた場合に、惑星が捕獲されるパラメータ領域を求めた。また、円盤内縁での惑星捕獲を調べたOgihara et al. (2010)をもとに、トルクの釣り合いからトルクの逆転する点の惑星捕獲数と惑星捕獲領域に対する半解析的な見積もりを行い、計算結果と比較した。この結果、円盤の面密度の上昇幅がそれまでの面密度の0.1倍程度以上の場合には計算結果と半解析的な見積もりはおおよそ一致した。面密度の上昇幅が0.1倍程度より低い領域では全く惑星は捕獲されず、わずかな円盤の面密度変化では非常に弱い軌道移動トルクであっても複数の惑星を捕獲できないことがわかった。



# 楕円軌道連星まわりの周連星系円盤の長時間進化 —円盤密度構造の影響—

○今枝 佑輔<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

連星周りの周連星系ガス円盤の長時間進化について発表する。

連星は恒星が誕生する時にごく当たり前に形成され、恒星の過半数が連星系をなしているとも言われる。恒星周りのガス円盤は惑星系形成の現場であり、ガス円盤の密度速度構造はこの連星の影響を強く受ける。従って連星系での惑星形成を考える上で、ガス円盤が受ける連星系から影響を知ることは重要である。

連星系がガス円盤に及ぼす影響は、変化のタイムスケールによって分類することができる。一つはダイナミカルなタイムスケールで物事が変化するもので、例えば潮汐力による共鳴に起因するガス円盤の進化が挙げられる。これにより作られる密度構造は円盤の回転と共に慣性系に対しダイナミカル時間程度で回転する。より長いタイムスケールでの進化としてはガス円盤の粘性進化などが挙げられ、これは力学進化に比べて非常に長時間をかけてゆっくりと変化する。

本発表ではもうひとつのタイムスケール、即ち連星からの永年摂動を受けて歳差のタイムスケールで変化する長時間進化について議論する。タイムスケールとしてはダイナミカル時間より長く、一般には粘性時間より短い値になる。作られる構造もダイナミカル時間程度では慣性系に対しほぼ静止してみえる。永年摂動による変化を考えるため、すべての摂動力をダイナミカル時間より短い現象について平均化して考える。これは連星軌道にリング状に分布する重力源を考え、ガス円盤を動径方向に連なるリングの集合体と考えたことに相当する。そしてガスリングに対してかかる重力摂動、隣のガスリングからかかる圧力勾配力を摂動力としてガスリングの軌道進化の方程式を導いた。ガスリングの軌道分布に起因するリング内の密度分布変化については Statler, T. S. (2001, AJ, 122, 2257) により求め、今回は特にガス円盤の動径方向の密度構造も考慮して定式化を行った。この進化方程式は、行列の固有値(パターン速度)・固有ベクトル(動径方向のパターン)を求める問題に帰着される。個々の解は重ね合わせることで任意の時間の密度分布を求めることができる。この結果、動径方向に密度分布がある場合のガス円盤についても一様密度円盤の場合と同様に、連星系が離心率を持つ軌道を運動する場合にはガス円盤の軌道も楕円軌道化され、 $m=1$  の密度構造が作られることがわかった。

### 中低質量星周りの地球型惑星の初期進化 Early evolution and its possible diversity of Earth-like planets around mid- to low-mass host stars

○濱野景子, 阿部豊, 玄田英典<sup>1</sup>

○HAMANO Keiko, ABE Yutaka, GENDA Hidenori<sup>1</sup>

東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

これまでに我々は、太陽と同様の恒星での水蒸気大気を持つ地球型惑星の初期進化を検討し、正味恒星放射と射出限界が一致する軌道を境にその進化が大きく異なることを示した。EUV による水の散逸は、内側の軌道では惑星の固化時間を律速する一方、外側では水収支にもほとんど影響しない。恒星質量が小さいほど EUV 強度も減少するが、その依存性が光度に比べ小さいために同じ恒星放射を受け取る軌道での EUV 強度は強くなる。本発表では中低質量星の EUV 強度/光度比の違いが、惑星の固化時間や水収支に与える影響を検討する。

We have investigated early evolution of Earth-like planets around Sun-like stars and shown that the net stellar flux that the planet receives is their determinative factor in thermal history and water budget. Especially, water loss caused by strong EUV radiation from a young star could control solidification time of the planet located closer to the star, while on the planet located further, it would have a limited impact. Since stellar EUV radiation / Luminosity ratio is larger for the smaller star due to the weaker dependence of EUV radiation on stellar mass, the planet receiving the same net stellar flux would receive the stronger EUV radiation around a lower-mass star. This may cause variation in early thermal history and water budget on terrestrial planets. We investigate the effect of EUV radiation/Luminosity ratio to planetary solidification time and its water budget and discuss about the possibly resulting diversity around mid- to low-mass host stars.

## Observed- Minus-Calculated 法 (O-C) 法を使った B 型準矮星を周る惑星と褐色矮星の探査

### A Search for Planets and Brown Dwarfs around Subdwarf B Stars Using the Observed-Minus-Calculated(O-C) Method

o Otani, Tomomi<sup>1</sup>

Oswalt, Terry D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Florida Institute of Technology, Department of Physics and Space Sciences  
Melbourne, Florida USA

We have searched for extrasolar planets and companion stars around several pulsationally unstable subdwarf B (sdB) stars using the Observed-minus-Calculated (O-C) method. Subdwarf B (sdB) stars are in the extreme horizontal branch (EHB) part of the Hertzsprung-Russell diagram. As sdB progenitors go through the red giant evolution stage they undergo loss of the hydrogen burning envelope, leaving a helium-burning core and a very thin inert hydrogen-rich envelope. After core helium exhaustion they settle along the extreme horizontal branch and spend about  $10^8$  years as sdB stars. They then turn into subdwarf O (sdO) stars and eventually white dwarfs. Several dozen sdB stars are known to be pulsators. Such pulsations provide a stable clock whose precision can be tested by the O-C method.

A star's position in space may wobble due to the gravitational forces of companions and planets orbiting it. In such cases the pulsations from the star are delayed when the star is on the far side of its orbit, and vice versa. We have tracked such pulse arrival time differences in several sdB stars using the O-C method.

The main purpose of our project is to investigate how frequently such highly evolved stars have companions, and by inference how often planets survive the red giant phase of their host stars. The frequency of companions to sdB stars is also important to determining whether binary star evolution plays an important or even essential role in the origin of sdB stars.

We have monitored several stars over the past 1.5 to 10 years. A Monte Carlo analysis was performed to estimate the ranges of possible masses and semimajor axes of companion to these stars that our program could have detected. For this, an IDL program was written to randomly choose a companion mass, semimajor axis and other orbital parameters that best fit each simulated O-C diagram. These results were compared to our data.

Our program confirmed the existence of a known planet around V391Peg and found candidate companions around the sdB stars PG1047+003 and PG1613+426. We have also computed the combinations of companion mass and semimajor axis that are excluded by our observational data.

\*T.D.O. acknowledges support from NSF grant AST-087919 to the Florida Institute of Technology.

## 太陽系外惑星のスピン推定

○河原 創 (首都大学東京)

系外惑星の自転軸の傾きや自転速度といったスピン情報は、惑星気候を決定する大きな要因であるだけでなく、形成理論の制約にもなりうる重要な量である。しかし実際にこれを観測から得るのは難しい。本講演では、惑星表面の非一様性によるライトカーブを用いた方法と、一様表面の惑星でも適応可能な惑星視線速度を用いた制限法の二つの推定法を説明する。

惑星表面に反射率の非一様性が存在する場合、光度変動の周期が自転周期となり推定可能である(Palle+08)。また反射光の時系列観測から表面の二次元マップが復元できるが、その際にスピン軸の2自由度（赤道傾斜角、季節フェーズ）が同時に推定できる(Kawahara & Fujii 10,11, Fujii & Kawahara 12)。

また近年、惑星視線速度が地上望遠鏡による高分散近赤外分光で検出されたが(Brogi+ 12)、これを用いた新たなスピン軸情報の制限法を提案したい。惑星視線速度は、主に惑星の公転運動によるサインカーブとなるが、これに加え、惑星表面の自転による速度が加わる。惑星からの放射が主星側に偏っていると、自転効果がサインカーブに対する anomaly として付加され、自転軸と公転軸の投影角度の情報などが得られる(Kawahara in prep)。この方法での将来的なスピン軸制限の可能性を議論したい。

### References

- Palle, E., Ford, E. B., Seager, S., Montanes-Rodriguez, P., & Vazquez, M. 2008, ApJ, 676, 1319
- Kawahara, H., & Fujii, Y. 2010, ApJ, 720, 1333
- Kawahara, H., & Fujii, Y. 2011, ApJ, 739, L62
- Fujii, Y., & Kawahara, H. 2012, ApJ, 755, 101
- Brogi, M., Snellen, I. A. G., de Kok, R. J., Albrecht, S., Birkby, J., & de Mooij, E. J. W. 2012, Nature, 486, 502
- Kawahara, H., 2012 in preparation

## 小惑星 Nereus の YORP 効果

○ 北里宏平<sup>1</sup>, 阿部新助<sup>2</sup>, 石黒正晃<sup>3</sup>, 石橋之宏<sup>4</sup>, 安部正真<sup>4</sup>

<sup>1</sup>会津大学, <sup>2</sup>台湾中央大学, <sup>3</sup>ソウル大学, <sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構

YORP効果は、天体表面の非等方的熱放射から回転力が生じて天体の自転状態が変化する効果である。天体にかかる力そのものは非常に微弱であるが永年的に影響を与え続けるため、サイズが小さく形状の歪な小天体の自転進化を考える上では重要な要素となり得る。

Rubincam [1] が2000年に初めて仮説を提唱して以降、これまでに小惑星YORPをはじめとする4つの小惑星で予想された自転の変化が検出され、YORP効果の存在は実証された [2]。しかし一方で、小惑星YORPやItokawaの観測からYORP効果の理論値と観測値の間には定量的に大きな不整合があることも明らかとなった [3, 4]。本研究ではその要因を探ることを目的として、小惑星NereusについてYORP効果の検出を試みた。

Nereusは過去に「NEAR Shoemaker」や「はやぶさ」のターゲットに選ばれていたこともある地球近傍小惑星であり、われわれは1997年から2010年にかけて地上望遠鏡を用いて観測を行ってきた。また、レーダー観測から詳細な形状が復元されており、YORP効果は数年の観測で検出可能なレベルと予測されている [5]。本発表では、観測から推定されるNereusのYORP効果および他の小惑星との比較について議論する。

[1] Rubincam, D. P., 2000, Icarus, 148, 2-11.

[2] Lowry, S. C., et al., 2007, Science, 316, 272-274.

[3] Taylor, P. A., et al., 2007, Science, 316, 274-277.

[4] Durech, J., et al., 2008, Astron. Astrophys., 488, 345-350.

[5] Brozovic, M., et al., 2009, Icarus, 201, 153-166.

## 第一著者名索引

### ア行

青木 隆修 P2-13  
安部 正真 03-01  
荒川 政彦 P2-04  
有本 龍三 01-07  
石津 尚喜 P3-05  
石山 謙 P1-02  
市村 隼 P2-20  
伊藤 孝士 P1-15  
今枝 佑輔 P3-10  
今枝 隆之介 S01  
岩田 隆浩 01-01  
上相 真之 07-04  
上田 翔士 010-06  
宇津木 綾香 P2-23  
浦川 聖太郎 03-09  
江藤 碧 P3-01  
大竹 真紀子 01-08  
大宮 正士 010-09  
岡田 達明 P2-01  
岡本 尚也 04-07  
岡本 千里 P2-15  
小川 和律 02-03  
小川 佳子 P1-03  
荻原 正博 09-09  
奥住 聡 08-07  
押上 祥子 P1-04  
押野 翔一 09-01  
小谷 朋美 P3-13  
落合 裕道 09-03

### カ行

片岡 章雅 08-06  
加藤 伸祐 P1-01

門屋 辰太郎 010-05  
鎌田 俊一 S02  
亀田 真吾 P1-08  
唐牛 譲 01-04  
河合 純 06-05  
河原 創 P3-14  
河村 恵里 P3-07  
木内 真人 P2-14  
北里 宏平 03-02, P3-15  
木村 勇気 08-03  
ギュットラ  
カーステン 05-06  
熊本 篤志 P1-05  
栗田 敬 02-06  
栗山 祐太朗 01-05  
黒川 宏之 S03  
黒崎 健二 010-07  
黒澤 耕介 010-02  
玄田 英典 010-01  
河本 泰成 05-04  
小玉 貴則 010-03  
小林 憲正 08-01  
小林 直樹 P1-10  
小林 浩 最優秀研究者賞特別講演

### サ行

佐伯 和人 02-04  
酒井 碧 P2-21  
酒井 理紗 S04  
坂谷 尚哉 05-08  
坂本 進 P1-11  
佐々木 晶 P1-12  
佐々木 洋平 04-04

|            |       |
|------------|-------|
| 佐藤 毅彦      | 04-01 |
| 佐藤 雅彦      | 06-03 |
| 柴田 裕実      | 02-09 |
| 寫生 有理      | P2-16 |
| 島田 玲       | 05-02 |
| 白石 浩章      | 02-02 |
| 城野 信一      | 08-08 |
| 末次 竜       | 09-06 |
| 菅原 春菜      | 06-04 |
| 杉田 精司      | 03-03 |
| 鈴木 絢子      | 05-03 |
| 関口 朋彦      | P2-12 |
| 関谷 実       | 03-08 |
| 千秋 博紀      | P2-10 |
| ソフィア リカフィカ |       |
| パトリック      | 09-08 |

#### タ行

|        |        |
|--------|--------|
| 高橋 康人  | 04-05  |
| 高橋 芳幸  | 04-02  |
| 高山 亜紀子 | 07-03  |
| 瀧 哲朗   | P3-04  |
| 滝田 隼   | P2-02  |
| 嵩 由英子  | 01-06  |
| 武井 亮斗  | P2-05  |
| 立浪 千尋  | 010-08 |
| 橘 省吾   | P2-03  |
| 田中 今日子 | 08-02  |
| 田中 智   | P1-07  |
| 谷川 享行  | 09-04  |
| 長 勇一郎  | S05    |
| 土山 明   | 03-07  |
| 寺居 剛   | P2-11  |
| 寺田 健太郎 | 07-01  |
| 鳥居 大亮  | 06-01  |

#### ナ行

|       |        |
|-------|--------|
| 長岡 宏樹 | 05-01  |
| 成田 憲保 | 010-10 |
| 西澤 誠也 | 04-03  |
| 野口 克行 | P1-14  |
| 野田 寛大 | 02-08  |
| 野村 英子 | P3-03  |

#### ハ行

|        |              |
|--------|--------------|
| 濱野 景子  | P3-12        |
| 早川 基   | P1-13        |
| 羽山 遼   | 04-08        |
| 春山 純一  | 01-10        |
| 晴山 慎   | 01-02, P1-06 |
| 樋口 有理可 | 09-10        |
| 平田 直之  | S06          |
| 藤井 悠里  | S07          |
| 藤田 哲也  | 09-07        |
| 藤田 智明  | P2-17        |
| 古市 幹人  | 010-04       |
| 古家 健次  | 08-05, P3-02 |
| 堀 安範   | 09-02        |
| 堀川 大和  | 02-05        |

#### マ行

|        |       |
|--------|-------|
| 前島 直彦  | 08-10 |
| 松浦 隆裕  | P2-06 |
| 松本 岳大  | P2-08 |
| 松本 徹   | 03-06 |
| 松本 恵   | 07-02 |
| 松本 侑士  | P3-09 |
| 丸田 有希人 | 09-05 |
| 丸山 薫   | 06-02 |
| 三浦 均   | 07-06 |
| 三浦 保範  | 06-06 |
| 三浦 弥生  | 01-09 |

|       |              |
|-------|--------------|
| 三谷 烈史 | P1-09        |
| 道上 達広 | 05-05        |
| 武藤 恭之 | 08-04        |
| 森島 龍司 | 03-10, P3-08 |
| 森家 智嗣 | P2-22        |
| 諸田 智克 | 01-03        |

### ヤ行

|        |       |
|--------|-------|
| 八亀 彰吾  | 03-05 |
| 保井 みなみ | P2-18 |
| 安田 奈央  | P2-19 |
| 矢田 達   | 03-04 |
| 矢田 達   | P2-07 |
| 山岸 明彦  | 02-07 |
| 山崎 布美香 | 07-05 |
| 山田 竜平  | 02-01 |
| 山本 聡   | 05-07 |

### ワ行

|       |       |
|-------|-------|
| 脇田 茂  | 08-09 |
| 和田 浩二 | 04-06 |
| 渡辺 圭亮 | P3-06 |



## 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

シャープ株式会社

有限会社テラパブ

株式会社ニュートンプレス

一般財団法人リモート・センシング技術センター

## 2012 年秋季講演会実行委員

実行委員長      中川 義次

実行副委員長   林 祥介

|      |       |        |       |       |
|------|-------|--------|-------|-------|
| 実行委員 | 大槻 圭史 | 保井 みなみ | 荒川 政彦 | 相川 祐理 |
|      | 中村 昭子 | 岩山隆寛   | 瀬戸雄介  | 末次 竜  |
|      | 安井 佑貴 | 岡本 尚也  |       |       |