

日本惑星科学会
2010 年秋季講演会
予稿集

10月6日～8日
名古屋大学野依記念学術交流館

主催：日本惑星科学会

2010年 日本惑星科学会 秋季講演会

日時：2010年10月6日（水）～8日（金）

場所：名古屋大学本山キャンパス 野依記念学術交流館 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

プログラム概要

○10月6日（水）

8:30	受付開始	
9:30	オーラルセッション1	ダスト・隕石
11:15	オーラルセッション2	最優秀発表賞選考
12:45	昼食	
14:00	ポスターセッション1	
15:15	オーラルセッション3	内惑星・ハビタブルプラネット
17:20	ポスターセッション2	
18:20	ポスターセッションwith BEER	名大LOC特別企画：ポスター セッション1～3のすべてのポ スターが掲示できます

○10月7日（木）

8:30	受付開始	
9:00	オーラルセッション4	月1
10:55	オーラルセッション5	月2
12:45	昼食	
12:50	月惑星探査の来る10年	第一段階トップサイエンス 中間報告
14:00	ポスターセッション3	
15:10	オーラルセッション6	観測
16:20	総会	
17:20	最優秀研究者賞特別講演	
18:30	懇親会	

○10月8日（金）

8:30	受付開始	
9:00	オーラルセッション7	衝突・破壊過程
10:55	オーラルセッション8	ガス惑星・リング・原始惑星系 円盤
12:45	昼食	
14:00	オーラルセッション9	惑星形成過程
15:45	オーラルセッション10	火星・小惑星
17:30	講演会終了	

プログラム

- 講演者は*で示してあります。
- 口頭発表は8分講演（最優秀発表賞選考は12分講演），3分質疑応答です。発表時間の厳守をお願いします。
- ポスターは秋季講演会期間中掲示していただけます。ポスターセッションのコアタイムについてはプログラムに掲載したように3つに分けています。最終日の16時までに撤収してください。

○ 10月6日（水）

オーラルセッション1 ダスト・隕石 （座長：和田 浩二（千葉工大），三浦 均（東北大））

- 9:30 101 原始惑星系円盤におけるダストアグリゲイトの焼結領域
城野 信一*（名古屋大）
- 9:41 102 蒸発・凝縮による氷微粒子のサイズ個数分布進化
黒岩 琢登*, 城野 信一（名古屋大）
- 9:52 103 ダストアグリゲイトの衝突シミュレーション：サイズ比の効果
和田 浩二*（千葉工大），田中 秀和（北海道大），陶山 徹（新潟県立自然科学館）木村 宏（神戸大），山本 哲生（北海道大）
- 10:03 104 初期太陽系円盤の揮発性元素同位体進化
小嶋 稔*（東京大）
- 10:14 105 酸素同位体異常を担った隕石有機物
橋爪 光*（大阪大），高畠 直人（東京大），奈良岡 浩（九州大），佐野 有司（東京大）
- 10:25 106 μ -XANESによる炭素質コンドライト有機物の直接分析
薮田 ひかる*（大阪大），三田 肇（福岡工大），小林 憲正（横浜国大），長谷川 紀昭（大阪大），キルコイン デイビッド（ローレンスバークレー研）
- 10:36 107 南極ドームふじ氷床コア中の微小スフェリュールの形成過程
上根 真之*（大阪大），三澤 啓司（極地研），鈴木 宏二郎（東京大）
- 10:47 108 Barred olivine コンドリュールに見られるリムの形成条件：純 forsterite 組成の場合
三浦 均*（東北大），横山 悅郎（学習院大），長嶋 劍（大阪大），塚本 勝男，スリバスタバアトゥル（東北大）
-
- 11:00 休憩
-

オーラルセッション2 最優秀発表賞選考 (座長:長沢 真樹子(東工大))

11:15 109 中性子および赤外線による氷結晶の構造解明と惑星科学への応用

荒川 雅* (東京大/原研), 鍵 裕之 (東京大), フェルナンデス-バカ ハイミ, チャコマコス ブライアン (オークリッジ研), 深澤 裕 (原研)

11:30 110 非晶質マグネシウムシリケイト微粒子の加熱結晶化実験

今井 悠太*, 小池 千代枝, 茅原 弘毅 (大阪大), 野口 高明 (茨城大), 土山 明 (大阪大)

11:45 111 渦による微惑星形成: 数値シミュレーション結果と解析解の比較

河村 恵里*, 渡邊 誠一郎 (名古屋大), 稲葉 知士 (早稲田大)

12:00 112 中質量赤色巨星による惑星飲み込み

國友 正信*, 生駒 大洋, 佐藤 文衛 (東工大), 勝田 豊 (北海道大), 井田 茂 (東工大)

12:15 113 氷微惑星の衝突破壊様式と破片速度分布に対する空隙率の効果

鳶生 有理*, 荒川 政彦 (名古屋大), 保井 みなみ (原研)

12:30 114 岩石への小金属球超高速衝突実験: 塵粒子のサイズ分布解析

高沢 晋*, 中村 昭子 (神戸大), 門野 敏彦 (大阪大), 荒川 政彦, 土肥 弘嗣 (名古屋大), 濑戸 雄介 (神戸大), 前田 誠 (広島大), 重森 啓介, 弘中 陽一郎, 境家 達弘, 佐野 孝好, 渡利 威士, 藤岡 慎介 (大阪大), 大野 宗祐 (千葉工大), 竹内 拓 (東工大)

12:45 昼食

14:00 ポスターセッション1 (最優秀発表賞選考)

15:00 休憩

オーラルセッション3 内惑星・ハビタブルプラネット (座長:今村 剛 (JAXA), 小林 憲正 (横浜国大))

- 15:15 115 惑星間空間ダスト分布と水星大気密度変動
亀田 真吾* (千葉工大), 鍵谷 将人, 岡野 章一 (東北大), 石丸 亮 (千葉工大)
- 15:26 116 金星到着目前の「あかつき」の現状と研究計画
今村 剛*, 中村 正人, あかつきチーム (JAXA)
- 15:37 117 金星大気のスーパーローテーションと「あかつき」への期待
高木 征弘 (東京大), 松田 佳久* (東京学芸大)
- 15:48 118 あかつき高次データアーカイブ
小郷原 一智* (JAXA), 神山 徹 (東京大), 佐藤 尚毅 (東京学芸大), 高木 征弘 (東京大), 今村 剛 (JAXA)
- 15:59 119 光化学反応によるイオの硫黄濃集機構
平田 直之*, 宮本 英昭 (東京大)
- 16:10 120 マグマオーシャンでの金属とシリケイトの分離過程における熱・元素の分配過程
市川 浩樹* (愛媛大), ラブロス ステファン (リヨン高等師範), 亀山 真典 (愛媛大)
- 16:21 121 同期回転惑星における太陽定数増大実験
納多 哲史* (神戸大), 石渡 正樹 (北海道大), 中島 健介 (九州大), 高橋 芳幸 (神戸大/CPS), 森川 靖大 (情報通信研究機構), 西澤 誠也, 林 祥介 (神戸大/CPS)
- 16:32 122 全球海惑星の炭素循環と気候進化
木村 亮*, 阿部 豊, 田近 英一, 玄田 英典 (東京大)
- 16:43 123 惑星のもつ初期の水の量を考慮したハビタブルゾーン内側境界の検討
小玉 貴則*, 玄田 英典, 阿部 豊 (東京大), ザンレ ケビン (NASA エイムズ研)
- 16:54 124 惑星間塵中の有機物と生命の起源 -たんぽぽ計画による検証-
小林 憲正*, サーカー パラッシュ, 小野 恵介, 伏見 英彦, 大林 由美子, 金子 竹男 (横浜国大), 三田 肇 (福岡工大), 藤田 ひかる, 長谷川 紀昭 (大阪大), キルコイン アーサー (ローレンス・バークレイ研), 山岸 明彦 (東京薬大), たんぽぽ ワーキンググループ (JAXA)
- 17:05 125 Japan Astrobiology Mars Project (JAMP): 火星表面におけるメタン酸化菌探査
山岸 明彦* (東京薬大), 吉村 義隆 (玉川大), 山下 雅道, 橋本 博文, 久保田 孝, 矢野 創, 春山 純一, 田端 誠 (JAXA), 小林 憲正 (横浜国大), 本多 元 (長岡技術科学大), 内海 裕一 (兵庫県立大), 才木 常正 (兵庫県立工業技術セ), 伊藤 隆 (理研), 宮川 厚夫 (静岡大), 浜瀬 健司 (九州大), 長沼 毅 (広島大), 三田 肇 (福岡工大), 戸野倉 賢一 (東京大), 佐々木 晶 (国立天文台), 宮本 英昭 (東京大)
-
- 17:20 ポスターセッション2
-
- 18:20 ポスターセッション with BEER
-

○ 10月7日（木）

オーラルセッション4 月1 (座長：大竹 真紀子 (JAXA), 山本 聰 (国環研))

- 9:00 201 月の軽元素：Ca 斜長石と微弱局在磁場
三浦 保範* (山口大)
- 9:11 202 月の斜長石の反射スペクトルにおける $1.25\mu\text{m}$ 吸収帯と含有微量 Feとの関係
神前 喬*, 佐伯 和人 (大阪大), 下林 典正 (京都大), 大竹 真紀子 (JAXA), 荒井 朋子 (千葉工大), 土・山 明 (大阪大)
- 9:22 203 月上部地殻の水平・垂直組成分布推定：かぐや (SELENE) 分光データを用いた解析
大竹 真紀子*, 春山 純一, 諸田 智克 (JAXA), 松永 恒雄, 山本 聰, 横田 康弘 (国環研), 中村 良介 (産総研), 廣井 孝弘 (ブラウン大), 武田 弘 (千葉工大), 小川 佳子 (会津大)
- 9:22 204 かぐや搭載スペクトルプロファイラが明らかにした月内部からのカンラン石表面分布とその起源
山本 聰* (国環研), 中村 良介 (産総研), 松永 恒雄 (国環研), 小川 佳子 (会津大), 石原 吉明 (国立天文台), 諸田 智克 (JAXA) 平田 成 (会津大), 大竹 真紀子 (JAXA), 廣井 孝弘 (ブラウン大), 横田 康弘 (国環研), 春山純一 (JAXA)
- 9:44 205 「かぐや」 ガンマ線分光計による月面観測から得た月全球における鉄およびチタン分布地図
唐牛 讓* (早稲田大), 小林 進悟, 晴山 慎 (JAXA), 山下 直之 (仮宇宙放射線研究セ), 長谷部 信行 (早稲田大), 柴村 英道 (埼玉県立大), 小林 正規 (千葉工大), 早津 佳那子, 長岡 央, 町田 二郎, 森田 幹雄, 藤井 至智 (早稲田大)
- 9:55 206 Procellarum KREEP Terrane 内部のクレータの岩石学的構造
杉原 孝充* (JAMSTEC), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 松永 恒雄, 横田 康弘 (国環研), 諸田 智克 (JAXA), 本田 親寿, 小川 佳子, 平田 成, 出村 裕英, 浅田 智朗 (会津大), 中村 良介 (産総研)
- 10:06 207 月周回衛星「かぐや」による分光観測データを用いた月 South Pole-Aitken 盆地内の鉱物分布
上本 季更* (JAXA/東京大), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 横田 康弘, 山本 聰 (国環研), 中村 良介 (産総研), 松永 恒雄 (国環研), 諸田 智克, 岩田 隆浩 (JAXA)
- 10:17 208 かぐや測月探査による南極エイトケン盆地の構造
佐々木 晶*, 石原 吉明, 花田 英夫, 荒木 博志, 松本 晃治, 野田 寛大, 菊池 冬彦, ホーセンス サンダー (国立天文台), 並木 則行 (千葉工大), 岩田 隆浩 (JAXA)
- 10:28 209 月面小型クレーターの光条消失時間
鈴木 静香*, 本田 親寿, 平田 成, 浅田 智朗, 出村 裕英, 小川 佳子, 北里 宏平, 寺園 淳也 (会津大), 諸田 智克, 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研)
-
- 10:40 休憩

オーラルセッション5 月2 (座長:諸田 智克 (JAXA), 荒井 朋子 (千葉工大))

10:55 210 月の海の二分性と時間変化

諸田 智克*, 春山 純一, 大竹 真紀子 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研), 本田 親寿 (会津大), 横田 康弘 (国環研), 木村 淳 (北海道大), 川村 太一 (東京大), 小林 進悟 (JAXA), 石原 吉明 (国立天文台), 武田 弘 (東京大)

11:06 211 月コペルニクスクレータに露出する地殻-マントル (?) 境界

荒井 朋子* (千葉工大), 大竹 真紀子 (JAXA), 山本 彩 (リモートセンシング技術セ), 杉原 孝充 (JAMSTEC), 中村 良介 (産総研), 和田 浩二 (千葉工大), 山本 聰, 松永 恒雄 (国環研), 春山 純一 (JAXA), 廣井 孝弘 (ブラウン大)

11:17 212 月地殻形成条件から制約するマグマオーシャン化学組成

酒井 理紗*, 久城 育夫, 永原 裕子, 小澤 一仁, 橋 省吾 (東京大)

11:28 213 月表層の熱伝導率についての実験的考察

坂谷 尚哉* (JAXA/東工大), 小川 和律 (JAXA), 飯島 祐一, 田中 智 (JAXA)

11:39 214 次期月探査計画 SELENE-2 の着陸地点検討報告

佐伯 和人* (大阪大), 荒井 朋子 (千葉工大), 荒木 博志, 石原 吉明 (国立天文台), 大竹 真紀子 (JAXA), 唐牛 讓 (早稲田大), 小林 直樹 (JAXA), 杉原 孝充 (JAMSTEC), 春山 純一 (JAXA), 本田 親寿 (会津大)

11:50 215 月惑星表層元素分析のためのガンマ線半導体検出器の開発

井上 洋介* (東京大/JAXA), 三谷 烈史, 小林 進悟, 飯島 祐一 (JAXA)

12:01 216 月面科学観測機器の熱制御システム (サバイバルモジュール) の開発

小川 和律*, 飯島 祐一 (JAXA), 坂谷 尚哉 (東工大), 田中 智 (JAXA)

12:12 217 将来の月地震探査におけるコアフェーズ検出可能性の評価

山田 竜平* (JAXA), Raphael Garcia, Marie Calvet (トゥールーズ大), 竹内 希 (東京大), 小林直樹 (JAXA), Phillip Lognonne (パリ地球物理研)

12:23 218 月・火星空洞探査について

春山 純一*, 西野 真木, 斎藤 義文, 橋本 博文 (JAXA), 白尾 元理 (惑星地質研), 小林 憲正 (横浜国大), 横堀 伸一 (東京薬大), 大島 泰郎 (共和化工), 山下 雅道, 諸田 智克, 小林 進悟, 高橋 太, 西堀 俊幸 (JAXA), 宮本 英昭 (東京大), 長谷川 利昭 (熊本大), 山岸 明彦 (東京薬大), 吉村 義隆 (玉川大), 横田 康弘 (国環研)

12:34 219 Planetary Data Access Protocol による惑星科学データ共有

山本 幸生*, 篠原 育 (JAXA), 笠羽 康正 (東北大)

12:45 昼食

12:50 月惑星探査の来る 10 年 第一段階トップサイエンス中間報告

14:00 ポスターセッション 3

オーラルセッション6 観測 (座長: 渡部 潤一 (国立天文台), 本田 充彦 (神奈川大))

15:10 220 はやぶさ探査機の大気圏再突入の地上観測

渡部 潤一*, 大川 拓也, 佐藤 幹哉 (国立天文台), 大西 浩次 (長野工業高専), 飯島 裕 (写真家), 加賀谷 穂 (Kagaya スタジオ), 田鍋 努 (写真家)

15:21 221 P/2010 A2 (LINEAR) の奇妙な形状について

菅原 賢 (神奈川工科大), 秋澤 宏樹* (姫路市星の子館), 渡部 潤一 (国立天文台)

15:32 222 潮汐分裂した近地球型小惑星の発見

阿部 新助* (台湾國立中央大學天文研), M. Granvik, R. Jedicke, R. Wainscoat, D. Tholen, L. Denneau (米ハワイ大), T. Grav (ジョンズホプキンス大), D. Kinoshita, C.K. Chang, W.P. Chen, W.H. Ip (台湾國立中央大學天文研)

15:43 223 22P/Kopff の観測とダスト空間分布構造

花山 秀和* (国立天文台), 石黒 正晃 (ソウル大), 渡部 潤一 (国立天文台), 猿楽 祐樹 (JAXA), 福島 英雄 (国立天文台)

15:54 224 AB Aur 原始惑星系円盤の pre-transitional disk 的性質

本田 充彦* (神奈川大), 井上 昭雄 (大阪産大), 岡本 美子 (茨城大), 片ざ 宏一, 藤原 英明 (JAXA), 深川 美里 (大阪大), 山下 卓也, 藤吉 拓哉, 田村 元秀, 橋本 淳 (国立天文台), 宮田 隆志, 酒向 重行, 左近 樹, 上塙 貴史, 尾中 敬 (東京大)

16:05 225 系外惑星大気に入射する光の屈折から生じる現象

山本 哲生* (北海道大), 中本 泰史 (東工大)

16:20 総会

17:20 最優秀研究者賞特別講演 (座長: 松田准一 (大阪大))

226 化学実験から惑星の多様性の理解を目指して: 惑星物理学から惑星化学、そして惑星生物学へ

関根 康人* (東京大)

18:30 懇親会

○ 10月8日（金）

オーラルセッション7 衝突・破壊過程 （座長：大野 宗祐（千葉工大），岡本 千里（JAXA））

- 9:00 301 真空環境下でのレーザー誘起絶縁破壊分光装置（LIBS）の定量精度
石橋 高*, 大野 宗祐, 亀田 真吾, 荒井 朋子, 小林 正規, 和田 浩二, 千秋 博紀, 後藤 和久, 並木 則行, 松井 孝典（千葉工大）, 長 勇一郎, 杉田 精司（東京大）
- 9:11 302 衝突蒸気雲の膨張過程における電子の役割
黒澤 耕介*, 杉田 精司（東京大）, 門野 敏彦（大阪大）
- 9:22 303 激光 XII号を用いた衝突蒸気雲内の硫黄酸化物の化学組成測定
大野 宗祐*（千葉工大）, 門野 敏彦（大阪大）, 黒澤 耕介, 羽村 太雅, 杉田 精司（東京大）, 重森 啓介, 弘中 陽一郎, 渡利 威士, 境家 達弘（大阪大）, 石橋 高, 松井 孝典（千葉工大）
- 9:33 304 衝撃波による酢酸の組成変化
小澤 萌*, 三村耕一（名古屋大）
- 9:44 305 鉄質小天体の衝突破壊強度-変形とサイズ依存
桂 武邦*, 中村 昭子, 濑藤 真人, 高部 彩奈（神戸大）, 長谷川 直（JAXA）, 三軒 一義（神戸大）
- 9:55 306 分化天体の衝突破壊および鉄隕石放出条件の解明
岡本 千里*（JAXA）, 荒川 政彦（名古屋大）, 長谷川 直, 田端 誠（JAXA）
- 10:06 307 衝突破片の形状と数値モデル
道上 達広*（福島高専）, 城野 信一（名古屋大）
- 10:17 308 強度支配域と重力支配域の移行領域における衝突クレーター実験
羽倉 祥雄*, 中村 昭子, 鈴木 紗子（神戸大）
- 10:28 309 スターダスト衝突トラックの模擬実験：突入物質サイズと密度依存性
新居見勲*, 土山 明, 門野 敏彦（大阪大）, 奥平 恭子（会津大）, 長谷川 直, 田端 誠（JAXA）, 中野 司（GSJ/AIST）, 上杉 健太朗, 竹内 晃久（JASRI/SPring-8）, 上畠 真之（大阪大）
-
- 10:40 休憩
-
- オーラルセッション8 ガス惑星・リング・原始惑星系円盤 （座長：森島 龍司（コロラド大）, 石津 尚喜（国立天文台））
- 10:55 310 天王星と海王星の内部構造に関する理解の現状
生駒 大洋*（東工大）
- 11:06 311 レーザー衝撃圧縮による高圧水素のオフユゴニオ計測と巨大ガス惑星の内部構造
佐野 孝好*, 尾崎 典雅, 境家 達弘, 重森 啓介（大阪大）, 生駒 大洋（東工大）, 木村 友亮, 宮西 宏併, 遠藤 恭, 城下 明之, 高橋 英樹, 實井 辰也, 弘中 陽一郎（大阪大）, 岩本 晃史（核融合研）, 門野 敏彦, 中井 光男（大阪大）, 奥地 拓生（岡山大）, 清水 克哉, 近藤 忠, 児玉 了祐, 三間 閔興（大阪大）

- 11:17 312 土星リング粒子の熱慣性
森島 龍司* (コロラド大), スピルカー リンダ (ジェット推進研), 大槻 圭史 (コロラド大/神戸大)
- 11:28 313 プロペラ構造を持たない小衛星
道越 秀吾*, 小久保 英一郎 (国立天文台)
- 11:39 314 木星・土星による小惑星の捕獲 -不規則衛星の起源-
樋口 有理可* (東工大), 岡本 尚也 (神戸大), 井田 茂 (東工大)
- 11:50 315 原始惑星系円盤初期における物質の降着年代分布
安達 俊貴*, 福井 隆, 倉本圭 (北海道大)
- 12:01 316 磁気的不活性領域を持つ原始惑星系円盤における乱流の垂直構造
奥住 聰* (名古屋大), 廣瀬 重信 (JAMSTEC)
- 12:12 317 電子再結合を考慮に入れた MHD シミュレーション：MRI による準定常ガス高密度領域の形成
加藤 真理子* (東工大), 奥住 聰 (名古屋大), アンダース ヨハンセン (ルンド大), 佐野 孝好 (大阪大)
- 12:23 318 原始惑星系円盤の温度構造
廣瀬 重信* (JAMSTEC), Neal Turner (JPL/Caltech)
- 12:34 319 原始惑星系円盤におけるダスト層重力不安定性の 3 次元数値シミュレーション
石津 尚喜* (国立天文台), 犬塚 修一郎 (名古屋大), 関谷 実 (九州大)
-
- 12:45 昼食
- オーラルセッション 9 惑星形成過程 (座長：田中今日子 (北海道大), 玄田英典 (東京大))
- 14:00 320 微惑星衝撃波による微惑星の蒸発
田中 今日子*, 山本 哲生 (北海道大), 三浦 均 (東北大), 長沢 真樹子, 中本 泰史 (東工大), 田中 秀和 (北海道大)
- 14:11 321 小さなコアを持つガス惑星形成：氷微惑星による大気汚染の効果
堀 安範*, 生駒大洋 (東工大)
- 14:22 322 中心星に照射された自転する固体球の温度分布の逐次近似解
関谷 実* (九州大)
- 14:33 323 微惑星集積期における惑星スピニ進化
松倉 大士* (東工大), 小久保 英一郎 (国立天文台), 井田 茂 (東工大)
- 14:44 324 巨大衝突による衛星形成：原始惑星の組成が円盤の蒸発率に与える影響
中島美紀 (東工大), 玄田 英典* (東京大), アスフォーグ エリック (カリフォルニア大), 井田 茂 (東工大)

14:55 325 格子法による3次元ジャイアントインパクトシミュレーション
森薦 宏太*, 玄田 英典, 阿部 豊(東京大), 小久保 英一郎(国立天文台)

15:06 326 N体シミュレーションによる巨大惑星周りの衛星系形成
荻原 正博*, 井田 茂(東工大)

15:17 327 軌道移動による平均運動共鳴軌道における惑星系の安定性
松本 侑士*, 長沢 真樹子, 井田 茂(東工大)

15:30 休憩
オーラルセッション10 火星・小惑星 (座長: 岩田隆浩 (JAXA), 平田成 (会津大))

15:45 328 宇宙測地学的手法による火星回転変動計測
岩田 隆浩* (JAXA), 原田 雄司(東京大), 石原 吉明(国立天文台), 松本 晃治, 菊池 冬彦, 佐々木 晶(国立天文台)

15:56 329 火星の地質作用におけるメタンと二酸化炭素ガスの役割
小松 吾郎* (ダヌンツィオ大/千葉工大), 石丸 亮, 並木 則行, 松井 孝典(千葉工大)

16:07 330 カプセルリエントリー=人工隕石落下の地上観測 — カプセルリエントリーに伴う衝撃波観測と将来への展望 —
石原 吉明* (国立天文台), 山本 真行(高知工科大), 平松 良浩(金沢大), 古本 宗充(名古屋大), 藤田 和央(JAXA), 阿部 新助(台湾國立中央大学)

16:18 331 「はやぶさ」回収カプセル受入れとキュレーション作業
藤村 彰夫*, 安部 正真 (JAXA), 中村 智樹(東北大), 野口 高明(茨城大), 岡崎 隆司(九州大), 矢田達, 石橋 之宏, 白井 康, 上野 宗孝, 向井 利典 (JAXA)

16:29 332 小惑星探査ミッション「はやぶさ2」の現状
吉川 真*, はやぶさ2 プリプロジェクトチーム (JAXA)

16:40 333 はやぶさ2: リターンサンプルのサイエンス
橋 省吾* (東京大), はやぶさ2 サンプリングチーム

16:51 334 はやぶさ2: 衝突・その場観測のサイエンス
高木 靖彦* (愛知東邦大), 中村良介(産総研), 北里 宏平(会津大), 岡田 達明, 矢野 創, 津田 雄一, 佐伯孝尚, 岡本 千里, 吉川 真, はやぶさ2 プリプロジェクトチーム (JAXA)

17:02 335 「分化型」小惑星の探査 ~プログラム探査としての小天体探査シリーズ~
岡田 達明*, 次期小天体探査 WG (JAXA)

ポスターセッション1(最優秀発表賞) 10月6日(水) 14:00-15:00

- P001 中性子および赤外線による氷結晶の構造解明と惑星科学への応用
荒川 雅* (東京大/原研), 鍵 裕之 (東京大), フェルナンデス=バカ ハイミ, チャコマコス ブライアン (オークリッジ研), 深澤 裕 (原研)
- P002 非晶質マグネシウムシリケイト微粒子の加熱結晶化実験
今井 悠太*, 小池 千代枝, 茅原 弘毅 (大阪大), 野口 高明 (茨城大), 土山 明 (大阪大)
- P003 渦による微惑星形成: 数値シミュレーション結果と解析解の比較
河村 恵里*, 渡邊 誠一郎 (名古屋大), 稲葉 知士 (早稲田大)
- P004 中質量赤色巨星による惑星飲み込み
國友 正信*, 生駒 大洋, 佐藤 文衛 (東工大), 勝田 豊 (北海道大), 井田茂 (東工大)
- P005 氷微惑星の衝突破壊様式と破片速度分布に対する空隙率の効果
鳴生 有理*, 荒川 政彦 (名古屋大), 保井 みなみ (原研)
- P006 岩石への小金属球超高速衝突実験: 塵粒子のサイズ分布解析
高沢 晋*, 中村 昭子 (神戸大), 門野 敏彦 (大阪大), 荒川 政彦, 土肥 弘嗣 (名古屋大), 濑戸 雄介 (神戸大), 前田 誠 (広島大), 重森 啓介, 弘中 陽一郎, 境家 達弘, 佐野 孝好, 渡利 威士, 藤岡 慎介 (大阪大), 大野 宗祐 (千葉工大), 竹内 拓 (東工大)

ポスターセッション2 10月6日(水) 17:20-18:20

- P007 10km/sを超える衝突速度でのクレーター形成実験
荒川 政彦* (名古屋大), 門野 敏彦 (大阪大), 土肥 弘嗣 (名古屋大), 高沢晋, 中村 昭子 (神戸大), 弘中 陽一郎, 渡利 威士, 境家 達弘, 佐野 孝好, 重森 啓介 (大阪大)
- P008 はやぶさ2搭載用中間赤外カメラ
岡田 達明* (JAXA), 中村 良介 (産総研), 関口 朋彦 (北海道教育大), 長谷川 直 (JAXA), 北里 宏平, 小川 佳子 (会津大), 福原 哲哉 (北海道大), 田口 真 (立教大), 今村 剛, 上野 宗孝, 和田 武彦 (JAXA), ヘルバート ヨルン (独宇宙航空研究セ)
- P009 「はやぶさ2」小型ランダの現状
岡田 達明, 矢野 創, 津田 雄一, 久保田 孝, 照井 冬人, 吉川 真 (JAXA), 平田 成, 出村 裕英 (会津大), トラミ ホ, ウィッテ ラース, フアン・ゾエスト ティム, スポーン ティルマン (独宇宙航空研究セ), ビブリン ジャン=ピエール (仏天体物理研)
- P010 高空隙率焼結体への弾丸貫入実験
岡本 尚也*, 中村 昭子 (神戸大), 長谷川 直 (JAXA)
- P011 小型ソーラーセイル実証機搭載 PVDF式大面積ダストモニタに対する固体微粒子衝突の校正・評価
岡本 千里*, 矢野 創 (JAXA), 田中 真 (東海大), 長谷川 直, 田端 誠 (JAXA), 岩井 岳夫 (東京大), 奥平 恭子 (会津大), 尾川 順子 (JAXA), 平井 隆之 (総研大)

- P012 H₂-H₂O 雰囲気中での Mg-Si-O-H 系凝縮実験に向けた真空実験装置の開発**
片岡 香織*, 橘 省吾, 瀧川 晶, 永原 裕子 (東京大)
- P013 高出力レーザーによる飛翔体の加速と衝突実験：可視高速カメラおよび X 線カメラによる衝突光の撮影**
門野 敏彦*, 境家 達弘, 弘中 陽一郎, 渡利 威士, 佐野 孝好 (大阪大), 荒川 政彦 (名古屋大), 高沢 晋, 桂 武邦, 中村 昭子 (神戸大), 大野 宗祐 (千葉工大), 黒澤 耕介, 羽村 大雅, 杉田 精司 (東京大), 重森 啓介 (大阪大)
- P014 はやぶさ 2 搭載用近赤外分光計の開発**
北里 宏平* (会津大), 安部 正真 (JAXA), 高木 靖彦 (愛知東邦大), 松永 恒雄 (国環研), 大竹 真紀子 (JAXA), 高遠 徳尚 (国立天文台), 廣井 孝弘 (ブラウン大)
- P015 月表面探査ガンマ線分光計の元素定量分析の性能**
小林 進悟*, 三谷 烈史 (JAXA), 唐牛 讓, 長谷部 信行 (早稲田大), SELENE2 GNS Team
- P016 気化によるエジェクタ速度への影響に関する衝突実験**
高部 彩奈*, 中村 昭子, 濑藤 真人, 桂 武邦 (神戸大), 長谷川 直 (JAXA)
- P017 次期月探査計画 SELENE-2 の検討状況**
田中 智*, 飯島 祐一, 三谷 烈史, 大嶽 久志, 小川 和律, 小林 直樹, 橋本 樹明, 星野 健, 大槻 正嗣 (JAXA), 木村 淳, 倉本 圭 (北海道大)
- P018 月・惑星データ協働解析システム (WISE-CAPS) と月面地名検索システムの現状報告**
寺薙 淳也* (会津大), 中村 良介, 山本 直孝, 児玉 信介 (産総研), 出村 裕英, 平田 成, 小川 佳子, サハシュ バーラ (会津大)
- P019 高強度レーザーを使った衝撃圧縮回収実験と惑星科学への応用**
永木 恵太*, 境家 達弘, 近藤 忠, 門野 敏彦, 弘中 陽一郎, 重森 啓介 (大阪大)
- P020 レゴリス層への弾丸貫入実験**
中村 昭子*, 濑藤 真人 (神戸大)
- P021 衛星アトラスのクレーターと地表更新プロセス**
平田 直之*, 宮本 英昭 (東京大)
- P022 ラブルパイル構造を持つ天体の衝突破壊の特徴**
藤田 幸浩*, 荒川 政彦, 嶽生 有理 (名古屋大), 長谷川 直 (JAXA)
- P023 圧子圧入試験による氷・岩石混合物の局所的変形強度の計測**
保井 みなみ* (原研), 荒川 政彦 (名古屋大)
- P024 固体天体用地中レーダー (GPR) システムの検討と開発**
渡邊 宏弥* (東京大), 春山 純一, 西堀 俊幸 (JAXA), 真鍋 武嗣 (大阪府大), 宮本 英昭 (東京大)

P025 はやぶさ地球帰還カプセルの分光観測

阿部 新助* (台湾國立中央大學天文研), 藤田 和央 (JAXA), 柿並 義宏 (台灣國立中央大學天文研/國立中央大學), 飯山 青海 (大阪市立科学館), 鈴木 雅晴 (五藤光学研究所)

P026 メインベルト彗星 P/2010 A2 (LINEAR) のダスト雲の形状観測

石黒 正晃* (ソウル大), 花山 秀和, 渡部 潤一, 福島 英雄 (国立天文台), 猿楽 祐樹, 白井 文彦 (JAXA), 鳴沢 真也, 坂元 誠, 松田 健太郎, 丹羽 隆裕 (西はりま天文台), 秋澤 宏樹 (姫路市星の子館), 大坪 貴文 (東北大), 黒田 大介, 柳澤 顯史 (国立天文台)

P027 オールト雲起源新彗星の力学進化の予備的計算

伊藤 孝士* (国立天文台), 樋口 有理可 (東工大)

P028 月の詳細地形 (DTM) から推定されたグーラベン下のマグマだまり

上岡 周平*, 山路 敦, 佐藤 活志 (京都大), 春山 純一, 大竹 真紀子 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研)

P029 月の海の層構造：MI データを用いた LRS 反射面の同定

押上 祥子*, 奥野 信也, 山口 靖 (名古屋大), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 小野 高幸 (東北大)

P030 巨大氷衛星の内部分化における鉱物脱水作用の寄与

木村 淳*, 倉本 圭 (CPS/北海道大)

P031 海惑星の大気構造：大気中での中心星放射の吸収が射出限界に与える影響について

黒川 宏之*, 中本 泰史 (東工大)

P032 破壊により決まる原始惑星の最終質量

小林 浩, クリコフ アレクサンダー (イエナ大), 田中 秀和* (北海道大)

P033 ダークマターハローによる太陽系天体の軌道進化

鈴木 貴之*, 樋口 有理可, 井田 茂 (東工大)

P034 乱流円盤内での微惑星集積

台坂 淳子*, 小久保 英一郎 (国立天文台)

P035 ガス惑星周りの原始衛星系ガス円盤の構造

谷川 享行* (CPS/北海道大), 大槻 圭史 (CPS/神戸大), 町田 正博 (国立天文台), 小林 浩 (イエナ大)

P036 高軌道傾斜角メインベルト小惑星を対象とする広域サーベイ観測

寺居 剛*, 伊藤洋一 (神戸大)

P037 火星大気中の Ne と Ar の濃度及び同位体比の進化

野口 聖彦*, 柄澤 史也, 橘省吾, 阿部 豊, 田近 英一 (東京大)

P038 火星の砂丘上のガリー: 南半球中高緯度帯における形態的特徴と分布

前田 俊介*, 宮本 英昭 (東京大)

P039 月における最後の海の火成活動

諸田 智克*, 春山 純一, 大竹 真紀子 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研), 本田 親寿 (会津大), 横田 康弘 (国環研), 木村 淳 (北海道大), 小川 佳子, 平田 成, 出村 裕英 (会津大), 岩崎 晃 (東京大), 杉原 孝充 (JAMSTEC), 佐伯 和人 (大阪大), 中村 良介 (産総研), 小林 進悟 (JAXA), 石原 吉明 (国立天文台), 武田 弘 (東京大), ビージンガー ハラルド (ヴィルヘルム大)

P040 光学的に薄い円盤内でのタイプI惑星移動

山田 耕* (CPS), 稲葉 知士 (早稲田大)

P041 金星大気の 1km スケール擾乱の数値実験

山本 勝* (九州大)

P042 すばる望遠鏡+Suprime-Camによる太陽系小天体のスリットレス分光観測

吉田 二美*, 八木 雅文, 小宮山 裕, 仲田 久徳, 古澤 久徳 (国立天文台), 大野 貴博 (東京大/文科省), 岡村 定矩 (東京大), 中村 士 (帝京平成大)

P043 系外水惑星の自転軸傾斜角が気候に及ぼす影響

渡邊 吉康*, 田近 英一 (東京大)

P044 ALMA(Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)初期運用へ向けて

齋藤 正雄*, 西合 一矢, 奥村 幸子 (国立天文台)

原始惑星系円盤におけるダストアグリゲイトの焼結領域

°城野 信一¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

原始惑星系円盤に漂うダストグレインを材料として固体惑星は形成される。ダストグレインは主としてシリケイト、有機物、氷から構成される。氷の組成は主として H_2O であるがその他の成分も星間雲の観測から数多く検出されている。このような氷をまとったダストグレインからダストアグリゲイトが形成されると、ガス抵抗により中心星方向へと落下していく。落下すると温度が上昇するため、主として蒸発+再凝縮により焼結が進行し、グレイン間のネックへと水分子は移動する。このプロセスは氷表面の曲率に依存して進行する。

本研究ではネックの成長に要する時間スケールを数値シミュレーションにより求め、その結果を用いて原始惑星系円盤において焼結が進行する領域を求めた。氷の組成に応じて焼結領域は異なり、温度が一定の場合ではそれぞれ数 AU の幅をもつ。温度に数 10K 程度の揺らぎがあると、原始惑星系円盤全域において焼結が進行することが明らかとなった。

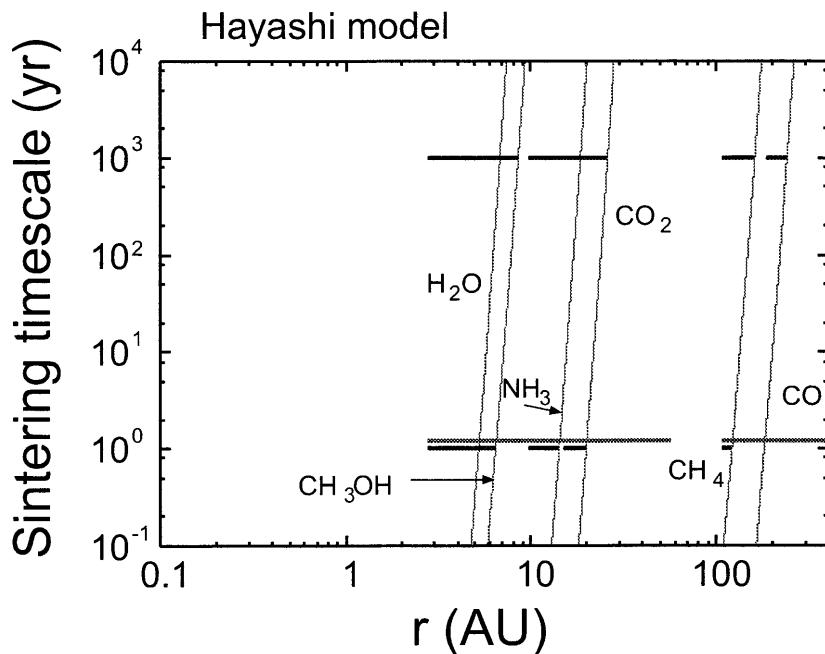


図 1: 焼結に要する時間。横軸は太陽からの距離、縦軸が焼結時間。上部横線は焼結時間が 1000 年以下となる領域を示し、下部横線は焼結時間が 1 年以下となる領域を示す。下部横線のうち、上の線は 30K の温度揺らぎが存在した場合。

蒸発・凝縮による氷微粒子のサイズ個数分布進化

○ 黒岩 琢登¹、城野 信一¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

惑星形成の初期段階では原始惑星系円盤中のサブ μ m サイズのダストが衝突合体成長して数 km サイズの微惑星ができたと考えられている。現在の数値計算では氷ダストアグリゲイトを考えることによってサブ μ m サイズのダストが合体成長し、数 km サイズまで成長することができると考えられている。この研究に限らずほとんどの衝突合体の数値計算ではその構成粒子である氷微粒子が常にサブ μ m で一定としている。しかし、snow line より外側では氷と水蒸気が共存し、その水蒸気圧は飽和水蒸気圧によって決まっている。そのような状態では氷表面で凝縮と蒸発を繰り返しており、時間と共に氷粒子のサイズが変化することが考えられる。もし氷粒子が大きくなると粒子同士の付着することのできる最大の速度は小さくなり、また付着応力は小さくなるのでダストアグリゲイトを形成しにくくなることが考えられる。

そこで本研究では蒸発・凝縮による氷球のサイズ個数分布の時間進化を数値計算によって求め、そのタイムスケールを求める。

本研究の数値計算の結果、氷球のサイズ個数分布は図 1 のように時間変化し、解析解とよく一致した。また snow line 付近の温度の高い領域で氷球のタイムスケールが氷球の衝突のタイムスケールよりも小さくなつた。このような領域ではサイズが大きいために氷球同士が衝突したとしても付着することができない可能性がある。

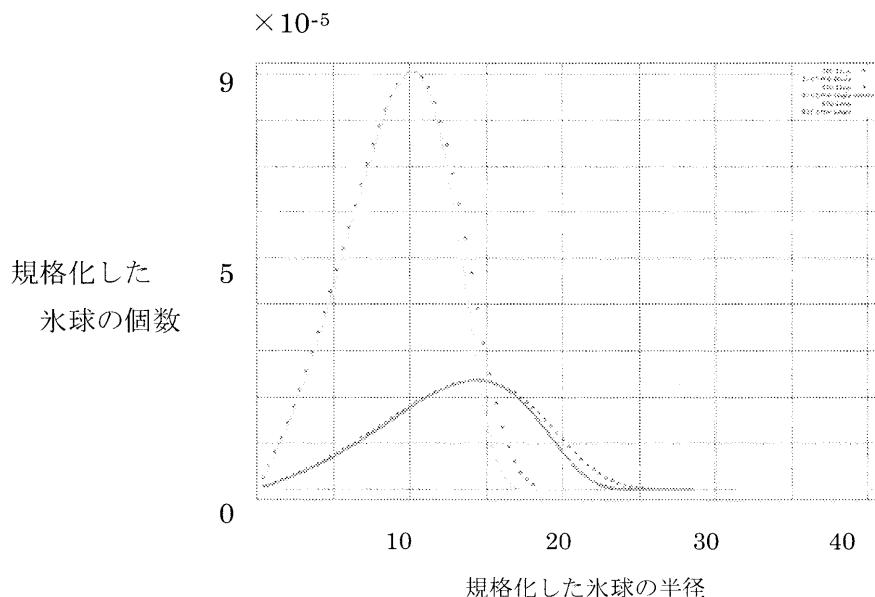


図 1

氷球のサイズ個数分布。横軸は典型的な大きさで規格化した氷球の半径、縦軸は初期の個数で規格化した氷球の個数。丸は規格化した時間で 200 時間後、三角は 400 時間後、中抜きの丸は 800 時間後である。また、実線は解析解である。

ダストアグリゲイトの衝突シミュレーション： サイズ比の効果

○和田浩二¹, 田中秀和², 陶山徹³, 木村宏⁴, 山本哲生²

¹千葉工業大学惑星探査研究センター

²北海道大学低温科学研究所, ³新潟県立自然科学館, ⁴CPS

原始惑星系円盤内においてダストアグリゲイトが衝突付着成長できるかどうかは、微惑星形成を考える上で重要な問題である。とりわけ、原始惑星系円盤内においてダスト同士の衝突速度が数 10m/s にも達する（乱流のない林モデル円盤で 50m/s）ことを考えると、そのような高速衝突におけるダストの付着成長の可能性が問われる。これまで我々の行ってきた衝突シミュレーションによれば、氷粒子からなるダストアグリゲイトであれば成長できるかどうかの臨界衝突速度はおよそ 50m/s であることが示され、氷ダストであれば原始惑星系円盤内で成長可能であることが示唆された[1]。しかし、シリケイト粒子からなるダストアグリゲイトの臨界衝突速度は氷ダストのそれより一桁小さいため、内惑星領域で重要となるシリケイトダストの付着成長は厳しいものがある。ただし、以上の結果はすべて同じサイズ（質量）のアグリゲイト同士の衝突シミュレーションによって得られたものである。異なるサイズのアグリゲイト同士の衝突においては、臨界衝突速度は大きくなることが予想される。というのも、等サイズ同士であっても正面衝突であれば臨界速度が上昇する傾向がみられ、サイズ比が異なれば多少オフセット衝突になっても正面衝突に近い衝突が実現されると考えられるからである。

そこで本研究では、臨界衝突速度のサイズ比依存性を調べることを目的に異なるサイズ同士のアグリゲイトの衝突シミュレーションを行った。衝突させるアグリゲイトは比較的密な構造である BPCA アグリゲイトとし、サイズ比、衝突速度、衝突パラメーターを様々に振る。これまでのところ、サイズ比が大きくなるほど衝突による合体成長は促進される傾向が見られたが、臨界衝突速度の上昇にはほとんど寄与しないという結果が得られつつある。このことは、サイズ比を考慮してもシリケイト粒子からなるダストアグリゲイトの成長は依然として困難であることを示唆するものである。発表においてはシミュレーションの詳細を述べるとともに得られたサイズ比依存性がダスト成長に及ぼす影響について議論を行う予定である。

[1] Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T. 2009, ApJ 702, 1490.

初期太陽系円盤の揮発性元素同位体進化

小嶋 稔 (東京大学)

太陽系元素同位体組成の推定は、非揮発性元素については CI コンドライトの分析値、希ガスや酸素の同位体比組成は太陽風 (Solar Wind, 以下 SW と略記; 月表層砂や Genesis—試料) の分析から推定されている。後者の場合、太陽の平均同位体組成 (つまりは初期太陽系星雲の同位体比組成) を結論するには SW と太陽との間の同位体比分別を知る事が前提となる。現在この同位体分別はよく分かっていない。本講演では希ガスと酸素の場合につき SW—太陽・間の同位体分別そして同位体比進化につき新たな提案を行う。

太陽系内の最も基本的な希ガスとして SW 希ガスと Q 希ガスが一般に認められている。Genesis 試料で求められた SW の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ は $4.64\text{e-}4$, 他方 Q 希ガスの ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ は $1.23\text{e-}4$ と報告されている。この違いは太陽形成直前に起こった $\text{D} + \text{p} \rightarrow {}^3\text{He}$ (D-燃焼反応) に依ると考えられている (1)。明らかに Q 希ガスが SW He より先に太陽系星雲内に誕生したより始原的な He である事を示している。我々は最近の日震学や分子雲のスペクトロ分析値を用い D-燃焼反応による ${}^3\text{He}$ 増加を計算し、これから現在の太陽 He として ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = 3.98\text{e-}4$ の値を推定した。この値は Genesis の SWHe の値より 1 2 % 程少さい。我々はこの差は太陽—He と SW—He 間のレーリー蒸発タイプの質量依存型同位体分別に依る、と結論する。

この結果を酸素同位体比に適用すれば SW 酸素の ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ (GENESIS の分析値) は、太陽組成に比べ約 6%程度軽い方に分別している事になる。酸素の場合、太陽光彩圏には可成りの CO 分子 ($> 20\%$) の存在が指摘されており (2)、上記の質量依存性同位体比分別に加え CO 分子の分解に伴う質量非依存性同位体分別の可能性も考慮する必要があるかも知れない。

1. Geiss J. and Reeves H., Astron. Astrophys., 18, 126-32, 1972.
2. Asplund M. et al., Ann. Rev. Astron. Astrophys., 47, 481-522, 2009.

酸素同位体異常を担った隕石有機物

○橋爪 光¹、高畠直人²、奈良岡 浩³、佐野有司²

¹阪大・理、²東大・大気海洋研、³九大・理

始原隕石中には有機物が豊富に含まれるが、それらの起源は明らかではない。これらの有機物の一部には、隕石全岩、あるいは、地球組成とは異なる、大きな水素・窒素・炭素同位体比異常が存在することが以前から知られていた。これらの同位体比異常は有機物生成時の化学反応に伴う同位体分別が原因ではないかと考えられている。同位体分別の過程が正確に解読できれば、宇宙空間での化学反応、つまり、太陽系内で最初に固体惑星物質が生成した反応素過程を解明できるかもしれない。しかしながら、有機物は脆弱な固体物質である。隕石に含まれる大部分の有機物は、小天体内での様々な変成・変質作用のせいで、宇宙空間における物質生成時に獲得した同位体信号をほとんど失ってしまっている可能性が高い。しかし、最近の高度な極微小領域質量分析技術 - 同位体イメージング - により、初期同位体信号をそのまま保持している有機物微粒子が、始原隕石中にごくわずかだが存在していることが示された（例えば、Busemann et al., 2006; Nakamura-Messenger et al., 2006）。

有機物は CHONS と書きならわされるように、安定同位体を複数持つ多数の元素から構成される。われわれは、これらの同位体情報を組み合わせることにより、有機物の形成環境を詳しく理解することを目指した。特に、本研究の中心的な課題は、有機物中の酸素同位体組成の解読である。酸素は他の主要有機元素 (C,H,N) が 2 つずつしか安定同位体を持たないのに対して、3 つ同位体を持つ。これは、酸素同位体異常がもし見つかれば、従来の C,H,N 同位体研究に比べて、物質形成過程により強い制約条件を課せることを意味する。

我々は南極産炭素質コンドライト隕石 Yamato-793495 (CR2) から抽出した酸不溶有機物 (IOM) を分析した。東京大学・大気海洋研究所に備わる NanoSIMS50 を用い、水素・窒素・炭素・酸素の同位体イメージングを進めた。水素・窒素のイメージングからは、先行研究を良く再現した高い δD , $\delta^{15}N$ を持つ「ホット・スポット」の検出に成功した。本研究の成果として特筆すべきは、酸素・炭素同位体イメージングの結果である。領域の一部において、 $^{17,18}O/^{16}O$ が、イメージング領域全体の平均組成に比べて最高約 50 % 高い値が検出された。酸素同位体イメージングとは独立に行われた炭素イメージングの結果を酸素同位体イメージと重ね合わせると、 $\delta^{17,18}O$ 異常と $\delta^{13}C$ 異常が全く同じ領域で見られ、2 元素の同位体異常がカップリングしている事がわかった。また、酸素・炭素スポットと水素・窒素スポットはデカップリングしていることもわかった。すなわち、本研究で用いた隕石中有機物には、おそらくは起源の異なる 2 種類の有機物が混在していることがわかった。講演では、得られた同位体比異常の組み合わせを用い、固体惑星物質間に広範に見られる同位体比異常の原因物質としての有機物の起源について議論する。

μ -XANESによる炭素質コンドライト有機物の直接分析

○藪田ひかる¹, 三田肇², 小林憲正³, 長谷川紀昭⁴, A. L. David Kilcoyne⁵

¹阪大宇宙地球, ²福岡工大工, ³横浜国大工, ⁴阪大超高压電顕セ, ⁵Advanced Light Source, LBNL

【序論】従来の隕石有機物研究で適用してきた手法は、試料から有機物を分離し分析するものが殆どであった。しかし最近では、スターダスト計画の一環で彗星塵中の有機物が直接分析されるなど(Sandford et al. 2006; Cody et al. 2008), 試料からの分離操作を必要とせずに有機物の化学分析を可能にする種々の顕微分析法が積極的に利用されている。走査型透過X線顕微鏡(STXM)を用いたマイクロ-X線吸収端近傍構造(μ -XANES)分光法は、ミクロンサイズ以下の試料の元素組成だけでなく化学状態の定量に優れた分析法である。本研究では、 μ -XANESによる炭素質コンドライトの直接分析を試み、バルク状態からの有機物の検出そして得られたCarbon- (C-) XANESスペクトルとMurchison隕石から分離した酸不溶性有機物(IOM)との比較を行った。

【実験】Murchison隕石粉末(バルク試料)を硫黄に包埋し約100 nmの薄片にした後、SiO支持膜付TEM用グリッドに乗せた状態でSTXM用の試料プレートに設置し、 μ -XANES測定を行った。測定はローレンス・バークレー国立研究所、Advanced Light Source、ビームライン5.3.2.で行った。

【結果と考察】炭素の1s吸収端前後の2つの異なるX線エネルギーでMurchison隕石のバルク試料を走査し、透過したX線強度の差から、試料中の炭素の分布を明らかにした(Carbon mapping)。バルク試料から識別されたある炭素領域のC-XANESスペクトルでは、芳香族炭素、芳香族ケトンの、カルボニル炭素の各1s → π^* 遷移に相当するエネルギー吸収ピークが検出された。これらのスペクトルからは、IOMのC-XANESスペクトルとほぼ同様の官能基が検出された(Fig.)。しかし、1) IOMよりバルク試料の方が、芳香族炭素のピーク強度が相対的に高い、2) バルク試料の芳香族炭素の吸収に相当するエネルギーがIOMのそれに比べてシフトしている、3) バルク試料では、エテル／アルコールに相当するピークが検出されなかった、といった相違点が見出された。バルク試料中の異なる領域で取得されたC-XANESスペクトルとの比較では、検出された官能基の種類はほぼ同じだが、その割合にはIOMで報告されているもの以上の多様性が見られた。これは、隕石母天体における有機物の化学構造や存在形態の不均一性が、IOMの分離操作では失われるがバルク測定により観測できることを示唆している。

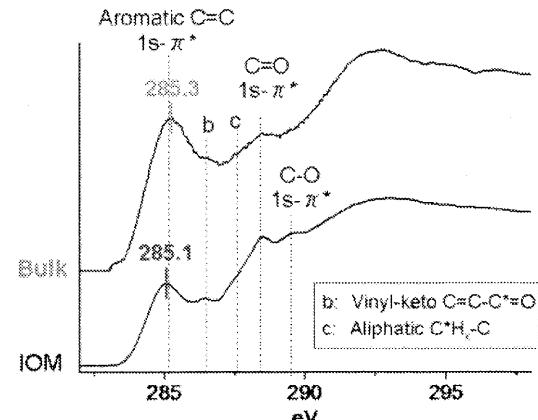


Fig. Comparison of the C-XANES spectra between bulk matrices and insoluble organic matter from Murchison meteorite.

南極ドームふじ氷床コア中の微小スフェリュールの形成過程

○上相真之¹、三澤啓司²、鈴木宏二郎³

¹大阪大学、²国立極地研究所、³東京大学

南極のドームふじ氷床中のボーリングコアの中から、2つのダストリッチな層が発見された。この二つの層のうち、とくにDF2691と名付けられた層には多数の極めて小さな($100\mu\text{m}-0.1\mu\text{m}$)スフェリュールが含まれており、さらには数百μmの集合体を形成している。このようなスフェリュールの集合体がどのように形成されたかはわかつておらず、大気圏突入時、およびその母天体の重要な情報を保持していると考えられる (Misawa et al., 2010)。

Uesugi (2010)では、Love and Brwonlee (1991)の数値モデルを発展させた計算を行い、このダストの形成環境を調べた。この結果、 $1\mu\text{m}$ 以下のダストは、地球に突入する際の速度が極めて大きないと溶融できず、さらに太陽系の重力圏での可能な相対速度では溶融できる突入速度を実現出来ないことがわかった。小さなダストは慣性が小さく、密度の極めて薄い大気圏の上層でも徐々に減速される。この際は 温度が上がるまえに放射冷却で冷却されるため、摩擦加熱が効きにくい。さらに、大気圏下層部のガス密度の濃い領域ではすでに突入速度を失っており、結局、溶融に必要な温度まで加熱されることがなくなる。Uesugi (2010)ではスフェリュール形成の可能なモデルとして、ダストが単体で大気圏に突入したのではなく、数mm以上の母天体が大気圏に突入したというモデルを提案した。このmmサイズの母天体がもともと $1\mu\text{m}$ 以下のダストの集合体であり、極めてもろいならば、大気圏突入の際に、大気圏下層のガス密度の高い高度でばらばらに分解し、 $1\mu\text{m}$ 以下のダストの集団になることは可能である。また、この領域で高い突入速度を維持できるので、内部の低温なダストも瞬間的に高温に加熱され、スフェリュールを形成することも可能である。これらの特徴は彗星起源のダストに一致しており、実証できれば、スフェリュールの起源の有力な候補となる。

しかし、母天体がばらばらに分解する前に隕石が溶けてしまうと、珪酸塩メルトの表面張力が非常に強いために $1\mu\text{m}$ 以下の粒に分裂することはできない。また、すべての隕石がばらばらになるのならば、他では小さなスフェリュールが回収されない理由が説明出来ない。そこでわれわれは、隕石が溶けずにばらばらの破片に分解することが可能なのかどうか、可能ならば、それは隕石の種類など、どのような条件によって変わるので、隕石の種類を変えた風洞実験によって検証を行った。この結果、Allendeのような固い岩石質の隕石では破壊よりも先に溶融がおこり、TagishLakeのようなもろい隕石では、破壊がおこることがわかった。

この結果から、ドームふじ氷床コアのスフェリュールが、非常にもろい母天体の破壊によって形成されることは可能であるということが示された。今後はサブミクロンのスフェリュールの形成、および凝集過程を調べ、その形成過程を探る。

References

- Misawa et al. (2010) Earth and Planetary Science letters 289, 287-297
- Uesugi (2010) Proceedings of Antarctic meteorites conference XXXIII, 73-74.

Barred olivine コンドリュールに見られるリムの形成条件：純 forsterite 組成の場合

○三浦均¹, 横山悦郎², 長嶋剣³, 塚本勝男¹, Atul Srivastava¹

¹東北大・理, ²学習院大・計セ, ³阪大・工

コンドリュールに見られる barred olivine (BO) 組織には、球粒表面を取り巻くりムと、球粒内部のバーという、二重構造が見られる^[1]。バー（樹枝状結晶）は、1990 年のメルト結晶化実験によって再現されていた^[2]。一方、リム＆バーの二重構造は、1999 年に塚本らが純 forsterite (Mg_2SiO_4) 組成メルトを用いて^[3]、2001 年に土山らのグループが FeO-rich 組成メルトを用いて^[4, 5]、それぞれ再現に成功している。土山らは、リムの成因として、メルト表面蒸発に伴う気化熱冷却により表面温度が局所的に下がり、その大きな結晶化駆動力（過冷却度）によってメルト表面が素早く結晶化した結果であると主張した^[5]。しかしながら、彼らの実験において、リムが形成するだけの過冷却度が得られていたのかどうかについては議論されていなかった。そこで、本研究では、リム形成条件を明らかにすることを目的としたメルト結晶成長数値シミュレーションを行なった。

数値計算手法として、フェーズフィールド法を採用した^[6]。純 forsterite 組成メルト（半径 250 μm ）を仮定し、簡単のため結晶成長カイネティクスや結晶-メルト界面張力の異方性は無視した。メルトは表面冷却によって急冷しており、内部には冷却速度に対応した温度勾配が生じる。メルト表面温度が融点を 300 K 下回ったとき（過冷却）に、メルト表面の一点にて結晶化が生じたという想定の元に計算を実施した。その結果、リムが形成するのは、メルト内部と表面に ~100 K 以上の温度差が生じているときであることが分かった。これは、メルト表面に沿って成長するリムの成長タイムスケール（大回りだが、成長速度は大きい）と、メルト内部を成長するバーの成長タイムスケール（最短距離でメルトの反対側に到達するが、メルト中心は温度が高いため成長速度は小さい）の比較によって決まる。メルト温度分布の解析解によると、半径 250 μm の純 forsterite 組成メルト内部に ~100 K の温度差を生じさせるためには、~1000 K/s 以上の冷却速度が必要であることが分かった。土山らの実験では、メルトの冷却速度は比較的小さい (1000 K/hr) ため、~100 K もの温度差は生じないだろう。一方、塚本らの実験でリムが形成したのは、メルトを浮遊させるためのガス（室温）による強制冷却が一因となった可能性がある。

参考文献 : [1] Weisberg, *J. Geophys. Res.* **92**, E663 (1987). [2] Lofgren & Lanier, *GCA* **54**, 3537 (1990). [3] Tsukamoto et al., *Antarct. Meteorit.* **24**, 179 (1999). [4] Osada et al., *LPSC abst#1334* (2001). [5] Tsuchiyama et al., *GCA* **68**, 653 (2004). [6] Wang et al., *Physica D* **69**, 189 (1993).

中性子および赤外線による氷結晶の構造解明と惑星科学への応用

○荒川雅^{1,2}, 鍵裕之¹, Jaime A. Fernandez-Baca², Bryan C. Chakoumakos², 深澤裕³¹東大院・理, ²Oak Ridge National Laboratory, ³日本原子力研究開発機構

太陽系の氷の多くが結晶として存在することが、実験と天体観測の双方から明らかにされている。宇宙に存在する氷はどのような結晶構造で存在しているのだろうか。

我々が普段目にする氷は氷 Ih と呼ばれ、図 1(a) に示す構造を取っている。酸素原子間の水素原子は、それぞれの位置に 1/2 の確率で存在する。この状態を水素原子の無秩序配置と呼ぶ。一方、氷 XI は図 1(b) に示す構造で、水素原子は酸素原子の間の 1 力所のみに存在する。この状態は水素の秩序配置と呼ばれる。結晶全体が分極するため、氷 XI は強誘電体となる。中性子回折実験に基づき、氷 XI は天王星などに相当する低温下で生成し^{1,2}、宇宙には 1 mmあたり 1 万 V 近い電位差を持つ強誘電性氷が存在する可能性が指摘されている。

本研究では、氷 XI の核形成と結晶成長、宇宙での氷粒子の成長について理解するため、微量の不純物を添加した氷(99.95%重水置換)の中性子回折を測定し、その時間変化を観測した。試料を 60–65 K に保つと氷 XI が生成し、生成した氷 XI を 76 K 以上に保つと氷 Ih に相転移した。次に、一度氷 XI を経験した氷 Ih を冷却すると、再び氷 XI への相転移が起こった。この時、過去に氷 XI を経験した氷 Ih からは、初めての氷 XI 生成よりも短時間で多量の氷 XI が生成した²。さらに、これまでに報告された氷 XI の生成温度 (60–65 K)¹ より高温の 72 Kにおいても、氷 XI の生成が観測された。このことは、氷 XI を経験した氷 Ih には微小な水素秩序領域の“メモリー”が存在し、氷 XI 成長の核として働いたことを示している。我々は、この現象を“水素秩序化のメモリー効果”と名づけた。微小な水素秩序領域は 150 K 程度まで存在すると考えられ、宇宙空間の広範囲に微小な水素秩序氷が存在し、氷粒子の成長過程に影響を与えた可能性が示された。

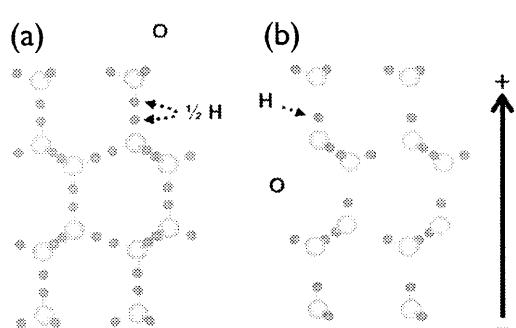


図 1. 氷 Ih(a)と XI(b)の結晶構造。氷 XI は結晶全体が電気的に偏っており、強誘電体である。

さらに、宇宙における氷 XI 存在の直接的な証拠を得るためにには、実験室で生成した氷 XI の赤外スペクトルの特徴について詳しく理解することが不可欠である。そこで、薄膜氷の赤外吸収スペクトル測定³を行った。その結果、水素秩序化に伴い、水素の挙動に敏感なピークの幅に顕著な減少が観測された。このことから、天体望遠鏡や探査機による赤外線観測により、宇宙空間における氷 XI の存在を証明する道を切り拓くことができた。

本発表では、天体内部に相当する高圧下での氷の中性子回折実験⁴についても報告する。

参考文献

- 1) Fukazawa H., Hoshikawa A., Ishii Y., Chakomakos B. C., and Fernandez-Baca J. A., *Astrophys. J.* **653**, L57–60, 2006.
- 2) Arakawa M., Kagi H., and Fukazawa H., *J. Mol. Struct.* **982**, 111–114, 2010.
- 3) Arakawa M., Kagi H., and Fukazawa H., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **184**, 361–365, 2009.
- 4) Abe J., Arakawa M., Hattori T. et al., *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 043910, 2010.

非晶質マグネシウムシリケイト微粒子の 加熱結晶化実験

Crystallization experiments of amorphous
magnesium silicates

○今井 悠太¹, 小池 千代枝¹, 茅原弘毅¹, 野口 高明², 土山 明¹

¹大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 ²茨城大学理学部理学科

赤外線天文観測と室内実験結果の比較から、晚期星や若い星の星周領域において非晶質シリケイトだけでなく、オリビン($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$) やパイロキシン($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$)を主とする結晶質シリケイトの存在が確認されている。一方、星間空間のダストはほぼ完全に非晶質であるとされているため、若い星の星周の結晶質シリケイトは、星間空間のダストが原始惑星系円盤に取り込まれ、何らかの加熱を受けることにより結晶化したものと考えることができる。また晚期星の星周においても、質量放出によりガスから非晶質のダストが凝縮し、それが加熱により結晶化するというプロセスが考えられる。室内実験によって非晶質シリケイトの結晶化プロセスを詳細に調べることにより、星周の結晶質シリケイトダストが形成された物理化学的環境について推定することができる。

今回我々は、高周波誘導熱プラズマ法(日清エンジニアリング)を用いて、エンスタタイト(En)組成($\text{Mg}/\text{Si} = 1/1$) 及びフォルステライト(Fo)組成($\text{Mg}/\text{Si} = 2/1$)の非晶質シリケイトを作製した。作成した試料の粒子は球形でサイズは直径 50–200 nm であった。この試料を温度 650 – 850°C で 10 分から 240 時間加熱したところ、 $\text{Mg}/\text{Si} = 1$ の試料ではクリノエンスタタイト(MgSiO_3) が、 $\text{Mg}/\text{Si} = 2$ の試料ではフォルステライト(Mg_2SiO_4) が結晶化した。En, Fo それぞれの組成について各温度・時間での結晶化の進行の程度(結晶化率)を赤外吸収スペクトルの変化から推定した。得られた結晶化率を Johnson-Mehl-Avrami 式で近似し、各温度での結晶化の時定数 τ , キネティックパラメータ n を求め、その値をアレニウスプロットすることで結晶化の活性化エネルギー E_a と振動定数 ν_0 を求めた。その結果、En と Fo の活性化エネルギーはそれぞれ 8×10^4 (K), 4×10^4 (K) となった。また、振動定数はどちらも Si の格子振動に比べて非常に小さい値となり、実験結果が単純にアレイニアンではないことが考えられる。こうして得られた (E_a, ν_0) を用いて TTT ダイアグラムを作り、これまでの非晶質シリケイトの加熱実験の結果 (Fabian et al., 2001; Murata et al., 2007; 2009) と比較した。それにより、非晶質シリケイトからの結晶化において、活性化エネルギーは $E_a(\text{En}) > E_a(\text{Fo})$ であることが示唆された。また、これらの先行研究で求められたキネティックパラメータの妥当性についても議論する。

渦による微惑星形成： 数値シミュレーション結果と解析解の比較

○河村恵里¹, 渡邊誠一郎¹, 稲葉知士²

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²早稲田大学国際教養学部

km サイズの微惑星は、ダスト落下問題が存在するために未だどうやって形成されたか分かっていない。これに関して、渦による微惑星形成という微惑星形成過程が提唱されている。渦による微惑星形成とは、原始惑星系円盤内でガスが流体力学的な不安定を起こして凝集性の渦を形成した場合に、その渦の中心にダストが集まることによってそこで微惑星が形成されるという過程を考えるものである。先行研究において渦の中でダストの運動をシミュレーションしたものがいくつかあるが、渦によってどれだけの微惑星がどれだけの時間でできるかということに関して統一的な見解がまだ得られていない。

そこで本研究では、解析的な手法を用いることで、定量的に渦の中に集まるダストの量と時間の関係を示すことを目的としている。本研究では渦を成すガスの流れを解析的に与え、その流れの中でダストの運動を解析的に解いた。その結果、渦の中でのダストの面密度分布は渦の中心からの距離の -2 乗に比例する形を取るということを示した。また、渦の中でのダストの面密度分布進化も求め、それに対するダストのサイズや時間との関係を調べ、mm サイズ以上のダストであれば渦の中で初期の20倍程度にまで面密度が増加し、ダスト層の自己重力不安定によって微惑星が形成されることが示唆された。

しかし、本研究は解析的な手法を用いていることから、渦の流れやガス抵抗係数などに関するいくつか仮定をおき、簡単化して問題を解いている。そこで、今回は本研究でこれまでに得られた解析的な結果と数値シミュレーションの結果を比較することで、本研究で用いた簡単化の妥当性を議論するとともに、本研究の結果で数値シミュレーションをどれだけ説明できるか示し、渦における微惑星形成を定量的に議論する。用いる数値シミュレーションは Inaba & Barge 2006*に基づいたガス-ダスト二層流体シミュレーションで、円盤中に与えたガスの不安定から渦の形成とダストの集積を同時に解いたものである。ダストからガスへのバックリアクションがある場合とない場合のシミュレーションを行い、その結果と解析的な結果とを比較した。バックリアクションがない場合には、渦を成すガスの流れは非常に良い一致を示すことが確認された。また、渦の中に集まるダストについても、シミュレーションの結果得られたダストの分布が本研究における解析でよく説明できることが示唆された。バックリアクションがある場合についても議論する。

* Inaba, S. & Barge, P. 2006, ApJ 649, 415

中質量赤色巨星による惑星飲み込み

○國友正信¹生駒大洋¹佐藤文衛¹勝田豊²井田茂¹

¹東京工業大学 ²北海道大学

近年、2-3 太陽質量の巨星周りに惑星が発見されている。しかし、軌道長半径 0.6AU 以内の短周期惑星は発見されていない。これは、ホットジュピターに代表される短周期惑星を有する太陽型主系列星とは明らかに異なる特徴である。本研究では、中心星が主系列星から巨星へと進化する間に、惑星の軌道が変化し、短周期惑星が中心星に飲み込まれた可能性を追求する。ここでは、惑星に与える影響として、中心星による潮汐力と中心星の質量損失を考慮する。そして、これらの影響下での惑星の軌道進化を数値計算した。先行研究との違いは、本研究では中心星の質量や金属量などの違いが惑星の生存限界に与える影響を詳しく調べた点である。結果として、惑星が飲み込まれない限界の軌道長半径（＝「限界軌道長半径」）は、中心星質量が 1.9 太陽質量から 2.3 太陽質量の間で大きく変わる—中心星質量が大きくなると限界軌道長半径が急激に小さくなることを明らかにした。理論的に求めた限界軌道長半径と実際に検出された惑星の軌道長半径を比べると、観測誤差の範囲内で、本研究で求めた限界軌道長半径より内側には惑星は見つかっていないことがわかった。このことから、本研究で求めた限界は観測と矛盾しない。しかし一方、2.4 太陽質量より重い巨星の周りでは、限界軌道長半径の外側の比較的離れた惑星も見つかっていないことが分かった。つまり、必ずしも巨星による惑星飲み込みだけでは巨星周りの惑星の特徴を説明できない。その場合には、形成プロセスを見直す必要がある。しかし、巨星周りの惑星は、まだ観測例が少ないと言わざるを得ない。理論モデルとの比較によって統計的な議論を行うためには、さらに多くの惑星の検出が必要である。

氷微惑星の衝突破壊様式と破片速度分布に対する空隙率の効果

○鳴生有理^{1,2}, 荒川政彦¹, 保井みなみ³,

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²日本学術振興会特別研究員(DC1),

³日本原子力研究開発機構

はじめに：ダストアグリゲイトの付着成長によって形成された初期氷微惑星は90%以上の空隙率を持つ可能性が示唆されている[e.g., 1,2]. 氷微惑星は太陽に近いほど熱進化が早く進むため、スノーラインに近い氷微惑星ほど焼結によって空隙率が小さくなつたと考えられる。この焼結による空隙率変化は、氷微惑星同士の衝突破壊様式を変化させ、その結果、再集積過程に影響を与えると予想される。そこで本研究では氷微惑星同士の衝突による破片速度分布と破壊様式が空隙率によってどのように変化するかを調べた。

実験方法：実験は北大低温研の大型低温室内（室温-15°C）で行った。雪試料は液体窒素中に微細な水を噴霧して凍結させた数10μmの氷微粒子を用いて作成した。この氷微粒子を体積一定の鋳型に入れて作成し、プラスチック袋に入れて-15°Cで焼結させた。作成した雪試料は、直径60mm、空隙率40-70%（質量62.4-31.1g）、焼結時間1時間-1ヶ月とした雪玉である。弾丸には空隙率30%、直径10mmの雪円柱（質量0.35g）、直径15mmの雪玉（1.1g）および氷円柱（1.6g）を用いた。弾丸の加速にはHeガス銃を用い、速度3-490m/sで正面衝突させた。衝突の様子は高速度デジタルビデオカメラを用い、撮影速度5,000 or 10,000 fps、露出時間10 or 20μsで撮影した。衝突後、回収破片の質量分布を測定した。

結果：破壊様式は破片速度分布と回収試料の観察から4つに分類した。それらは、弾丸が反発するRebound、ターゲット内に弾丸が捕獲されるSticking、最小の破片速度が反対点であるDisruption、最大の破片速度が反対点であるPenetrationである。空隙率60-70%では、

Penetrationの結果から弾丸の潜り込みに関する

抵抗則を求めることができた。その結果、

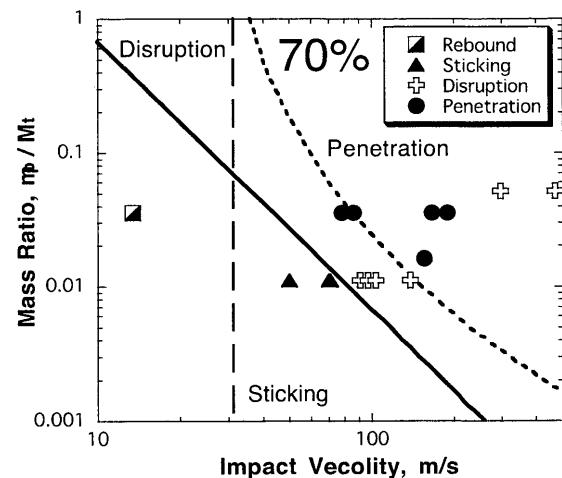
Stickingに必要な最小貫入速度 V_p を求めた。

右図は、空隙率70%雪試料に対してSticking

（破線）とPenetration（点線）が起こる条件、及び衝突破壊（実線）が起こる条件を示している。その結果、Stickingが起こる条件は $m_p/M_t < 0.1$ であることがわかつた。

[1] Wurm and Blum (1998), *Icarus* 132, 125-136. [2]

Wada et al. (2009) *APJ* 702, 1490-1501.



岩石への小金属球超高速衝突実験 ：塵粒子のサイズ分布解析

○高沢晋¹, 中村昭子¹, 門野敏彦², 荒川政彦⁴, 土肥弘嗣⁴, 濑戸雄介¹, 前田誠⁷,
重森啓介², 弘中陽一郎², 境家達弘³, 佐野孝好², 渡利威士², 藤岡慎介², 大野宗祐⁵,
竹内拓⁶

¹神戸大・理, ²大阪大・レーザー研, ³大阪大・理, ⁴名古屋大・環境,

⁵千葉工大・惑星探査研, ⁶東工大・理工, ⁷広島大・自然科学研究支援開発センター

約1~100 μm の惑星間塵は太陽光によるポインティング・ロバートソン効果の影響で、その寿命は太陽系の寿命よりもはるかに短い。よって現在見えている惑星間塵はごく最近できたものであり、その主な供給源として小天体どうしの衝突現象が挙げられている。また、観測技術の発達により太陽系外に塵やガスでできた大きな円盤を持つ恒星が数多く発見されており、Lisse et al. 2009では、HD172555 星の周りの塵円盤は岩石質天体の超高速度衝突 ($>10 \text{ km/s}$) によってできたと考えられている。そこで、惑星間塵や塵円盤の形成過程を考える上で、室内実験により $\sim\mu\text{m}$ の破片を多量に作る衝突条件（衝突速度、弾丸サイズ、標的物質）を明らかにする必要がある。

本研究では大阪大学レーザーエネルギー学研究センターのレーザー銃「激光 XII 号」を用いて、13~61 km/s という超高速度まで加速した 80~250 μm の弾丸粒子を岩石質標的に衝突させる実験を行った。衝突点から放出された標的破片を標的近くに設置したエアロジェルによって捕獲し、エアロジェル表面を電子線プローブマイクロアナライザー (EPMA) でマッピング分析することにより、放出破片サイズ分布を得ている。顕著なクレーターが形成されたショットについて、数 μm までの衝突破片サイズ分布を調べた。かんらん岩を標的に用いた2つのショットの結果を比較してみると、衝突条件（衝突速度、弾丸サイズ）の違いによってサイズ分布の形状に大きく違いが見られた（図1）。この結果は、塵の生成量が衝突による初期発生圧力と等圧核サイズに影響するというモデルで定性的に説明ができた。

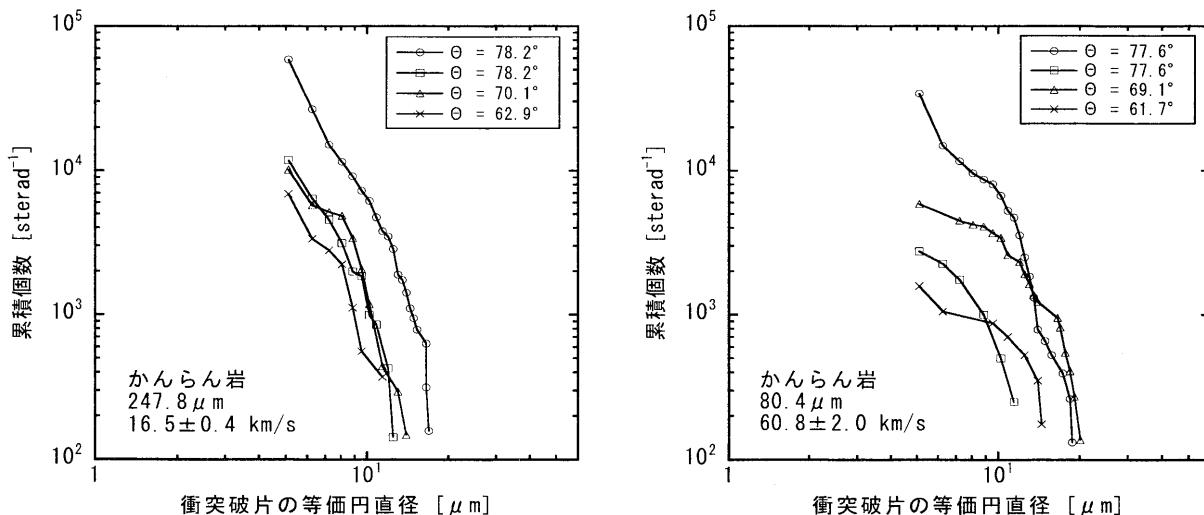


図1. かんらん岩を標的に用いたショットによる破片の単位立体角当たりの累積個数分布。
 θ は弾丸入射方向からの破片放出角。左：弾丸直径 247.8 μm 、衝突速度 $16.5 \pm 0.4 \text{ km/s}$ 。
右：弾丸直径 80.4 μm 、衝突速度 $60.8 \pm 2.0 \text{ km/s}$ 。

惑星間空間ダスト分布と水星大気密度変動

Interplanetary dust distribution and temporal variability of Mercury's sodium density

○亀田真吾¹、鍵谷正人²、岡野章一²、石丸亮¹

1 千葉工業大学惑星探査研究センター 2 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター

水星には非常に希薄な大気がある。太陽光、太陽風、隕石などが水星地表に衝突し、表面物質を放出することで、大気が形成されていると考えられているが、これまでに観測されている極域に集中した大気分布や密度の時間変動の原因は分かっていない。我々は1998年から2007年に観測された大気密度の変動の要因を解明するために、ACE衛星で観測された太陽風フラックス、TIMED衛星で観測されたEUVフラックス、黒点数、F10.7フラックス、水星太陽間距離、太陽放射圧の変動との比較を行なったが、大気密度変動との相関はみられなかった。しかし、水星黄道面間距離には他に比べると強い相関があり、このことは黄道面を中心に分布する惑星間空間ダストとの衝突回数の変動が水星大気密度の時間変動を引き起こしている可能性を示唆している。本発表では、2008年から2009年に得られたデータを追加し、比較結果について紹介する。

また我々は水星磁気圏探査衛星 BepiColombo/MMO に搭載する水星ナトリウム大気分光カメラ(MSASI)の開発を行なっている。MSASI は 2009 年に試験機の組み立てを終え、2010 年には試験機を用いた月の撮像など、各種性能試験を行なっている。本発表ではその進捗状況についても紹介する。

Mercury has a thin and unstable atmosphere, and the source processes of Na in its atmosphere are unclear. Using the data obtained from 1998 to 2007, we compared Na density with various parameters which are possibly related to release process of Mercury's atmosphere from the surface. The results have revealed that the atmospheric Na density has no or low correlation with the solar flux measured by ACE spacecraft, sunspot number, F10.7 solar flux, EUV flux measured by TIMED spacecraft, heliocentric distance, or solar radiation pressure. We show that the variability of Mercury's atmospheric Na density depends strongly on the interplanetary dust (IPD) distribution. The IPD distribution in the inner solar system is not yet well understood because of lack of direct dust measurements in the inner solar system and so one needs to rely on zodiacal light observations that are difficult to interpret. That is, Na density is low (high) when Mercury is far away from (close to) the symmetry plane of IPD, and so one can infer the IPD distribution near Mercury orbit from the temporal variability of Na density in Mercury's atmosphere. In this presentation, we report the new result of observation performed from 2008 to 2009, and the correlation between sodium density in Mercury's exosphere and interplanetary dust distribution near Mercury. Additionally, we report the current progress in the development of Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI) onboard the BepiColombo/MMO spacecraft. We completed to manufacture the Laboratory Test Model in 2009. The result of performance test by observing the Moon will be presented.

金星到着目前の「あかつき」の現状と研究計画

○今村剛¹, 中村正人¹, あかつきチーム

¹宇宙航空研究開発機構

1. 一番星への旅

2010年5月21日の朝、金星気象衛星「あかつき」が地球を旅立った。打ち上げの半日後には遠ざかる地球を波長365nm、0.9μm、10μmで撮影し、地球が短波放射でエネルギーを受け取り長波放射で廃熱する様子を映し出して、惑星気象ミッションとして象徴的と言えるスタートを切った。今後は金星周回軌道投入までの間に近赤外カメラを用いて黄道光を観測し、惑星間空間ダストの空間分布を捉えることに挑戦する。金星周回軌道への投入は2010年12月7日に予定されている。

なぜ金星気象か。惑星の環境形成のしくみを理解するうえで、私たちは惑星気象学という、究極的にはあらゆる大気現象を説明できる普遍的な視点を獲得する必要がある。地球と大きさがほとんど同じであるにもかかわらず地球気象学では計り知れない(ように今は見える)現象に満ちた金星大気こそ、この飛躍のための多くのヒントを与えてくれると考えられる。

2. 問題意識

金星大気の西向き高速帶状流「スーパーローション」を気象学の最大の謎であると言っても、あながち間違いではないだろう。土星の衛星タイタンにも似た風が吹いていることがわかってきており、どうやら金星だけの特殊な現象ではない。地球(・火星)型の大気循環とスーパーローションを分ける要因が何なのかという問題は、大気大循環論の根本に関わっている。

長年有力視されてきた(しかし懷疑論もある)仮説によれば、ハドレー循環が固体部分の角運動量の一部を大気中に運び上げ、一方で中緯度の帶状流から生じる順圧波が低緯度方向に角運動量を運ぶことで、大気上層に角運動量が蓄積される。しかしこのメカニズムは下層大気に現実よりも大きな加熱強制を与えないといつて発現しにくくこれがモデル研究から示唆されており、また地球対流圏の擾乱が上記とは逆方向の角運動量輸送をもたらしていることを整合的に説明せねばならないなど、まだまだ課題がある。別の仮説として、雲層で励起される熱潮汐波が地表面まで届いて大気と固体惑星との間の角運動量交換をもたらし、結果的に大気を加速させるという考えがある。熱潮汐波が大きく減衰することなく鉛直伝搬する必要があるが、ここはまだ十分に詰められていない。これら以外の仮説にも決定的なものはない。

スーパーローションに押し流される硫酸の雲層には惑星スケールから数kmスケールまで様々な模様が見られるが、その多くは現象の正体の見当が付いていない。これらの解明なくして、雲層の形成をもたらす物質循環の理解は無いだろう。この雲の中で雷が起こっているらしいという、主に電磁波観測からの報告も、悩ましいものである。地球の気象学では、積乱雲の中で雹やあられが作られて重力落下することが電荷分離をもたらすことになっている。しかしそのようなことは金星大気ではおよそ起こりそうにない。

雲層の下の気温減率は断熱温度減率に極めて近い。このことから金星の鉛直温度分布は鉛直対流で決まるとの考えが広く受け入れられている。しかし実際には断熱温度減率よりもほんのわずか安定である。放射平衡が断熱温度分布に極めて近いという偶然がないかぎり、別のしくみを考える必要がある。たとえば子午面循環による安定化であり、ここにも地球気象学と共通の問題意識がある。鍵となる子午面循環の構造は金星ではほとんどわかっていない。

3. 気象衛星によるアプローチ

「あかつき」はおそらく、気象衛星という呼び名に値する初の惑星探査機である。「あかつき」は赤道上空の橿円軌道を巡り、赤外から紫外までをカバーする5台の気象観測カメラが、光の波長ごとに異なる高度の大気が映し出されることを利用して3次元の流体運動を動画として描き出す。また画像解析によって複数高度での風速分布、雲量、化学物質の循環といった情報を取り出す。金星は厚い雲に覆われているが、ある近赤外波長ではその下の大気や地表までを外から見通すことができる。映像情報とは別に、地球との電波通信を利用した電波掩蔽観測を行い、気温や硫酸蒸気の高度分布をとらえて相補的な情報とする。幅広い時間スケールの変動を抽出するために、なるべく同じ観測モードを数年にわたって継続する。これまで金星探査機多しと言えども、ここまで徹底して気象観測を追求したものはない。

公開する観測データには、較正済み画像や電波掩蔽による温度分布などに幾何情報を付したレベル2データと、輝度値を緯度経度格子に展開したうえで雲追跡ベクトル場なども加えたレベル3データがある。これらのデータを速やかに研究に供するためには、半自動でデータ処理を行うパイプラインシステムを構築中である。

金星大気のスーパーローテーションと「あかつき」への期待

高木 征弘¹, 松田 佳久²

¹ 東京大学・大学院理学系研究科, ² 東京学芸大学・自然科学系

1. 序

金星大気にはスーパーローテーションといわれる特異な現象が存在している。これは、雲層(約45–70 kmに存在)上部で、大気が自転方向に4日で1回転、つまり固体部分の約60倍の速さで回転する現象である(金星の自転周期は約243日)。雲層上部では100 m/sの強い東風が吹いていることになる。米ソの探査機が観測した東西風の鉛直分布によると、地面から連続的に風が強くなり、70 km付近で最大になっている。なぜ、このような強い風が吹き続けているのか、その角運動量はどこから来たのかという謎に答えることが、金星気象学の最大の問題となっている。

一方、金星の自転が大変遅いので、その大気で卓越する循環は、昼側で上昇、夜側で下降する夜昼間対流に近くなるという予想も成り立つ。なぜ、この夜昼間対流が卓越しないのか、ということも、スーパーローテーションの原因論における重要な論点である。

本発表では、スーパーローテーションの原因についての諸説を簡単にレビューするとともに、我々の最新の数値実験結果を紹介したい。さらに、現在、金星に向かいつつある「あかつき」の観測により、スーパーローテーションの実態とその原因がどの程度解明されるのか、議論したい。

2. スーパーローテーションを説明するメカニズム

1970年代から80年代にかけて、スーパーローテーションを説明するメカニズムとして、色々な説が提案されてきたが、これらは3つに大別できる。(1)夜昼間対流を前提し、その傾斜からスーパーローテーションを導きだそうとする説(Schubert and Whitehead, 1969; Thompson, 1970など)。(2)熱潮汐波によって反対方向の運動量を地面まで運び、そこに捨てる説(Fels and Lindzen, 1973)。(3)子午面循環によって、固体の持つ運動量を上方に汲み上げ、上方に蓄積する説(Gierasch, 1975; Matsuda, 1980)。いずれの説も、まず東向きの運動量と西向きの運動量をペア・クリエーションし、スーパーローテーションと反対方向の運動量を地面摩擦により、つぶそうとするメカニズムである。

このうち、(1)のメカニズムは赤道上の東西-鉛直2次

元断面のみで検討されていたもので、球面上3次元大気では作動しないことが示された(Takagi and Matsuda 1999, 2000)。(2)のメカニズムは提案者自身、臨界高度の問題があり、否定的であった。しかし、Takagi and Matsuda (2006, 2007)により、この困難が取り除かれ、このメカニズムによりスーパーローテーションが形成されることが、数値実験により示された。(3)のメカニズムはGCM(大気大循環モデル)により、最近Yamamoto and Takahashi (2003)その他により調べられているが、Hollingsworth et al. (2007)によると、現実的な太陽光加熱を仮定すると、スーパーローテーションは再現されない。Kido and Wakata (2008)は、スーパーローテーションの状態と夜昼間対流の状態は共に安定定常解として存在できるというMatsuda (1980)の理論的研究の結果を、GCMを用いて確認した。

しかし、今までのGCMによる計算においては、放射過程が不当に単純化されて、ニュートン冷却によって表現されていた。そこで、我々はより正確な放射モデルを構築し、それをGCMに組み込んで、金星の大気循環の再現を試みている。まだ、中間段階であり断定的なことは言えないが、正確な放射モデルを用いても、(3)のメカニズムではスーパーローテーションの再現が困難なこと、下層の子午面循環の南北流は0.1–0.5 m/s程度、雲層のそれは(強くても)10 m/s程度であることが示唆された。

3. 「あかつき」の観測

金星の気象観測は、全天を覆う雲層の存在により、発展していない。スーパーローテーションを維持するメカニズムを、観測から議論することが出来ない段階であった。「あかつき」はスーパーローテーションの実態と原因を観測から明らかにすることを目指した(地球以外で)初の気象衛星である。紫外、近赤外、中間赤外など計5台のカメラにより立体的に金星の雲を観測し、雲の動きから風速を算出する計画である。

その結果、東西平均子午面循環の有無、あったとしたらその強さ、熱潮汐波の検証、渦による運動量の水平輸送などの解明が期待される。これらが分かれば、少なくとも雲層でのスーパーローテーションの原因が解明されると期待される。

あかつき高次データアーカイブ

○小郷原一智¹、神山徹²、佐藤尚毅³、高木征弘²、今村剛¹

¹宇宙航空研究開発機構、²東京大学、³東京学芸大学

あかつき（Venus Climate Orbiter, VCO）に搭載された4つのカメラによって複数高度における雲画像（輝度値データ）を得ることができる。また、あかつきの周回軌道角速度は、多くの部分でスーパーローテーションとほぼ同期するように決定されているので、スーパーローテーションに重なっている多くの波動を検出することが期待される。さらに、雲追跡によって輝度値データから水平風速の3次元分布が求められる。このような輝度値や風速のデータを解析することにより、長らく議論されてきたスーパーローテーションの維持機構や子午面循環の有無などに対して、決定的な情報が得られると期待される。本発表では、そのような金星大気研究に容易に用いられるよう整備されるあかつきデータの形式、アーカイブについて説明する。

もともと惑星探査データは撮像された画像（pixel × pixel）として配布されるのが一般的である。しかし、あかつきでは金星大気現象の研究を想定して、経度緯度座標に変換された格子点データとして公開する。物理量は各フィルターの輝度値とそれらを使って雲追跡で求められた水平風であり、ファイル形式はNetCDF形式である。

金星-あかつき間距離がおよそ60000kmの時（遠金点は約80000km）、衛星直下点における解像度は約12km/pixelであり、0.11°に対応する。そこで、輝度値データの解像度を、JRA-25※のちょうど10倍の解像度である0.125°×0.125°に設定する。この輝度値データを用いて作成される風速データの解像度は3°×3°である。また、各格子点における太陽天頂角、衛星天頂角、地方時などのジオメトリ情報の経度緯度分布も付与される予定である。このようなジオメトリ情報の作成は、放射計算や雲物理の研究のためはもちろん、地球とは大きく異なる金星大気のデータ解析で混乱しないようにするためでもある。

1つのNetCDFファイルにはおよそ2時間間隔で1軌道分（約10回の撮像）のデータが梱包される予定であるが、1ファイル1撮像の形式も同時に公開することが検討されている。

※25 years Japan Re-Analysisの略。25年再解析データ。地球の気象の研究によく用いられるデータセットである。

光化学反応によるイオの硫黄濃集機構

Concentration mechanisms of sulfur on Io: Contribution of photochemical reactions

○平田直之 宮本英昭 東京大学総合研究博物館

イオは木星系のガリレオ衛星の一つであり、硫黄と溶岩に覆われた衛星である。イオは潮汐加熱の結果、太陽系随一の活動度をもちその表面には現在も多く活火山が存在している(図1)。この衛星の表面にはどういう訳か大量の単体硫黄が海のごとく表面を覆い尽くしている。この硫黄の起源は定かではなく、様々な仮説が提案してきた。

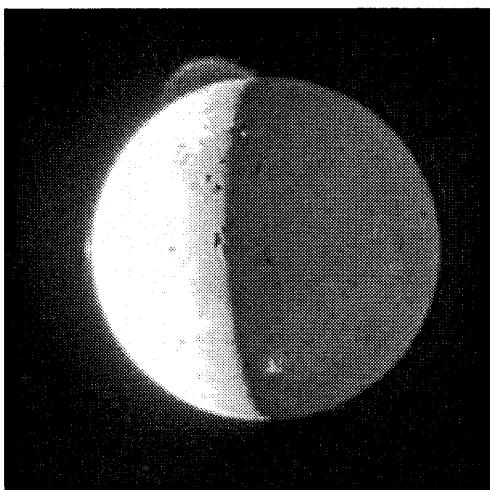


図1 : Tvashtar's Plume (PIA09248)

単体硫黄は地球の火山地帯にも豊富に存在していて、自然硫黄や湯の華として知られている。地球の単体硫黄は火山ガスに含まれる SO_2 を還元するか、 H_2S を酸化することで作られているが、そのいずれの反応でも水素原子が必要である。しかし、イオの火山ガスは水素が枯渇していることが分かっており[1]、地球と同様のメカニズムは現在では期待できない。このためイオの硫黄濃集機構として、

「イオがかつてエウロバのように内部海をもっていた」、「内部で熱水作用によって単離している」といった理論が提案してきた[2]が、いずれも根拠に乏しいものであった。本研究で、硫黄濃集機構として、イオの希薄大気の光化学反応(図2)によって硫黄が単離し、地表に固着している可能性があることがわかった。このメカニズムは既存の理論とは異なり、現在でも有効である。

イオ大気は極めて希薄であり、その主成分は SO_2 である[3]。イオの火山ガスは主に SO_2 で構成され、他の揮発性元素は全く枯渇している[1]。この火山ガスによってイオ大気は維持されていると考えられる[3]。

この大気中の SO_2 はエネルギーの高い紫外線の曝露を受けると破壊され、单原子硫黄となることが知られている。この单原子分子は夜になるとより安定な SO_2 や S_2 と変化していく。この過程でわずかに S_3 以上の単体硫黄分子が形成され、地表でしばらくの間、安定して存在できることが分かっている[4]。またイオトーラスに含まれている電子も SO_2 を破壊することが分かっていて[3]、似たような現象が期待できる。本研究ではこれらのメカニズムで濃集しうる硫黄を定量的に見積もり、肯定的な結果を得た。

イオも地球も共に活火山を持ち、豊富に硫黄が存在している。しかしそのメカニズムはまったく異なつたものである可能性があることが分かった。

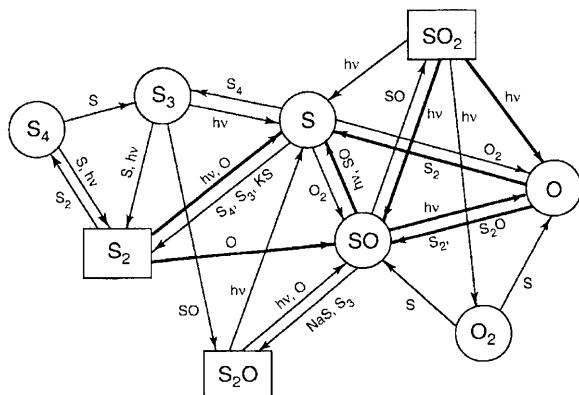


図2 : イオの大気中の光化学反応。hvは光子を意味する。(J.I.Moses et al, 2002[5])

(参考文献)

- [1]Ashley Davies, 2007, Volcanism on Io., p:73-
- [2]J.S.Kargel, 1999, Icarus, vol:142, p:249-
- [3]R.M.C.Lopes, J.R.Spencer, 2007, Io After Galileo.
- [4]P.Geissler et al., 2004, Icarus, vol:169, p:29-
- [5]J.I.Moses et al, 2002, Icarus, vol:156, p:76-

マグマオーシャンでの金属とシリケイトの分離過程における熱・元素の分配過程

○市川浩樹¹, Stéphane Labrosse², 亀山真典¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

²Ecole Normale supérieure de Lyon

地球の中心核形成過程において、重力エネルギーの解放により地球全体を 2000K ほど暖めるのに必要な熱が放出されると見積もることができるが、その熱エネルギーの地球内部での最終的な分布は、まだ明らかになっておらず、考えている中心核形成モデルに依存する。本研究では、大きな地球型惑星において考えられているマグマオーシャン中での金属とシリケイトの分離過程に注目して、熱の分配、またそれに伴う元素のコアマントル分配を考察する。

マグマオーシャンの底でシリケイトと金属が化学平衡状態にあったと仮定して、その底の温度圧力状態から、地球の元素のコアマントル分配を説明しようという試みが行われているが、いくつかの困難がある。例えば、一つの温度圧力条件で地球のコアマントル分配を説明しようとすると、マグマオーシャンの底の温度は融点よりも 700K ほど大きくなる必要がある [Wade and Wood, 2005]。マグマオーシャンの底の温度はリキダスとソリダスの間に位置する必要があり、つじつまがあつてない。そもそもマグマオーシャンの底での温度圧力条件で、化学平衡状態にあったとの仮定が作成的であり、マグマオーシャンでの分離過程全体において、金属とシリケイトが化学平衡になりうることを考慮しなければならない。

本研究では、マグマオーシャン中での金属の落下を取り扱った cm メートルスケールの数値計算結果 [Ichikawa *et al.*, 2010] を元に、惑星スケールの計算モデルを作成し、それを用いて、熱エネルギーの生成と移流の計算、そして、それぞれの場所の温度圧力条件における化学平衡とその移流の計算をした。発表では、マグマオーシャンの底の温度圧力条件のみを考慮した場合の分配と、マグマオーシャンでの分離過程全体を考慮した場合の分配の違いや、核形成後における熱エネルギーの分配などに重点をおいて紹介する。

同期回転惑星における太陽定数増大実験

○納多 哲史¹, 石渡 正樹², 中島 健介³, 高橋 芳幸^{1,4}, 森川 靖大⁵, 西澤 誠也^{1,4}, 林 祥介^{1,4}

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 北海道大学大学院理学院, ³ 九州大学大学院理学研究院, ⁴ 惑星科学研究センター, ⁵ 情報通信研究機構

1. はじめに

これまでに発見された系外惑星の多くは中心星の近傍に存在し、中心星の潮汐力により同期回転している、すなわち昼半球と夜半球が固定されている惑星であると予想されている。中心星が低質量であり輝度が小さければ(例: M型星)、惑星表面に液体の水を有する、同期回転する地球型惑星が存在する可能性がある。

我々は同期回転惑星の気候状態を探ることを目的として、大気循環モデルを用いて、地球の太陽定数の値における、自転角速度を変更したパラメータ実験を行ってきた。その結果、自転角速度の値に応じて昼半球から夜半球への直接循環が卓越する状態、降水を伴う擾乱や赤道波等が卓越する状態などが得られることがわかった(納多ほか, 2010)。

今回は、液体の水の存在を決める重要な条件の一つである暴走限界(暴走温室の発生の閾値となる太陽定数)の決定を目的として同期回転条件において太陽定数を変化させた実験を開始したので、その現状について報告する。自転角速度変更実験で得られていたそれぞれの循環パターンに応じて、暴走限界の値に違いが生じるかどうかを確認するため自転角速度と太陽定数の値を変化させたパラメータ実験を行う。現在、そのための予備実験を行っている。

2. モデル

モデルは我々の開発している GCM である dcpam (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) を用いた。凝結成分は水蒸気のみである。雲はない。大気は短波放射に透明、長波放射に灰色である。地表面は全て海で覆われ、熱容量はゼロとした。自転軸傾斜角、離心率はゼロとし、惑星半径、平均地表面気圧などは地球の値を用いた。解像度は T21L32 (水平格子点数は 64×32) である。自転角速度は 0、地球の $1/13$ 倍、地球と同じ値の 3 種類を用いた。これらの値は太陽定数を地球の値にした時に、それぞれ大きく異なる循環パターンを示している。以降、自転角速度は地球の値で規格化したもの用い、 Ω と表記する。太陽定数は 1380, 1500, 1600, 1650 W/m² を用いた。太陽定数を増加させると 2-grid noise の振幅が大きくなるため長時間積分が困難となるので、石渡ほか (1998) が用いた鉛直フィルタを適用した計算を行った。この鉛直フィルタは、鉛直方向に水平風速、温度の分布の平滑化を行うものである。

3. 太陽定数増大実験の現状

3.1. 予備実験の結果

鉛直フィルタを使用することで比較的安定に計算を行えるようになるが、循環強度に影響を及ぼすことが報告されている(詳しくは 3.2 で述べる)。本実験でも同じ副作用が起こる可能性があるためフィルタを使用しない方が望ましいのではあるが現時点ではフィルタなしで長時間積分に成功したパラメータは限られている。そのため、予備実験として鉛直フィルタを適用して

パラメータスイープ実験を行った。

いずれの自転角速度においても、太陽定数 1500 W/m² までは OLR の全球平均値が入射放射量の全球平均値に漸近する統計的平衡状態が得られた。これに対して、 $\Omega = 1$ では太陽定数を 1600 W/m² 以上とした場合、 $\Omega = 0, 1/13$ では太陽定数を 1650 W/m² とした場合には、地表面温度の全球平均が単調増加し、OLR の全球平均が単調減少を続ける結果となった。これらでは暴走温室状態が発生したと考えられる。例として、太陽定数 1600 W/m² における全球平均した OLR の時系列を示す(図 1)。 $\Omega = 0, 1/13$ の場合は熱収支が釣り合っていることに対応する 400 W/m² 付近にあるが、 $\Omega = 1$ の場合は時間とともに減少している。これより、暴走限界が自転角速度に依存しうることが示された。

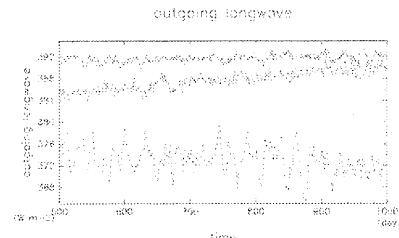


図 1: 太陽定数 1600 W/m² における、全球平均した OLR の時系列。上から順に $\Omega = 0, 1/13, 1$ である。 $\Omega = 1$ の場合は時間とともに減少している。

3.2. 鉛直フィルタの影響

今回の実験設定においても鉛直フィルタの影響があるか調べるために、フィルタなしでも計算できた一部のパラメータについて、鉛直フィルタを適用した場合とそうでない場合の結果を比較した。暴走限界に自転角速度依存性があるという結果は変わらなかったが、循環強度については今回の条件においても鉛直フィルターを適用すると子午面循環が弱くなることが確認された(図 2, 3)。循環や輸送量を評価する際は鉛直フィルターを適用しないで実験を行うことが望ましい。今後、フィルタなしで全てのパラメータを計算できるよう設定の検討を行っていく。

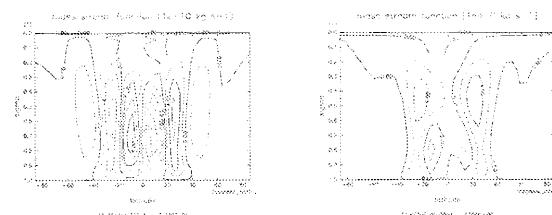


図 2: $\Omega = 1$, 太陽定数 1380 W/m² において鉛直フィルタを用いたときの質量流線関数

図 3: $\Omega = 1$, 太陽定数 1380 W/m² において鉛直フィルタを用いないときの質量流線関数

全球海惑星の炭素循環と気候進化

○木村 亮¹, 阿部 豊¹, 田近 英一¹, 玄田 英典¹

¹東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

現在では系外惑星が450個以上発見され、中には液体の水が表層に存在する可能性がある地球型惑星も発見されてきた。現在の地球の海は地球質量の0.023%しかない。これは非常に微妙な量であり、海の量が4倍になると全球が海で覆われてしまう。現在の惑星形成論によれば現在の地球の水の量に強い必然性はなく、系外地球型惑星には全球が海で覆われた惑星が存在する可能性が大きいにある。

地球では地表温度が上がると大陸風化が進み、二酸化炭素が炭酸塩として海底に沈殿され、大気中二酸化炭素が減る。大気中の二酸化炭素が減少すると地表温度が下がり、風化が抑制される。大陸が存在する地球には、このような負のフィードバックが働き、気候が安定化されていると考えられている(Walker et al, [1981])。また、先行研究では、全球が海で覆われていたと考えられている初期地球の温度の推定(Tajika & Matsui, [1993])は行われていたが、大陸風化以外の陽イオン供給プロセスについて詳細に調べられてはいない。そこで本研究では全球を水で覆われた地球と非常に似ている条件の海惑星を考え、大気中の二酸化炭素濃度の推定を試みた。

地球では大陸風化によって海洋へ陽イオンが供給され、炭酸塩が沈殿し固定される。海水中の炭酸イオンが減少し、二酸化炭素が海洋へとけ込むことで大気中二酸化炭素濃度が決定される。それに対して全球海惑星では大陸地殻が海の上にないため、海洋中の炭酸イオンが飽和に達したらそれ以上は海水に溶け込むことができなくなってしまう。しかし実際には、以下の反応式で表される海洋地殻の風化と熱水反応によって陽イオンが供給されるとして、これらをモデル化した。

大気中二酸化炭素濃度を推定する為に、惑星をシステムととらえ、そのサブシステムとして大気、海洋、海洋地殻、マントルの4つのリザーバを考え、それぞれのリザーバ間の炭素の挙動をボックスモデルを用いて検証した。今回の発表では恒星進化を考慮して計算した各リザーバの炭素量と二酸化炭素濃度及び地表温度の変遷について示し、大陸が存在する地球のような気候安定化フィードバックが働くかどうかについて議論する。

惑星のもつ初期の水の量を考慮した ハビタブルゾーン内側境界の検討

○小玉貴則¹、玄田英典¹、阿部豊¹、Kevin Zahnle²

¹東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、²NASA Ames Research Center

生命の誕生と進化を考える上で、液体の水の存在はとても重要である。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。水蒸気は温室効果気体であり、氷は高いアルベドを持つため、大量のH₂Oは時に惑星の気候を不安定にさせる。したがって、現在の地球と同じような惑星で、水の量のみが異なる場合のHZを検討することが重要である。

Kastingら(1993)は、地球の海洋質量程度の水を持つ「海惑星」の場合には、暴走温室状態に入る中心星放射よりも少し小さい入射で上層大気の水蒸気の割合が増加し、大規模な水の散逸が起こることを発見し、HZの内側境界をこのような散逸が起こる中心星放射で決めた。一方、阿部ら(2010)の研究では、惑星表面には水は存在するが少ないために全球的につながっておらず、降雨と蒸発が局所的にバランスしている仮想的な惑星「陸惑星」のHZが検討し、陸惑星では海惑星が暴走温室状態に入る中心星放射よりもかなり大きい入射まで液体の水が存在し、かつ水の散逸もほとんど起こらないことを示した。

Kastingら(1993)と阿部ら(2010)の結果に基づき、海惑星のHZの内側境界の外側に海惑星が存在した場合を考える。Kastingら(1993)、阿部ら(2010)両結果から、中心星の進化に伴い上層大気の水蒸気量が増加し、暴走温室状態に入る前に水蒸気の流体的な散逸によってH₂Oが効率よく散逸して陸惑星的な惑星になった場合、この惑星はハビタブルな惑星で存在し続ける可能性が示唆される。水の量がどの程度減れば陸惑星的な惑星になるかは自明ではないが、少なくとも全ての水が失われる直前のどこかでは陸惑星的になるはずである。

そこで本研究は、恒星の進化と初期の水の量を考慮した惑星進化に伴うHZの内側境界を検討することを目的に、恒星の進化と大気の流体的散逸に注目し、数値計算を行った。まずは簡単の為に、恒星の進化には太陽を用い、惑星には地球の質量と半径の惑星を用いた。このような条件で、初期海質量と太陽からの距離を様々に振って、惑星のHZを再検討した。数値計算より得られた、海が散逸して失われるタイムスケールと恒星進化のタイムスケールを比較して、前者が早い場合、初期の状態が海惑星であっても、最終的には、陸惑星のHZが適用され、後者が早い場合は、大気の散逸か暴走温室効果の発生のいずれかがHZの内側境界として適用されることがわかった。

この研究から、様々な恒星や惑星サイズを考慮して、HZの内側境界を検討することによって、今後観測が期待される系外地球型惑星を、海惑星、海惑星(暴走温室状態)、陸惑星、陸惑星(暴走温室状態に入っていない)、陸惑星(暴走温室状態)の領域に分類でき、将来観測的に立証できることが示唆される。

惑星間塵中の有機物と生命の起源 -たんぽぽ計画による検証-

○ 小林憲正¹, Palash K. Sarker¹, 小野恵介¹, 伏見英彦¹, 大林由美子¹, 金子竹男¹,
三田肇², 藤田ひかる³, 長谷川紀昭⁴, A. L. D. Kilcoyne⁵, 山岸明彦⁶, たんぽぽWG⁷
¹横浜国大院工, ²福岡工大工, ³阪大院理, ⁴阪大超高压電顕センター,
⁵Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁶東薬大生命, ⁷JAXA/ISAS

生命の誕生に必要な有機物の起源として、地球外物質（炭素質コンドライト・彗星など）が注目されている。隕石や彗星中の有機物は、太陽系生成前に、分子雲中の星間塵アイスマントルに宇宙線・紫外線が作用することにより有機物が生成した有機物をもととした可能性が考えられ、実際に室内模擬実験で模擬星間物質からアミノ酸前駆体などの生成が確認されてきた[1]。このような有機物が、星間で紫外線などにより変成を受け、さらに太陽系生成時に、太陽系小天体にとりこまれ、その中でさらにさまざまな変成を受けたと考えられる。

地球外有機物を地球に持ち込む手段として、彗星、隕石（小惑星）のほかに惑星間塵（微隕石）が考えられる。彗星中では、放射線と紫外線（表面のみ）による変成が、隕石母天体中では、天体内部での水質変成、熱変成などが重要とされる。これらの変成の評価には、模擬星間有機物への粒子線・紫外線照射や、水質・水熱変成実験を行い、実際の隕石有機物との比較を行う必要がある。一方、惑星間塵（微隕石）は、彗星や小惑星から惑星間空間に放出された塵である。惑星間塵は地球大気への突入の際の変成が隕石・彗星よりも軽微であること、また、地球への有機炭素の持ち込み量が隕石・彗星よりも多いと推定されること[2]などから、惑星間塵有機物は生命の誕生に大きく貢献したことが期待できる。しかし、隕石や彗星と異なり、惑星間塵は、太陽紫外線や宇宙放射線に直接曝露を受けるため、その有機物がどのように変成するかが大きな問題となる。

惑星間塵（微隕石）は、これまで南極の氷中や成層圏で採取されてきたが、地球由来有機物の汚染の可能性が問題であった。そこで、われわれは国際宇宙ステーション・日本実験モジュール曝露部を用いた、宇宙塵の捕集および有機物曝露実験を計画している（たんぽぽ計画）。捕集実験では、超低密度シリカゲルを宇宙環境で曝露し、高速で衝突してくるダストを回収、分析する予定である。有機物の捕集条件の検討のため、二段式軽ガス銃（JAXA/ISAS）を用いた、アミノ酸を含む模擬星間塵の捕集・評価実験を行っている。地球周回軌道上で惑星間塵捕集・曝露実験や地上での有機物変成実験などを総合し、惑星間塵有機物の生命の誕生における役割を評価していく予定である。

[1] K. Kobayashi *et al.*, *Electron. Comm. Jpn.*, **91**, 15-21 (2008).

[2] C. Chyba and C. Sagan, *Nature*, **355**, 125-132 (1992).

Japan Astrobiology Mars Project (JAMP)： 火星表面におけるメタン酸化菌探査

○山岸明彦¹、横堀伸一¹、吉村義隆²、山下雅道³、橋本博文³、久保田孝³、矢野 創³、春山純一³、田端 誠³、小林憲正⁴、本多 元⁵、内海裕一⁶、才木 常正⁷、伊藤 隆⁸、宮川厚夫⁹、浜瀬健司¹⁰、長沼 毅¹¹、三田 肇¹²戸野倉賢一¹³、佐々木晶¹⁴、宮本英昭¹³

¹東京薬科大、²玉川大、³ISAS/JAXA、⁴横浜国立大、⁵長岡技術科学大、⁶兵庫県立大、⁷兵庫県立工技セ、⁸理研、⁹静岡大、¹⁰九州大、¹¹広島大、¹²福岡工大、¹³東京大学、¹⁴国立天文台

生命には水が必須である。もう一つ生命の維持に重要な因子としてギブス自由エネルギーがある。動物は食物と酸素無しには生存できないが、それは両者が自由エネルギーの獲得に必要だからである。火星で生命が誕生して現在もまだ生存し続けているとするならば、現在まで自由エネルギーが入手可能な場所でなければならない。

生物による自由エネルギー獲得方法としては、呼吸（動物）、光合成（植物）、化学合成（化学合成微生物）の三つが知られている。火星におけるメタンの発見と、地球におけるメタン酸化鉄還元細菌の発見（Beal ら 2009）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）が生存しうるのではないかと推定するに至った。

もし、火星に於いて生命が誕生し現在も生存しているとすれば、そこは生存にとって困難な条件をさける環境で無ければならない。火星の様々な環境の内で温度、気圧、重力等は地球の生命を考えた場合には十分に生存可能な環境である。放射線も生死に影響を与えるほどの強度は持っていない。唯一、紫外線が重要な致死要因となる。しかし、紫外線は様々な物質によって吸収されるので、薄い火星土壤に覆われるだけで、十分生育可能な環境となる。細胞内の液体の水は地球型生命にとって必須であるが、細胞外の液体の水は生存にとっては必須ではない。従って、メタンと酸化鉄のような酸化型物質の両者がある場所であれば、数センチメートル程度の深さでも微生物は生存している可能性があると推定している。

微生物探査の方法としては、蛍光色素をもちいた蛍光顕微鏡観察を自動的に行う。これまで多くの蛍光色素が開発されている。その中から、生命の定義に対応した色素を組み合わせて用いる。細胞の内外を区別する膜（境界）の存在を識別する色素、細胞の複製にひつような遺伝物質を識別する色素、細胞の代謝を司る酵素の存在を識別する色素を組み合わせて用いる。これらの色素の組み合わせから、「細胞」の特徴を抽出することができる。

さらに、その後「細胞」らしき粒子のアミノ酸分析を行う。地球の生物はすべて 20 種類の L 型アミノ酸からなるタンパク質を持っている。火星の「細胞」らしき粒子が地球と同じアミノ酸かどうかを調べる事により、「細胞」の由来を知ることができる。その他、現在検討中の探査方法について報告する。

月の軽元素 : Ca 斜長石と微弱局在磁場

Lunar light elements: Ca-plagioclases and weakly localized magnetic fields

三浦保範

山口大学（理）

1. 月の軽元素 :

アポロ月面試料に微量含まれる軽元素（炭素・水素）の炭素含有物と月磁場を考察する。

2. 月の Ca 斜長石と炭素 :

月面 Ca 長石の主要成分は化学量論的でなく FeMg 成分が多いことが報告されている。筆者によりアポロ試料 EPMA 分析から、破碎岩に多い四面体組成欠陥(VT, MMT)が多く、これが月面 Ca 長石の空隙組成で主要成分以外の軽元素（炭素など）に起因すると考えられる。

3. 月磁場（内部と表層）の軽元素の関与 :

1) 月内部磁場：惑星磁場のダイナモ理論では流体中の軽元素上昇による電流発生と天体自転により磁場が発生するので、微弱で不規則分布をする月磁場が不規則に局在する軽元素の鉱物化学的要因による、月ダイナモ過程で説明できると考えられる。月内部は地球型対流がないので、月内部軽元素は初期月形成時に岩塊による大規模衝突（巨大衝突破片の集合体衝突）混入過程が、月内部で局在する軽元素含有流体のトリガーであると考えられる。月表側の海の多くの衝突で軽元素が散逸し、月裏側でその影響を受けずに軽元素含有流体が多く残存し局在して微弱な月内部磁場の要因になっていると考えられる。

2) 月表層衝突孔磁場：炭素含有物の高圧下での流体化の動的過程で磁場が発生する。月内部のダイナモ過程の磁場の他に、月表層のクレーター周辺の微弱磁場は、衝突時の高温急冷状態で形成された軽元素残存流体と鉄含有物などの冷却残留磁場によると考えられる。

4. 月の炭素含有物の形成 :

1) 炭素高圧相：月においては Ca 斜長石以外に、炭素高圧相（ナノダイヤモンドなど）が、地球における多くの隕石衝突破片岩・火山噴出岩・断層破碎体のスペクトル観察で筆者により確認できているので、表層部の衝突時冷却で微細な炭素高圧層が一般的に残存していると考えられる。具体的には、月のサイズでは岩石圧による地球型ダイヤモンド鉱物の形成ができるないが、深部の月震と大規模衝突による衝撃で炭素含有物から微細な高圧炭素相が形成できる。炭素高圧相のサイズは、その動的な高圧化の頻度と継続性で決まる。月深部物は一般的に上昇しないが、表面で採取されるのは大規模な衝突クレーター地形周辺の場所である。

2) ナノ球粒連結鉄酸化物組織：月面には生命炭素含有物（植物化石）や大気衝擊性の球粒連結鉄酸化物はないが、炭素源（巨大衝突による古期地球岩体起源の炭素含有物）があると、月にナノサイズの炭素含有組織（ナノバクテリア状組織、炭素含有鉄酸化物）が形成し採集される可能性はあると考えられる。

月の斜長石の反射スペクトルにおける $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯と含有微量Feとの関係

○神前喬¹、佐伯和人¹、下林典正²、大竹真紀子³、荒井朋子⁴、土山明¹

¹大阪大学、²京都大学、³JAXA、⁴千葉工業大学

斜長石は月の高地を構成する主要な鉱物だと考えられている。アポロが持ち帰った月の斜長石の中にはFeを1%未満含むものがあり、その反射スペクトルの $1.25 \mu\text{m}$ 付近にブロードな吸収帯がある(e.g. Relab database)。大竹ら(2009)は月周回衛星「かぐや」の"マルチバンドイメージヤ"のデータから月面で $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯がはっきり見える所にPAN (Purest Anorthosite : 斜長石 > 98 vol% の斜長岩) が存在することを発見した。Lucey (1998)のスペクトル合成モデルによれば、 $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯は苦鉄質鉱物の混在により消えやすく、それがはっきり見えるときは、斜長石の占める割合が大きいという推測である。しかし、 $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯の無い斜長石によるPANが存在する可能性もあり、もし存在すれば月面のさらに広範囲に高純度の斜長岩が存在することになる。また、吸収帯の有無の原因がわかれればその斜長石の晶出過程や、集積してからの履歴を知る手がかりになる可能性がある。

Adamsは、アポロサンプルの他、地球試料 (Stillwater complex, Duluth gabbro 他) の斜長石の可視・近赤外反射スペクトルを測定し、斜長石中のFe含有量が大きくなるほど $1.25 \mu\text{m}$ 吸収の深さが深くなり、An値が大きくなるほど吸収ピークが長波長側にシフトする傾向を示した(Adams 1978)。また、酸化雰囲気下で加熱実験を行ったときには $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯が消え、恐らく $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ となってイオン半径が減少したFeが結晶中から離溶されたのではないかと報告している。

本研究では、斜長石中のFeの価数変化によって、 $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯の形状が変化するかどうかを調べる実験を行った。 $1.25 \mu\text{m}$ 吸収帯の存在が確認されている地球の斜長石 (Chihuahua 産 bytownite) の粉末 (粒径75 - 100 μm) を電気炉を用いて酸化的雰囲気 (Air)、還元的雰囲気 (IQF) の下でそれぞれ 1000°C で48時間加熱した。なおこの温度では結晶構造は変化しないとされている (Winter, 1978)。試料を加熱する前後で画像分光顕微鏡により近赤外領域の反射スペクトルを測定した。またEPMAを用いて出発物質と加熱後の試料の組成を調べた。結果、出発物質と比較して酸化雰囲気下 (Air) で加熱したものは $1.25 \mu\text{m}$ 吸収が浅くなり、還元雰囲気下 (IQF) で加熱したものは $1.25 \mu\text{m}$ 吸収は深くなった (図1)。また、これらの加熱前後のサンプル間でFeの含有量に有意差は認められなかった。

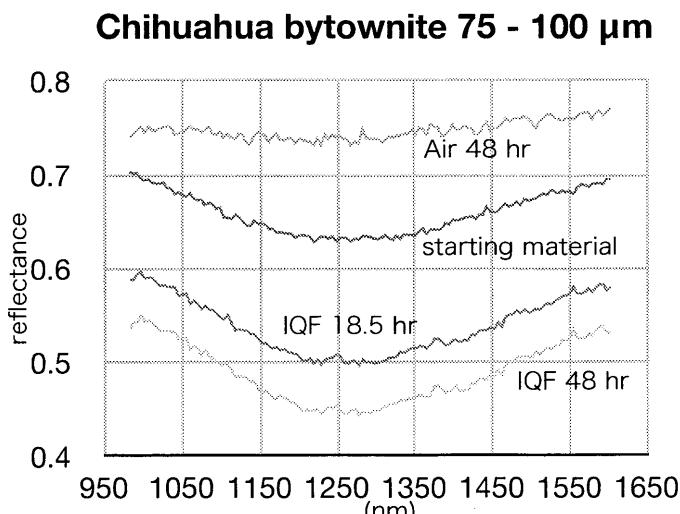


図1. Chihuahua産の斜長石 ($\text{An}_{(60)}$) の加熱実験前後の近赤外反射スペクトル(982 nm ~ 1602 nm)

以上のことから、酸化環境下での加熱では Fe^{2+} が Fe^{3+} になったために $1.25 \mu\text{m}$ 吸収が無くなつたと考えられる。一方、還元環境下での加熱で $1.25 \mu\text{m}$ 吸収は却つて深くなつたのは、もともとあった Fe^{3+} が還元されて Fe^{2+} になったからかもしれない。月でこのような還元環境が実現できるかは今後の研究が必要であるが、斜長石の $1.25 \mu\text{m}$ の吸収帯の深さがFeの価数を変えることで変化することが示唆された。

月上部地殻の水平・垂直組成分布推定：
かぐや(SELENE)分光データを用いた解析

Composition of the extremely plagioclase-rich lunar upper crust:

Results of the SELENE spectral data

○大竹真紀子、春山純一、諸田智克（宇宙航空研究開発機構）、
松永恒雄、山本聰、横田康弘（独立行政法人 国立環境研究所）、
中村良介（産総研）、廣井孝弘（ブラウン大）、武田弘（千葉工大）、小川佳子（会津大）
M. Ohtake, J. Haruyama, T. Morota (JAXA/ISAS),
T. Matsunaga, S. Yamamoto, Y. Yokota (NIES), R. Nakamura (AIST),
T. Hiroi (Brown University), H. Takeda (Chiba Institute of Technology),
and Y. Ogawa (The University of Aizu)

月周回衛星かぐや (SELENE) に搭載されたマルチバンドイメージャ (Multiband Imager; MI) データを用いて、我々は月上部地殻には従来の研究から推定されている値 ($\text{pl}=82\sim92\text{vol.}\%$) よりも斜長石に富んだ、ほぼ純粋な斜長岩 ($\text{pl}=98\sim100\text{vol.}\%$ で Purest Anorthosite ; PAN と呼ぶ) が普遍的に存在し、上部地殻の少なくとも一部がこのような組成であることを報告した[1]。このような純粋な斜長岩からなる地殻を形成するためには、非常に効率的なマグマからの結晶分離が必要であり、従来の月マグマオーシャンからの斜長石浮揚による地殻形成モデルでは説明が困難となる可能性がある。そのため、このような PAN の地殻の水平・垂直組成をより詳細に調べることが、今後の月地殻進化過程を考える上で非常に重要である。

本研究では、かぐや搭載スペクトルプロファイラ (Spectral profiler; SP) データおよび MI データを用いて、これまでに行ってきました PAN の月全球における分布の把握をさらに発展させ、それら PAN の組成、すなわち含まれる微量な有色鉱物の量や有色鉱物の Mg/Fe 比の水平・垂直分布を調べることによって、地殻の形成過程について考察する。

解析手法は、SP の全データから、斜長石に特徴的な 1250nm 付近の吸収深さが最大となるスペクトル（ほぼ純粋な斜長岩のスペクトル）を選定し、それら選定されたスペクトルについてカーブフィッティングをかけて吸収の中心波長や深さを求めることで組成を推定する。一方、水平位置は各選定データの緯度・経度情報から求め、また同じ領域を観測した MI データを使って該当スペクトルを示す露頭が存在する場所（クレータの内壁やイジェクタに相当する）のクレータ直径からクレータ掘削深度を推定することで地殻中の水垂直位置を調べた。

結果、月全球の高地領域に普遍的に分布する PAN 岩石中において、微少量存在する有色鉱物の量は地殻中で深さとともに減少する傾向にあることが明らかとなった。このことは、斜長石の浮揚による地殻形成モデルと傾向としては調和的と考えられるが、一方、結晶粒子サイズなど他のパラメータ変化による地殻組成推定への影響も考慮して、地殻形成過程を考える必要がある。

[1] M. Ohtake et al., Nature, 461, doi:10.1038.

かぐや搭載スペクトルプロファイラが明らかにした 月内部からのカンラン石表面分布とその起源

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

¹国環研, ²産総研, ³会津大学, ⁴国立天文台, ⁵JAXA/ISAS, ⁶ブラウン大学

ケイ酸塩鉱物の一種であるカンラン石は、月のマントルを構成する主たる鉱物と考えられている。月のマグマオーシャンの進化過程において、カンラン石は比重が大きいために深部に沈み込み通常では月表面に現れないが、巨大衝突クレーター形成の際に地下深部から月表面にもたらされると考えられている。そのことから、月面上のカンラン石分布を明らかにすることとは、月の内部およびその進化を理解する上で重要である。一方、地上観測や過去の探査機による探査では、カンラン石に富む領域は月面の数か所について報告されていたにすぎず、それがマントルに由来するのか、より浅い地殻下部のマグマに由来するのかがよく分かつていなかった。

最近の月探査衛星かぐや(SELENE)搭載のスペクトルプロファイラー(以下SP)による観測データを基にした我々の先行研究[1]により、世界で初めてカンラン石の月全球分布が明らかにされた(図1)。SPによって取得された月全球にわたる7000万点にも及ぶ可視近赤外(波長0.5-2.6 μm)域に対する連続スペクトルデータについて、カンラン石が持つ中心波長1.05 μmの吸収帯に着目して解析したところ、カンラン石に富む領域を新たに31か所(観測点としては約250点)が発見された。また、クレメンタイン探査機による過去の検出報告の多くは誤りであることが分った。

これらのカンラン石がマントル由来なのか、地殻下部由来かについて理解を深めることは、月内部構造と進化を考える上で重要である。先行研究[1]による解釈では、(1)これらのカンラン石に富む領域が、いずれも地殻の薄い巨大衝突盆地の周りに限られていること(2)月の裏側などの地殻の厚い部分や従来カンラン石に富むと考えられていた中程度のクレーターの中央丘にはほとんど見いだされないことから、巨大天体の衝突によって掘り起こされたマントル起源の可能性を提案している。一方、新たに見つかった31箇所のカンラン石に富む領域の局所的分布について詳細解析を行うことは、これらの起源に対する制約を与える上で重要な情報を与えると期待される。そこで、今回の発表では、これらのカンラン石に富む31箇所のうち、代表的な領域(南極エイトケン盆地周辺のシュレディンガークレーターなど)について詳細な解析と解釈を行ない、月表面に分布するカンラン石の起源について議論を行う。

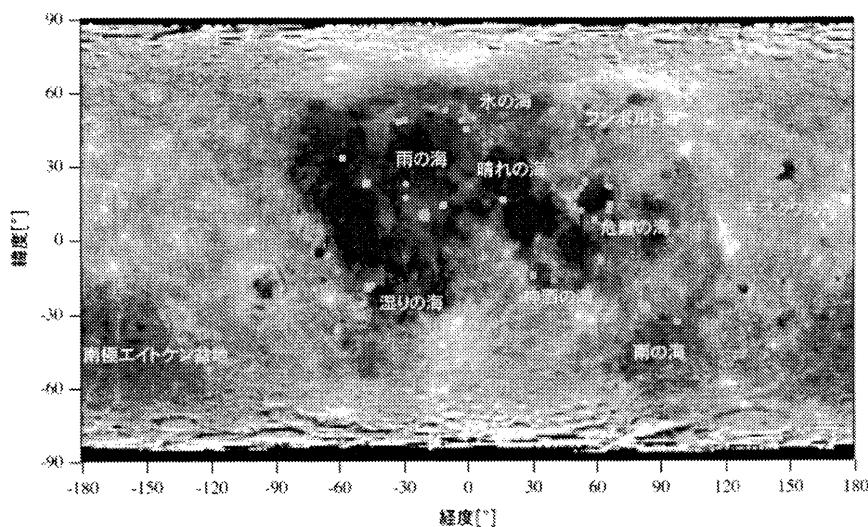


図1：カンラン石に富む領域の月全球分布(緑点)。背景図は、SPにより得られた赤色光(波長0.75 μm)の反射率の分布。

[1]Yamamoto et al., Nature Geoscience 3, 533 - 536, doi:10.1038/ngeo897 (2010).

「かぐや」ガンマ線分光計による月面観測から 得た月全球における鉄およびチタン分布地図

○¹ 唐牛 譲、² 小林進悟、² 晴山慎、³ 山下直之、¹ 長谷部信行、⁴ 柴村英道、⁵ 小林正規、¹ 早津佳那子、
¹ 長岡央、¹ 町田二郎、¹ 森田幹雄、¹ 藦科至智

¹ 早稲田大学理工学研究所、² 宇宙航空研究開発機構、³ フランス宇宙放射線研究センター
⁴ 埼玉県立大学、⁵ 千葉工業大学惑星探査研究センター

月表層の元素組成分布は、月の起源と進化を考える上で重要な情報である。日本初の大型月探査衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計（KGRS）は、エネルギー分解能に優れた Ge 検出器を採用することにより、月全球における主要元素（O、Mg、Al、Si、Ca、Ti および Fe）および天然放射性微量元素（K、Th および U）の月全球分布を作成し、月全体の化学組成に制約を与えることを目的としている[1]。Kobayashi et al. [2]は月面の天然放射性元素の絶対濃度の決定法を開発し、K の全球濃度分布地図を作成した。さらに Yamashita et al. [3]は Th と U の全球濃度分布地図を作成した。本研究では、月面の主要元素である鉄とチタンの全球濃度分布地図作成の最新の解析結果を報告する。

天然放射性元素とは異なり、月面の主要元素由来のガンマ線は、高エネルギーの銀河宇宙線が月面物質と相互作用して生成した 2 次中性子で原子核が励起されることにより発生する。このため、月面主要元素濃度を測定するためには、ガンマ線強度の観測に加えて、月面中性子フラックスの測定が必要不可欠である[例えは 4]。しかしながら「かぐや」は中性子分光計を搭載しておらず、主要元素組成を KGRS の観測のみで決定することは難しい。これに対して、晴山ほか[5]は月面からの中性子によって励起される Ge 検出器自身のガンマ線ピークを解析することにより、KGRS のデータから月面中性子分布地図を作成する試みを行っているが、未だ完成に至っていない。そこで本研究では、ルナプロスペクタ搭載の中性子分光計データ[6]を用いることにより、KGRS による鉄（7631 および 7645keV）およびチタン（6760keV）由来のガンマ線強度を補正して鉄およびチタン濃度分布地図作成を試みた。

得られた鉄およびチタンの濃度分布地図を比較すると、鉄の分布は嵐の大洋と雨の海の東側（Western Procellarum and Imbrium; WPI [7]）に鉄が最も濃集しているのに対し、チタンの分布は WPI よりもアポロ 11 号の着陸地点である静の海に最もチタンが濃集している特徴を示した。鉄とチタンのこのような濃度分布の違いは、表側の海の領域でチタン含有量の異なる海玄武岩が不均質に分布していることを示している。本講演では、さらなる鉄およびチタンの濃度分布の比較、およびアポロ試料や月隕石試料との比較を報告するとともに、月地殻の化学組成に対する考察を行う予定である。

- [1] Hasebe et al., EPS 60, 299, 2008.
- [2] Kobayashi et al., SSR DOI 10.1007/s11214-010-9650-2, 2010.
- [3] Yamashita et al., GRL 37, L10201, doi:10.1029/2010GL043061, 2010.
- [4] 唐牛謙ほか, 日本地球惑星科学連合 2010 大会.
- [5] 晴山慎ほか, 日本地球惑星科学連合 2010 大会.
- [6] Lawrence et al., JGR 107, 5130.
- [7] Prettyman et al., JGR 111, E12007, 2006.

Procellarum KREEP Terrane 内部のクレータの岩石学的構造

◦杉原孝充¹、大竹真紀子²、春山純一²、松永恒雄³、横田康弘²、諸田智克²、本田親寿⁴、
小川佳子⁴、平田成⁴、出村裕英⁴、浅田智朗⁴、中村良介⁵

¹ 海洋研究開発機構、² 宇宙航空研究開発機構、³ 国立環境研究所、⁴ 会津大学、

⁵ 産業技術総合研究所

月の地殻物質を構成する岩石とその空間分布を理解するために、「かぐや」搭載 LISM/MI の可視・近赤外域の分光画像データの解析を行ってきている。本稿では、特に Procellarum KREEP Terrane (PKT) 内部に存在する、特に著しく高い Th 濃度を示すクレータ (Th-spot クレータ) の地質構造、特に岩石学的構造について議論する。

Aristillus、Kepler、Aristarchus クレータは、Lunar Prospector のガンマ線分光計の Th 濃度マップで Th-spot としての特徴が確認され、「かぐや」搭載のガンマ線分光計によっても、より正確な Th 濃度が得られてきている。これら 3 つのクレータは高い Th 濃度という特徴を除き、それぞれの示す分光スペクトルの特徴は多様であり、PKT 内部の地殻物質の多様性が大きいことが示唆される。Aristillus クレータは Th-spot クレータの中でも最も高い Th 濃度を示すことが知られているが、その内部に分布する岩石の特徴も他の Th-spot クレータと比較して、より多様である。クレータ中央には、小規模な中央丘が複数密集するような形態で存在している。これら中央丘を構成する岩石の分光スペクトルの特徴からは、低 Ca 輝石と高 Ca 輝石に富む特徴を持つが、大きくみると中央丘の北部においてより高 Ca 輝石に富み、南部にいくほど低 Ca 輝石に富むようになる。またそれぞれの輝石に富む中央丘は、おそらく斜長石含有量の違いに起因するスペクトル形状の変化も観察される。これら岩相の変化は、明瞭な境界を持たず漸移的な場合が多い。またクレータ壁の分光特性を観察すると、苦鉄質鉱物としては、輝石に加えてかんらん石を含むようになり、斜長石の吸収に起因する 1250nm の吸収ピークも観察される。このように Aristillus クレータで観察される岩相変化は多様だが漸移的であり、PKT 以外では岩脈状に苦鉄質鉱物に富む岩体が貫入している場合もあることとは対称的である。この Aristillus での観察結果は PKT 内部の物質構造を理解する上で重要な知見を与えてくれる。

月周回衛星「かぐや」による分光観測データを用いた
月 South Pole-Aitken 盆地内の鉱物分布

○上本季更^{1,4}, 大竹真紀子¹, 春山純一¹, 松永恒雄², 諸田智克¹,
横田康弘¹, 中村良介³, 山本聰², 岩田隆浩¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²国立環境研究所, ³産業総合研究所, ⁴東京大学

月裏側にある South Pole-Aitken 盆地(SPA 盆地)は、巨大衝突により形成されたと考えられている。同盆地ではこの衝突により、表面の地殻が剥ぎ取られ、下部地殻やマントルが露出しており、月の起源の解明に繋がる月内部の元素・鉱物組成を直接的に把握するのに最も重要な地域であると考えられてきた。特に衝突の中心部においては、掘削深度が大きいため、表層の斜長石に富む地殻はすべて外へ飛散し、有色鉱物に富む岩石が広がっている可能性が高いとされてきた[1]。しかし一方、Pieters et al. (2001) では、盆地の地形的底部から近い場所 (Alder クレーター、中心より約 800km) に、anorthosite (斜長岩) が存在するとされ[2]、また、Ohtake et al. (2009) では、同じく地形的底部に近い Leibnitz クレーターに、purest anorthosite (>98vol.% 斜長石) が存在することが報告されていることから[3]、SPA 盆地内では従来の考え方に反して地殻が完全に剥ぎ取られていない可能性がある。そもそも、巨大衝突盆地の形成メカニズム (掘削深度や形状後の崩壊過程など) は未だ明確に把握されていないことから、SPA 盆地内に下部地殻やマントル物質が露出するのかどうかを含めて、これまでの研究を再検討し、SPA 盆地における盆地形成メカニズムを把握する必要がある。本研究では、SPA 盆地における盆地形成メカニズムを理解するため、まず地殻が剥ぎ取られず残存する領域を把握することでを目的とする。そこで、上部地殻の飛散状況を把握するために、SPA 盆地内の anorthosite の上記のすでに報告された地域以外における有無を確認するとともに、その盆地内における分布を調査する。更に、斜長岩の他に存在する岩石種およびその分布の解析から、盆地全体の鉱物分布を把握し、盆地内での各位置における掘削深度推定に繋げる。

研究手段としては、月周回衛星「かぐや」搭載のマルチバンドイメージヤ (MI) による分光観測データを用い、SPA 内部のクレーターおよびその周辺の反射スペクトル解析を行うことで、鉱物に特徴的な吸収を観察した。MI は、可視波長域においては 415, 750, 900, 950, 1000nm、近赤外波長域においては 1000, 1050, 1250, 1550nm のバンドを観測する。そこで、1250nm にある斜長石の吸収を用いて斜長石に富む岩石の存在の確認をするとともに、pyroxene (900~1000 nm 付近), olivine (1050nm 付近) の吸収を観察することにより、各観測地点の岩石種を調べた。解析する地域は、斜長石に富む岩石は有色鉱物を多く含む岩石よりも反射率が高いという特徴を利用し、SPA 盆地の内部で、反射率の高い場所を Clementine 750nm-basemap を用いて選出した。今回は、この basemap の中で最も反射率の高いものに対して 8割以上の反射率である地域を解析対象とし、SPA 盆地内で 55 箇所を選出した。

これまでに 55 箇所のうち 35 箇所の解析を終了しており、それら結果から、盆地の地形的底部から上記の Alder クレーターとほぼ同じ距離にある Poincare 北部のクレーターにおいては、クレーター内の南部のリム上に purest anorthosite (>98vol.% 斜長石) がみられることがわかった。さらに、Alder クレーター南部リムをはじめ、比較的地形的底部から外側にある 6 箇所において、purest anorthosite ほどではないが斜長石に富む岩石 (>90vol.% 斜長石) がみられたが、より地形的底部に近い（中心かれ半径約 800km 以内の）位置にある 28 箇所には、斜長石に富む岩石はみられなかった。

のことから、これまでの解析では、anorthosite は SPA 盆地の地形的底部付近には分布しておらず、地形的底部から約 800km の範囲より外側では複数見られることがわかった。その中でも特に盆地の縁から内側へ約 400km の地域に比較的多く分布していることが明らかとなった。今後更に解析を進め、内側に anorthosite がないのかどうか調べ、SPA 盆地形成メカニズムを明らかにする。

[1] Spudis et al., (1994) Science, 266, 1848-1851

[2] C. M. Pieters et al., (2001) Journal of Geophysical Research, vol. 106, No. E11D.

[3] Ohtake et al., (2009) Nature 461 (7261):236-40

かぐや測月探査による南極エイトケン盆地の構造

○佐々木晶・石原吉明・花田英夫・荒木博志・松本晃治・
野田寛大・菊池冬彦・サンダー ホーセンス¹
並木則行², 岩田隆浩³

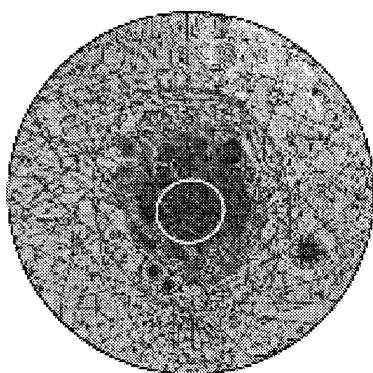
¹国立天文台、²千葉工大、³ISAS/JAXA

2007年9月に打ち上げられ、2009年6月まで観測を続けた、かぐや (SELENE) には、月の裏側の重力を調べるためのリレー衛星、衛星位置決定精度を高めて重力場精度を向上させる目的の VLBI 衛星、さらに月の全面の詳細地形を調べるためにレーザ高度計が搭載されていた。これにより、世界ではじめて、正確な全球の重力分布、地形分布が得られた(Namiki et al., 2009, Araki et al., 2009, Matsumoto et al., 2010)。さらに、重力異常を地殻・マントル面の変化と解釈することにより、全球のモホ面分布、地殻厚さ分布が取得されている(Ishihara et al., 2009)。

月の裏側にある南極エイトケン盆地は、直径 2500km の太陽系最大の衝突地形である。この規模の衝突盆地であれば、地殻が吹き飛ばされていてマントルが露出していても不思議ではないが、これまでの観測ではマントル物質露出の明瞭な証拠は無く、下部地殻物質や衝突溶融物で底が覆われているという主張があった。

Garrick-Bethell and Zuber(2009)は、主にクレメンタイン高度計データや Fe や Th の分布に基づいて、南極エイトケン盆地全体が 1:1.3 の橢円形であり、これは斜め衝突によって形成されたと主張している。「かぐや」による地殻厚さを見る限りは、橢円形の方向は合っているが縦横比は小さい。また、（盆地形成後の衝突クレーターの影響を除く）中央部の地殻が最も薄い領域は、橢円形の中心から南側に位置し

ている。これも斜め衝突を示唆しているかも知れない。この領域でも 25km 程度の地殻厚さがある。南極エイトケン盆地の中心部では、衝突直後に生成された衝突溶融物からなる地殻で覆われていて、マントル物質は露出していない。南極エイトケン盆地の内部にカンラン石が見られないという、「かぐや」の分光データとも対応している。



月面小型クレーターの光条消失時間

○ 鈴木静香¹、本田親寿¹、平田成¹、浅田智朗¹、出村裕英¹、小川佳子¹、北里宏平¹、寺薙淳也¹、諸田智克²、大竹真紀子²、春山純一²、松永恒雄³

¹会津大学、²JAXA/ISAS、³国立環境研

惑星表面に形成されるクレーターは衝突による放出物によってできる光条をもっている。クレーターの光条は時間の経過とともに見えなくなることが分かっている。クレーターの光条が見えなくなる原因は、月表面物質が太陽風や宇宙線、微小隕石によってさらされる結果、反射スペクトルが赤化する宇宙風化作用と、光条を形成している放出物と放射物下の物質が隕石の衝突による搅拌作用によるものであると考えられている(Wilhelm, 1987)。光条が消失する時間スケールは径 5 km 以上のクレーターの場合、7 億 5 千万年であることが報告されている (Werner and Medvedev, 2010)。本研究の目的は、月面にある小型クレーター(直径 300 m 以上)の光条が消失するまでの時間を推定することである。

本研究では、Kaguya/MI データを用いてスペクトルの形状から光条の有無を調べた。表面物質の宇宙風化作用の光学的指標を表す値が OMAT parameter (Lucey et al., 2000) である。宇宙風化作用が進行するとともに OMAT 値は減少することが知られており、OMAT 値が 0.12 以下は風化しきっているとされる(Grier et al., 2001)。MI データを OMAT に変換し、光条をもつ直径 300m 以上のクレーターを抽出した。本研究で抽出したクレーターのサイズ頻度分布から、小型クレーターの光条が消失するまでの時間は 7 千万年(直径 300 – 800 m)であることが分かった。Werner and Medvedev (2010) が示した結果と比較すると、小型クレーターの光条が消失する時間スケールが、大型クレーターの約 1/10 という結果になった原因是次の 2 点が考えられる。第一に、光条が消失しかかっているクレーターを十分抽出できていない可能性がある。第二に、光条消失の時間がクレーターの大きさに依存し、各々クレーターの放出物の厚さの違いに関連している可能性があるかもしれない。

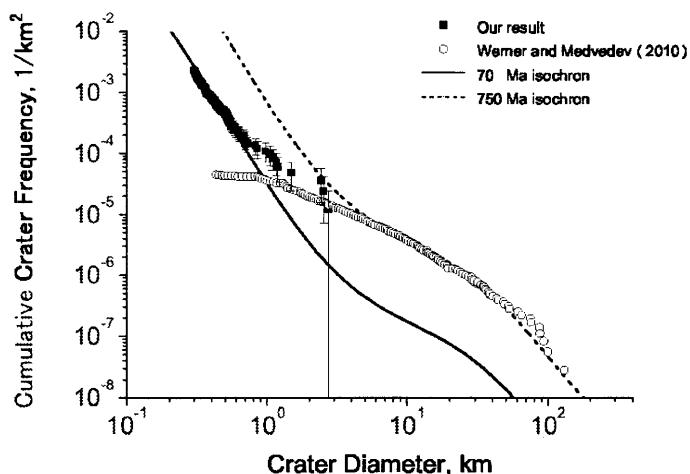


図 1: 解析した領域のクレーターサイズ頻度分布

月の海の二分性と時間変化

○諸田智克¹、春山純一¹、大竹真紀子¹、松永恒雄²、本田親寿³、
横田康弘²、木村淳⁴、川村太一⁵、小林進悟¹、石原吉明⁶、武田弘⁵

¹宇宙研、²国環研、³会津大、⁴北海道大、⁵東大、⁷国立天文台

月の海は表側に集中し、裏側では一部の低地に見られるだけである。このような不均質性の原因はまだよくわかっていない。我々はこれまでに、月周回衛星「かぐや」で得られた高解像度画像データを用いて、裏側とPKT領域の海の年代と体積を調査してきた。これらの成果を用いて、本発表では海の火成活動の空間的な特徴とその時間変化について報告し、月の二分性形成モデルに対して制約を行う。

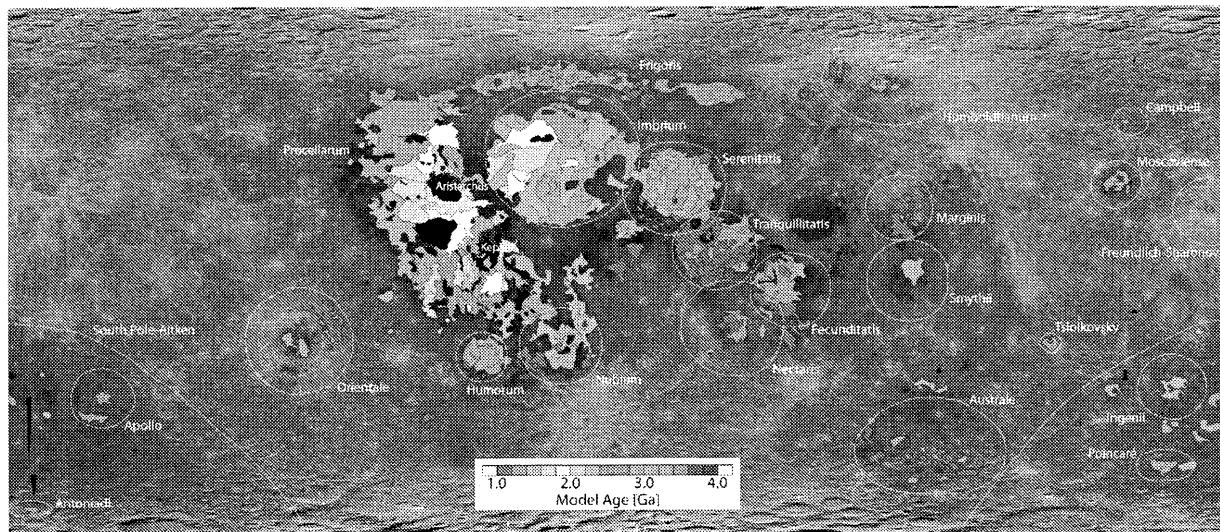


図1. 溶岩流の年代マップ [Greeley et al., 1993; Hiesinger et al., 2000; 2003; 2006; 2010; Haruyama et al., 2009; Morota et al., 2009; 2010].

月コペルニクスクレータに露出する地殻-マントル(?)境界

○荒井朋子¹、大竹真紀子²、山本彩³、杉原孝充⁴、廣井孝弘⁵、中村良介⁶、
和田浩二¹、山本聰⁷、松永恒雄⁷、春山純一²

¹千葉工大惑星探査研、²JAXA、³RESTEC、⁴JAMSTEC、⁵ブラウン大、⁶産総研、⁷環境研

コペルニクスは月の表側赤道付近の(北緯 9.5 度、西経 20.0 度)、直径 95km のクレータで、インブリウムベースンのクレータリングの南方 100 km のところに位置する。コペルニクスのクレータ放出物とされるアポロ 12 号のインパクトメルト試料の年代から、形成年代は、約 8 億年前と推定される。嵐の大洋及びインブリウムベースンが広がる地域は、月面にカリウム、トリウム、ウラン及び鉄が濃集する地域で、Procellarum KREEP Terrane (PKT)と呼ばれる。月面の7割以上が斜長石に富む地殻に覆われているのに対し、PKT とその周辺には斜長石に富む地殻は乏しく、大部分を海の玄武岩に覆われている。PKT は、月全球において最も熱的に活発な地域であり、海の火山活動により、初期の地殻情報が保持されにくい場所である。しかし、コペルニクスとその周辺は、隆起したリング上に位置するため、比較的標高が高く、玄武岩質マグマ流出を例外的に免れた地域である。また、クレータリングでは、元々地下深部に位置した物質が、クレータ形成に伴い表層に移動しているため、地下深部も物質や構造を理解するためには最適の研究対象である。本研究では、月表側の初期地殻の組成と構造を理解するために、かぐやマルチバンドイメージの可視・近赤外波長域の反射スペクトルデータに基づき、コペルニクスクレータの内部及び周囲の鉱物分布を調べた。

中央丘及び西側のクレータ底、クレータ壁及びその周囲は、かんらん石に富む。一方、東側のクレータ底、クレータ壁及びその周囲は、斜長石に富む。さらに、南側のクレータ壁と周囲は輝石に富む。輝石に富む地域は、中央丘北側に少量筋状にも見られた。斜長石の反射スペクトルの吸収は、輝石やかんらん石に比べ、非常に弱いため、斜長石の存在度がほぼ100%近い場合のみ検出可能である。従って、クレータ底東側は、ほぼ斜長石100%のPurest Anorthositeであると考えられる。また、輝石の吸収は、かんらん石に比べ圧倒的に大きいため、かんらん石の吸収が顕著に見られた東側クレータ底は、輝石に乏しい、かんらん石(+斜長石)からなる岩相であることがわかる。

南側クレータ壁とクレータ周囲に存在する輝石に富む物質は、この地域の表層に分布するインブリアムのクレータ放出物と考えられ、クレータ南側に分布が限定するのは、クレータ北側からの斜衝突による、クレータ放出物の非対称分布が原因である可能性が高い。さらに特筆すべきは、クレータ底西側のかんらん石に富む地域と東側の斜長石に富む地域の境界は、ほぼ直線的であることがある。MIデータから作成した地形モデルから、前者は後者よりも約100m高度が低い。クレータ地形とは独立した、非対称かつ不均質な鉱物分布が、クレータ形成前の、この地域の地質や地形を反映していると考えると、直線的に接するかんらん石に富む地域と斜長石に富む地域は、地殻とマントル(あるいは下部地殻)の境界面が露出していると考えられる。従って、コペルニクスは、月の内部組成及び構造を理解する鍵であり、今後の月着陸探査における重要な候補地点である。

月地殻形成条件から制約する マグマオーシャン化学組成

○酒井 理紗¹, 久城 育夫¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹, 橋 省吾¹

¹東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

はじめに 月は形成直後には深さ数百 km 規模のマグマオーシャン(Lunar Magma Ocean: LMO)状態にあり、冷却過程での結晶分化作用によって、マントルおよび斜長岩地殻ができたと考えられている。しかし、LMO の化学組成や深さ、進化過程については未だに強い制約は与えられていない。本研究では斜長石晶出時の LMO の密度と粘性を測定し、斜長岩地殻形成条件を満たす初期 LMO 化学組成の制約を試みる。特に、酸化還元条件によって大きく変化し、またメルトの密度や粘性を大きく変える FeO の存在度、および、斜長岩地殻に濃集するため、LMO の初期深さを規定する重要な量である Al₂O₃ の存在度を推定することを目的とする。

実験 初期 LMO の化学組成として、地球のバルクマントル組成から FeO, Al₂O₃ をそれぞれ独立に変化させた組成を用い、かんらん石や輝石の分別結晶作用を様々に仮定し、熱力学計算により斜長石析出時の LMO の化学組成を求め、それらの組成のガラスを作成し、これを実験の出発物質とした。実験はピストンシリンダーを用いて斜長石析出時の温度圧力条件(1250–1300 °C, 0.5–1.0 GPa)でおこない、メルト中で斜長石が浮上できるかどうか（メルト密度が斜長石密度より大きいか）を確認した後、球落下法を用いて、メルトの粘性を決定した[1]。

結果 FeO 量のみを変化させた組成の実験から、斜長石が密度差によって浮上するためには初期 LMO 中の FeO 量は 4 wt% 以上である必要があることがわかった。また粘性測定実験からメルト中の FeO 量が多いほど粘性が下がることが確認された。粘性の圧力依存性はほとんどなく、温度依存性を示す活性化エネルギーは 230–320 kJ/mol であった。

考察 実験で得られた粘性を用いて斜長石析出時の LMO の Rayleigh 数を見積もると 10^{19–21} となり、激しい乱流状態であることが予想される。対流境界層における結晶分離効率を決定する実験で、析出した結晶が境界層に運ばれると非常に効率よく分離することが示されているが、乱流状態では析出した結晶を境界層まで運ぶためには、密度差だけでなく斜長石の上昇速度が LMO の対流速度に比べて十分に大きい必要がある。実験結果に基づき、斜長石が対流メルト中から分離できる条件[2]を検討し、斜長石の浮上・分離条件を満たすことができる LMO の組成範囲を推定した結果、初期 LMO の FeO 量が 8wt% 以上であれば、分別結晶過程によらず、斜長岩地殻形成条件を満たすことがわかった。また、地殻中に斜長石以外に析出する可能性のある単斜輝石の Mg# (=Mg/(Mg+Fe)×100) の推定値を、月岩石中の単斜輝石の Mg# と比較し、初期 LMO の FeO が 13wt% 以下である必要があることもわかった。講演では実験に基づいた Al₂O₃ 量の推定値についても発表する予定である。

[1] Kushiro, 1976, J. Geophys. Res. 81, 6347

[2] Tonks & Melosh, 1990, in Origin of the Earth, 151

月表層の熱伝導率についての実験的考察

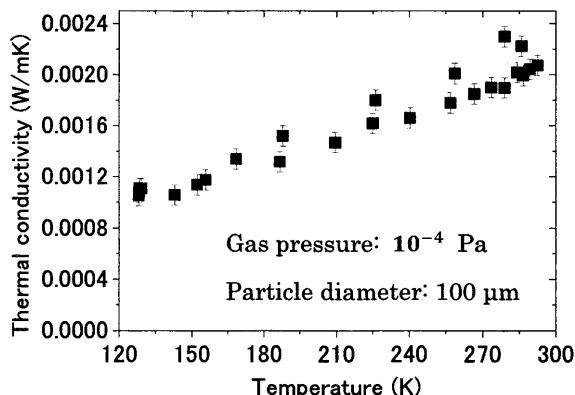
坂谷 尚哉, 小川 和律, 飯島 祐一, 田中 智

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

月表層の熱伝導率を正確に測定することは、熱流量の決定、さらに熱流量をもとにした月内部の熱的な状態の理解のために重要である。アポロによる月面の熱伝導率測定の結果、月面レゴリスの熱伝導率は非常に低いことが確認された ($\sim 10^{-3}$ W/mK)。この低熱伝導率は主に月面が真空で、空隙率の高いレゴリスで覆われているためだと解釈されているが、詳細に解説されているわけではない。レゴリスのような粉体の熱伝導率は、粒径、嵩密度、表面の形状、温度、粒子同士の接触状態など様々なパラメータに依存する。そこで本研究では、月面レゴリスのような低熱伝導率のアナログ物質を用いて、高真空中で熱伝導率計測実験を行い、粉体の熱伝導率の上記のようなパラメータ依存性について考察する。

高真空中で実験を行うためには、コンダクタンスの大きい粉体サンプルが必要である。そこで、本実験では、球体で、粒径がそろっているガラスビーズを用いた。実験で変化させたパラメータは粒径、圧密度、温度である。用いた粒径は平均直径 60, 100, 430, 860 μm の 4 種類である。圧密度はガラスビーズ層の熱伝導率を測定する深さを変えることによって変化させる。そこで、高さ 40 cm の容器の深さ 1, 5, 15, 30 cm の 4 点に熱伝導率の測定点を設けた。真空槽内の気圧は約 10^{-4} Pa である。この気圧では気体による熱輸送の効果は無視することができる。また、液体窒素を用いた冷却装置によって、温度を 130~300 K の間で変化させた。

右下の図は温度を変化させたときのガラスビーズの熱伝導率変化を示したグラフである。測定深さは 1 cm、粒径は 100 μm である。ガラスビーズは月面レゴリスと同程度の熱伝導率である。温度 130~300 K の変化で熱伝導率は約 2 倍変化した。また、どの粒径でも深さが深いほど熱伝導率が高くなった。これは圧密度が高いほど熱伝導率が高くなることを意味する結果である。100 μm ビーズの場合、深さ 1 cm と 30 cm の変化で、熱伝導率は 0.002 W/mK から 0.005 W/mK まで增加了。熱伝導率と粒径の間には直線関係が見られ、粒径が大きいほど熱伝導率は高くなかった。本発表では、実験結果を踏まえた理論的考察も行う。



次期月探査計画 SELENE-2 の着陸地点検討報告

○佐伯和人¹、荒井朋子²、荒木博志³、石原吉明³、大竹真紀子⁴、
唐牛譲⁵、小林直樹⁴、杉原孝充⁶、春山純一⁴、本田親寿⁷
(¹阪大、²千葉工大、³国立天文台、⁴JAXA、⁵早大、⁶JAMSTEC、⁷会津大)

日本の次期月着陸探査計画 SELENE-2 は、「かぐや(SELENE)」の後継計画として、2010 年台半ばの打ち上げを目指して計画されている。SELENE-2 の科学的成果を最大にする着陸候補地点を選ぶために、2010 年 3 月に月着陸候補地点検討会議が発足した。本検討会議では、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の地点に着陸し、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。2010 年 6 月に日本惑星科学会、日本鉱物科学会、日本地球化学会の会員をはじめ、広く月科学に関心のある地球惑星科学コミュニティ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。下図は提案テーマを、解明の対象を元に分類した項目リストである。これらの提案を基に科学目的の重要性、技術的実現可能性を考慮しつつ議論を進め、今日もっとも優先すべきサイエンスを実行するための、複数の着陸候補地と探査計画案を作成した。本講演では、探査計画案とその選択根拠を説明するとともに、今後の引き続き進められる着陸地選定方針について紹介する。

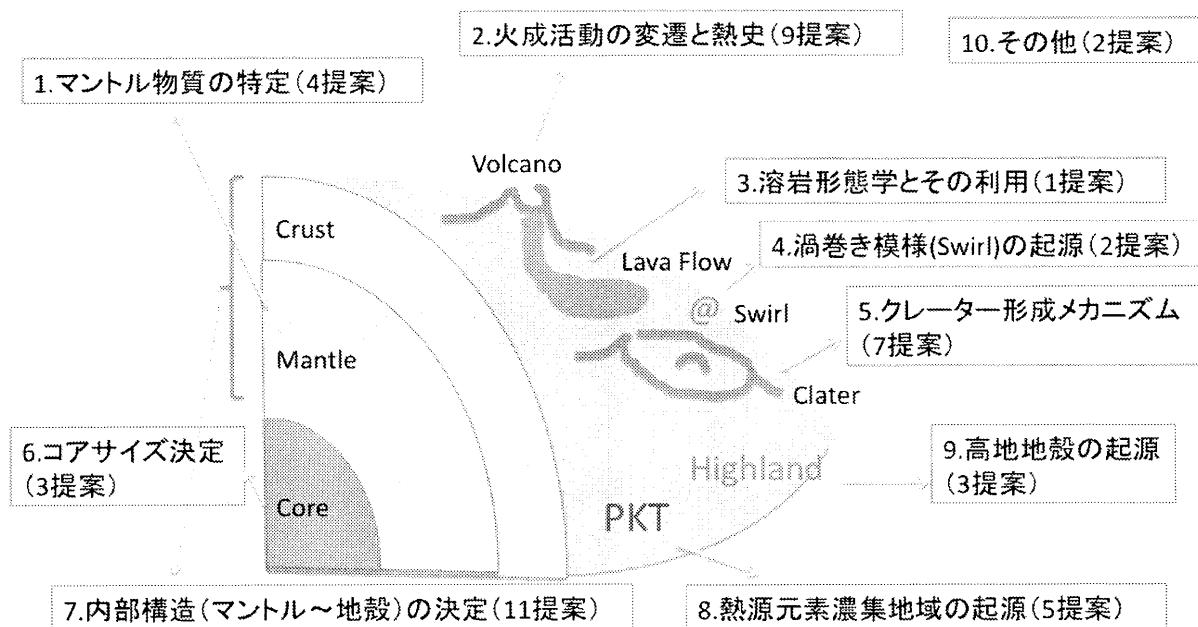


図 1 応募科学テーマ分類図（着陸地点ではなく、解明の対象で分類したもの）

月惑星表層元素分析のためのガンマ線半導体検出器の開発

○井上洋介^{1, 2}、三谷烈史²、小林進悟²、飯島祐一²

¹東京大学、²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

月惑星表層の元素組成を知ることは、月惑星の形成過程やその火成活動を理解するために重要である。特に U、Th、K は固相に取り込まれにくい液相濃集元素であり、かつ、その放射線崩壊に伴う発熱は惑星進化における重要な熱源である。さらに U、Th は難揮発性元素に分類され、惑星の形成過程を制約する上でも重要な元素である。この U、Th、K の表層における存在量を知るためにガンマ線を利用することができる。放射性崩壊に伴い発生するガンマ線は、その元素固有のエネルギーを持つており、そのエネルギーと強度を測定することで、元素を同定し、その存在量を知ることができる。

将来の月惑星探査における月惑星表面上への着陸船・ローバーへの搭載を考えると、検出器の軽量化、小型化、省電力化が必要となり、これらの要求を満たしつつ月惑星表層の温度環境でも動作させる必要がある。そこで我々は常温でも動作が可能である CdTe 半導体を用いた検出器の開発を進めている。これまでの研究では常温以上でのスペクトル性能はあまり調べられておらず、月面昼間での動作を考えると、室温以上の高温側で検出器を評価する必要がある。

CdTe 検出器において取得されるスペクトルのエネルギー分解能を決めている主な要因は、回路ノイズと「電荷輸送効率」である。回路ノイズは、リーク電流と静電容量に依存する。また電荷輸送効率とは、CdTe とガンマ線の相互作用で生じた電荷キャリア（電子一正孔対）の収集効率のことである。CdTe は正孔の輸送効率が悪いために、検出器の厚さ、印加する電圧によっては、スペクトルのピークが低エネルギー側にテールを引き、エネルギー分解能を悪化させる。以上のエネルギー分解能決定要因のうち、温度依存性があるのは理論的にリーク電流と電荷収集効率である。そこで本研究では、まずこれらの影響を確認した。

電極素材の異なる 2 種の CdTe 単素子を評価した。陽極が In、陰極が Pt (In/CdTe/Pt) と、もう 1 つは近年開発が進められている陽極が Al、陰極が Pt (Al/CdTe/Pt) のものである。リーク電流は Al/CdTe/Pt の方が大きいが、これは金属／半導体の接触のパラメータの違いと整合している。次に放射線源¹³⁷Cs を用い、662 keV のガンマ線を入射して行ったスペクトル測定では、662 keV のピークにおいて In/CdTe/Pt では半値全幅で 1.6 % (@20°C)、Al/CdTe/Pt では 1.0 % (@20°C) という結果を得た。また、温度を 0°C から 50°C まで 10°C おきに変化させて測定を行った。リーク電流は、温度が 20°C 上昇すると 1 枝増加することがわかった。温度上昇に伴うエネルギー分解能の悪化は、温度上昇に伴う回路ノイズの増加分よりも大きく、その分は電荷輸送効率の悪化が原因だと考えられる。

実用検出器として確立するためにはなるべく大きな面積が必要となる。しかし面積を大きくすると静電容量が増加し、エネルギー分解能を悪化させる。そこで片方の電極が細分化された片面ストリップ検出器を開発した。この検出器は面積を大きく保ちつつ電極をストリップ状に分割することで 1 読み出し当たりのノイズを低減することができる。電極を分割しているので複数のチャンネルを同時に読み出す必要があるが、低雑音アナログLSIを使用することでそれを可能にした。In/CdTe/Pt 片面ストリップ検出器を評価した結果、1.3 MeV までスペクトルピークを取得することができ、エネルギー分解能は 662 keV のピークにおいて半値全幅で 2.5 % (@17°C) を得た。検出器の温度特性は、40°C まではスペクトルを得ることができ、40°C、662 keV でのエネルギー分解能は 4.3% となった。

今回は Al/CdTe/Pt 片面ストリップ検出器の測定結果を示すとともに、In/CdTe/Pt 片面ストリップ検出器と比較し、その性能の違いの考察と今後の課題について発表する。

月面科学観測機器の熱制御システム(サバイバルモジュール)の開発

○小川 和律¹, 飯島 祐一¹, 坂谷 尚哉², 田中 智¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

² 東京工業大学大学院 地球惑星科学専攻

現在、月面で観測を行う機器のための熱制御装置(サバイバルモジュール)の開発を進めている。月では地表温度が昼と夜で -200 から 100 C 程度と大きく変動するため、機能を正常に保つためには、昼間の熱を効率よく排熱し、かつ夜は暖めるという矛盾する機構が不可欠であり、長期観測型の機器の成功を左右する重要な開発課題である。開発中の装置は、このような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。

月周回探査機 Kaguya の後継機となる月面着陸探査機 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。これらの機器は主に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総合することで、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制約条件を推定し、月の起源、歴史について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。

観測機器の温度制御のため我々が提案するのは、機器と周囲の地面を山形の多層断熱膜(MLI)で覆い、内部機器をレゴリス表層と積極的に熱結合させる手法である。これによりレゴリス層が蓄熱材として働き、断熱機能だけでなく、昼間の熱を MLI 下のレゴリスに蓄えることができる。今まで、熱数学モデルによる評価、また熱性能評価用試作機を用いた熱パラメータの確認などを通して、このコンセプトの有効性を調査した。その結果、観測機器およびサバイバルモジュールの主要なエレキについて、昼夜の温度変動を 0 から 40 C までの範囲に抑えることができ、月面の長期サバイバル(目標 1 年)の可能性を示すことができた。

今回は新たに、内部に搭載するデータ処理系エレキ、通信系(対地球、着陸機)のエレキとアンテナの概念検討を実施し、これらの発熱を運用案をふまえて熱モデルに組み込み、より実際のコンフィグレーションに即した検討を実施した。また現在、観測機器に電力を供給するための電源系の検討を実施中である。長期間の電力をどのように確保するか、一次電池、二次電池、太陽電池などの電源系のコンフィグレーション検討が、重要な開発課題である。モジュール熱設計の鍵となる MLI は、探査機への搭載性のため打ち上げ時には折り畳んでおき、月面で山形に展開することを検討している。確実に展開するための最適な方法についてトレードオフを実施し、最終的に試作機を用いて試験を実施する。本発表では、これら一連の開発の現状を報告する。

将来の月地震探査における コアフェーズ検出可能性の評価

○山田竜平¹、Raphael Garcia²、Marie Calvet²、竹内希³、小林直樹¹、Phillipe Lognonne⁴

¹ISAS/JAXA、²Toulouse University、³東大/地震研、

⁴Institut de Physique du Globe de Paris

月中心核のサイズ、及びその組成の解明は、月形成時の初期構成物質に対して重大な制約を与えることから、月の起源を理解するうえでの主要な課題となっている。これまでの月探査で行われた重力場、磁場、測地観測の結果より、月はその中心におよそ 200~450km の液体 Fe 核を持っている事が示唆されている(eg. Konopliv et al., 1998, Hood et al., 1999)。ただし、これらの観測からだけではコアの組成を一意に決定することはできず、サイズの不確定性も大きい。コアのサイズと組成に関してより確定的な情報を得るには、これまでの地球物理探査データに加えてコア内部を直接伝播してきた直達地震波及びコア-マントル境界での反射波（コアフェーズ）を地震計により検出し、その到達時刻情報からコア内部の速度構造（弾性的性質）及びそのサイズを決定する事が重要である。

一方、過去のアポロミッションにおける月地震探査(eg. Toksöz et al., 1974)で得られた地震（月震）観測データからは、ネットワークの口径の狭さ（口径 1100km の三角ネットワーク）や地震計の感度不足、月表層で受ける地震波の激しい散乱により、いまだコアフェーズと断定できるものは検出されていない。そのため、現在 JAXA を含むいくつかの宇宙機関で、1 点~4 点の新しい月地震観測点の設置が検討されている。本研究では、これらの将来の月地震探査において、特に少数の観測点（最低 1 点）という条件の下、設置予定の地震計を用いてコアフェーズを検出、同定できる可能性について検討を行った。

観測点が 3 点より少なく、観測データのインバージョンから独立して月震の震源位置が決められない将来探査を想定した場合、月面ではアポロで位置決定された深発月震イベントの利用が期待できる。深発月震は深さ 700~1100km の間で、月-太陽-地球の位置関係（潮汐力）に依存し、同一の震源域で繰り返し発生する事が知られている(Lambeck, 1977)。本研究では、まずアポロで観測された深発月震データと月震データ解析より導出された深発月震の活動度と月内部構造モデルを基に月震コアフェーズ（反射波と直達波）の振幅値を見積もった。その振幅値を設置予定の地震計の性能と比較し、各震央距離におけるコアフェーズの検出可能性について評価している。また、アポロデータより位置決定された深発月震の震源位置を基に、月面のどの位置においてコアフェーズを最も良く検出できるかの検討も行った。本発表ではこれら月震のコアフェーズ検出に関する評価結果について報告・議論する予定である。

月・火星空洞探査について

○春山 純一¹、西野 真木¹、斎藤 義文¹、橋本 博文¹、白尾 元理²、小林 憲正³、

横堀 伸一⁴、大島 泰郎⁵、山下雅道¹、諸田 智克¹、小林 進悟¹、高橋 太¹、

西堀 俊幸¹、宮本 英昭⁶、長谷中 利昭⁷、山岸明彦⁴、吉村 義隆⁸、横田 康弘⁹

¹JAXA・ISAS、²惑星地質研、³横浜国立大、⁴東京薬科大、⁵共和化工、

⁶東京大、⁷熊本大、⁸玉川大、⁹国立環境研

SELENE（かぐや）による観測で、月の嵐の大洋の中程に位置するマリウスヒルに直径 60 ~70m、深さ 80m 以上に及ぶ縦穴が見つかった (Haruyama et al., GRL, 2009)。その後、地形カメラの全球にわたる観測データを利用して調査した結果、他にも、二つの縦穴が静の海と賢者の海に発見された。これらは、いずれも直径が 100m 以上にも及ぶものであった。

SELENE により発見された縦穴は、地下の溶岩チューブに続くものと考えられる。溶岩チューブは地球では玄武岩質の粘性の低い溶岩流によくできるものである。溶岩チューブが形成されることで溶岩流の輸送距離が延びる事になる。つまり、溶岩チューブの形成の有無は、溶岩流の流出量、流出率などを知る上でキーとなる要素であり、この意味で溶岩チューブに続くと思われる縦穴の発見は、月の火成活動を研究する上で重要なものである。

また、近年の観測から、太陽風プロトンは月表土内酸素と結合して水酸基（もしくは水）となることがあることが確かめられつつあるが、この現象は縦穴の内部でも起こりうるだろう。太陽風プロトンが太陽風磁力線周りにある程度の方向性の広がりを持つのに対し、太陽紫外線には方向の広がりは無い。このことはすなわち、月の縦穴底部に形成された水酸基が、すぐに光脱離による散逸を起こしにくいことを意味する。更に微小隕石衝突による縦穴壁から供給されるダストが、縦穴底を覆うであろうことを考えれば、より太陽風物質の濃集が期待される。

SELENE で見つかった三つの縦穴は 32~37 億年前に形成された地質ユニット域に有る。この時期は地球では生命が既に誕生していた時期であり、未だ多くの隕石衝突が地球にあった時期である。表層形成時期に時を同じくして、月の縦穴が形成されていたとしたら、月の縦穴には、更に地球からの過去の生命体を含んだ物質も期待されるかもしれない。

以上のように、月の縦穴は、科学的に重要な研究対象である。加えて、縦穴構造は、月だけではなく、更に火星にも見つかっている。火星における縦穴構造もまた同様に、地質学的、生命科学的に重要な研究対象である。本講演では、こうした月・火星における縦穴構造の紹介と、これらの科学的な研究トピックスを、将来探査も含めて議論を行いたい。

Planetary Data Access Protocol による 惑星科学データ共有

○山本幸生¹, 篠原育¹, 笠羽康正²

¹宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所 ²東北大大学

近年、世界各国において惑星探査が活発になり、惑星科学データとして解析に耐えうるデータを各国が取得できる状況が育ってきている。これに伴い、惑星科学データの共有と利用を促進する国際惑星データ連合 (International Planetary Data Alliance; IPDA) が発足し、NASA, ESA をはじめインド、中国、欧州各国からもメンバーとして参加し、JAXA も IPDA のメンバーとして国際的なデータ利用の促進に貢献している。

IPDA の活動は多岐に渡り、NASA の惑星科学データベースである Planetary Data System (PDS) の時期バージョンの開発支援や、標準化の手続きなど、惑星科学データを取り扱うための様々な項目が議論されている。その中の一つとして Planetary Data Access Protocol (PDAP) がある。

PDAP は技術的には Web Service API に位置づけられ、Google Maps API や Amazon API など、http をベースとした技術上に実装されている。PDAP は惑星データベースの検索に特化するために、検索項目に NASA PDS で用いられている一般的なキーワードや、緯度・経度を持つデータに対して検索可能なように設計されている。

また PDAP の応答は共有可能なように VOTable と呼ばれるテーブルデータを XML で表現する技術を用いている。VOTable はもともとは Virtual Observatory (VO) と呼ばれる仮想天文台で用いられている技術であり、惑星科学データの共有についても現在採用されている。

JAXA では「はやぶさ」や「かぐや」のデータをこの PDAP で配信する予定であり、また将来の惑星探査機データにおいても PDAP により配信することを検討している。これにより JAXA 内におけるミッション間を超えたデータ検索が可能となり、また PDAP により世界に向けて配信することで、他の国とのデータ共有も可能となる予定である。

はやぶさ探査機の大気圏再突入の地上観測

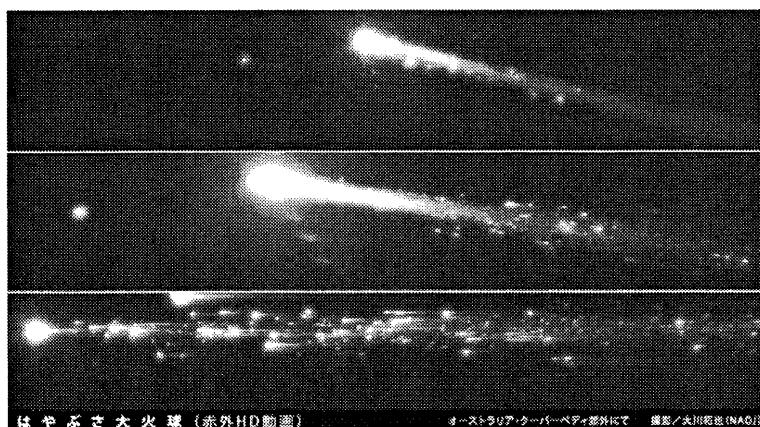
○渡部潤一¹、大川拓也¹、佐藤幹哉¹、大西浩次²、飯島裕³、加賀谷穰⁴、田鍋努

¹国立天文台 ²長野高専 ³写真家 ⁴KAGAYA スタジオ

はやぶさ探査機の大気圏再突入に際して、われわれは JAXA とは独立に、熟練したプロの写真家を含む 7 名の地上観測チームを編成し、オーストラリアのクーバーペディ近郊において、画角、解像度、感度など、光学系や撮像素子の異なる複数のカメラ・ビデオカメラ合計 17 台を駆使して、再突入時のカプセルが発光する様子、および本体が大気圏再突入で四散し、燃え尽きていく一部始終を観測することができた。

大気圏再突入は、構造・素材・質量などが既知の物質が決められた軌道で地球に飛び込むという、いわば「人工流星」現象である。通常、流星や火球の構造や組成は未知であるため、その光り方や分光データから推定せざるを得ないが、今回はそれらが既知の「人工流星」である。この観測によって、天然自然の流星の構造や組成を解く鍵が得られる。

我々の観測から、はやぶさ本体は分裂四散による表面積増大によって、クーバーペディ近郊においては、満月並みの明るさに光り輝いたこと、また 100 個以上にも分裂した破片のサイズ分布は、そのべきが 2.5-3.0 の範囲となって、分裂彗星シュバスマン・バハマン第 3 彗星の分裂破片 : 3.3 (Ishiguro et al. 2009, Fuse et al. 2007) や、衝突破壊理論で予想される 3.5 (Dohnanyi 1969) に比べると比較的フラットであること、グリズムと広角レンズによる低分散分光観測からは、さまざまな本体の部品に由来する金属輝線や、カプセルが空力加熱によって熱せられた結果、プラズマは約 5000K の黒体放射まで達していたことがわかつた。また、カプセルの光度変化などから、低速流星の発光効率などを求めることができる見込みである。本発表では、これらの地上観測で得られた成果をまとめて発表する。



はやぶさ大火球（赤外HD動画）

オーストラリア・ターナー・ペディ郊外にて 撮影／大川拓也（NAOJ）

P/2010 A2 (LINEAR) の奇妙な形状について

菅原賢¹、○秋澤宏樹²、渡部潤一³

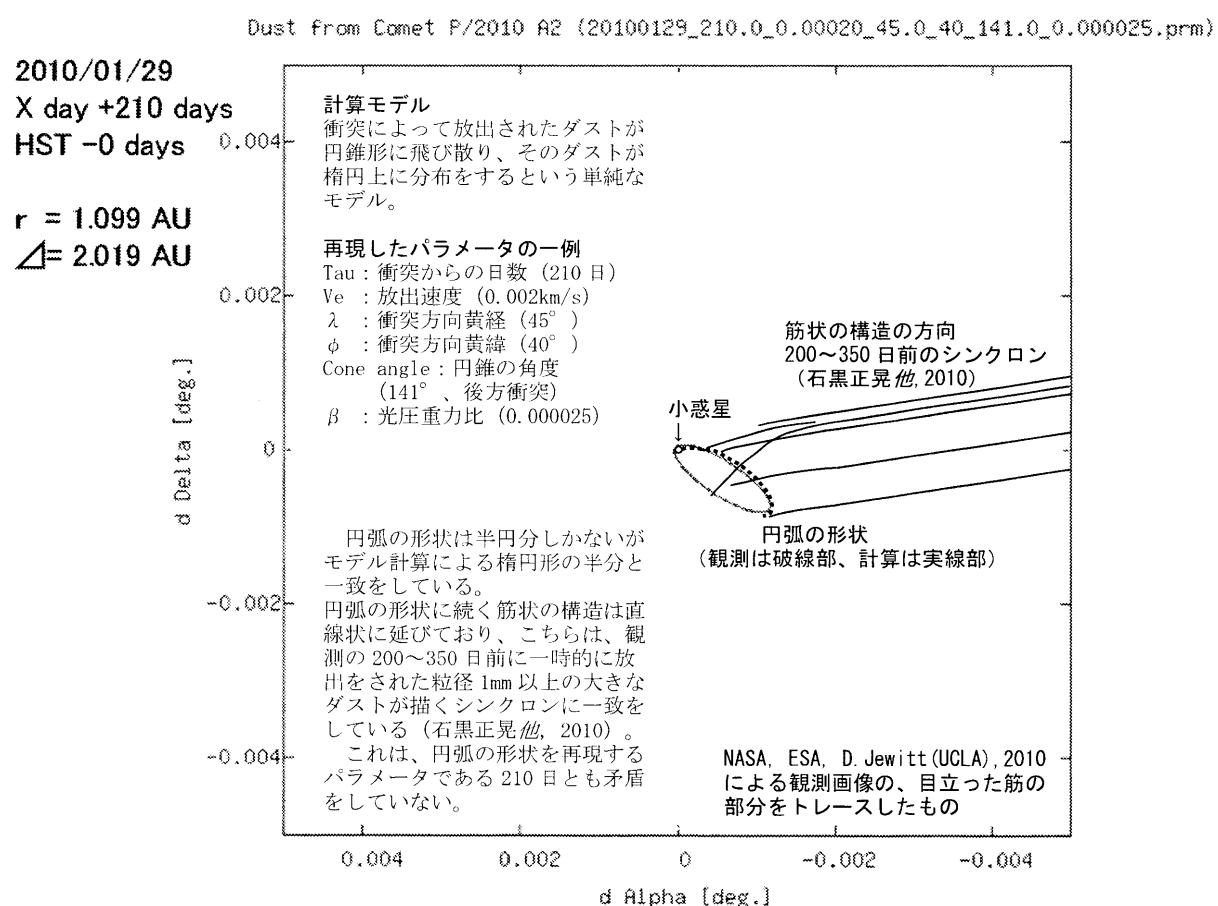
¹神奈川工科大学厚木市子ども科学館、²姫路市宿泊型児童館「星の子館」、³国立天文台

今年1月に「LINEAR」によって発見された「P/2010 A2 (LINEAR)」は、暫定軌道が求まると5番目の「メインベルト彗星」かと思われたが、核やコマが見られずに直線の尾だけのように見える形態や、いわゆる雪線より内側にあってなぜ枯渇していないのかなど、謎の多い新「彗星」であった。

その後、Jewitt他 (Kitt Peak 3.5m) や Licandro 他 (ESO 2.5m) の観測によって直線の尾の近傍に「小惑星」が発見され、小惑星など他の天体が衝突したことによる一時的な彗星のような振る舞いを見せた可能性が示唆された。

更に、1月末のハッブル宇宙望遠鏡の観測によって、X字型に交差した微細構造が撮像されるに至り、他の天体との衝突によって形成された塵雲であることが有力視されている。

我々は、この仮説に従い、衝突によって放出されたダストの運動を数値的に追跡することで、X字型構造の一部である円弧の形状を再現することに成功した。その結果を元に、衝突のシナリオ案を提案するとともに、今後の形状変化の予測について述べる。



図ー ハッブル宇宙望遠鏡により撮像された P/2010 A2 の形状の模式図とモデル計算結果との比較

潮汐分裂した近地球型小惑星の発見 Discovery of tidally disrupted NEA

○ 阿部新助(Shinsuke Abe)¹, M. Granvik², R. Jedicke², R. Wainscoat², D. Tholen², L. Denneau², T. Grav³, D. Kinoshita¹, C.K. Chang¹, W.P. Chen¹, and W.H. Ip¹

¹國立中央大学天文研究所(NCU), 台湾

²ハワイ大学天文研究所(IfA), 米国

³ジョンズホプキンス大学(JHU), 米国

It is widely accepted that asteroid families are formed in the main belt through the catastrophic disruption of a large parent body followed by chaotic dynamical orbit evolution of the fragments (Hirayama 1918, Nesvorný et al. 2002, Vokrouhlický & Nesvorný 2008, Pravec & Vokrouhlický 2009). We have identified the first genetically related pair of Near Earth Asteroids (NEA), (226219) 2002 VT₈₅ and 2002 PN₆, through the extreme similarity of their orbits over a long period of time. Multi-colour photometry of both objects was obtained with the Gemini 8.1-m telescope and their colours match those of *B*- and *F*-type asteroids that comprise only ~5% of the NEA population. The similarity of their orbits and colours leads us to believe that they are fragments from the disruption of a larger parent object (~0.92 km and ~0.24 km respectively). It is likely that tidal forces during close encounters with Mars around 110,000 years ago caused the fragmentation of the parent asteroid making this the youngest known asteroid family and only the second tidally disrupted object. The discovery of this genetically related NEA pair suggests that there are likely to be more fragmented asteroids on Earth-orbit crossing trajectories. Considering the rarity of the *B*- and *F*- type asteroids it is suspicious that this NEA pair, the Earth impacting asteroid 2008 TC₃ (Jenniskens et al. 2009) and the Phaethon-Geminid stream complex (Ohtsuka et al. 2006) are all of *F*-type – perhaps these types of asteroids are particularly weak and easily disrupted. The existence of tidally disrupted asteroid ‘streams’ in the NEA population has implications for the rate of Earth impacts.

22P/Kopff の観測とダスト空間分布構造

○花山 秀和¹ 石黒 正晃² 渡部 潤一¹ 猿楽 祐樹³ 福島 英雄¹

¹国立天文台 ²ソウル大学 ³宇宙科学研究所

2009年に回帰した短周期彗星 22P/Kopff について、近日点通過後の 2009 年 8 月から 12 月まで国立天文台/石垣島天文台の MITSuME 3 色同時撮像カメラと東京大学木曾観測所の 2kCCD カメラによる観測を行った。観測では軌道方向に細長く伸びたダスト構造が見られた。また、彗星核から軌道面に対して南側には、扇状に広がったジェット構造が見られた。

ジェット構造の複数回の観測データ解析により、彗星核の自転軸の向きを推定した。また、軌道方向の細長いダスト構造はダストトレイルあるいはネックラインである可能性があるが、解析の結果ダストトレイルであることが明らかになった。一方、ネックラインが予想される方向には、観測では細長い構造は明確には見られず、予想に反して淡く広がった構造となっていた。このような構造は彗星核からのダスト放出が常に太陽方向に起こると仮定した計算モデルでは説明が困難である。

そこで我々は今回 22P/Kopff のダスト構造を説明する新たなモデルとして、推定される彗星核の自転方向を考慮し、ダスト放出の方向が太陽方向とは異なるモデルでの計算を行った。その結果、ネックラインの起源となるダストが北側の自転軸方向に放出されていた場合には、観測されたダスト構造がよく説明されることが明らかになった。過去の観測データとの比較を行ったところ、近日点通過前ではジェット構造の広がる向きが北向きになっており、計算モデルとの矛盾は見受けられなかった。

本研究結果は、22P/Kopff のジェット構造の向きが彗星の季節変化とともに軌道面に対して南北に変化し、その後の彗星のダスト構造に顕著な影響を与えている可能性があることを示唆するものである。

AB Aur 原始惑星系円盤の pre-transitional disk 的性質

○ 本田充彦(神奈川大学)、井上昭雄(大阪産業大学)、岡本美子(茨城大学)、片山宏一、
藤原英明(ISAS/JAXA)、深川美里(大阪大学)、山下卓也、藤吉拓哉、田村元秀、
橋本淳(国立天文台)、宮田隆志、酒向重行、左近樹、上塚貴史、尾中敬(東京大学)

AB Aur (ぎょしゃ座 AB 星) は、中質量前主系列星であり、その星周にスパイラルやリング状の構造を持つ原始惑星系円盤・エンベロープを持つ若い天体である。今回、Subaru/COMICS を用いて波長 $24.6 \mu\text{m}$ において AB Aur の星周円盤を空間分解撮像した(図 1)。その結果広がった放射が検出された。放射サイズとして、ガウシアン輝度分布を仮定すると $\text{FWHM} = 90 \pm 6 \text{AU}$ が得られた。これは、より短波長の観測である Marinas et al. (2006) の $11.6 \mu\text{m}$ で $17 \pm 4 \text{ AU}$ 、 $18.5 \mu\text{m}$ で $22 \pm 5 \text{ AU}$ との観測結果より非常に大きい。このような $24.6 \mu\text{m}$ での広がった放射を解釈するため、円盤の内側の面密度が境界半径 R_c を境に大幅に減少している円盤モデルを考える。これは、電波連続波での高空間分解能観測 (Pietu et al. 2005, Lin et al. 2006) から示唆される構造を反映している。モデルと観測を比較した結果、 $R_c = 88 \text{ AU}$ 、内側領域の面密度が 0.01 倍も減少しているモデルが、 $24.6 \mu\text{m}$ の撮像観測結果を良く説明することが分かった(図 2)。このモデルが広がった $24.6 \mu\text{m}$ 放射を作り出す理由として、面密度の不連続により現れる R_c における”壁”のような構構(外側円盤の内縁)からの寄与が原因と挙げられる。壁の温度は約 96 K であり、 $24.6 \mu\text{m}$ 放射には効いてくるが、より短波長の $11.6 \mu\text{m}$ や $18.5 \mu\text{m}$ では黒体放射の Wien 側となり効いてこないため、より点源のように観測されるのである。このような円盤の幾何学的構造は、近年一部の T Tauri 型星等に提唱されている “pre-transitional disk” に類似しており、AB Aur 円盤もこのような “pre-transitional disk” 段階にあると我々は提案したい。

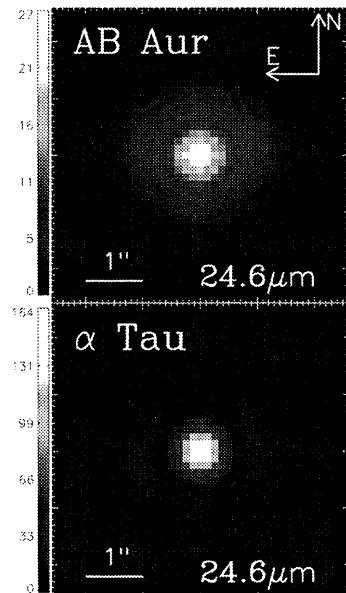


図 1: (上) すばる望遠鏡と COMICS による AB Aur 原始惑星系円盤の $24.6 \mu\text{m}$ 画像 (下) 観測装置の点源広がり関数 (Point Spread Function; PSF) 画像としての αTau (アルデバラン) 観測画像

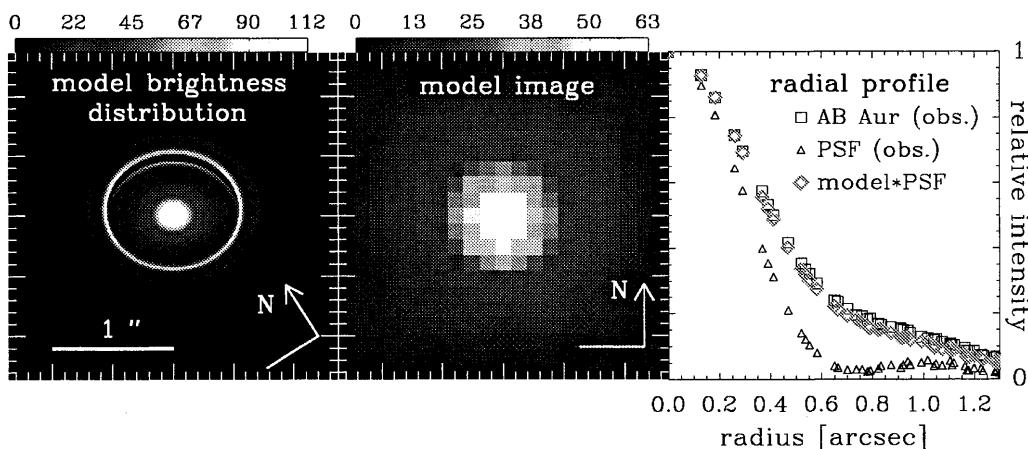


図 2: (左) 88 AU 以内の面密度が 0.01 倍に減少しているモデルの $25 \mu\text{m}$ 画像。(中) 観測装置 (Subaru/COMICS) の PSF を畳み込んだモデル画像 (右) 観測された AB Aur (□)、PSF (△)、PSF を畳み込んだモデル画像 (◇) のそれぞれの半径方向の輝度分布

系外惑星大気に入射する光の屈折から生じる現象

○山本哲生（北大低温研），中本泰史（東工大地球惑星）

Phenomena expected from refraction of light in atmospheres of exoplanets

○Tetsuo Yamamoto¹ & Taishi Nakamoto²

¹ILTS, Hokkaido University, ²Dept. Earth & Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology

We show a few phenomena resulting from refraction of star light incident onto atmospheres of exoplanets. We present results of their quantitative analyses and examine possibilities of their observations.

系外惑星本体やその大気が、トランジット法等で観測されている。トランジット中の星の光度の減光量から惑星の半径が求められ、中心星の光を引いたスペクトルから、惑星大気の組成等が推定される。従来のこれらの観測の解析においては、恒星からの光は惑星大気中で直進するものと仮定されていた。しかし、地球大気でわれわれがよく知っているように、実際には恒星光は惑星大気中で屈折を受けたり散乱を受けたりする。屈折や散乱の度合いは入射光の波長に依存する。このことを考慮すると、系外惑星観測からその大気に関するさらに豊かな情報を得ることができるかもしれない。

惑星大気上空を通過する光線は、一部は吸収・散乱されるが、残りは屈折を受けて透過する。屈折率は光の波長と大気密度に依存し、たとえば紫色 ($\lambda = 0.4\mu\text{m}$) と赤色 ($\lambda = 0.8\mu\text{m}$) では、地球大気ではその屈折率において数%以上の違いがある。われわれはモデル惑星系として地球のような大気を持つ惑星と太陽を用い、この系を外部から観測したとして、波長に依存する屈折を考慮した場合にどのような効果があるかを検討した。

その結果、以下のような興味深い現象が生じることを見いだした：

1. **惑星の見かけの大きさが変わる効果**：大きな屈折を受けた光線は観測者の視線方向から逸れて観測されなくなるため、その限界から惑星の半径が推定される。臨界屈折角は波長に依存し、屈折率が小さい長波長で見る方が惑星は小さく見える。この効果を利用して、見かけの半径の波長依存性から、大気のスケールハイトが推定できる。
2. **レンズ効果**：遠方にある背景の恒星の光が、手前にある惑星の大気を通過するとき増光される場合がある。重力レンズの場合と異なり、大気による光の屈折は波長に依存するため、惑星大気によるレンズ効果では「色収差」が生じる。この結果、虹のリングが生じる。リングの幅は一般に観測の角分解能と比べて十分大きい。このため虹のリングの観測は困難かも知れない。
3. **レンズ効果による星の色の時間変化**：遠方にある背景の恒星に対する手前の惑星の固有運動 (proper motion) によって、観測者に届く星の光の色は紫から赤へ、あるいは赤から紫へと変化する。観測的には虹リングより、色の時間変化の方が有望であると考えられる。

化学実験から惑星の多様性の理解を目指して： 惑星物理学から惑星化学、そして惑星生物学へ

○関根 康人¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

なぜ地球は生命に満ち溢れる惑星になったのか、地球以外に生命を宿す天体は存在するのか、という問いに答えることは、地球惑星科学の最大の目標の1つである。これまで国内外の様々な研究者によって、塵とガスだったころの原始太陽系から、どのように惑星や衛星が形成され、現在の姿に至るかの大まかな道筋は立てられた。しかし、これにより上記の問題に答えが得られたかというとそうではないだろう。それは、これらの研究は主に物理学（古典力学、熱力学など）に基づいたもので、惑星や衛星の進化段階における数多くの物質進化・化学反応の素過程をきちんと考慮してはいないからである。例を挙げれば、エウロパや火星に液体の海が存在している（いた）ことは分かったとしても、その化学組成や酸化還元ポテンシャル、pHなどが推定出来なければ、惑星探査においてもどのような生命の痕跡を天体のどこに探したらよいのか予想するのは困難なのが現状である。そして最も重要な問題は、化学反応の素過程を考慮しようにも、それらの実験データがほとんどないということにある。すなわち、かなり大胆な言い方をすれば、これまでの惑星科学とは、主に惑星物理学（と惑星地質学）であった。

講演者はこれまで、原始地球、タイタン、氷衛星などを研究対象とし、主に惑星大気の化学進化を決定しうる化学反応の素過程（例えば、大気化学反応、隕石衝突、熱水活動、生物反応）を、室内化学実験により調べてきた。そして、得られた化学実験データを数値モデルに組み込み、それぞれ個別の天体の大気・表層進化を議論してきた。本講演ではそれら一連の研究を紹介するのに加え、今後の研究者としての展望についても述べたい。すなわち、今後10年間は、室内実験により惑星上の化学進化の重要な素過程を調べ、その後の10年では、それら実験データに基づき、系外惑星も含む惑星や衛星の形成と進化において物質進化・化学反応を取り入れた、惑星化学を惑星科学の中に立ち上げるということである。そして最後の10年では、惑星科学においても、化学的情報に基づいた生物学が展開できる可能性を示し、30年後に惑星生物学を志す若者にバトンをつなげたい。

真空環境下でのレーザー誘起絶縁破壊分光装置(LIBS)の定量精度

○石橋高¹, 大野宗祐¹, 龍田真吾¹, 荒井朋子¹, 小林正規¹, 和田浩二¹, 千秋博紀¹,
後藤和久¹, 並木則行¹, 松井孝典¹, 長勇一郎², 杉田精司³

¹千葉工業大学, 惑星探査研究センター, ²東京大学, 理学系研究科, 地球惑星科学専攻, ³東京大学, 新領域創成科学研究科, 複雑理工学専攻

レーザー誘起絶縁破壊分光装置(LIBS)は、惑星着陸探査における次世代の元素分析装置として期待されている。LIBSは、これまでの惑星探査に用いられてきた元素分析手法とは異なり、(1)ほぼすべての元素の測定が可能(軽元素も測定できる)、(2)遠隔地点(e.g., ~10 m 遠方)の試料の測定が可能、(3)測定時間が短い(1測定あたり数秒~数分)といった特徴を持っている。これまでのところ、惑星探査用 LIBS は主に火星探査を念頭において開発が行われてきたが[e.g., 1]、高真空間下での使用が可能であれば、LIBS を月や小惑星探査にも用いることができる。しかし、高真空中におけるレーザー生成プラズマの発光強度は周囲大気圧に強く依存し、高真空中で得られるスペクトルの強度は著しく低下することが知られている[e.g., 2, 3]。この現象は、LIBS による元素定量精度の低下を招く可能性がある。そこで本研究では、高真空中を模擬した低圧環境下で LIBS 測定を行い、高真空间下が LIBS による元素濃度推定精度に与える影響を調べた。

まず、岩石試料の LIBS スペクトルを取得した。岩石試料には、あらかじめ元素濃度を XRF で測定しておいた 15 種類の火成岩を用いた。レーザー強度は、試料表面上で 1×10^{-9} mbar となるようにした。これは試料が化学量論的に均一に蒸発するのに必要なレーザー強度の下限値である。試料を真空チャンバー内に置き、周囲大気は 1 bar および 1×10^{-3} mbar(組成は空気)とした。 1×10^{-3} mbar の大気の平均自由行程は真空チャンバーのサイズよりも長く、プラズマと周囲大気の相互作用はほとんど無視できる。したがって、 1×10^{-3} mbar は、プラズマにとっては高真空間と同等の条件と見なせる。取得したスペクトルの波長領域は 300-900 nm、波長分解能は約 1 nm である。取得した LIBS スペクトルを多変量解析手法の一つである Partial Least Squares Regression 法(PLS)[e.g., 4]を用いて解析し、岩石に含まれる主要8元素(Si, Fe, Mg, Ca, Na, K, Al, Ti)の濃度を推定した。

1×10^{-3} mbar の場合の元素濃度推定精度も、1bar の場合の結果と劇的に変わることはなかった。ただし、いくつかの元素(Fe, K, Si)については推定精度が若干低下した。推定精度の低下が起こらなかつた元素は、今回の測定波長範囲(i.e., 300-900 nm)に比較的強い輝線を持っている。それに対して推定精度の低下が起きた元素は比較的弱い輝線しか持たない。 1×10^{-9} mbar の場合は、1bar の場合に比べてプラズマ温度が低く、弱い輝線はノイズに埋もれてしまい、推定精度が低下したと考えられる。したがって、元素濃度推定精度を上げるには、(1)レーザーの強度を上げてプラズマ温度を上げる、(2)測定波長領域に強い輝線の存在する波長領域(e.g., UV 領域)を含めるといった対策が考えられる。今回の結果は、月や小惑星といった大気の無い天体においても、LIBS は有力な元素分析装置と成り得ることを示している。

[1] Maurice, S. et al., ChemCam Instrument for the Mars Science Laboratory (MSL) Rover, Lunar and Planetary Science XXXVI, Abstract #1735, 2005. [2] Cremers, D.A., and Radziemski, L.J., Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Wiley, 2006. [3] Knight, A.K. et al., Characterization of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for application to space exploration, Applied Spectroscopy 54, 331-340, 2000. [4] Martens, H. and Næs, T., Multivariate calibration, Wiley, 1992.

衝突蒸気雲の膨張過程における電子の役割

○黒澤 耕介^{1,2}, 杉田 精司¹, 門野 敏彦³

¹東大 新領域 複雑理工, ²日本学術振興会, ³阪大 レーザー研

要旨:

惑星形成最終期においては、天体同士の衝突速度が 10 km/s を超え、内部惑星の主要構成要素であるケイ酸塩でさえも蒸発することが理論的、実験的に示されている[Ahrens & O'keefe, 1972; Kurosawa et al., Submitted]。我々は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターに設置された大型レーザー「激光 XII 号」を用いてケイ酸塩の衝撃圧縮実験を行い、衝撃圧縮-断熱膨張の熱力学進化を計測してきた。その結果、電離/電子再結合による発熱/吸熱が蒸気雲の進化に重要な役割を果たし得ることが明らかとなってきた[Kurosawa et al., 2010]。

本講演ではこの結果を受けて、電子挙動がケイ酸塩蒸気雲の時間進化に与える影響を示し、その重要性を指摘する。先行研究で、化学結合はそのエネルギーが小さいために、蒸気雲の膨張過程に影響を与えないことが示されている[Melosh, 2007]が、電離エネルギーは非常に大きいので、電離/電子再結合が蒸気雲の膨張過程に影響を与える可能性がある。具体的には電子励起、電離を考慮した一様な蒸気雲の膨張モデルを構築し、(1)蒸気雲の膨張速度(音速), (2)蒸気雲の冷却率が電離を考慮することによって、どの程度変化するか評価した。その結果、電離を考慮すると、(1)蒸気雲の膨張が遅くなるために、凝縮相の放出物が長時間加速を受け続けること、(2)蒸気雲の冷却率が桁で減少することが明らかとなった。前者は、月形成巨大衝突後の放出物挙動を変化させ得る可能性を示唆し、電離過程を考慮した巨大衝突流体計算の必要性を指摘する。後者は蒸気雲の化学反応生成物、特に微量成分(HCN などの生命前駆物質)や低温安定成分(SO₃ など)の生成量推定にはまだ不定性が残っている可能性を示唆する結果である。

参考文献:

- Aherens & O'keefe (1972), *The Moon*, 4, 214-249.
- Kurosawa et al., Submitted.
- Kurosawa et al. (2010), *41th LPSC*, #1785.
- Melosh (2007), *MAPS*, 42, 2079-2098.

激光 XII 号を用いた衝突蒸気雲内の硫黄酸化物の 化学組成測定

○大野宗祐¹、門野敏彦²、黒沢耕介³、羽村太雅³、杉田精司³、重森啓介²、弘中陽一郎²、
渡利威士²、境家達弘⁴、石橋高¹、松井孝典¹

¹ 千葉工大・惑星探査研、² 阪大・レーザー研、³ 東大・新領域、⁴ 阪大・理

6550 万年前の生物大量絶滅を引き起こした巨大衝突では、衝突地点付近の硫酸塩岩から大量の硫黄酸化物が放出されたと言われている。放出された硫黄酸化物の化学組成は、その後の環境変動と絶滅機構を理解する上で非常に重要であると考えられている。ところが、宇宙速度での衝突実験を行う事と衝突蒸気雲ガスの分析を行う事が困難であったため、先行研究ではレーザー直接照射による模擬衝突蒸気雲を用いた実験や理論計算のみから衝突蒸気雲の化学組成を推定するという手法がとられ、硫酸塩岩組成の衝突蒸気雲の化学組成の計測はこれまで行われてこなかった。本研究では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの高出力レーザー「激光 XII 号」を用い、飛翔体を宇宙速度以上に加速し、硫酸塩岩組成の衝突蒸気雲を発生させ、その組成を四重極質量分析計で測定するという実験を行った。その結果、今回の実験条件では三酸化硫黄が多く生成される事がわかった。三酸化硫黄は二酸化硫黄と比べ低温で安定であるため、室内実験の条件と比べ冷却が遅くクエンチ温度が低い実際の巨大スケールの衝突蒸気雲では、三酸化硫黄がさらに多く生成する事が予想される。この結果は、K/T 事件の際に放出された硫黄酸化物は短期間で硫酸を形成する三酸化硫黄であるため、衝突後数日程度で地表もしくは海中に落下したということを意味する。短期間で海中に落下した硫酸は海洋表層の酸性化を引き起こしたと考えられ、この短期間に集中した急激な硫酸酸性雨により多くの K/T 事件と関連した地質記録を説明する事が出来る。

衝撃波による酢酸の組成変化

○小澤萌¹、三村耕一¹(¹名古屋大学大学院環境学研究科)

1、はじめに

生命の起源物質がどのようにして地球上に供給されたかということは、生命誕生について考える上で重要な問題である。この問い合わせに対し、隕石中の有機物質が重要な役割を果たしたという考え方方が提案されている。隕石は様々な種類の有機物質を含み、カルボン酸やアミノ酸など生体を構成する上で重要な物質を含むことも確認されている。先の提案では、これらの隕石が多量に落下して、初期地球に有機物質を供給した可能性を強調している。

隕石が地球に落下する際には必ず大きな衝撃波が発生する。これによって隕石は瞬間的に高温高圧状態になり、含まれる有機物質の組成は変化してしまうだろう。そして、衝撃波がある程度の大きさを超えると、隕石中の有機物質は無機物質としての炭素に変化してしまうと考えられる。

本研究では、隕石が地球に衝突することを想定し衝撃波による酢酸の組成変化を検討した。酢酸は、炭素質コンドライトに最も高濃度で含まれる有機物質であり隕石中には Na 塩として存在している。このため出発物質として酢酸ではなく酢酸 Na を使用した。

2、実験方法

蛇紋岩粉末と酢酸 Na 試薬を 14 : 1 程度の割合で混合して隕石模擬物質を作った。これに対して 6 ~ 35 GPa の衝撃圧力を与えた。得られたサンプルは圧力ごとに 2 つに分け、片方はカルボン酸、他方は無水型に縮合したカルボン酸の分析に用いる。

○カルボン酸分析の手順：分析には GC を用いた。0.2M,NaOH/MeOH 溶液を用いて、超音波で 30 分間生成物を抽出する操作を行った。これによって遊離状態で存在していたカルボン酸を Na 塩の形にして揮発を防ぐ。次に全体を遠心分離にかけて上澄みを回収した。残渣にも MeOH を加えてボルテックスミキサーで攪拌し、再び遠心分離して上澄みを回収した。得られた上澄みを合わせてろ過し、ろ液を乾固した後でエ斯特化剤（イソプロピルアルコールと塩化水素を混合してある）によってカルボン酸 Na を誘導体化した。生じたイソプロピルエステルをジクロロメタンによって抽出し、GC で定量した。

○無水型のカルボン酸分析の手順：分析には GC-MS を用いた。サンプルはそのままの状態で処理を行わず、熱分解装置に投入した。

以前の卒業研究で、Murchison 隕石実物と 7 種類のカルボン酸 Na 塩を混合した模擬物質を作成し衝撃実験を行った結果が出ている (Hayashi and Mimura 2006)。これらの結果と、今回行う酢酸 Na 単体の実験結果との比較を行い発表する。

鉄質小天体の衝突破壊強度－変形とサイズ依存

○桂 武邦¹ 中村 昭子¹ 瀬藤 真人¹ 高部 彩奈¹ 長谷川 直² 三軒 一義¹

1 神戸大学 大学院理学研究科 2 宇宙科学研究所

現在地球上では多数の鉄隕石が発見されており、小惑星の中にも高いレーダーアルベドを根拠に金属で出来ている可能性が高い小惑星が存在している。これらの天体は分化した天体の核が衝突により破壊された破片であると考えられている。この鉄隕石母天体が分化した年代や隕石サイズまで破壊された年代はそれぞれ推定されているが、鉄隕石母天体が経験した衝突破壊過程については未だ解明されていない。Bottke et al. (2006) では、鉄隕石母天体が地球型惑星で形成された可能性が示された。もし、地球軌道付近で破壊されていたのならば、鉄物質は塑性物質としてふるまつたと考えられる。また鉄隕石の中には 900~500K の冷却速度が数 K/Myr かかるものもあり、母天体の核が冷えるまでに破壊を経験した可能性も考えられる。これらのことから、鉄隕石の起源を理解するためには、鉄物質が塑性を示す温度条件での衝突破壊強度を調べる実験が重要になってくるといえる。

衝突速度 0.5~3.5km/s の範囲で、常温の鉄隕石や鋼を用いた衝突破壊実験を行なった結果、塑性を持つセンチメートルサイズの鉄物質を破壊するために必要なエネルギー密度は、先行研究での冷却された鉄隕石の破壊に比べてあまり変わらないという結果が得られた。ところが最大破片質量の割合は元々の鉄質量や衝突速度で大きく変化するため、塑性を示す物質の破壊強度には、サイズ依存性や衝突速度による歪速度依存性があると考えられることがわかった（桂他、連合大会 2010）。

今回ミリメートルサイズの鉄隕石を用いて、衝突速度～4.8km/s と速度領域を広げて実験を行った。その結果、サイズがほぼ同じものではエネルギー密度が上がるにつれ最大破片質量割合が減少する傾向が見られた。

さらに高速度衝突実験(2.0km/s～)での衝突時の圧力と変形の程度を調べた結果、圧力が高くなるほど鉄隕石は薄く押し潰されていることがわかった (Fig.1)。また元の厚さが小さいものは変形度も小さくなり、ある圧力での衝突後の鉄の厚さが元の厚さに関係なく同程度になったことから、衝突後の厚さには、圧力で決まる限界値があるのかもしれない。

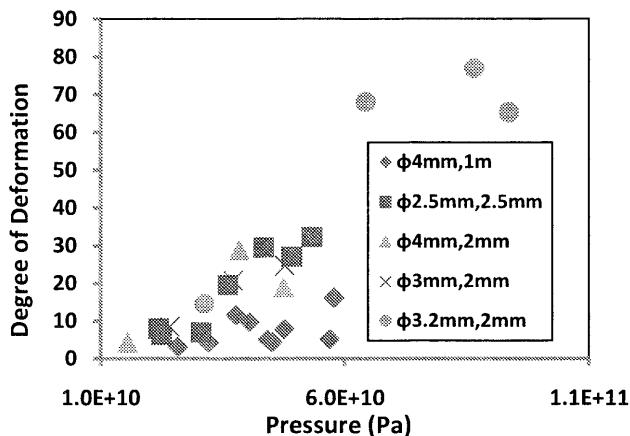


Fig.1 変形の程度と圧力の関係

分化天体の衝突破壊および鉄隕石放出条件の解明

○岡本千里¹, 荒川政彦², 長谷川直¹, 田端誠¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²名古屋大学大学院環境学研究科

はじめに：小惑星は、大型望遠鏡による地上観測および惑星探査によって、多様な組成を持つことが明らかにされている。小惑星は反射スペクトルのタイプによって、様々な種類に分類されており、分光学的特徴から、V-type 小惑星や M-type 小惑星は小惑星ベスタに関連付けられ、地球のような分化天体（金属コア—岩石マントル天体）が衝突破壊した結果生じた可能性が示唆されている。現在まで、均質な内部構造を持つ岩石質天体の衝突破壊現象が衝突実験、衝突破壊の数値シミュレーションによって数多く調べられてきた [1, 2]。一方、分化天体の衝突破壊条件や、そのコア破壊により形成された鉄隕石の放出条件は、ほとんど知られていない。特に衝突実験では、金属破壊の困難さからそのような系統的な研究はほとんど行われていない。そこで本研究では、天体の内部構造が、衝突破壊の結果にどのような影響を及ぼすのか調べ、分化天体の衝突破壊・再集積条件を明らかにするために、分化天体模擬試料への高速衝突実験を行った。

実験方法：分化天体模擬試料への衝突実験を行うため、金属コア—岩石マントル構造を持つ分化天体模擬試料を作成した。試料はコア質量比を変えることで、その内部構造を系統的に変化させた。また、エンドメンバーとして、金属球（スチール）単体および岩石球（モルタル）単体にも同様に実験を行い、その破片サイズ分布や破片速度分布などを調べた。ここで、金属球（金属コア）の素材は高炭素クロム鋼鉄であり、常温下でも脆的に振る舞う。また、マントル模擬物質として用いたモルタルは、玄武岩に近い強度を示す。以上の実験は、名古屋大学および JAXA に設置された二段式軽ガス銃を用いて、それぞれ、質量～0.2g のナイロン弾丸を速度～2km/s および 4–7 km/s に加速して行った。実験は真空チャンバー内で行われ、衝突破片の放出速度を計測するために、高速度カメラを用いてその場観察を行った（撮影速度：1 コマ 8 μs–200 μs）。

結果および考察：衝突の結果は金属コア—岩石マントル試料の内部構造（コア質量比, R_{CM} ）により大きく依存した。この金属球単体の動的な衝突破壊強度を調べたところ、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し、高炭素クロム鋼球は、低温環境下の鉄隕石のよいアナログ物質である可能性がある [3]。本実験により得られた金属球単体の衝突破壊強度は 7×10^4 J/kg であり、ガラスや玄武岩など、シリケイトと比較するとその衝突破壊強度はおよそ 100 倍大きい結果となった。一方、エネルギー密度一定の場合、金属コア—岩石マントル試料の R_{CM} が大きくなるにつれて、金属コアはよりはげしく破壊されていた。実験結果からコアに分配された衝突エネルギーを見積もった結果、コアの破壊は試料内部構造に依存していた。Okamoto and Arakawa (2008) では、岩石コア—高空隙率マントルを持つ 2 層構造天体模擬試料のコア・マントルへのエネルギー分配率を見積もったが、今回の実験結果は、エネルギー分配率というパラメーターが、様々なコア・マントル物質に適応できることを示唆している。また、エネルギー分配率に基づき、金属コアに加えられる衝突エネルギーと金属コアの衝突破片である鉄隕石の破片速度の関係から、鉄隕石がどのような条件で母天体から放出されるのか、見積もることが可能と考えられる。cm サイズの試料から km サイズの天体へのスケーリングなどについても考慮する必要があるが、本研究により、様々なコア—マントル天体の衝突破壊・再集積条件は、それらの内部構造から推定できる可能性がある。

[1] Fujiwara and Tsukamoto (1980) *Icarus*, 44, 142–153. [2] Asphaug et al., (1998) *Nature*, 393, 437–440. [3] Holsapple et al. (2002) in *Asteroids III* (Univ. of Arizona Press, Tucson), pp. 443–462.

衝突破片の形状と数値モデル

A numerical model for the shape distribution of fragments in dynamic fragmentation

○道上達広¹、城野信一²

¹福島工業高等専門学校、²名古屋大学

室内実験において、衝突破壊における破片の形状の分布は、特徴的でかつ普遍的な分布になっていることが知られている。それは破片の長軸 a : 中間軸 b : 短軸 c の比が平均で $2:\sqrt{2}:1$ になっていることである。この分布は、衝突速度、標的の形状など実験条件に依らず成り立っている (Fujiwara et al., 1977 : Capaccioni et al., 1984)。また最近の研究で、この法則は大きさ 200m 以下の高速度回転 (自転速度 1 時間以内) の小惑星の形状、小惑星エロスの岩塊 (一部) の形状でも成り立っており、小惑星イトカワの岩塊でも成り立っていることが示唆されている (Michikami et al., 2010)。しかしながら過去の研究において、なぜこのような普遍的な形状分布になっているか、定性的な解釈もできない。例えば、Capaccioni et al. (1984)は、立方体をランダムに切り、各破片の幾何学的形状を調べたが、衝突破片に見られるような形状比にはならなかった。本研究では、破壊の統計物理モデルで有名な Grady and Kipp (1980)のモデルのクラック成長の仕方を改良し、数値計算を行うことで、衝突破壊における破片の形状分布を再現した。その結果、形状分布はクラックの成長速度、欠陥の数、標的の形状には依存しないことが分かった。

Dynamic fragmentation is a complex physical phenomenon in many natural systems. The shape of fragments is one of the most interesting aspects of dynamic fragmentation. That is, in laboratory impact experiments, the shape of fragments over a broad size range is distributed around the mean value of the axial ratio $2:\sqrt{2}:1$, which is independent of a wide range of experimental conditions. The shape distributions of the boulders on asteroid Eros and the small- and fast-rotating asteroids (diameter <200 m and rotation period <1h) are similar to those of laboratory fragments (Michikami et al., 2010). However, there are few studies to explain the shape distribution of fragments. No simple fragmentation model can reproduce the experimental shape distribution satisfactorily. Many geometric approaches have focused on the size distribution of fragments. In this study, a geometric approach by numerical simulation has been performed, but we consider the effect of faults and the growth of cracks on the shape of fragments. Our model can reproduce the experimental shape distribution. The results show that the shape distribution is independent of target's shape, the growth of cracks and the number of inherent faults in the target.

強度支配域と重力支配域の移行領域における衝突クレーター実験

○羽倉 祥雄, 中村 昭子, 鈴木 紗子

神戸大学大学院理学研究科

衝突クレーターの直径や深さなどを測定し、スケーリング則にあてはめることによって、インパクターの大きさや衝突速度、母天体の性質などが明らかになり得る。そのため、スケーリング則を確立することは非常に重要である。

母天体側においてクレーターの直径や深さを決定付ける要因は大きく 2 つある。その 2 つとは強度と重力であり、重力よりも強度の影響力が大きい領域を“強度支配域”、これに対して重力が強度よりも影響力が大きい領域を“重力支配域”と呼ぶ。重力が一定の条件下では、この強度支配域と重力支配域を分けるパラメータは母天体の強度の大きさであるが、移行領域におけるスケーリング則は確立されていない。

そこで我々は、剪断強度の異なるガラスピーズ焼結体と同粉体を標的として衝突クレーター形成実験を行い、各々の強度のものについて最終クレーターの直径、深さ、形状を測定した。焼結体の強度は焼結時間を 4 時間で統一し、焼結温度を 630°C, 600°C, 580°C と変えることにより変化させた。また、ガラスピーズは粒径 50μm のものと 420μm のものの 2 種類を用いた。この 2 種類は材質が同じでも粒子間の摩擦力が異なる。なお、弾丸は直径 1/8 インチのソーダガラス球、衝突速度は 240m/s で統一した。

測定したクレーターの直径と深さから、深さ直径比を計算し、その値を先行研究と比較した結果、大きく 2 つのグループがあることがわかった。焼結体を主とする深さ直径比 0.4 程度のグループと、粉体を主とする深さ直径比 0.14 程度のグループである。クレーターの深さはばらつきの範囲内で強度に依らなかったが、一方で直径は焼結体でのものと粉体でのものはひとつのべきでは表されず、そのべきの変化点ないし、深さ直径比の変化点が移行領域かもしれないことが示された（羽倉他, 2010 年連合大会）。

今回、移行領域をより限定するために焼結温度 560°C で 4 時間焼いたガラスピーズ焼結体と粒径 100μm の同粉体、更に焼結体の強度依存性をより明確に示すために焼結温度 650°C で同じく 4 時間焼いたガラスピーズ焼結体の 3 種類を標的の種類に追加して同様の実験を行った。深さ直径比はこれまでと変わらず 0.4 と 0.14 程度の 2 グループに分かれた。一方、焼結体の深さが強度に依存していること、すなわち深さも直径と同様に焼結体でのものと粉体でのものでひとつのべきでは表されないことがわかった。我々は、直径や深さの強度依存のべきの変化や、深さ直径比から、移行領域を ~10kPa と見積もった。

スターダスト衝突トラックの模擬実験：突入物質サイズと密度依存性

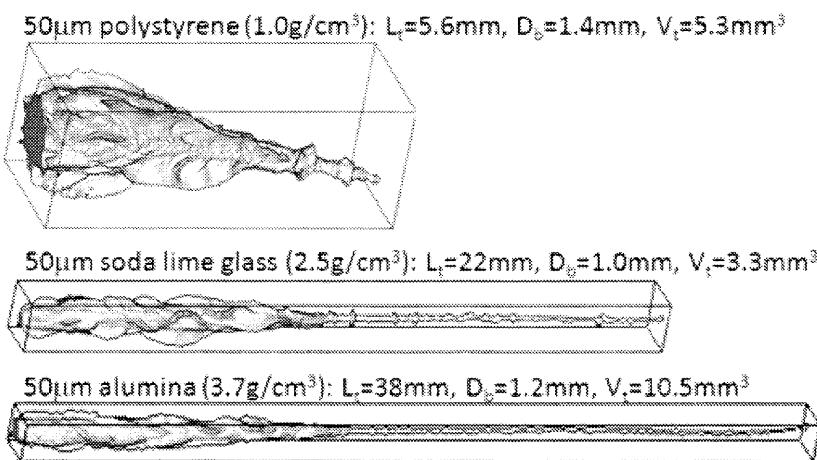
新居見 励¹ 土山 明¹ 門野 敏彦² 奥平 恭子³ 長谷川 直⁴ 田端 誠⁴
中野 司⁵ 上杉 健太朗⁶ 竹内 晃久⁶ 上根 真之⁷

¹阪大・理 ²阪大・ILE ³会津大 ⁴ISAS/JAXA
⁵GSJ/AIST ⁶JASRI/SPring-8 ⁷阪大・工

Stardust 計画(NASA)では 81P/Wild2彗星の塵が、相対速度 6.1km/s でシリカエアロジェル(5-50 mg/cm³)に捕獲され、地球に持ち帰られた[1]。塵がエアロジェルに残した衝突痕（トラック）は、捕獲時に破碎、蒸発を起こして原形を失ってしまった塵の情報を知るための大きな手掛かりとなる。これまで、トラックの最大幅などをもとに塵のサイズが[2]、またトラックの体積が突入粒子の運動エネルギーに比例することを仮定して、トラックの X 線 CT データを用いて塵の密度と高温生成物質の含有量が推定されている[3]。しかし、トラック形状が突入物質のサイズや密度にどのように依存するかを調べた系統的な実験データはないため、トラック形成モデルも十分ではない。[2]や[3]を評価し、より正確な推定を行うためには、トラック形成の定量的な理解が必要である。

我々は宇宙科学研究所の 2 段式軽ガス銃を用いて、様々なサイズ(30 - 100 μm)、密度(0.4 - 8.9 g/cm³)の球状粒子を 20 mg/cm³ の均一なシリカエアロジェルに約 6 km/s で衝突させ、トラックを形成した。これらの形状を光学顕微鏡で調べるとともに、ポリスチレン(1.0 g/cm³; 50 μmφ)、ガラス(2.5 g/cm³; 50 μmφ)、アルミナ(3.7 g/cm³; 50 μmφ)によって形成されたトラックについては SPring-8 の BL20B2, BL47XU でそれぞれ「トラック全体」と、「トラック終端にある捕獲粒子」の X 線 CT 像を取得し、三次元構造を調べた。

ガラス以上の密度を持った物質は、細長いトラックを形成した一方、ポリスチレンなどの密度の低い粒子は、太短いバルブ型のトラックを形成した（図）。発表では、トラックの特徴的なパラメータ（長さ、最大幅、体積など）のサイズ、密度依存と、トラックの詳細な三次元構造、更に突入粒子の損傷を踏まえて、トラック形成メカニズムを議論する。



- [1] Brownlee *et al.* (2006) Science, **314**, 1711-1716.
- [2] Burchell *et al.* (2008) MAPS, **43**, 23-40.
- [3] Iida *et al.* (2010) MAPS, in print.

図: 20 mg/cm³ のエアロジェルに形成した衝突トラックの三次元構造。L_t, D_b, V_t はそれぞれトラックの長さ、最大幅、体積を表す。左から突入した粒子はトラックの終端（右端）に捕獲されている。

天王星と海王星の内部構造に関する理解の現状

○生駒大洋¹

¹東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻

ホットジュピターのトランジット観測が可能になり、太陽系外の巨大ガス惑星についても内部構造が推定されるようになった。そして、コア質量などの情報から惑星の形成過程を制約できるようになった。宇宙望遠鏡の稼働や地上観測技術の進歩により、すでにターゲットは巨大氷惑星やスーパー地球などの比較的小さな惑星へと移行しつつある。系外惑星の内部構造の推定は、対応する太陽系惑星の特徴を説明できるモデルを適用することでなされる。ホットジュピターの場合は、木星と土星の理解が不可欠であった。しかし、天王星と海王星に関して言えば、重力場や赤外放射量などの観測と整合する理論モデルが得られていない。本講演では、著者の内部構造モデリングの最新結果を紹介し、天王星と海王星の内部構造と進化に関する現状の理解と課題について議論する。

レーザー衝撃圧縮による高圧水素のオフュゴニオ計測と巨大ガス惑星の内部構造

○佐野孝好¹、尾崎典雅²、境家達弘³、重森啓介¹、生駒大洋⁴、木村友亮²、宮西宏併²、遠藤恭²、城下明之¹、高橋英樹³、實井辰也²、曾田智史²、堀安範⁴、弘中陽一郎¹、岩本晃史⁵、門野敏彦¹、中井光男¹、奥地拓生⁶、清水克哉⁷、近藤忠³、兒玉了祐²、三間闇興¹
¹阪大レーザー研、²阪大工、³阪大理、⁴東工大地惑、⁵核融合研、⁶岡山大、⁷阪大極限セ

超高圧下での水素の状態方程式は、木星などの巨大ガス惑星の内部構造を理解する上で重要な基礎物理となっている。しかし、超高圧での水素の物性は、実験的にも理論的にも未だ十分に調べられていないため、状態方程式には大きな不定性が存在している。そこで本研究では、高強度レーザーによる衝撃圧縮を用いて、これまで実験的には実現困難であった超高圧下での水素の物性を解明していく。特に、最も不定性の大きい分子水素から金属水素への遷移領域(木星内部では圧力が200–400GPaで、温度は約6000–9000Kに相当)での状態方程式を実験的に検証することを最終的な目標としている。そして、例えば、その結果を木星の内部構造の解明に応用することで、木星を始めとする太陽系惑星の形成過程の理解などにも貢献していきたい。

液体水素のユゴニオ計測は、二段式ガス銃を用いた過去の実験で10GPaまで調べられているだけであった(Nellis et al. 1983)。金属化への遷移が起こると予測されている10–200GPaでの水素の圧縮率が、レーザー実験によって計測できれば、世界初のデータとなる。これまでの我々の成果として、クライオ装置を用いた実験で55GPaまでのユゴニオ計測に成功した。この実験では水晶を標準物質として利用することで、従来のレーザー実験と比べて非常に高精度の計測が実現できている。今回はさらに、反射衝撃波による二段圧縮によって、水素を200GPaを超える圧力にまで圧縮することに成功した。多段圧縮することで、一段圧縮と比較して温度上昇を抑えた超高圧状態の実現が可能となる。目標である木星の遷移層状態を再現するためには、このような温度制御技術(オフュゴニオ計測技術)は必要不可欠である。本講演では、二段圧縮実験の結果の詳細と、ダイヤモンドアンビルセルとレーザー衝撃圧縮を組み合わせた今後の実験計画について報告する。

土星リング粒子の熱慣性

○森島龍司¹, Linda Spilker², 大槻圭史^{1,3}

¹コロラド大学, ²ジェット推進研究所, ³神戸大学

NASA/ESAの探査機カッシーニは、2004年に周土星軌道へ投入されて現在に至るまで、様々な観測装置により、土星本体、衛星、リングの観測を行って来ている。本研究では、土星リングの赤外熱輻射の観測データの解析を行い、氷からなるリング粒子の熱慣性を求めたので報告する。熱慣性とは物質密度、比熱、熱伝導率の積の平方根で表わされ、熱伝導率が物質の空隙率に非常に強く依存するために、レゴリス層の有無などの天体表面状態の指標となる量である。リング粒子が土星の影に入った時の温度降下が大きければ大きいほど、熱慣性は小さく、粒子表面層の空隙率が大きいことを意味する。

データには、土星中心からの距離がほぼ等しく、影領域を含む周土星経度沿いにスキャンされた赤外スペクトル(A, B, Cリングおよび、カッシーニの間隙)を用いた。リングの温度は、25-100ミクロンのスペクトルをプランク関数にフィッティングすることによりもとめた。リングの熱輻射の計算では古典的放射輸送にリング粒子の運動による熱輸送を組み入れたモデル(Morishima, Salo, Ohtsuki, 2009, Icarus 201)を用いた。熱輻射では粒子の自転状態が重要となるが、このモデルでは高速自転により等方的に熱輻射する小さい粒子と自転をしていない大きい粒子が混合したもので近似化している。

モデルのフィッティングにより得られた熱慣性は、 $7-20 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ と非常に小さいことが分かった。これはリング粒子の表面が空隙率の高いレゴリスで覆われていることを意味する。さらに、詳しく調べると、熱慣性は太陽位相角（太陽-リング-観測者からなる角度）と共に大きくなることが分かった。この解釈として、自転の遅い大きい粒子は、自転の速い小さい粒子に比べて、熱慣性が小さいということが考えられる。なぜなら、前者と後者は、それぞれ太陽位相角が小さいところと大きいところで相対的に熱輻射が強くなるからである。そこで、大きい粒子と小さい粒子が別々の熱慣性の値を持つとして、再フィッティングした。その結果、大きい粒子と小さい粒子の熱慣性はそれぞれ $5-10 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ 、 $20-90 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ であることが分かった。リング粒子の自転周期はサイズにほぼ比例することが理論的には予測されているので、小さい粒子は高速自転により空隙率が高いレゴリス層は持てないと考えられる。また、小さい粒子のサイズを変えた計算から粒子サイズの下限値が約 1cm であることも分かった。

プロペラ構造を持たない小衛星

○道越秀吾¹、小久保英一郎¹

¹国立天文台

土星探査機カッシーニによって、土星の環のAリング領域で、「プロペラ」のような形をした密度構造が見つかってきている。このプロペラ構造は、観測されていない小衛星の重力散乱によって形成されていると考えられている。昨年、Bリングの外側の端の領域で新しい小衛星(S/2009 S 1)が発見された。土星の環上に影が観測されており、その長さから、小衛星の大きさは直径300mと推定されている。しかし、この小衛星の周囲ではプロペラ構造は見つかっていない。

そこで我々は、小衛星(S/2009 S 1)周囲の密度構造を調べるために、実スケールの数値シミュレーションを行なった。Aリングのように面密度が低い場合は、プロペラ構造が形成される(図1)。一方、Bリングのように高い面密度の場合、小衛星の周囲では自己重力wake構造が強く発達し、はっきりとしたプロペラ構造が見えない(図2)。

プロペラ構造が形成される条件を考察し、小衛星のヒル半径よりも重力不安定の臨界波長が長いときに、プロペラ構造が自己重力wake構造によってかき消されることを示した。

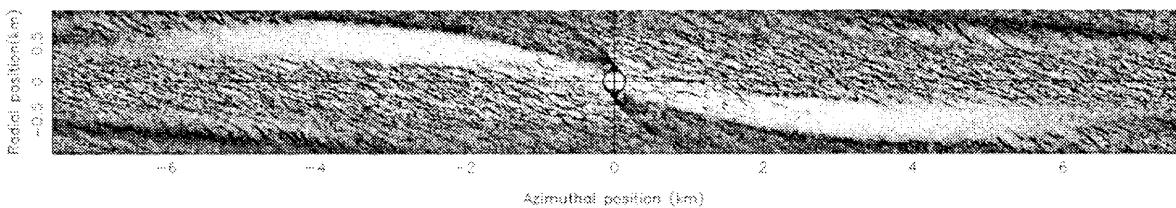


図1：Aリングモデル(低密度モデル)の場合のシミュレーション。横軸は回転方向、縦軸は半径方向。中心の円が直径300mの小衛星を表わす。プロペラ構造が形成される。

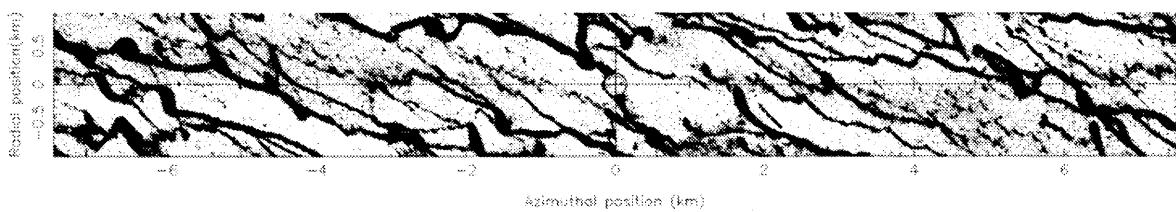


図2：図1と同じであるがBリングモデル(高密度モデル)の場合。自己重力wakeが強く発達し、プロペラ構造が形成されない。

木星・土星による小惑星の捕獲 -不規則衛星の起源-

○樋口有理可¹ 岡本尚也² 井田茂¹

¹東京工業大学 ²神戸大学

巨大惑星の周りには、ガリレオ衛星などの規則衛星とは異なる起源を持つと考えられる衛星が多数発見されており、これらを不規則衛星と呼ぶ。不規則衛星は、元々は周太陽軌道にあった天体が何らかの過程を経て周惑星軌道に捕獲されたものだと考えられている。それらの天体が元々どこで誕生したものであるかはまだわかっていないが、近年提唱されている惑星移動モデル(Nice モデル)の枠内では、カイパーエルトなどの惑星領域外縁部から巨大惑星領域にもたらされた氷天体が不規則衛星へと進化した可能性が指摘されている(e. g., Bottke et al. 2010)。一方、木星・土星の不規則衛星のアルベドやライトカーブから推測されるその姿はカイパーエルト天体よりも小惑星に近い。しかし、小惑星帯の天体が木星以遠の惑星の不規則衛星に進化した可能性はこれまでほとんど調べられていない。そこで本研究では、小惑星帯の天体が木星・土星まで輸送され、不規則衛星候補になりうるかどうかを数値計算で調べた。その結果、小惑星帯から木星領域まで輸送された小惑星の $1/3-1/2$ は土星領域にも輸送されうること、それらが各惑星に対して持つ軌道傾斜角には違いがあることが分かった。また、一部の天体は太陽周回軌道にありながら惑星の周囲に長期にわたって滞在する、「一時的捕獲」の状態になることが分かった。これらは「準衛星」と呼ばれる軌道にあり、その後は相対的に小さなエネルギー散逸でもって衛星軌道に進化できると考えられ、不規則衛星の強力な候補であると言える。本研究ではさらにこの準衛星の起源と軌道進化について詳細に調べた。発表では、小惑星の群のひとつであるヒルダ群と木星の不規則衛星の起源の関係、軌道傾斜角分布に焦点を絞って議論する。

原始惑星系円盤初期における物質の降着年代分布

○安達俊貴, 福井隆, 倉本圭

北海道大学大学院理学院宇宙物理学専攻

始原的隕石中には、難揮発性包有物 (CAI) やコンドルールなど、高温環境を起源とする物質が見られる。放射性同位体年代測定の結果から、CAI の形成年代は分子雲コアの収縮開始から数十万年で形成される一方で、コンドルールは CAI 形成後からおよそ 200 万年間の間に断続的に形成されたことが示唆される。つまり始原的隕石中には形成年代の異なる物質が混在している。起源の異なる物質の混在は彗星中にも見られる。NASA のスターダスト計画によって、カイパーベルト起源の彗星サンプルから、難揮発性包有物とみられる物質が発見されている。従ってこれらの物質は、太陽に比較的近い高温の領域で形成された後、円盤全体に輸送され、始原的天体を作ったと考えられている。

これまで、円盤形成の初期段階に降着した物質は早期に中心星に落下し、円盤から失われると考えられてきたが、定性的な議論にとどまっている。しかし、異なる年代の降着物質がどのような割合で円盤に分布するのかを議論することは、隕石物質の起源を考える上で重要である。また、高温起源物質の再輸送はいくつか研究がなされている (Shu 2001, Ciesla 2007 など)。しかしながら先行研究のほとんどは、分子雲コアからの降着を無視した定常円盤を仮定している。特に CAI のような高温起源物質は円盤形成段階の初期に形成されると考えられるため、円盤降着終了時の物質の分布を知るために、降着初期段階から物質の輸送を追う必要がある。

そこで本研究では、円盤形成初期段階において降着した年代ごとに降着ガスを区別し、各種ガス面密度分布、及び濃度分布の時間発展を計算した。面密度の拡散モデルには Pringle (1981) の定式化を用い、Morfill & Voelk (1984) による濃度拡散の表現を組み込んだ。分子雲コアから円盤へのガス流入は Cassen & Moosman (1981) の定式化を用い、降着年代及び位置を区切って異種のガスとみなして計算した。分子雲コアの温度と回転角速度、及び粘性パラメータ (Shakura & Sunyaev 1973) を変えてパラメータスタディを行った結果、分子雲コア収縮開始から 100 万年後において、初期(10~20 万年)に降着したガスが惑星形成領域 (< 100 AU) で支配的 (濃度 ~50%) であることが示された。このことは、CAI のような古い物質が比較的容易に惑星形成段階まで生存し、隕石物質に見られるような、形成年代の異なる物質の混合が説明できる可能性があることを示す。

磁気的不活性領域を持つ原始惑星系円盤における 乱流の垂直構造

○奥住聰¹, 廣瀬重信²

¹名古屋大学大学院理学研究科 ²海洋研究開発機構

ダスト粒子の合体成長と赤道面への沈殿は、原始惑星系円盤における惑星形成の第一歩である。これらの過程を明らかにする上で、ガスの乱流の性質は必要不可欠な情報である。原始惑星系円盤での乱流生成機構として最も有力とされているのは、磁気回転不安定性(MRI)と呼ばれる磁気流体力学起源の不安定性である(Balbus & Hawley 1991)。この不安定性が作用するのは、ガスがある程度電離して磁場と十分に結合している場所のみであり、外部からの宇宙線や X 線が十分に到達できる円盤上層部に限られる。この事実から、円盤の垂直構造は、MRI が活性化される上層部と不活性な下層部（赤道面部）の 2 層で特徴づけられることが予想される(Gammie 1996)。しかも重要なことに、電離度の分布、すなわち 2 層の厚みの割合は、ダストのサイズ分布・空間分布にも著しく依存する(Sano et al. 2000)。このことは、ダストのサイズ分布と円盤の乱流構造が相互に依存しながら進化することを示唆するが、このような進化の具体的な描像はまだ確立していない。

本研究では、上記のような 2 層構造をもつ円盤内での乱流の性質を、円盤の垂直構造と磁気拡散を考慮した MHD 数値シミュレーションによって体系的に調査した。その結果、MRI による磁気エネルギーの增幅は上層部の活性領域でのみ活発に起こるのに対し、ガスのランダム運動のエネルギーは垂直方向全体におおむね等分配されることを明らかにした。これは、上層部での磁気活動がつくる音波が、垂直方向全体にわたってガスの運動を誘起していることを示唆する。さらに、磁気不活性領域の「厚み」をよく記述する物理量を特定し、この厚みと不活性領域内のガスの速度分散との間に非常に簡単な関係が成立することを経験的に見いだした。本講演では、この経験式を標準的な原始惑星系円盤モデルに適用し、ダストの成長および沈殿に対してどのような理論的制限が与えられるかを議論する。

電子再結合を考慮に入れた MHD シミュレーション:
 MRI による準定常ガス高密度領域の形成
 MHD simulation with density-dependent magnetic resistivity:
 Formation of the long-lived density bump by MRI growth

○加藤真理子¹, 奥住聰², Anders Johansen³

¹東京工業大学、²名古屋大学、³Lund University

磁気回転不安定性(Magneto-Rotational Instability: MRI)は、原始惑星系円盤中の角運動量輸送や乱流生成、微惑星形成等において重要な役割を担うと注目されており、これまでに多くの研究が行われてきた。この不安定性は、ガスの電離状態によって成長率が異なり、電離度が低いほどオーム散逸の効果によって成長率が下がる(Jin, 1996)。原始星付近(原始星からの動径方向距離 $R <$ 数十 AU)の赤道面では、ミクロンサイズのダスト表面における電子再結合が著しいため、主にダスト量によって電離度が決まり、オーム散逸の効果を無視できないほどの弱電離状態にあると考えられている(Sano et al. 2000)。そのため、これまでの MRI に関する電磁流体シミュレーションの多くが、磁気拡散項を加えているが、そのほとんどが磁気拡散係数を定数として扱っている。しかし、MRI によって乱流が生成されれば、乱流中でダスト密度が変化し、電離度、すなわち磁気拡散係数も変化する。そこで本研究では、MRI 乱流中でのダスト密度変化による電子量の変化を考慮に入れ、磁気拡散係数を同時に計算する電磁流体シミュレーションを行った。

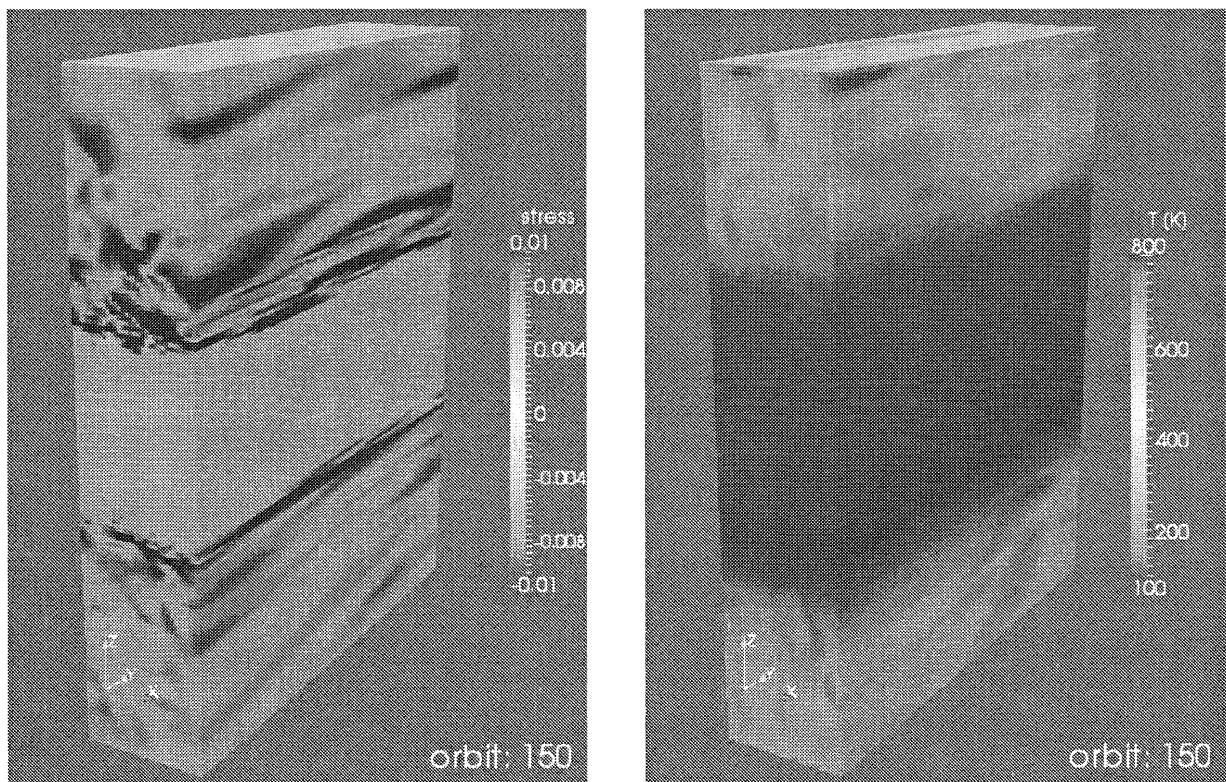
本研究の電磁流体シミュレーションでは、ミクロンサイズのダスト密度はガス密度に比例しているとし、電磁流体方程式から得られるガス密度より、Okuzumi et al. (2008)による半解析手法を用いて磁気拡散係数を計算した。その結果、オーム散逸の効果が MRI 成長率を下げるほどの弱電離状態下において、MRI 成長によって軸対称な高密度領域が形成された。この密度揺らぎは、磁気拡散係数を定数とした場合と比べて 2 倍以上も大きく、さらに長時間維持される。本発表では、この高密度領域形成過程の詳細や、原始星からの距離や計算領域サイズによる結果の違いを発表する。

原始惑星系円盤の温度構造

○廣瀬重信（海洋研究開発機構）

Neal Turner (JPL/Caltech)

原始惑星系円盤の温度構造は、円盤内のダストとガスの進化、延いては惑星形成過程を理解する上で、重要な要素である。原始惑星系円盤の温度構造は、加熱（＝粘性加熱+中心星からの可視光照射）と冷却（＝円盤表面からの赤外線輻射）のバランスによって決まる。ここで、円盤内の粘性加熱が（磁気回転不安定性が駆動する）磁気乱流の散逸であるとすると、その加熱率を精確に求めるためには、数値シミュレーションによるアプローチが不可欠となる。そこで、我々は、原始惑星系円盤の一部（中心星からの距離が1[AU]）をシーリングボックスで近似し、その垂直方向の力学および熱バランスを、3次元輻射磁気流体力学シミュレーションを用いて求めている。下図は、表面密度 $1000[\text{g/cm}^2]$ 、垂直磁場強度 $0.02[\text{G}]$ 、ダスト-ガス比 10^{-4} の場合についての計算例である（左がストレス分布、右が温度分布）。このケースでは、赤道面近傍のいわゆるデッド・ゾーンの外側でのみ（磁気乱流による）ストレスが働いている、それは約 $10^{-8}[\text{Msol/yr}]$ の降着率に相当する。温度分布を見ると、円盤内部ではほぼ一様に約 $160[\text{K}]$ になっている一方、円盤大気では乱流起源のゆらぎが大きく、平均で約 $400[\text{K}]$ 、局所的には高いところで $1000[\text{K}]$ 近くになる。ただし、その熱源のほとんどは中心星からの可視光照射であり、粘性加熱はそれに比べると無視できる程度である。本講演では、これらの結果の詳細について説明するほか、上記の3つのパラメータ（表面密度、垂直磁場強度、およびダスト-ガス存在比）への依存性、およびこれまでよく用いられているアルファモデルとの比較について議論を行う。



原始惑星系円盤におけるダスト層重力不安定性 の3次元数値シミュレーション

○石津尚喜¹、犬塚修一郎²、関谷実³

¹自然科学研究機構国立天文台、²名古屋大学大学院理学研究科、

³九州大学大学院理学研究院

微惑星形成過程のモデルは、ストリーミング不安定性、ダストの連続成長、ダスト層の重力不安定などが考えられている。今回、重力不安定性について考える。原始惑星系円盤の中心面にダストが沈殿して形成されるダスト層が十分に薄くなれば重力不安定性により分裂する。分裂したダスト層のダストが集積することによって微惑星は形成される。重力不安定性による微惑星の形成モデルは、cm未満のダストからキロメートルサイズの微惑星を一気に形成することができるため有効である。しかしながら、乱流が存在するとダストは巻き上げられるため、臨界密度に達することができない。本研究では、円盤が層流状態でかつ重力不安定が生じうるシミュレーションを仮定する。

重力不安定に関して、ガスとダスト間の相互作用がない場合や考慮されていても2次元での数値シミュレーションが行われてきた。本研究では、ガスとダストの相互作用を考慮した3次元数値シミュレーションを行った。ダストとガスは2流体近似で取り扱われた。計算に用いられたパラメーターは、ダストの摩擦時間とケプラー角速度の積が0.01の場合で、林モデルで1AUのとき直径3cmのダストに相当する。中心面での初期ダスト、ガス密度比は重力不安定性の臨界密度を超える300:1とした。シミュレーション結果は、Wakita & Seikya(2008)によって行われた動径方向、方位角方向の2次元計算が予測したように密度分布に非軸対称のパターンが生じた。パターンが生じた後、Yamoto & Sekiya(2006)による動径方向、鉛直方向での数値シミュレーションで見られるような中心面での流入が見られた。今回の計算では、さらなる分裂過程を追うことはできなかった。重力不安定による微惑星形成をより理解するためにはさらなる計算が必要である。

微惑星衝撃波による微惑星の蒸発

Evaporation of Planetesimals due to Planetesimal Bow Shocks

○ 田中今日子¹、山本哲生¹、三浦均²、長沢真樹子³、中本泰史³、田中秀和¹

Kyoko K. Tanaka¹, Tetsuo Yamamoto¹, Hitoshi Miura², Makiko Nagasawa³,

Taishi Nakamoto³, and Hidekazu Tanaka¹

¹ 北海道大学低温科学研究所、² 東北大大学、³ 東京工業大学

¹ILTS, Hokkaido Univ., ²Tohoku Univ. ³Tokyo Institute of Technology

High eccentricities of planetesimals cause bow shock waves in front of the planetesimals in the protoplanetary disk. We construct a simple model describing evaporation of a planetesimal due to the planetesimal bow shock. We found that ice planetesimals evaporate effectively around 3-5 AU in the stage of protoplanet formation.

原始惑星系円盤内において、微惑星の離心率が上昇するとガスと微惑星の間に相対速度が生じ、相対速度が音速を越えると衝撃波が発生する。微惑星衝撃波の後面で加熱されたガスの吹き付けにより微惑星の表面物質は蒸発する。この微惑星蒸発の効果は従来無視されてきたが、惑星形成に大きな影響を及ぼす可能性がある。本研究では微惑星衝撃波による微惑星の蒸発についてモデル化し、惑星形成過程における橿円軌道化した微惑星蒸発の影響について調べた。微惑星の蒸発率は Miura et al.(2010)¹ により得られた衝撃波後面の温度およびエネルギーバランス式から導いた。

原始惑星系円盤として Hayashi モデルを考えた場合、3-5AU 付近において離心率が 0.04-0.05 以上の場合にガスと微惑星の間の相対速度が音速を越え衝撃波が生じる。惑星形成の標準理論によると、微惑星が形成した後、微惑星の一部が暴走成長し原始惑星を形成する²。原始惑星が形成されると周りの微惑星は原始惑星の重力散乱によりね上げられ離心率が上昇する³。この離心率の上昇を考慮すると、原始惑星の周りの氷微惑星の蒸発が効率的に起きることが分かった。例えば 5 AU 付近において原始惑星が 10 地球質量まで成長した場合、半径 100km の氷微惑星は原始惑星の重力散乱により離心率が 0.2 程度まで上昇する。このとき、衝撃波速度 2.5km/s の衝撃波が生じ、衝撃波後面の 330K の高温ガスが微惑星表面に吹きつける。その結果、微惑星はおよそ数百万年で蒸発する。発生した蒸気はその後小さな粒子として再凝縮しガスとともに運動するので、結果的に木星型惑星コアの成長は妨げられる可能性がある。また蒸発の際は水蒸気のみならず重元素も周囲にばらまかれるためガス惑星の大気成分などにも影響を与えるだろう。

References: [1] Miura, H., Tanaka, K. K., Yamamoto, T., Nakamoto, T., Yamada, J., and Tsukamoto, K. ApJ, 719, 642-654 (2010), [2] Kokubo, E., and Ida, S. Icarus 143, 15-27 (2000), [3] Tanaka, H., and Ida, S. Icarus 139, 350-366 (1999)

小さなコアを持つガス惑星形成：氷微惑星による大気汚染の効果

○堀 安範, 生駒大洋

東京工業大学 地球惑星科学専攻

コア集積モデルでは、原始惑星コアがある臨界質量(臨界コア質量)に到達すると、暴走的に円盤ガスを捕獲し始める。この臨界コア質量は典型的には10 地球質量とされている。そのため、木星のように小さなコアを持つガス惑星 形成はコア集積モデルの問題点とされていた。

そこで、小さなコアを持つガス惑星形成を説明するアイデアとして、エンベロープ中のグレイン オパシティの減少や遅い微惑星降着率が考えられて來た。しかしながら、これまでの研究ではすべて、太陽組成を持つエンベロープ を想定していた。実際には、降着する氷微惑星はエンベロープ中でアブレー ションを経験し、大気を重元素汚染する可能性が高い。

以上から、本研究では氷微惑星による大気汚染に注目して、臨界コア質量およびガス降着時間を再評価した。その結果、大気汚染は断熱温度勾配の減少 および平均分子量の増加を引き起こすことで、臨界コア質量を下げ、ガス降着 を早めることが分かった。さらに、従来、想定されていたグレイン オパシティ の減少を考慮しなくても、大気汚染の効果だけで1地球質量程度のコアを 持つガス惑星形成を説明出来ることも分かった。

本講演では、上記の結果について発表を行う。

中心星に照射された自転する固体球の 温度分布の逐次近似解

○関谷 実¹

¹九大・理

中心星により照射されながら自転する球状の固体の温度分布を求めるることは、惑星科学の基礎となる問題である。たとえば Yarkovsky 効果による軌道進化を求める上で、温度分布は本質的である。それにもかかわらず、この問題が解析的に解かれなかつたのは、Stefan-Boltzmann の法則による冷却則が温度の 4 乗という非線形な形をしているためである。昨年度の秋期講演会では、冷却則を平均温度からのずれの 1 乗までの線形近似をした場合の解析解を紹介した。本年度は、厳密な冷却則を用いた場合の温度分布に限りなく近づけることができる逐次近似法を考案したので、その結果を紹介する。この方法を用いることにより、数値的表面積分（すなわち表面をメッシュに分けた足し算）と、漸化式を繰り返し用いるだけで、原理的には任意の精度の解を得ることが出来る。

以下に、計算例（地球軌道で、半径 2m の普通コンドライトの球、自転周期 140 時間、太陽方向が自転軸から 60 度の場合）を示す。

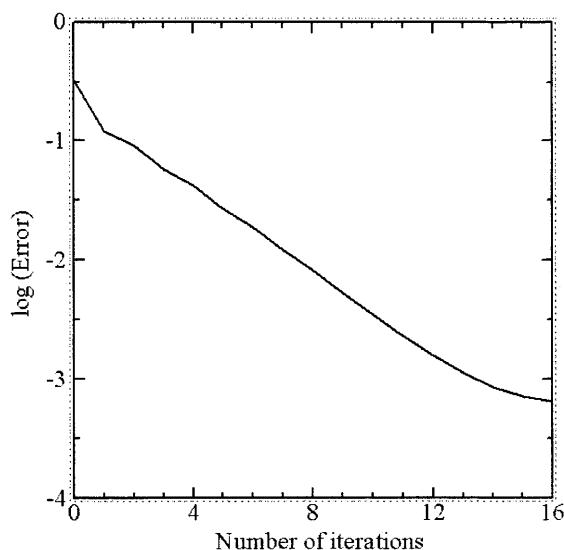


図 1. 逐次近似の回数と、表面の加熱冷却の誤差の関係を表す。1 回目は線形近似に相当するが、この場合の誤差は 12% あった。16 回逐次近似を繰り返すと、誤差は 0.065% にまで減少した。

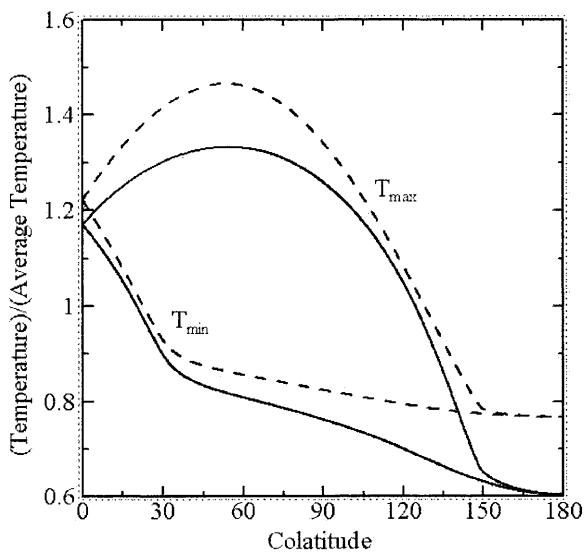


図 2. 各緯度での最高温度と最低温度の比較。横軸は自転軸から測った経度。線形近似解を破線で、逐次近似を 16 回行った解を実線で表している。線形近似解では最高温度や最低温度が、逐次近似解に比べて大きくなっている。

微惑星集積期における惑星スピン進化

○松倉大士¹, 小久保英一郎², 井田茂³

^{1,3}東京工業大学, ²国立天文台

現在の太陽系に存在する地球型惑星は、すべて自転 (=スピン) をしている。スピン物理量である自転角速度や自転軸傾斜角は、惑星自体が形成される際に主に獲得されてきたと考えられている。そのため、形成直後の角運動量を未だ保存していると考えられる地球-月系は、地球型惑星のスピン進化を追う上で重要なサンプルである。地球型惑星のスピンについては、寡占成長期における3体計算(Ohtsuki&Ida(1998)) や惑星形成後期のジャイアン トインパクト期 におけるN体計算(Kokubo&Ida(2007))において、詳細な計算が行われている。今回我々は、微惑星円盤からの惑星スピン進化を追うにあたり、先行研究の Ohtsuki & Ida(1998) では考慮されていない「微惑星の衝突合体」による成長過程を初めて取り入れた。これは、微惑星同士の相互重力を高速ベクトル型計算機 GRAPE6 を用いたN体計算により、高速化した計算が可能である。これにより、微惑星円盤の分布を解きながら惑星のスピン進化を追うことができ、スピン進化における ordered component と stochastic component を分けることなくスピン進化を追った。初期設定として、地球型惑星形成領域に初期質量 $10^{-4} M_{\text{Earth}}$ の微惑星からなる円盤を仮定した。その後、微惑星の軌道進化を追い、暴走成長・寡占成長を経て合体成長した惑星のスピン進化を調べた。ここで、微惑星の衝突合体は完全合体を仮定している。結果として、初期の微惑星同士の衝突では、break-up speed に近い自転角速度を持つが、その後 10^4yr 経過後に初期質量の 100 倍程度に成長した原始惑星は、自転角速度 $1-10/\text{hr}$ に分布することがわかった。これは自転周期 $0.1-10\text{hr}$ に対応する。また自転軸傾斜角は、 $0-180$ 度に等方分布に近い形をとることがわかった。このことから微惑星成長初期において、stochastic component が ordered component よりも十分卓越していることがわかった。

巨大衝突による衛星形成： 原始惑星の組成が円盤の蒸発率に与える影響

中島美紀¹, ○玄田英典², Erik Asphaug³, 井田茂¹

¹東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻

²東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

³Earth and Planetary Sciences, University of California, Santa Cruz

地球の衛星である月は、惑星形成過程の最終段階で頻繁に起こったと考えられる原始惑星同士の衝突（巨大衝突）によって作られたと考えられている。原始惑星が原始地球に斜めに衝突することによって、原始地球周回上に物質がばらまかれ、円盤が形成され[1]、円盤物質が再集積することによって月が形成されたと考えられている[2]。巨大天体衝突による衛星形成は、地球-月系だけでなく、太陽系ではプルート-カロン系[3]や、太陽系外の惑星形成過程でも普遍的に起こりうることが予測されている[4]。

近年、巨大天体衝突による月形成に関する詳細なプロセスが再検討されるようになってきて、形成される円盤の蒸発率が、最終的にできる衛星の質量に強く影響を与えることがわかつてきた。例えば Machida and Abe (2004) [5] では、部分蒸発した円盤内での月形成プロセスに注目し、円盤の蒸発率が大きい程、形成される衛星の質量が小さくなること、また円盤の蒸発率が 70%を超えると衛星が形成されなくなることを示した。また、Wada et al. (2006) [6] は、巨大天体衝突の高解像度シミュレーションを行い、円盤形成プロセスと円盤の初期進化を調べ、円盤が気体的に振る舞えば、円盤は数日程度で地球に降着し、大きな衛星が形成出来ないことを明らかにした。

原始惑星を構成する物質の蒸発の潜熱と衝突時のエネルギーの大小関係が形成される円盤の蒸発率を左右すると考えられる為、原始惑星の組成や天体衝突の規模（衝突天体の質量等）が円盤の蒸発率に大きな影響を与えるはずである。しかし、そのような観点で円盤の蒸発率について調べた研究はない。

そこで本研究では、M-ANEOSなどの物質の相変化を扱える状態方程式を用いて、岩石原始惑星（岩石+鉄）同士、氷原始惑星（氷+岩石）同士の巨大衝突を、SPH 法を用いて系統的にシミュレーションを行った。そして、原始惑星の組成や衝突の規模が、形成される円盤の蒸発率にどのような影響を与えるかを明らかにした。その結果、プルート-カロン系サイズでは組成（岩石、氷）に依らず蒸発は殆ど起こらないが、地球サイズでは氷原始惑星の円盤の方が岩石のそれに比べてより大きな蒸発率を持ち、その値が 70%を超えること、また地球の 5 倍程度の質量を持つスーパー地球サイズでは岩石、氷原始惑星の円盤の大部分が蒸発することが分かった。

参考文献

- [1] Ida, S. et al., *Nature* 389, 353, 1997. [2] Canup, R. M. and Asphaug, E., *Nature* 412, 708, 2001.
- [3] Canup, R. M., *Science* 307, 546, 2005. [4] Ogihara, M. and Ida, S., *ApJ* 699, 824, 2009.
- [5] Machida, R. and Abe, Y., *ApJ* 617, 633, 2004. [6] Wada, K. et al., *ApJ* 638, 1180, 2006.

格子法による3次元 ジャイアントインパクトシミュレーション

○森薗宏太¹、玄田英典¹、阿部豊¹、小久保英一郎²

¹東大・理, ²国立天文台

現在、月の起源として、ジャイアントインパクト説（巨大衝突説）が有力である。この説では火星サイズの原始惑星が原始地球に衝突し、主に衝突天体のマントル物質が原始地球周回上にばらまかれ円盤（原始月円盤）が形成され(e. g., Canup, 2004)、それらが集積して月ができたとするものである(e. g., Ida et al. 1997)。どのような衝突条件で、どのような円盤が形成されるかについては、SPH法(Smoothed Particles Hydrodynamics method)と呼ばれる流体コードが主に用いられ、大まかなことはわかつてきた。

しかし、SPH法は流体を粒子として扱って計算する方法で、密度が高く、物質が沢山存在している場所には多くの粒子が存在し、密度が低く、物質があまり存在していない場所はあまり粒子が存在しないという特徴がある。したがって原始月円盤は全体の数%の質量しかないので円盤を形成する領域には全体の粒子数の数%しか粒子がなく、さらにそれらの粒子の広がりはディスクの半径程度になり、円盤の解像度が非常に低くなってしまうという問題がある。

この問題を解決するためにWada, Kokubo and Makino (2006)は、数値計算方法に粒子法ではなく格子法を用い空間全体で等しい解像度を実現し、円盤部分での解像度をあげることを試みた。その結果、円盤領域ではSPH法の10-20倍の解像度を得ることができ、円盤領域での詳しい様子をシミュレーションすることが出来た。彼らが用いた状態方程式は仮想的なものであったが、円盤物質が気体的に振る舞うような状態方程式を用いた場合、これまでのSPH法によるシミュレーションでは見られなかった円盤領域でのスパイラル状の衝撃波などによって円盤物質が徐々に失われてしまい、その後形成される月の質量が小さくなってしまうという示唆が得られた。この結果は、月の起源そのものに影響するため、きわめて重要なものであったが、彼らが用いた状態方程式は仮想的なものであり、蒸発の効果などは入ってなく、SPH法での計算と異なる状態方程式なので手法による違いを正確に見積もったわけではない。また、そのためSPH法との詳細な比較も行われていない。

そこで、本研究では彼らの結果をさらに発展させるため、同様の格子法によるシミュレーションコードを作成し、状態方程式に蒸発の効果が入ったTillotsonの状態方程式を用いてシミュレーションを行った。これによりWada et al. では見られなかった蒸発の影響を見積もることが出来るようになり、蒸発しやすい状況下では形成される衛星の質量が減少する等の結果が得られた。またTillotsonの状態方程式はSPH法でもよく用いられてきたものなので、SPH法と格子法との詳細な違いを調べる事が出来るようになった。今回の発表では粒子法と格子法で同じ衝突条件でジャイアントインパクトを計算したときの詳細な比較を発表する。

N体シミュレーションによる巨大惑星周りの衛星系形成

○荻原正博 井田茂

東京工業大学・地球惑星科学

最新の研究に基づく周惑星円盤モデルを用い、巨大惑星周りの衛星系形成を、円盤ガスの効果を考慮に入れた重力N体計算によって調べた。

太陽系での巨大惑星周りに存在する規則衛星は、惑星形成におけるコア集積モデルと同様の過程を経て形成したと考えられている。即ち、原始惑星を取り巻く周惑星円盤中に存在した微衛星がガスによる影響を受けつつ、衝突・合体を繰り返し現在のサイズまで成長したという考えである。このように太陽系と巨大惑星の衛星系は同様のプロセスで形成したと考えられているのだが、木星周りに存在する衛星系と土星周りの衛星系、太陽周りの惑星系はすべて衛星（惑星）の分布などに違いがある。この違いの一部は、衛星系（惑星系）が形成した環境（円盤の状態や進化など）に起因すると考えられ、その形成環境と形成する衛星系（惑星系）の性質の相関を明らかにすることは、系外惑星系形成理論構築の為にも重要である。本研究では、系外惑星に比べて軌道情報が正確に知られている木星衛星系と土星衛星系の形成過程を調べることで、形成環境と衛星系の性質の相関を明らかにすることを目的とする。

巨大惑星周りの衛星系形成について、Canup & Ward (2002, 2006)は「gas starved disk」と呼ばれる低質量の定常降着円盤モデルを考え、N体計算を行った。計算の結果、円盤中の衛星は形成と円盤ガスとの重力的相互作用（タイプI移動）による落下を繰り返すことで、形成する衛星の総質量(M_T)と惑星質量(M_P)の比が一定に保たれることを示した。これは木星・土星衛星系における質量比(M_T/M_P)と一致している。しかし、木星系と土星系の違いの必然性に関しては議論されておらず、また木星系に存在する共鳴関係や形成する個数（木星系は大きな衛星が4個、土星系は1個存在）に関しても説明できていない。これは、円盤モデルをシンプルに考えた為、またN体計算での粒子数が少なかった為であると考えられる。

そこで、Sasaki et al. (2010)はCanup & Wardモデルを改良し、「円盤内縁の存在」と「円盤散逸時間」が木星と土星において違いがあるという条件を課し、モンテカルロ法を用いたモデル計算を行い、木星系と土星系の作り分けを説明した。更に、衛星の個数・分布をそれぞれ再現できるパラメータを見つけ出すことに成功している。

今回本研究では、Sasaki et al. (2010)により改良された円盤モデルを用いて、木星系・土星系それぞれの再現を目指す。特に、モデル計算では追うことが難しい共鳴関係や、Canup & Ward (2006)のN体計算では粒子数が少なかったことで見逃していた形成プロセスについて詳細に議論する。具体的には、木星周りのガリレオ衛星は内側の3衛星がそれぞれ平均運動共鳴に入った状態で形成しているが、N体計算の結果この共鳴関係を再現できることがわかった。また、ガリレオ衛星の個数(4個)は、Ogihara et al. (2010)によって提唱された「eccentricity trap」の理論を適用することで説明されることがわかった。更に、N体計算において粒子数を増やすことにより、質量が小さい微衛星の段階からの形成シミュレーションが可能になり、これによってCanup & Ward (2006)で再現されなかった土星衛星系の特徴を再現できる可能性についても議論する。

軌道移動による平均運動共鳴軌道における惑星系の安定性

○松本侑士, 長沢真樹子, 井田茂¹¹東京工業大学 地球惑星科学専攻

惑星形成における数値計算は円盤ガスとの相互作用により、原始惑星が中心星方向に落下し平均運動共鳴に入ると考えられる (e.g., Terquem & Papaloizou 2007, Ogihara & Ida 2009)。特に Ogihara & Ida 2009 では、タイプ I 軌道移動が強ければ 5個程度の原始惑星が一次の共鳴に入りガス散逸後も安定で、内縁付近に共鳴に入った惑星系が形成された。それに対し、弱いときは 40程度の原始惑星が一次の共鳴に捕獲されるが、ガス散逸後に不安定化、内縁に偏らない、共鳴でない広い軌道間隔の惑星系となった。

これに対して、観測された multipleな地球型惑星による惑星系では、共鳴軌道に入ったものは見つかっていない。すなわち、Ogihara & Ida 2009 のように共鳴に入った惑星系が不安定化したと考えられる。Ogihara & Ida 2009 により弱い軌道移動の際、軌道が不安定化することが知られているが、何のパラメータによってどのように安定時間が変化したのは明らかにはされてはおらず、どうして惑星系が不安定化したのかはわかってはいない。

惑星が共鳴でない軌道の場合の安定時間は Chambers et al., 1996 によって経験的に知られている。Chambersらは太陽質量の中心星に対し、1AUからヒル半径の定数倍ずつの軌道間隔に同一平面で離心率 0 で等質量の原始惑星を数体置き、その軌道安定時間を調べた。惑星間の距離がそのお互いのヒル半径の内側に入ったら軌道が不安定化するとし、惑星の軌道交差が起きるまでの時間を軌道安定時間とした。軌道間隔の異なる場合の軌道交差時間を測定した結果、この軌道交差時間と軌道間隔の間には線形の関係があることを発見した。Chambersらの計算では共鳴の場合の安定性については調べておらず、Ogihara & Ida 2009 で示唆された安定な共鳴軌道の安定時間は見積もることができない。そのため、共鳴軌道に入り安定化した惑星と不安定化する惑星のつくりわけを説明することができない。

そこで本研究では、軌道移動による平均運動共鳴に入った惑星系の安定時間のパラメータ変化を調べるために、原始惑星を軌道移動により共鳴に入れた後ガスを散逸させ、その後の安定時間を計算した。結果、弱い軌道移動でも天体数の少ない時は 不安定化しないことが分かった。

宇宙測地学的手法による火星回転変動計測

Measurements of Martian rotational variations by space geodetic techniques

○岩田隆浩¹、原田雄司²、石原吉明³、松本晃治³、菊池冬彦³、佐々木晶³

¹⁾JAXA・宇宙研、²⁾東大・地震研、³⁾国立天文台・RISE

T. Iwata¹, Y. Harada², Y. Ishihara³, K. Matsumoto³, F. Kikuchi³, and S. Sasaki³

¹⁾ISAS/JAXA, ²⁾ERI, U. Tokyo, ³⁾RISE, NAOJ

一般に固体天体の表層環境の変化や内部構造は、その天体の回転（自転）変動に影響を及ぼし、その変動の振幅は電波航法やVLBIなどの宇宙測地学的手法により観測可能である。特に火星は、地球と類似の構成要素を有しながらも過去から現在に至る進化やダイナミクスの様相は大いに異なっており、その相違を表層環境・内部構造から解き明かすことは比較惑星学的に重要である。

火星の回転変動には、主に太陽潮汐等のトルクに起因する歳差・章動と、主に大気・極冠結合系の短期変動に起因する極運動・自転速度変動があり、これらを計測することにより内部・表層サブシステムに制約を与えることが可能である。まず歳差に関しては、回転計測から決める歳差定数と重力から推定される力学的扁平率から主慣性能率が与えられ、これと核半径等の情報から密度の深度方向の分布を推定することが可能である。一方で、天体力学的摂動と歳差との共鳴による自転傾斜角の変動は、火星の気候変動を解く鍵となる。次いで章動に関しては、液体の核と固体のマントルにおける角運動量の相互作用の存在を探ることで、流体核の有無に関する傍証が与えられる。さらに極運動・自転速度変動に関しては、火星の気象を特徴づけている二酸化炭素・水などの物質の循環や、ダストの力学的挙動を求める指標となる。例えば、極冠や大気圧の変化は慣性テンソルの摂動を励起し、またダストストームの強弱は大気・マントル間の角運動量の交換への影響として表れる。

これらの回転変動を精測する手法として、例えば欧州では火星ランダー、火星オービターと地上との3経路の電波航法（測距・距離変化率計測）が提案されており（ex. Dehant *et al.*, 2009, *Planet. Space Sci.*, **57**, 1050-1067）、その計測精度も推定されている（ex. Yseboodt *et al.*, 2003, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2003JE002045）が、ミッションとして採択されてはいない。これに対して我々は、日本の火星複合探査（MELOS）における複数ランダーとオービターによる構成を想定して、かぐやの月裏側の重力場探査（ex. Namiki *et al.*, 2009, *Science*, **323**, 900-905）で実績のある、4-way ドプラ計測による方式を提案している。また将来において、消費電力の低減などの技術課題を克服することを前提に、逆 VLBI 法（Kawano *et al.*, 1999, *J. Geod. Soc. Japan.*, **45**, 181-203）による一層の精度向上も検討している。

火星の地質作用における メタンと二酸化炭素ガスの役割

○小松吾郎^{1,2}, 石丸亮², 並木則行², 松井孝典²

¹ International Research School of Planetary Sciences, Università d'Annunzio, Italy

² 惑星探査研究センター, 千葉工業大学

火星の地質作用におけるメタンや二酸化炭素などのガスの役割は現在までほとんど議論されてこなかった。近年報告が続く火星大気中のメタンの存在[例えは、1, 2]はこの状況に一石を投ずる可能性がある。本報告では現在の火星に限らず過去にもさかのぼってこれらのガスが地質作用の中ではたしてきたと思われる役割を議論する[3]。これらのガスの源は不明であるが、いずれにせよ火星の地殻中を時間とともに上昇し、一部は地中に存在するさまざまなトラップ（構造性、堆積性、地下の氷、ガスハイドレートなど）に留め置かれると考えられる。これらのガスは最終的には大気中にゆっくり染み出したり、噴出口から放出される。ガスハイドレートは火星ではその存在が直接確認されたわけではないが、理論的には地殻内や極冠などに存在する可能性がありガスの貯留層としての重要な役割をはたしている可能性がある。火星のガスハイドレートはメタンと二酸化炭素の両者を同時に含むシステムとして存在しているであろう。地球ではガス（特にメタン）と結びつきが強い地形、例えば泥火山などが数多く分布している。火星でもこのような地形が見つかればメタン（もしくは二酸化炭素）が惑星の地質作用に寄与した可能性があると言えるかもしれない。例としてクリュセ平原には地球の泥火山に似た地形が数多く分布している。しかしながら、ここでは現在活動している証拠は見つかっていないので最近報告されている火星大気中のメタンの存在との関係は希薄であるといえる。それでも、過去に起こったガス噴出の痕跡である可能性がありさらなる詳しい調査が望まれる。

- [1] Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N., Giuranna, M., 2004. Detection of methane in the atmosphere of Mars. *Science*, 306, 1758–1761.
- [2] Mumma, M.J., Villanueva, G.L., Novak, R.E., Hewagama, T., Bonev, B.P., Disanti, M.A., Mandell, A.M., Smith, M.D., 2009. Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. *Science*, 323, 1041–1045.
- [3] Komatsu, G., Ori, G.G., Cardinale, M., Dohm, J.M., Baker, V.R., Vaz, D.A., Ishimaru, R., Namiki, N., Matsui, T., 2010. Roles of methane and carbon dioxide in geological processes on Mars. *Planetary and Space Science*, 10.1016/j.pss.2010.07.002, in press.

カプセルリエントリー=人工隕石落下の地上観測 - カプセルリエントリーに伴う衝撃波観測と将来への展望 -

○石原吉明¹・山本真行²・平松良浩³・古本宗充⁴・藤田和央⁵・阿部新助⁶

¹国立天文台・²高知工科大・³金沢大・⁴名古屋大・⁵宇宙航空研究開発機構・⁶台湾國立中央大

2003年5月9日に打ち上げられた「はやぶさ」は7年の旅を終え、2010年6月13日に地球に帰還し、オーストラリアのウーメラ立ち入り制限地域（WPA）上空でリエントリーし、カプセルを地上に送り届け、本体は火球となって散った。

我々は、JAXA がカプセル回収オペレーションの一環として編成した地上観測部隊の一員として現地に赴き、カプセル落下地点推定の補助、および、「はやぶさ」のリエントリーを隕石落下レベルの大火球のアナログと見立てた理学観測を実施するため、WPA 内部および周辺に複数の観測点を設置し、待ち受け観測を行った。

隕石の落下や、大火球出現時には、流星物質の超音速飛行によって励起された衝撃波によると考えられる「ドーン」という衝撃音を聞いたという証言が多数報告されることがある。近年では日本全国に張り巡らされた地震観測網によって、衝撃波が固体地球とカップリングした結果と思われるシグナルが検出されており、到達時刻を用いた落下経路決定や、地動振幅を用いた流星物質のサイズおよびアブレーション過程の研究が行われている。しかしながら、地動の振幅をもとにした議論では、カップリング過程などの仮定が大きく、推定結果の信頼性には問題があった。

地上観測部隊の観測項目には、リエントリーカプセルの落下経路を追跡する為の光学観測や、流星発光の素過程に迫る為の分光観測などの多角的な光学観測とともに、リエントリーに伴う衝撃波を検出するためにインフラサウンド・地震計測が含まれている。カプセルの素材、サイズや重量は厳密に分かっており、また、落下経路については、同時に光学観測によって精密に決定される。衝撃波をインフラサウンドセンサーで大気圧変動として、地震計で地動として計測することで、これまで仮定していたカップリングの問題や、推定に用いていた衝撃過剰圧と流星物質サイズとの関係式（ReVelle, 1976）の妥当性について、観測データをもとに検証可能となることが期待される。

本発表では、光学観測を含む地上観測全体の概要と、速報として得られたデータを紹介し、特にインフラサウンド・地震計測に関して初期解析結果を報告する。また、「はやぶさ」に続く将来のサンプルリターンミッションでのリエントリー観測実施に向けた提言をおこないたい。

「はやぶさ」回収カプセル受入れと キュレーション作業

○藤村彰夫¹, 安部正真¹, 中村智樹², 野口高明³, 岡崎隆司⁴,
矢田達¹, 石橋之宏¹, 白井慶¹, 上野宗孝¹, 向井利典¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²東北大学, ³茨城大学, ⁴九州大学

'Hayabusa' re-entry capsule was safely carried into the clean room of Sagamihara Planetary Sample Curation Facility in JAXA. After executing CT scanning, removal of heat shield, and surface cleaning of sample container, the sample container was enclosed into the clean chamber. After opening the sample container and residual gas sampling in the clean chamber, optical observation, sample recovery, sample separation for initial analysis will be carried. This curation work will be continued with some selected member of Hayabusa Asteroidal Sample Preliminary Examination Team (HASPET) for several months. We report the 'Hayabusa' capsule recovery operation and current status of curation work for 'Hayabusa' sample.

小惑星イトカワを探査した探査機「はやぶさ」が、2010年6月13日深夜に地球大気に突入し、地球帰還カプセルがオーストラリアのウーメラで14日に無事回収された。回収されたカプセルは、ヘリコプターにより、回収隊本部のある建物に一旦運び込まれ、カプセル内の火工品やバッテリーを除去する安全化処理を15日に実施、カプセルに付着した汚染物の除去と専用の輸送箱への梱包作業を16日に実施し、17日午後に本部に最も近いウーメラ空港より直行便にて羽田に空輸された。18日未明に相模原キャンパスの惑星物質試料受入れ設備（キュレーション設備）のクリーンルームに到着した後も、24時間連続作業で、開梱、外観チェック、内部のCT撮像、アブレータ取外し、サンプラコンテナ清掃、チャンバー搬入準備が行われ、20日午後にキュレーション設備内のクリーンチャンバーに搬入された。

搬入後は、サンプラコンテナの内圧推定作業を実施してから、チャンバー真空状態にてコンテナ開封を実施した。開封時にはチャンバーに取り付けられたガス採取タンクを用いてコンテナ内部のガス採取を行った。開封されたコンテナは、真空環境下で保管され、内部の光学観察が実施された。コンテナ内部のサンプラキャッチャは高純度窒素環境下のクリーチャンバーに搬送後、バイトン製のグローブ操作にて、静電制御型のマイクロマニピュレータと光学顕微カメラを利用して、キャッチャ内部のサンプルの取出し、分配、保管作業を順次実施する。これらのキュレーション作業は、サンプル1次分析チームから選抜された研究者とともに数か月程度実施され、その後1次分析が行われる予定である。本講演では、カプセル回収から、キュレーション設備搬入後のキュレーション作業についての現状を報告する。

小惑星探査ミッション「はやぶさ2」の現状

○吉川 真¹、はやぶさ2準備チーム

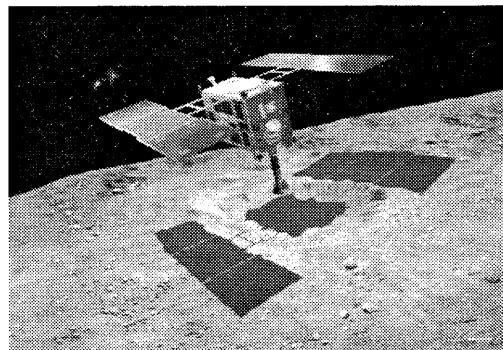
¹宇宙航空研究開発機構

小惑星探査機「はやぶさ」は、世界で初めて小惑星からのサンプルリターンを試みたミッションであり、2010年6月、多くのトラブルを乗り越えて再突入カプセルを地球に戻すことに成功した。「はやぶさ」は、太陽系往復探査の技術実証のための探査機であったが、その経験を生かしてより確実な技術に仕上げ、そしてより進んだ探査を行うために、「はやぶさ」の後継ミッションが検討されてきた。後継ミッションでは、単に技術だけではなく、科学も重要な目的としている。これまで、「はやぶさ2」と「はやぶさ Mk2」と呼ばれるミッションの検討が行われた。「はやぶさ2」は、「はやぶさ」とほぼ同じ規模の探査機でC型小惑星からのサンプルリターンを試みるものであり、「はやぶさ Mk2」は、「はやぶさ2」の次の世代の探査としてより大型の探査機によりD型小惑星ないし枯渇彗星核などからのサンプルを持ち帰るものである。ここでは、「はやぶさ2」の概要について紹介する。

「はやぶさ2」は、2005年11月に「はやぶさ」が予定されたとおりには小惑星イトカワから表面物質を採取できなかったことを受けて、2006年から検討が開始された。イトカワがS型小惑星であるので、科学的な見地から次はC型小惑星を探査しそれからのサンプルリターンを試みたいということで、ターゲットの天体は、1999 JU3というC型小惑星に決められた。通常、C型小惑星は、小惑星帯の中央からより遠方に多く存在しているのであるが、1999 JU3は例外的に地球軌道の近くにありサンプルリターンがしやすい天体であり、「はやぶさ」規模の探査機でサンプルリターンが可能な唯一のC型小惑星である。

当初は、「はやぶさ」の探査をほぼ踏襲する形で早期の実現を目指しており、2011年前後の打ち上げを検討していた。しかし、早期打ち上げは予算の関係で不可能となつたため、現在では2014-15年の打ち上げを目指して検討作業が進められている。現在の検討では新たな試みとして、“衝突装置”を搭載していくことで、直径数m程度の人工的なクレーターを作ることも検討されている。このことで、表層下の物質の採取も試みるのである（図参照）。

「はやぶさ2」によって、日本の太陽系探査技術を更に進展させるとともに、有機物や含水鉱物に富んだC型小惑星サンプルリターンによって、太陽系誕生時の鉱物・有機物・水の解明に迫ることを目指している。



図：小型の衝突装置により人工的なクレーターを作り（左）、そのクレーター内ないし周辺から地下物質の採取を試みる（右）

はやぶさ 2: リターンサンプルのサイエンス

○橋 省吾¹, はやぶさ 2 サンプリングチーム

¹東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

最近の地球外物質研究の進展により、始原物質形成の段階まで遡ると、地球や海、生命の原材料物質である鉱物、氷、有機物が相互に化学反応を起こし、物理的に作用しあい、構造をつくっていることがわかってきてている。例えば、水との反応できる鉱物の酸素同位体に見つかる初期太陽系の始源氷の証拠、隕石中に見られる含水鉱物と有機物の存在分布の相関、氷を中に含んでいたと想像される有機物膜の発見、水が反応に関わったと考えられる隕石中のアミノ酸の存在などである。このように太陽系始原物質において鉱物、氷、有機物が物理的に化学的に相互に関係しあって存在しており（鉱物-氷-有機物相互作用），この相互作用が地球や海、生命の誕生につながる第一歩であると考えられる。しかし、この相互作用を担う氷や有機物は地上で発見される隕石では汚染を受けやすく、また、氷や揮発性有機物は天体上での移動しやすい成分であり、天体内で不均質に存在している可能性もあるため、始原物質の鉱物-氷-有機物相互作用は、始原天体サンプルリターンミッションでその場観察とともに採取した試料を地上の高精度分析で詳細に調べて明らかにする必要がある。

「はやぶさ 2」リターンサンプルを用いて明らかにする「鉱物-氷-有機物相互作用」および実際におこなう分析は以下のとおりである：

1. 鉱物-氷・有機物相互作用
 - ・マトリクス物質化学組成分析による小惑星物質の始源度の推定
 - ・プレソーラーグレイン種類・存在度、鉱物年代測定
2. 有機物-鉱物相互作用
 - ・有機物・鉱物分布状態、希ガス分析・担体同定
3. 有機物-氷相互作用
 - ・アミノ酸（カルボン酸、糖）のキラリティー・分子・同位体組成
4. 氷-鉱物相互作用
 - ・小惑星氷、炭酸塩の水包有物中の酸素、水素同位体組成推定
 - ・始源物質の水質変成作用
5. 氷-鉱物-有機物相互作用
 - ・氷・有機物・鉱物の酸素同位体組成

はやぶさ2：衝突・その場観測のサイエンス

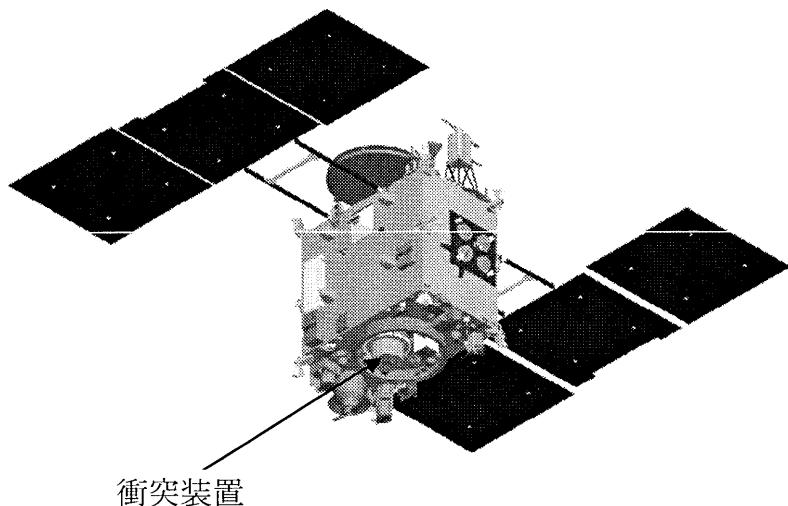
○高木 靖彦¹、中村 良介²、北里 宏平³、岡田 達明⁴、矢野 創⁴、津田 雄一⁴、
佐伯 孝尚⁴、岡本 千里⁴、吉川 真⁴、はやぶさ2プリプロジェクトチーム⁴

¹愛知東邦大学、²産業技術総合研究所、³会津大学、⁴宇宙航空研究開発機構

6月13日に地球へ帰還した「はやぶさ」の後継機「はやぶさ2」は、始原的な天体への探査を順番に進めていくという小天体探査のロードマップにそって、C型小惑星(162173)1999JU3を目標天体として計画が進められている。「はやぶさ2」の最大の科学目標は「はやぶさ」と同様、表面サンプルの採集することであるが、合わせて、搭載科学観測機器によるその場観測も計画されている。また、昨年夏にミッションスコープの拡張が行われ、衝突機により人工クレータを作つて地下物質を露出させ、太陽風等の影響をあまり受けていない地下物質を搭載機器で観測すると共に、そこからサンプリングを行うことが計画に加わった。ここでは、衝突機と搭載科学観測機器の科学目標を紹介する。

小型衝突機（衝突装置）は、母船下部に取付けられて小惑星近傍まで運ばれた後に切離されて、約2kgの金属衝突体を2000m/sec程度の速度で小惑星表面へ衝突される装置である。この衝突により、直径2m程度のクレータの形成が予測されるので、その内部の観測、そこからのサンプリングが検討されている。また、その衝突の振動により起こされる表面変化の観測の可能性についても検討されている。

搭載科学観測機器としては、「はやぶさ」と同様に航法機器としても使われる可視カメラ、LIDARの他に、近赤外分光器と中間赤外カメラがノミナル機器として計画されている。近赤外分光器は、3.4μmまでの分光を行い、水氷、含水鉱物の探索および分布の観測を行うことを目的とする。一方、中間赤外カメラは、10μm近辺の波長で撮影を行い、表面温度と熱慣性を調べ、表面状態を明らかにすることを目的とする。



「分化型」小惑星の探査～プログラム探査としての小天体探査シリーズ～

岡田達明（ISAS/JAXA）、次期小天体探査 WG

次期小天体探査検討 WG では、「はやぶさ」(S(IV)型小惑星イトカワを探査)、提案中の後継機「はやぶさ2」(C型小惑星 1999JU3 を目標)に続く探査計画を長期的に検討している。今のロードマップの主流は、地球の海や生命の起源物質となった可能性のある揮発性成分(氷、有機物)が豊富な C 型や D 型などの「始原的」天体に向かい、氷や有機物の存在状態や相互作用の様子を直接探査することである。しかし科学目標は時代とともに変わり得る。探査技術の発展や諸外国による探査計画の動向も無視できない。探査計画はそれ自身が創造的大きな科学的新展開をもたらすべきで、立案には柔軟な発想を要する。一度決めた方針に固執せず、定期的にロードマップ自体を見直す覚悟も重要である。本報告では、「分化型」の小天体の探査を行うことの意義やメリットを述べる。

ここでいう「分化型」とは何らかの熱進化過程を経た天体のことを意図する。小惑星の反射スペクトル型でいえば S 型のうちのあるもの、V 型(ベスタと似た反射スペクトル型)、A 型(カンラン石に似た型)、M 型(隕鉄などに似た型)、E 型(エンスタタイト・エンドライトに似た型)などがある。ベスタなど大型の小惑星はそれ自身が表面に分化過程の痕跡を残す可能性があり、熔岩(ユークライト)、巨大クレータ内部にマントルやコアまで露出する可能性もあり魅力的だが、2011 年に周回探査する予定の DAWN による観測成果が待たれる状況にある。

「分化型」天体の主な探査目的は、(1) 地球や内惑星系を作った物質を知ること、さらには原始太陽系の内側領域での温度分布、酸化還元状態などを知る手掛かりを直接得ること、(2) 物質分化の過程、内部構造の境界などの痕跡を直接観ること、である。「分化型」天体は C 型や D 型と違って地球近傍小惑星(NEO)に多く存在する。ランデブーによるその場観測とサンプルリターンという「はやぶさ」の技術延長で基本的に実現が可能であり、「日本のお家芸」とするに最も適したミッション形態といえる。技術的には、低燃費の電気推進・光学航法誘導・試料採取・地球帰還が直接的に活かされる。特に軌道が太陽に近いほど太陽電池による発電に有利であり、電気推進がより有効になる。また、最近は 10 数年以上の長寿衛星も多いことから、一回のランデブーおよびサンプルリターンに加えて、推薦が尽きるまで延長ミッションで複数の NEO を訪問するマルチ・ランデブー／フライバイを計画段階で視野に入れることも現実的である。

「分化型」天体のリモート観測には、フライバイやランデブーで高解像度および全球撮像用のカメラ(マルチバンド)、鉱物同定や表面物性探査用の可視・近赤外・中間赤外分光撮像、さらにやや高度を下げ重力場探査(LIDAR、電波計測)と元素分化過程の検出用に X 線蛍光までは必須観測項目である。さらに降下探査・着陸探査を加え、レーダ地下探査、高解像度の撮像、質量分析、ガンマ線分光も期待される。「はやぶさ2」で検討している衝突装置等による深さ数 10cm 以上の掘削による探査も重要である。表層および掘削地域のサンプル回収により、複数地点からグラム以上の採取を目指したい。

10km/s を超える衝突速度でのクレーター形成実験

○荒川政彦¹, 門野敏彦², 土肥弘嗣¹, 高沢晋⁴, 中村昭子⁴, 弘中陽一郎², 渡利威士², 境家達弘³, 佐野孝好², 重森啓介²,

1名古屋大学大学院環境学研究科, 2大阪大学レーザーエネルギー学研究センター,

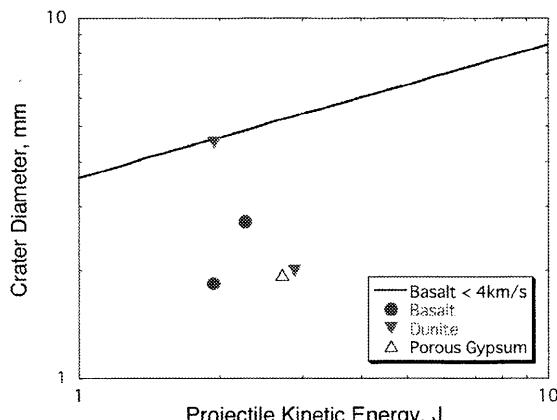
3大阪大学大学院理学研究科, 4神戸大学大学院理学研究科

はじめに：月、惑星上での衝突現象を研究するには、>10km/s の高速度の飛翔体衝突を実験室内で再現する必要がある。地球を始めとして月、火星等のクレーターには高速度衝突により地殻が溶融し、その後再固結したような地質構造が普遍的に見られる。これは岩石が溶融すると言われる>10km/s で小惑星が衝突した結果であると言われるが、その形成過程の研究は理論的な計算でのみで、これまで実験的に検討されたことはない。そこで我々は激光 XII のレーザー照射による飛翔体加速実験を行い、>10km/s での飛翔体衝突を実現するための技術開発を行っている。その結果、100 μm～200 μm のアルミ球を >10km/s に加速する手法を確立しつつある。この発表では玄武岩、カンラン岩、石膏上のクレーター形成実験の結果を紹介する。

実験方法：クレーター形成実験では、サイズ 15mm の立方体試料をバスケット形の破片回収治具に固定して実験を行った。アルミ球の弾丸はレーザー照射による加速時に分裂するので、その分裂の影響を最小限に留めるために試料前面から 5mm 以内に設置した。アルミ球のサイズは 100 μm と 250 μm の 2 種類を用い、それぞれの衝突速度は X 線ストリーカカメラでアルミ球の飛翔を撮影し、そのトラックを解析して求めた。100 μm 球では 50km/s 程度、250 μm 球では 15km/s 程度の速度が出るとこれまでのキャリブレーション実験からは予測されており、今回の実験もだいたいそのような衝突速度を実現することができた。試料の種類は、玄武洞産の玄武岩、幌満産のカンラン岩、それに空隙率 50% の二水石膏である。衝突実験後は試料を回収して形成したクレーターの形状や構造の変化を観察した。

実験結果：玄武岩試料に対してサイズ 250 μm のアルミ球を速度 14km/s で衝突させる実験を 2 回行った。実験の結果、2 種類のクレーター形状が確認された。1 つは開口型の通常のクレータ

ーで、もう 1 つは表面の衝突破片が飛び出さずに付着したままの遷移型クレーターである。カンラン岩試料に対しては 100 μm と 250 μm の 2 サイズのアルミ球を 46km/s と 16km/s で衝突させた。形成されたクレーターはすべて開口型であり、玄武岩時のように遷移型クレーターは観察されなかった。クレーターの大きさは 45km/s の衝突では 4mm を超える（弾丸径の 40 倍以上）クレーターが形成された。クレーターの深さ/直徑比は比較的小さく (0.12)、これは 4km/s 以下で岩石上に形成されるクレーターと類似している。ただ、その形態は大きくことなり、4km/s 以下の実験で観察されているクレーター中央のピットやその周囲のスパール領域は観察されない。さらにカンラン岩試料では、立方体試料の衝突面の背面にスパール破壊の痕跡が見られた。玄武岩に対して得られている既存のスケール則と今回の結果を下図に示す。このように玄武岩ではクレーター直徑が既存のデータを外挿した値よりかなり小さくなる。深さに関しても同様である。一方、カンラン岩の場合弾丸の運動エネルギーが大きく異なる場合でも、その衝突速度が速くなると倍以上大きなクレーターが生じている。



クレーターサイズと弾丸運動エネルギーの関係

はやぶさ2搭載用中間赤外カメラ

岡田達明¹、中村良介²、関口朋彦³、長谷川直¹、北里宏平⁴、小川佳子⁴、福原哲哉⁵、田口真⁶、

今村剛¹、上野宗孝¹、和田武彦¹、Joern Helbert⁷、はやぶさ2中間赤外カメラチーム

1:ISAS/JAXA、2:産総研、3:北海道教育大、4:会津大、5:北海道大、6:立教大、7:DLR(独)

「はやぶさ2」のリモート観測機器の一つとして中間赤外カメラの搭載が検討されている。本機器は小天体の表層の熱放射を中間赤外線帯（10μm付近）で2次元撮像する機器である。小惑星表層の各地点での熱放射量は小天体の自転にともない時間変化するため、地域・時間毎の変化的プロファイルを得ることにより、表層の温度環境や熱慣性の情報を遠隔的に得られる。「はやぶさ2」はC型小惑星1999JU3を探査対象とする。C型小惑星は炭素質隕石と関係が深いとされる。炭素質隕石は脆く、大気突入時にほとんど崩壊し、生存した部分だけが岩塊として得られるだけであり、小天体上での平均的な空隙率は全く未知である。小惑星253 Mathildeは平均密度が低く（約1300g/m³）、フリーズドライ様に氷が抜けて高空隙率になった可能性もある。水質変成の進展も場所によって異なり、地域によって密度が斑な可能性もある。小規模天体では低重力のため粒子サイズも未知である。これらは表層熱物性として顕著に表れるため、可視カメラによる高解像度撮像に加えて熱撮像が有効である。また、表層の物理状態や温度環境を降下運用を実施する以前に情報が得られることは、運用面でも貴重である。C型小惑星は低アルベドのため表面温度が高温になると考えられ、小惑星表面からの熱放射量の大きい低高度での滞在可能な時間を事前に知り、運用シーケンスに組み込むことができる。

中間赤外域の放射率の波長依存性は、鉱物種や粒度などに強く依存しており、隕石種ごとの区別も可能である。「はやぶさ2」中間赤外カメラでは8~13μm（可能なら7~14μm）で8バンド以上の波長フィルタを用いた多色撮像により、物質の識別を試みる予定である。特に炭素質隕石では9μ前後に3波長取ることによってCF（=Christensen Feature）の中心波長を決定することができ、物質の分類に効果的である。

機器の暫定仕様は、320X240画素、視野角12°、角度分解能1mradとしている。ホームポジション（高度約10km）で全球を視野に入れ、かつ天体サイズ（直径約1km）の1%程度となる10m解像度を達成できること、降下運用（高度約1km）では1m解像度を達成し、衝突装置による人工掘削クレータの内部の観測も可能であること、相対温度分解精度は0.5K（放射率精度0.005）が実現することが前提である。本原稿を執筆する時点では2種類の機器候補があり、今後の検討によって確定する。1つは7~15μmでほぼ一定の検出効率をもつMELCO製の非冷却SOIダイオード検出器を用い、8点以上のフィルタを用いた多色中間赤外カメラである。重量も3.5kg、電力10数Wである。フィルタホイール等の駆動部の機械環境や寿命テストは今後実施する必要がある。他方は、8~12μmの単色で熱放射撮像のみを行う機器で、NEC製の非冷却マイクロボロメータを用いる。重量や電力はほぼ同じである。機能的には制限されるものの、金星気象探査機「あかつき」に搭載された中間赤外カメラの転用のため開発実績があり、実現性は高い。

「はやぶさ 2」小型ランダの現状

岡田達明¹、矢野創¹、津田雄一¹、久保田孝¹、照井冬人¹、吉川真¹、平田成²、出村裕英²、

Tra-Mi Ho³、Lars Witte³、Tim van Zoest³、Tilman Spohn³、Jean-Pierre Bibring⁴

1: JAXA、2:会津大、3:DLR(独)、4:IAS(仏)

「はやぶさ」では米国 JPL による小型ランダ SSV による表層物質の探査が検討されたが実施しなかったが、「はやぶさ 2」ではドイツ宇宙機関の DLR を中心とする小型ランダ MASCOT による表面科学探査を検討している。C 型小惑星 1999JU3 の表層の地形、微細な構造・組織・組成、表層の硬度や熱物性などの調査を目的とし、リモート観測では得られない解像度、サンプル分析では得られない分布形態を知り、C 型小惑星の素性を知ることに貢献する。小型ランダの特徴と現状について、科学目標とともに報告する。

「はやぶさ 2」では、10kg 級のランダを DLR が中心となり、JAXA やフランス宇宙機構 CNES と協力のもとで開発を進めている。搭載観測機器は最大 3kg である。うち 1kg は多色の広角カメラ WAC や可視・近赤外のマクロ分光カメラ OicrOmega を搭載する方針である。その他は今後決定されるが、レーザ照射質量分析計 ILMA、X 線蛍光回折分析装置 XRFD、地下探査レーダ NewConcert（母船との 2 点観測）、レーザ誘導破壊分光 LIBS、アルファ X 線分光 APXS、小型の質量分析計 EVITA なども提案されている。ミッション全体としての科学目標への貢献度、機器開発のフィージビリティ、リソース等を考慮して最終的に決定する。常備装置として温度計、加速度計、傾斜計、電位計があり、表層温度や熱慣性、撥ね返り係数、重力場方向、帯電性など物性情報が得られる。寿命は 1 次電源で決まり、最低 16 時間程度（2 小惑星日）であるが、太陽電池と 2 次電源を搭載して長寿命化するオプションも検討している。

小型ランダの目的は、表層における高解像度・微視的かつ高精度の地形や物質の観察や分析である。表面にいて直接接触するランダゆえに可能となる表層物理状態の探査や内部構造探査も重要である。母船や他のランダ・ローバとの連携によるネットワーク探査も可能な範囲で検討したい。母船からの衝突装置による人工地震探査は内部構造決定に重要である。掘削孔の構造や地下物質（宇宙風化を受けていない試料、地下の氷や有機物など）の探査は C 型小惑星の水と有機物の関連性を調べる探査として極めて重要である。しかし小型ランダ自身の長期間の寿命や孔への誘導制御という技術課題があり、実現性は低いのが現状である。

小型ランダの主要観測課題は次のように整理できる。表面での科学観測（Stand-alone surface science）：地形や物質の高解像度撮像や微視的スケールでの観測、物質の組成や組織のその場分析、内部構造の探査を行う。地質学的産状把握（Geological context）：帰還サンプルやサンプル回収地域付近の産状について情報を収集する。指標情報（Groundtruth）：リモート観測データを解析するために必要な表層の物理状態、典型的な粒径、物質の元素・鉱物組成、物性についての情報を取り得する。

高空隙率焼結体への弾丸貫入実験

Penetration Experiments on High-Porosity Sintered Targets

○岡本 尚也¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直²

¹神戸大学, ²宇宙科学研究所

Takaya Okamoto¹, Akiko Nakamura¹, Sunao Hasegawa²

¹The University of Kobe, ²ISAS/JAXA

微惑星や彗星など、始原的天体は高い空隙率を持つと考えられている。そのような天体に密度の異なる小天体や塵が衝突したときの潜り込み過程や破壊・圧密過程は、衝突速度とともに、天体の空隙率、強度、ミクロな構造によると考えられる。キロメートル毎秒の高速度衝突領域では、弾丸の潜り込みの深さや衝突孔の形状等は、ガラスビーズ焼結体、エアロジエル、発泡スチロール等を用いた研究がある (Kadono and Fujiwara 2005; Michikami et al. 2007) が、標的強度が重要となる低速度領域では、高い空隙率をもった標的に対する実験はほとんど行われていない。他方、衝突速度が 1m/s 以下の超低速度領域では、ダスト集合体に対する実験が行われ、弾丸の潜り込み深さと衝突条件の関係が調べられている (Guttler et al. 2009)。

今回、我々は、高空隙率のターゲットを得るために、試料にソーダ石灰硼珪酸ガラスを組成とする中空ガラスビーズを使う。この中空ガラスビーズの焼結条件を変えることで、強度の異なる高空隙率なターゲットを用意した。このターゲットに対して、神戸大学にある小型ガス銃を用いて低速域で衝突実験を行い、また宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃を用いて高速衝突実験を行う。本研究では、ターゲット強度や衝突速度と、弾丸の潜り込み深さとの関係について評価することを試みた。

It is considered that primordial bodies in the solar system, such as planetesimals and comets, have high porosity. When small bodies or dusts impact those primordial bodies, the process of penetration, destruction or compaction should be controlled by the porosity, the strength, and the structure of target bodies. We prepare high porosity targets, and conduct impact experiment at low and high velocity. We examine the relation between the penetration depth and target strength as well as impact velocity.

小型ソーラーセイル実証機搭載 PVDF 式大面積ダストモニタに対する固体微粒子衝突の校正・評価

○岡本千里¹、矢野創¹、田中真²、長谷川直¹、田端誠¹、岩井岳夫³、奥平恭子⁴、尾川順子¹、平井隆之⁵

¹宇宙航空研究開発機構、²東海大学、³東京大学、⁴会津大学、⁵総合研究大学院大学

1mmに満たないメテオロイドは、現在も地球に年間2-6万トン降り積む宇宙物質の大半を占め、恒星や惑星系の進化と地球上の私達を直接繋ぐ物質である。また近年、原始星や主系列星の周囲にも多くのダスト円盤が発見され、太陽系のエッジワース・カイパベルト天体の軌道附近に対応する「冷たい」ダスト円盤だけでなく、内惑星附近に対応する「温かい」ダスト円盤も系外黄道光として観測されるようになってきた。このことは、「系外彗星」や「系外小惑星」の存在を示唆している。我々の「太陽系」における惑星と宇宙塵の存在分布の関係を理解することは、「比較惑星系学」における惑星系とダスト円盤やその母天体について理解する上でも重要である。宇宙塵は現在も、小惑星と彗星などから定的に供給されていると考えられ、それら各々の起源に対応する微細構造であるダストバンド(小惑星起源)やダストトレイル(彗星起源)なども発見されているが、黄道光観測の場合、太陽位相角の小さな領域、すなわち日心距離1AU未満の空間における実測は地球近傍からは困難である。また惑星探査の歴史においても、1AU未満の黄道面でダスト実測を行ったのは30年以上前のHelios 1,2のみである。よって、日心距離によるメテオロイドの数密度変化や、太陽に近づくに連れて存在率が上昇すると予想される彗星ダストトレイルの確認、星間塵の1AU以内への流入の可能性などは、これまで有効なデータ数が足りずに実証が難しかった。

そこで我々は、JAXA/JSPECによる小型ソーラーセイル実証機「IKAROS」のように、ミッション期間の大部分を深宇宙空間のクルージングに費やす探査機による宇宙塵分布の連続計測から、微粒子衝突頻度の日心距離依存性の解明することを目指し、PVDF(ポリフッ化ビニルデン)を使った軽量・薄型・大面積のダスト計測器(以下、ALADDIN)の開発を行った。IKAROS探査機は2010年5月21日に打ち上げられ、ALADDINの初期運用は一ヶ月後に開始された。機器の健全性を確認後、現在はダスト衝突の連続計測状態にある。運用と前後して、IKAROS搭載ALADDINのフライトスペアを用いた、超高速衝突条件下での地上校正実験を行った。

ALADDINはALDN-S(センサ)およびALDN-E(エレキ部)からなり、ALDN-Sは、IKAROSのソーラーセイル膜上に搭載された、厚み9ミクロンおよび20ミクロンのポリフッ化ビニルデン(PVDF)を8チャンネル分搭載している。PVDFセンサが受けた信号は、計測回路であるALDN-Eに送られ、電気信号の計測が行われる。ALDN-Eでは、1ミクロン以上の宇宙塵の高速衝突により発生する微小電荷をその内部のアンプで増幅、電圧値への変換を行い、宇宙塵の衝突時刻、信号ピーク値、信号の減衰時間などを記録する役割を持つ。このPVDFセンサへの深宇宙でのダスト衝突を模擬するために、JAXAに設置された2段式軽ガス銃を用いて、100ミクロンおよび330ミクロンのガラスビーズの厚み9ミクロンおよび20ミクロンのPVDFセンサへの高速衝突実験を行った(衝突速度:4-7km/s)。PVDFセンサのサイズは、搭載されたセンサと同一サイズとし、20ミクロンで500mm×250mm、9ミクロンで100mm×80mmとした。さらにダスト衝突による膜面の揺れを調べるために高速度カメラを2台用いて衝突の様子のその場観察を行った。衝突実験後、ALDN-Sの20ミクロン厚および9ミクロン厚のPVDF上に残されたダストの衝突痕の観察やALDN-Eが検出するダストの衝突信号持続時間、衝突信号ピーク値、PVDFセンサ内でのダスト衝突位置により、検出データが依存するかどうかなどを調べた。今後、本実験結果などを用いて宇宙での実測データの解析を進め、1AU未満でのメテオロイド分布の日心距離依存性の解明を目指す。

H₂-H₂O 雰囲気中での Mg-Si-O-H 系凝縮実験に 向けた真空実験装置の開発

○片岡香織¹, 橋省吾¹, 瀧川晶¹, 永原裕子¹

¹東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

初期太陽系円盤での固体物質の凝縮過程は、始原隕石の化学的多様性をつくり、さらには惑星の化学組成にも影響を及ぼすと考えられる。円盤の物理・化学条件は時間変化するため、凝縮過程は必ずしも平衡条件で起こらず、固体物質の形成過程は反応速度論を用いて理解する必要がある。しかし、初期太陽系での固体物質凝縮過程について反応速度論的な理解は十分になされていない。特に、初期太陽系において酸素のキャリアとなり、酸化物と珪酸塩の凝縮に大きく影響すると考えられるH₂O存在下での珪酸塩凝縮実験はこれまでに行われていない。本研究では、初期太陽系円盤に近いH₂, H₂O分圧下（それぞれ1Pa, 1×10⁻³Pa程度）での珪酸塩凝縮実験を行うために、1) ガス導入・分析のための既存の赤外線集光加熱真空炉の改良、2) 真空装置内でのH₂O雰囲気作成法の開発、を行った。

1) 実験装置の改良および評価 赤外線集光加熱真空炉に水素ガス導入ラインを新たに設置し、また、系のガス組成分析を可能にするために、四重極型質量分析計（QMS）を用いたガス分析ラインを作成した。

水素中でのフォルステライト蒸発実験：改良した実験系の評価のためにH₂ガス中でのフォルステライトの蒸発実験を行った。水素圧0.5Paとなるように炉内に水素を導入し、イリジウムるつぼに入れた粉末フォルステライトを、赤外線集光炉で10–16時間加熱した。赤外線ランプ電流17Aの条件で 2.03×10⁻⁴ g/h の蒸発速度が得られた。水素を導入しない真空条件での蒸発速度および過去のフォルステライトの蒸発実験と比較した結果、上記の蒸発条件が1540°C, 0.5Paに対応することがわかり、炉内への水素導入が問題なくおこなわれ、水素がフォルステライトと充分に反応していることが確認できた。また、炉内ガスが水素であることもQMSにより確認した。一連の改良により、水素雰囲気下でフォルステライトからMg-Si-O系のガスを蒸発させることが可能となった。今後は、発生させたガスを基板上に凝縮させる予定である。

2) 真空装置内でのH₂O雰囲気作成法の開発 真空装置内に外部から水蒸気を導入するには、恒温槽中の水と平衡に存在する水蒸気をキャリアガスを用いて流すなどの方法があるが、ガスラインでの結露やガスラインへの吸着による真空系への負荷などの問題があるため、真空炉内の低温部でCa(OH)₂を加熱し、Ca(OH)₂の脱水反応で真空装置内にH₂O雰囲気をつくることを試みた。

Ca(OH)₂脱水実験：Ca(OH)₂はフォルステライトの蒸発温度より十分低い400K程度で~10⁻² Paの平衡水蒸気圧をもち、また、脱水残渣のCaOは難揮発性酸化物であるため、H₂O蒸気の供給源として最適と考えられる。Ca(OH)₂粉末をアルミナるつぼ（内径4mm, 高さ9mm）に詰め、赤外線ランプの集光部から離れた位置に設置し、間接的輻射によって、一定時間加熱した。Ca(OH)₂の加熱温度はランプ電流値、アルミナるつぼとランプ集光部間の距離を変えることで調節した。脱水によって発生するガスがH₂OであることをQMSで確認し、また、実験条件によつては、脱水によって炉内圧力が10⁻³Pa程度に上昇し（通常10⁻⁵-10⁻⁴Pa）、試料が完全に脱水するまで、その圧力が24時間程度維持されることがわかった。これらの実験により10⁻³Pa程度のH₂O圧存在下で今後凝縮実験を行うことが可能となった。

高出力レーザーによる飛翔体の加速と衝突実験： 可視高速カメラおよびX線カメラによる 衝突光の撮影

○門野敏彦¹, 境家達弘², 弘中陽一郎¹, 渡利威士¹, 佐野孝好¹, 荒川政彦³, 高沢晋⁴, 桂武邦⁴, 中村昭子⁴, 大野宗祐⁵, 黒澤耕介⁶, 羽村大雅⁶, 杉田精司⁶, 重森啓介¹

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ²大阪大学理学部,

³名古屋大学環境学研究科, ⁴神戸大学理学部,

⁵千葉工業大学惑星探査研究センター, ⁶東京大学新領域創成科学研究所

惑星形成末期, 地球への隕石衝突は秒速10kmをはるかに超える速度で起こる。しかしそのような速度での室内実験は従来の二段式軽ガス銃では難しかった。そこで高出力レーザーを用いて飛翔体を秒速10km以上に加速する技術の開発を行っている。本発表では大阪大学レーザー研の激光 XII 号を使って平板および弾丸飛翔体を加速し、ストリーカカメラによって得られたそれらの速度についてこれまでの結果をまとめて報告する。これまでに、タンタル平板、アルミ、ガラス、金、ダイヤモンドの粒子を加速している。さらに、弾丸衝突によって発生する岩石蒸気をその場観測するために可視高速カメラおよびX線ピンホールカメラを使った予備的な撮像計測を行った。特に可視カメラについては、使用しているレーザーの波長が近赤外にあるため慎重に測定を行わなければならず、これまで可視光で衝突現象を撮像計測はあまり行われていない。今回はこれらの結果についても紹介する。

はやぶさ2搭載用近赤外分光計の開発

○ 北里宏平¹, 安部正真², 高木靖彦³, 松永恒雄⁴, 大竹真紀子², 高遠徳尚⁵, 廣井孝弘⁶

¹会津大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³愛知東邦大学, ⁴国立環境研究所,
⁵国立天文台, ⁶ブラウン大学

次期小惑星サンプルリターンミッション「はやぶさ2」では、「はやぶさ」NIRSの技術成果を継承し、水の吸収バンドが存在する3 μm帯反射スペクトルの観測を可能とする近赤外分光計の開発を進めている。「はやぶさ2」の探査対象天体であるC型小惑星は、蛇紋石やサポナイトなどの含水鉱物を含む炭素質コンドライトの母天体と考えられており、炭素質コンドライトと同様に様々な形状と強度の3 μm吸収バンドを示すことが知られている。

「はやぶさ2」近赤外分光計は、小惑星表面を空間分解して分光観測することにより含水鉱物の空間的分布を特定し、C型小惑星の水質変成及び熱進化についての痕跡の情報を得ることを目的とする。また、3 μm帯の全球観測から得られる小惑星表面の物質分布の情報は、探査機でサンプルを採取する場所の選定に必須の情報であるとともに、最近月で発見された太陽風による水の生成機構や、C型小惑星上の宇宙風化作用及び衝突作用による脱水について新たな知見をもたらすものと考えられる。

本発表では、「はやぶさ2」近赤外分光計の開発検討状況及び探査対象小惑星 1999JU3で想定される観測シナリオについて示す。

月表面探査ガンマ線分光計の定量元素分析の性能

○小林進悟¹、三谷烈史¹、唐牛譲²、長谷部信行²、

SELENE-2 用ガンマ線中性子分光計検討チーム

¹宇宙科学研究所、²早稲田大学

カリウムやトリウム (K, Th) は中揮発性・難揮発性元素、液相濃集元素、放射性元素という性質を持つため、月バルク組成、月マグマオーシャンと初期進化過程、月の熱史を制約する上でそれらの月地殻・マントルに含まれる量は重要である [e.g. Gillis et al. 2004]。月面の In-Situ 探査を想定した場合、ガンマ線分光計は K と Th の放射性という特徴を利用することで、岩石やレゴリスに含まれるこれらの元素を高い感度で定量することができる。ここでは SELENE-2 ミッションを想定し、月面探査ローバに搭載したガンマ線分光計がどの程度の性能を持つか見積を行った。

K, Th の定量時の濃度精度 $\Delta\chi$ は、センサが検出した K, Th からのラインガンマ線の計数値 C に対して $\Delta\chi/\chi = C^{-0.5}$ となり、一般的に試料を観測する時間が長いほど濃度精度は良くなるので、ここでは 10%の精度で定量するのに必要な観測時間を計算した。実際には月面やローバ筐体で発生する連続ガンマ線（外部バックグラウンド）、センサ内の放射性元素が発するガンマ線（内部バックグラウンド）の影響を受けるためそれらを考慮した。計算条件は銀河宇宙線 (GCR) の強度が最大 ($\Phi=324\text{MV}$) とし、全連続ガンマ線強度は月面で発生する GCR 由来の連続ガンマ線の 2.4 倍 (=1.2(自然放射性元素分)*2(ローバ筐体発生分)) とし、比較的 K, Th の観測に不利な条件で計算しているが、月からの中性子や GCR と LaBr₃ 自体の反応で発生する即発・遅発ガンマ線によるバックグラウンドは計算にまだ考慮していない。センサは LaBr₃ シンチレータを 1200g (球形) とし、エネルギー分解能は最高性能 (2.8%@662keV) よりも悪く現実的な 4%@662keV とした。月面からの連続ガンマ線は Geant4 コード [Agostinelli et al. 2003] を用いて計算し、K, Th からのラインガンマ線強度は文献 [Reedy 1978] の値を使用した。センサに含まれる ¹³⁸La からのバックグラウンドガンマ線は K の定量を難しくするがその影響も考慮してある。

月のレゴリス内の K (= 1200 ppm), Th (= 1.9 ppm) を想定した場合には必要な観測時間はそれぞれ 124 min, 164 min となり数時間で定量できる (cf. Apollo16 regolith, Lunar Source Book; K = 934 ppm; Th = 2.0 ppm)。また Apollo 15 KREEP basalt (Th: 11.8 ppm) の組成を持つ岩石では、試料をセンサに十分に近づけた場合には 5 min で定量が可能であることがわかった (Th 濃度と観測時間が比例関係にないのはバックグラウンドの存在のため)。

気化によるエジェクタ速度への影響に関する衝突実験

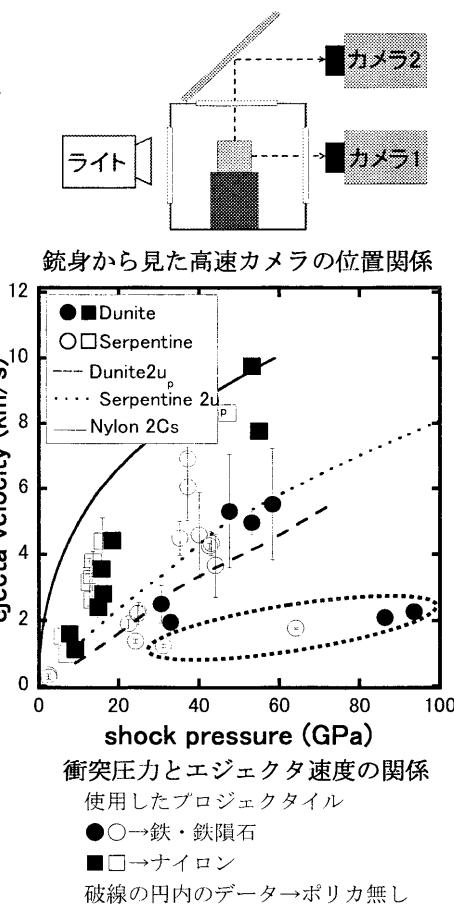
高部 彩奈^{*1} 中村 昭子^{*1} 瀬藤 真人^{*1} 桂 武邦^{*1} 長谷川 直^{*2}

^{*1}神戸大学大学院理学研究科 ^{*2}宇宙科学研究所

含水鉱物や氷を含む天体は他の天体と高速度で衝突すると脱水する。また、無水の天体であっても高速度で衝突することにより天体自身が気化することもある。理論的に固体エジェクタ速度は最大 $2u_p$ (粒子速度)であると考えられる。脱水や気化を引き起こす衝突では生じた水蒸気や気体が固体エジェクタを加速し、エジェクタ速度が $2u_p$ 以上になる可能性があるのではないかと考えた。そこで、脱水や気化によるエジェクタ加速の有無について調べることにした。

衝突実験は、宇宙科学研究所本部の二段式軽ガス銃を用いて行った。ターゲットは一辺 2.5~8.0cm の立方体の蛇紋岩とかんらん岩を用いた。含水鉱物から構成される蛇紋岩と無水鉱物から構成されるかんらん岩のエジェクタ速度を比較し、脱水によるエジェクタ加速の有無を調べた。プロジェクタイルは二種類用いた。一つ目は、直径 7mm、高さ 7mm の円柱のポリカーボネイトの先端に直径 4mm、高さ 1mm または直径 2.5mm、高さ 2.5mm の円柱型の鉄または鉄隕石を付けた物を使用した。二つ目は直径 7mm のナイロン球を用いた。今実験の条件ではナイロンやポリカーボネイトは部分気化または完全気化している(Kadono et al 1996)。鉄は気化しないので、異なるプロジェクタイルのエジェクタ速度を比較することにより気化の影響を調べる。エジェクタ速度を求めるために、高速度カメラで衝突現象を撮影した。カメラは右図のように二台用いた。高速度カメラの条件はカメラ 1 はコマ間隔 4、8 μs、露光時間 2 μs。カメラ 2 はコマ間隔 4 μs、露光時間 0.5、1 μs である。右グラフは衝突圧力とエジェクタ速度の関係を表している。かんらん岩と蛇紋岩のエジェクタ速度を比較したが、大きな差は見られず脱水による影響は確認されなかった。ナイロンプロジェクタイルを用いたエジェクタ速度が明らかに $2u_p$ よりも大きくなっている。またエジェクタ速度はナイロンの膨脹速度より小さいことからエジェクタがナイロンの気化により加速されたと考えられる(高部他、2009 年秋季講演会)。

今回新たにポリカーボネイトのついていない直径 3.2mm、高さ 2mm の円柱型の鉄隕石をプロジェクタイルとして用いた実験を行った(グラフの破線の円で囲んでいるデータ)。このエジェクタ速度はポリカーボネイトをつけている鉄や鉄隕石のエジェクタ速度よりも小さい。このことから、ポリカーボネイトによる影響を受けてエジェクタ速度が加速されていることがわかった。



次期月探査計画SELENE-2の検討状況

Current status of the Lunar Landing Mission : SELENE-2

○田中 智¹, 飯島祐一¹, 三谷 烈史¹, 大嶽 久志¹, 小川 和律¹, 小林 直樹¹, 橋本樹明¹,
星野健¹, 大槻正嗣¹, 木村 淳², 倉本 圭²

○Satoshi Tanaka¹, Yuichi Iijima¹, Takefumi Mitani¹, Hisashi Otake¹, Kazunori Ogawa¹,
Naoki Kobayashi¹, Tatsuaki Hashimoto¹, Takeshi Hoshino¹, Masatsugu Otsuki¹, Jun Kimura²,
Kiyoshi Kuramoto²

1、宇宙科学研究所, 2、惑星科学研究センター/北海道大学

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

月周回探査機「かぐや」ミッションに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」ミッションの検討が進められている。探査機の基本構成は、着陸機、ローバー、そして周回衛星からなる。2010年代半ばの打ち上げを目指しており、現在フェーズA段階(プリプロジェクト)である。

これまでにミッション成立にむけた基幹技術に関する検討、科学搭載機器の開発を鋭意進めてきた。その結果、各システムの構成、予想性能、そして重量諸言などが具体的になってきた。科学搭載機器候補についても技術レベルが明確になってきており、一部の搭載機器では大幅な変更、や本ミッションでの搭載の見送りという結論に至っている。

また、宇宙基本計画宇宙基本計画発足後、今後の月探査の方向性についての長期展望についても検討結果も出されSELENE-2の位置付けも明確にされた。現在ミッションを始動するために重要な通過点であるミッション要求審査(SRR)を迎えようとしている。 SRRをパスした後には、製造メーカーの選定、システム成立にむけたより詳細な技術検討を開始する。科学搭載機器の側面においては技術的なフィージビリティーと着陸地点ワーキンググループの検討結果に基づいて科学搭載機器の具体的な選考が実施される。これらのタスクを今年内に終了させ、次の審査行程であるミッション定義審査(SDR)を年度内に実施する意向である。

講演ではSRRの評価結果も含めこれら最新の状況について報告する。

月・惑星データ協働解析システム(WISE-CAPS)と 月面地名検索システムの現状報告

○寺薗 淳也¹、中村 良介²、山本 直孝²、児玉 信介²、
出村 裕英¹、平田 成¹、小川 佳子¹、サハシュ バーラ¹

¹会津大学、²産業総合技術研究所

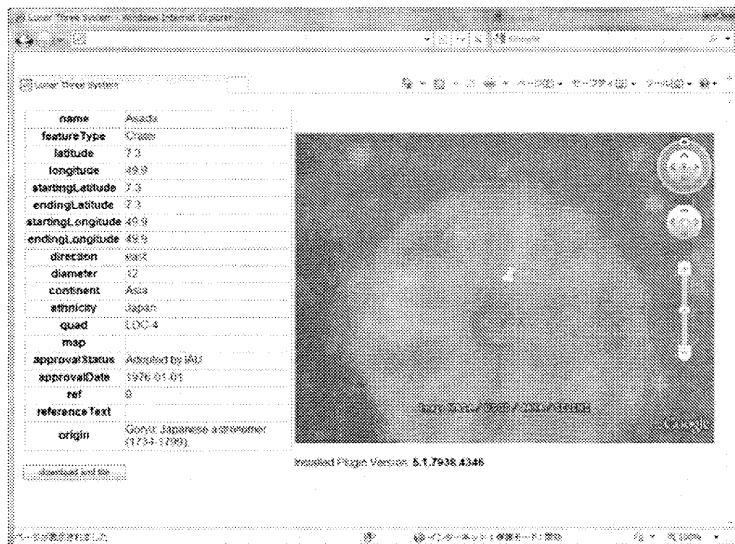
現在我々は、月・惑星データを Web-GIS システムを通して閲覧できるだけではなく、それを基盤として共同で解析や議論ができる環境として、会津大学内に WISE-CAPS (Web-based Interactive Secure Environment for Collaborative Analysis of Planetary Science) と名付けた GIS サーバの構築を進めている。

昨年の概要発表に続き、本年は本サーバについての現状、及び将来的な方向性について講演する予定である。

また、会津大学のデータベース学講座では、2007 年より、月面の地名を検索するためのシステムを構築している。本システムは、IAU により承認された月面地名を、USGS(アメリカ地質調査所)の Astrogeology Node で配布しているデータをもとにデータベース化し、ユーザ(特に科学者)がより使いやすいシステムを目指して開発を進めている。2008 年度の秋期講演会にて発表を行ったシステムをさらに改良し、2009 年度には 3 つのコンセプトに基づく 3 つのことなるシステムを作成し、実装を実施した。今回の発表では、このシステムの概要についても講演する予定である。

これらのシステムは、月・惑星探査の解析・研究・議論などの過程において、現在生じている不便な点などを取り除き、研究者が研究に最大限の力を払えることを念頭に開発を続けている。WISE-CAPS 自身はオープンシステムをコンセプトとしており、月面地名検索システム

も外部システムとの連携(現在は Google Earth)が可能になっている。本発表では、これらの最新の開発状況、及び将来的な構想などについて述べる。



月面地名検索システムの結果表示の一例。検索結果において Asada クレーターを表示させたところ。左側にはクレーター概要が、右側には Google Earth から取得した画像(「かぐや」データのレイヤー)と位置が表示されている。

高強度レーザーを使った衝撃圧縮回収実験と惑星科学への応用

○永木恵太, 境家達弘, 近藤忠, 門野敏彦⁽¹⁾, 弘中陽一郎⁽¹⁾, 重森啓介⁽¹⁾

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻,

⁽¹⁾大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

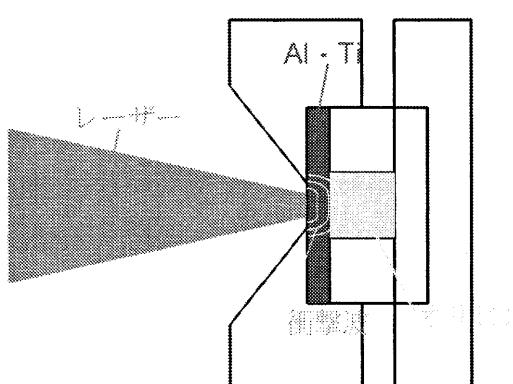
衝撃圧縮によって変成をうけた試料を回収して分析することは、隕石中に見られる高压鉱物の成因などの変成メカニズムを理解する上でとても重要である。これまで、ガス銃などを用いた衝突実験からの試料回収が行われているが、実際、隕石の衝突によって生ずる圧力(最大 300-500GPa@30km/s)には及んでいない。

我々はより高压の状態を作り出す方法としてレーザーによる衝撃圧縮に着目している。これまで行ったレーザー衝撃圧縮の回収実験は比較的低圧の約 100GPa までしか行われていないので、数百 GPa 領域での試料回収を行い、圧力・温度・持続時間の変化による変成の状態を調べることを目的として実験を行った。

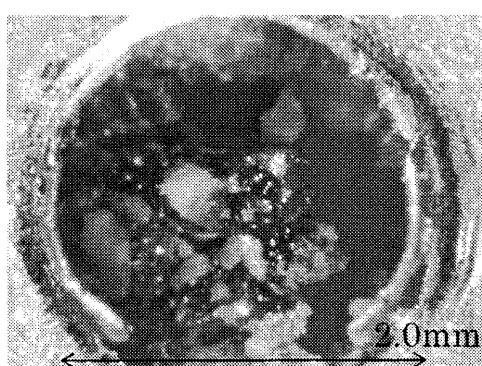
出発試料には、静的・動的圧縮のデータが豊富で隕石中の主要鉱物でもあるオリビン(サン・カルロス産)を用い、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの GXII/HIPPER レーザーを用いて実験を行った。回収したオリビンの変成・構造の観察また相の決定は光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡(SEM)・顕微ラマン分光などを使って行った。

過去の実験ではオリビンに対して直接レーザーを照射して高压を発生していたが、約 100GPa の比較的低圧の時を除いて、レーザー照射部分が吹き飛んでしまう。そこで試料が吹き飛ばないようにオリビン表面に金属板を配置し、この金属板に直接レーザーを照射した。この時金属板を介してオリビン中に衝撃波が伝播するので、オリビンが高压になるよう金属板の材料・厚みを調整して回収実験(圧力は約 120-300GPa)を行った。講演では詳しい解析結果について報告する。

・回収方法概略図(断面)



・Al を金属板として使用した回収後の試料をレーザー照射側から見た写真



レゴリス層への弾丸貫入実験

Laboratory Experiments on Impact Penetration in Asteroid Regolith

○中村昭子¹, 濑藤真人¹

¹神戸大学大学院理学研究科

小惑星表面は一般にレゴリスやボルダーに覆われている。レゴリスやボルダーは、もともと、小惑星の衝突クレーターからの放出物が再集積して堆積したものだと考えられている。再集積時の表面への衝突速度は、脱出速度で制約されるので、メインベルトの直径数100kmもの天体の場合でも、~100m/s以下となる。衝突速度や表面の状態によって、跳ね返り、貫入やクレーター形成、表面での破壊がそれぞれおこり、これらの過程により、レゴリスの攪拌やサイズ分布の変化などが進行すると考えられる。

我々は、再集積時の衝突による弾丸の貫入に着目し、弾丸がレゴリスによって減速される過程を理解するために実験を行った。弾丸速度70m/sでレゴリス層を模擬した粒径の異なるガラスビーズ層への弾丸貫入実験を行い、ガラスビーズ層の厚さを変えて、弾丸がレゴリス内を進む距離に応じてどのように減速されるか高速度カメラを使って調べた。その結果、弾丸は、弾丸速度の2乗に比例する流体抵抗や、ガラスビーズ層の静的なせん断強度だけでは説明できない速度の1乗に比例する抵抗をも受けて減速することがわかった。

衛星アトラスのクレーターと地表更新プロセス

Identification of an impact crater on Atlas:
Implications to its resurfacing process

○平田直之 宮本英昭 東京大学総合研究博物館

アトラス (Atlas)は1980年にVoyager が土星系を訪れた際に発見された、土星系の衛星である [1]. 2004年以降 Cassini は何回かの接近でこの衛星が円盤型をしていることを発見し(図1), 2007年6月12日の接近時の画像が現在得られている最も解像度の高い画像となっている(図2a).



図1：アトラスとAリング (PIA08233を改変)

アトラスはA環のすぐ外を公転する羊飼い衛星である。不規則な形状をしており3軸径が $42 \times 36 \times 18\text{km}$ の赤道部分が幅広く極域が膨らんだ「空とぶ円盤(flying-saucer)」のような形状をしている[2]。グローバルな特徴として、アトラスは明瞭な2分性を持ち、赤道域と極域とで見た目が大きく異なる。赤道域は非常になめらかな表面を持ち、クレーターはおろかそれ以外の構造や起伏もほとんど見えない。その一方で極域はクレーターが確認できないが、丘のようなものが多く起伏に富んでいる。この異様ななめらかさを維持するために何らかのメカニズムが存在すると考えられる。

本研究では、画像の詳細な解析を通して、明瞭なリムをもつクレーターを発見した(図2b). このクレーターは多くの示唆に富み、ここからアトラス表面での地表の更新作用の理解に大きな制約を与えることができた。解像度が低いが、リムはきれいな円形をしていて、大きさは 1km 程度である。これはアトラス表面にクレーターが形成され、それが一定の期間存続することを意味している。アトラスは密度が低くラブルパイルと考えられているが[2]、「衝突が起きてもエネルギーを吸収してしまい、明瞭なクレーターができる」という状態ではないといえる。またアトラス表面で氷の微粒子が塑性流体として振る舞っている可能性が指摘さ

れている[2][3]が、このクレーターを緩和できるとするとアトラスの粘性は異様に低くなってしまう。これはアトラスの全球規模にわたる重力的な不均衡が存在していること[2]と矛盾してしまう。

解析の結果、Dust levitation(電気的な粒子の浮遊)が地表の更新に重要な役割を果たしている可能性が高く、また現在のアトラスの性質を概ね説明できることができた。Dust levitationは光電効果によって帯電した粒子がクーロン力で浮遊する現象である。土星系は太陽から離れているが、アトラス軌道周辺でも月や小惑星と遙かのない Dust levitation が起きる条件にあることが分かった。アトラスは他の既知のいかなる天体とも異なる地表更新プロセスをもつ天体かもしれない。

(参考文献)

- [1]B.A.Smith et al., 1981, Science, vol:212, p163-
- [2]C.C.Porco et al., 2007, Science, vol:318, p1622-
- [3]K.D.Supulver et al., 2002, Icarus, vol:113, p:118-
- [4]E.C.Whipple, 1981, Rep. Prog. Phys. 44, p:1197-

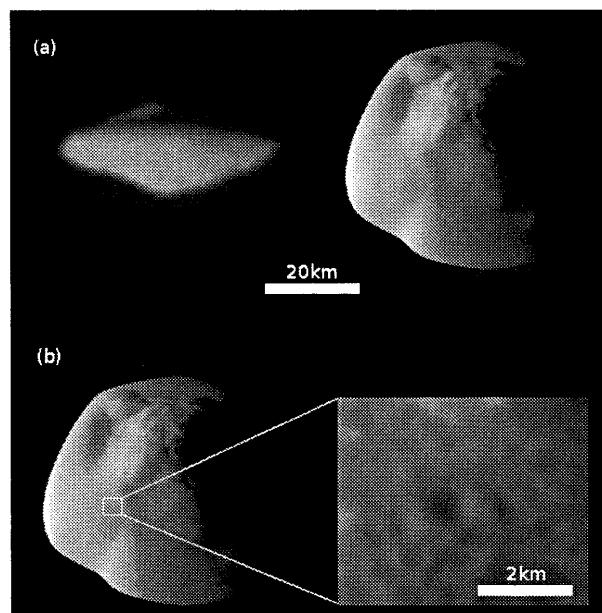


図2：(a)Cassini がとらえた最も解像度の高い2つの画像
(b)特定の部分を拡大しコントラストを強調している。
(PIA08405を改変)

ラブルパイル構造を持つ天体の衝突破壊の特徴

○藤田幸浩¹ 荒川政彦¹ 嶽生有理¹ 長谷川直²

¹名大・環境 ²JAXA/ISAS

はじめに

太陽系における衝突破壊・再集積プロセスでは複数の衝突破片が相互の重力によって集まり、その結果、岩塊が集積したような構造を持つ。このような天体をラブルパイル天体と呼ぶが、その主な特徴は構成する岩塊同士に結合力がほとんどないこと、また岩塊の間には大きな隙間が存在することである。ラブルパイル天体の衝突破壊は均質天体の破壊と大きく異なると考えられるが、この様な天体を模擬した衝突実験はこれまでほとんど行われたことがない。ラブルパイル天体の構造的特徴は、構成する要素のサイズ、個数、配置で記述される。さらに衝突を考慮すると弾丸サイズとその要素サイズの比が重要なパラメータとなる。本研究ではラブルパイル天体の構造的特徴が最も際立つと思われる弾丸と構成要素のサイズがほぼ同じ場合の衝突実験を実施した。衝突後の破壊の特徴を表すものとして、破片のサイズ分布と破片速度、また破壊の程度を表す量として総小破片質量を計測した。

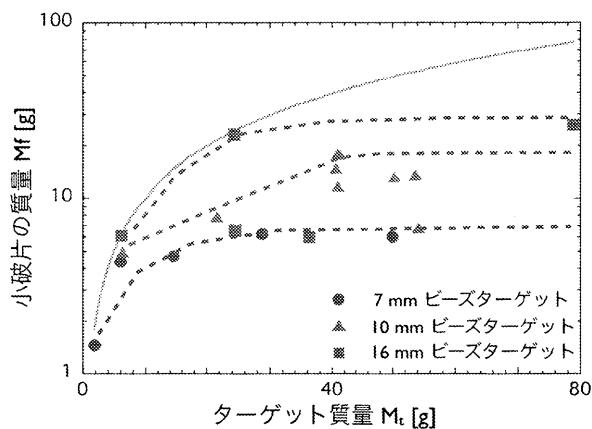
実験方法

ラブルパイルターゲットはサイズの等しいガラスピーツを構成要素として作成した。ターゲットに用いたビーズのサイズは7、10、16mmで、各サイズにおいて3~100のビーズを用いて4または5種類のターゲットを作成した。ビーズ同士は木工用ボンドで接着し、ビーズの組み方は面心立方格子とした。この場合の空隙率は約26%となる。ほとんどのビーズはカラーリングされているか数字が書かれており、破壊後の個々のビーズの同定や破壊前の初期位置の再構築に利用された。ターゲット質量(M_t)は18~78gである。衝突実験には名古屋大学と宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用し、ナイロンの弾丸(64mm 154mg)を衝突速度2~7km/sで変化させてターゲットに衝突させた。破壊の様子を高速度ビデオカメラで撮影し、映像を解析することで衝突破壊の様子や破片の速度を解析した。高速度ビデオカメラの撮影条件として、撮影速度を10000~125000fps、シ

ヤッタースピードは1~10μs、撮影光源系としてメタルハライドランプをバックライトで用いた。また、破壊後に回収した破片を分類し、それらのサイズ分布を調べた。

実験結果と議論

ラブルパイルターゲットは複数個のビーズから構成されており、ほとんどの実験ではビーズ同士の結合は切れてバラバラになった。この様な場合、一般に利用されている最大破片を破壊の程度を表すパラメーターとして用いると破壊の実態を表さないことになる。そこで破壊の程度を表す量として、最大破片の代わりに総小破片質量(M_f)を定義した。 M_f は各ビーズの質量から回収された各ビーズの最大破片質量を引いたものを要素の数だけ足し合わせたものである。この M_f を用いてラブルパイル試料の破壊の程度を調べたのが下図である。各ビーズサイズにおいてターゲット質量が小さい場合その増加とともに M_f が増加することがわかる。ターゲット質量が大きくなるとほぼ一定の値に落ち着くよう見えるが、その時の一定値はビーズサイズが小さくなると同時に小さくなるように見える。このようにラブルパイルターゲットの要素サイズが小さくなると、その破壊は抑制されることが分かった。



* 実線：ガラス球での小破片質量とターゲット質量の関係
Okamoto and Arakawa, 2008 から計算

圧子圧入試験による氷・岩石混合物の局所的変形強度の計測

○保井みなみ¹, 荒川政彦²

¹日本原子力研究開発機構, ²名古屋大学大学院環境学研究科

はじめに：氷・岩石混合物の流動則は氷衛星の熱進化過程やテクトニクスを知る上で非常に重要である。我々はこれまで岩石含有率を変化させてこの流動則を詳細に調べてきた。しかし、室内実験の結果を氷衛星のテクトニクス等に応用するには、実験で得られた経験式を氷衛星の物理環境下へ外挿する必要があり、そのためには混合氷の変形メカニズムを明らかにする必要がある。純氷の場合、物理環境（応力や温度）に対する変形メカニズムの変化は今まで詳細に調べられている（Shoji & Higashi, 1978）。一方で氷・岩石混合物の場合は、岩石含有率等によってその内部構造は大きく変化する。そのため同じ応力や温度下でも、構造が異なれば試料強度は大きく変化し、そのことは試料内部で変形を支配する領域が異なることを示している。そのため混合氷の変形メカニズムを明らかにするには、まず各岩石含有率において変形を支配する領域明らかにしなければならない。この変形支配領域を明らかにするためには、試料内の局所的な変形強度を調べる必要がある。そこで本研究では、ミクロスケールの変形強度を調べるのに有効な手法である圧子圧入試験法を用いて、氷・岩石混合物の局所的変形強度とその内部構造の関係を調べた。

実験手法：今回は岩石粒子として直径 1μm のシリカビーズを用いた。また、内部構造依存性を調べるために今回はシリカ含有率のみを変化させ、0wt.%（純氷）と 30wt.% の 2 種類の試料を準備した。実験は小型冷凍庫内で行い、温度は約 -25°C とした。実験で用いる圧子は、直径 5mm の球形のものを用いた。

結果：最初に、圧子圧入試験法が氷・岩石混合物の局所的変形強度を調べる手法として適切かどうかの評価を行った。そのため本実験で得られた試料の局所的な圧縮変形強度とバルク物質の圧縮変形強度を比較した。その結果、本実験で得られた変形強度の方が約 2 倍大きくなることが分かった。そこで、圧縮変形には主にせん断応力が支配的であることを考慮し、Nadai の八面体せん断応力を用いて本実験の結果と先行研究の結果を比較し直した。その結果、両実験結果はよく一致するようになった。そこでこの圧子圧入試験法は変形強度の測定に適切な手法であると考えた。混合試料を用いて局所的な変形強度を調べた結果、圧入する場所によって同一試料内でも強度が異なることが分かった。これは圧入位置での氷とシリカの質量比が強度に影響を及ぼしている可能性を示唆している。Yasui and Arakawa (2008) と比較した結果、試料内部において純氷の強度領域とシリカ含有率 80wt.% の強度領域が混在していることがわかった。

固体天体用地中レーダー(GPR)システムの検討と開発

○渡邊宏弥¹, 春山純一², 西堀俊幸², 真鍋武嗣³, 宮本英昭¹

¹東京大学, ²JAXA, ³大阪府立大学

固体天体の表層地下数十メートルは例えば月面で発見された溶岩チューブ状地形などに大きく関わる構造が存在する領域であり、我々はこの深度の地下探査は表層環境の進化過程の理解に大きく貢献すると考えている。また地球外天体では地震波探査を行うにしても測器の設置に大きな困難がある。このため我々は固体天体の表層地下を非接触でかつ詳細に探査するには地中レーダー(GPR)が最適であると考えている。本研究では今まで天体探査に用いられたものよりも高い分解能をめざし、高い周波数の電波を用いている。一般に地中ではレーダーの電磁波の伝播損失は周波数が高いほど大きくなる。しかし、地球外天体では損失の大きな原因となる水が基本的に存在しないために実用になるとえたからである。しかしGPRの検討開発を重ねてゆく中で、幾つかの問題が出ることがわかった。私は新たな考え方で対策を試み、それを克服できるとの確信を得た。我々は小惑星を含む複数の探査計画において地中レーダーによる表層地下探査を提言しており、その実現に向けて検討を重ねている。更には具体的に次期小惑星探査機への搭載を目標として検討・試作を行っている。

はやぶさ地球帰還カプセルの分光観測

○ 阿部新助¹, 藤田和央², 柿並義宏¹, 飯山青海³, 鈴木雅晴⁴

¹台灣國立中央大学 ²宇宙航空研究開発機構 ³大阪市立科学館 ⁴五藤光学研究所

はやぶさ地球帰還カプセルは、地球周回軌道に入らずに、惑星間軌道から直接大気圏へ再突入を行った。これは天然の流星の対地速度(秒速 12km~72km)と比較した場合、小惑星起源の隕石のような、非常に遅い流星(隕石火球)に匹敵する。過去にこのような超高速度での大気圏再突入を行ったリエントリーに「ジェネシス」(NASA, 2004 年 9 月)と「スターダスト」(NASA, 2006 年 1 月)がある。地球帰還カプセルは、流星や隕石と同じく高度 100km 以下の大気圏内において、衝突励起によりプラズマ発光する。流星・隕石物質は、元々の化学組成、形や大きさなど不明であるという不確定要素が多数あり、発光素過程についても完全に解明されていない。また、天然の流星や隕石衝突は、いつどこに発生するか予測できないため、このような精密な観測が行える機会はほとんど無い。はやぶさの地球帰還カプセルを、既知の物質、予測された地球衝突天体に見立てることで、流星や隕石、小惑星の地球(大気)衝突の貴重な機会として様々な科学的観測が実施された(インフラサウンド観測は、石原吉明 et al.を参照のこと)。我々は、分光観測をメインに行ったが、今回は、探査機本体もカプセルに引き続き地球大気に飛び込むため、探査機本体とカプセルの双方の分光を狙った。

2010 年 6 月 13 日、オーストラリア南部の砂漠地帯、タコーラとクーパーペディーの二ヵ所からの観測を実施した。分光装置には、近紫外線超高感度 HDTV 分光器(300-600nm)、および可視デジタル一眼 HDTV 分光器(400-900nm)を用い、撮像・分光装置群を、はやぶさの動きに合わせて追尾観測を行った。はやぶさは、同日 13:51:44 UT (23:21:44 LST)に、予定通り高度 100km に達し地球大気にリエントリーした。本発表では、観測された時間変化スペクトルと同定物質、および連続光成分の温度分析などについて報告する。

オカエリナサイ、はやぶさ！

メインベルト彗星 P/2010 A2 (LINEAR) の ダスト雲の形状観測

○ 石黒正晃¹、花山秀和²、渡部潤一²、福島英雄²、猿楽祐樹³、臼井文彦³、鳴沢真也⁴、
坂元誠⁴、松田健太郎⁴、丹羽隆裕⁴、秋澤宏樹⁵、大坪貴文⁶、黒田大介²、柳澤顕史²
¹韓国・ソウル大、²国立天文台、³宇宙研、⁴西はりま天文台、⁵姫路星の子館、⁶東北大

P/2010 A2 は、2010 年 1 月 6 日にリンカーン地球近傍小惑星探査 (LINEAR) 計画によって発見されたメインベルト彗星である。P/2010 A2 は、太陽からの距離 2.0—2.6 天文単位を約 3.5 年の周期で公転運動しており、今までに発見されているメインベルト彗星の中で最も内側に位置する。発見当初、核やコマを持たない尾だけの天体であったが、ハッブル宇宙望遠鏡によって、数百メートルの母天体と思われる小さな天体が確認されている。

私たちの研究グループでは、発見直後の 2010 年 1 月 16 日から 4 月 9 日にかけて、西はりま天文台 2 m なゆた望遠鏡と石垣島天文台むりかぶし望遠鏡を用いてリニア彗星 P/2010 A2 の可視撮像観測を実施し、チリ雲の形状やその時間変化について調べた。いずれの観測データにも尾を確認できている。チリ雲の力学的進化を考慮したモデルから、P/2010 A2 のダスト雲は、観測の 200—350 日前に短期間に放出された粒径 1 ミリメートル以上の大きなチリで構成されていることがわかった。この結果をもとに、ダスト放出の原因について考察する。

オールト雲起源新彗星の力学進化の予備的計算

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)

Unlike asteroids whose orbital distribution we know to some extent, little is yet known about the long-periodic comets, particularly about those with aphelion distances as large as the Oort Cloud radius — their orbital distribution, incoming flux toward the planetary region, and impact probability on major planets. In this presentation we would like to show some preliminary results of our numerical integrations of test particles perturbed and transported from 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.

昨今の計算機技術の進展により様々な小惑星と惑星との衝突確率はだいぶ精度良く計算されるようになった来たが、彗星についてはその力学的実体が余り定かではないために、数値計算についても確定的な研究はまだ多くない。本発表ではオールト雲の力学に関する形成モデルを元にして、オールト雲から落下する天体(新彗星)の力学進化および惑星との遭遇確率に関する予備的な計算結果を報告する。

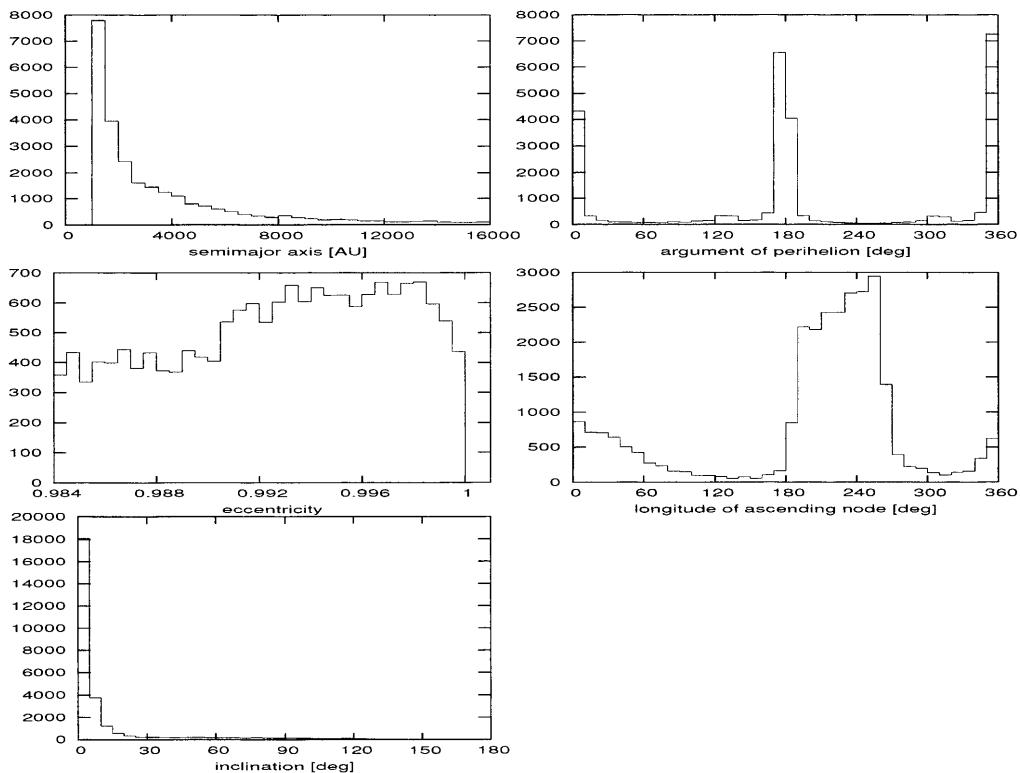


図 1: オールト雲から $r < 35$ AU に入った直後の新彗星の軌道要素分布。(左上) 軌道半長径、(左中) 離心率、(左下) 軌道傾斜角、(右上) 近日点引数、(右中) 昇交点経度。近日点引数と昇交点経度の分布が一様でないのは銀河潮汐力の影響である。

月の詳細地形(DTM)から推定された グラーべン下のマグマだまり

○上岡周平¹, 山路敦¹, 佐藤活志¹, 春山純一², 大竹真紀子², 松永恒雄³

¹京都大学大学院 理学研究科

²宇宙航空研究開発機構

³国立環境研究所 地球環境研究センター

月のような単純な系では、火成活動の量は天体の起源や進化を考えるうえで重要な制約となる。マグマの量の見積もりで、噴出しなかったものの見積もりは困難だが、マグマの大部分は貫入岩になったという理論的推定がある(Kirk and Stevenson, 1989; Head and Wilson, 1992)。貫入岩体の発見が待たれるところだが、近頃、ラコリスの伏在を推定した研究が発表された(Wöehler and Lena, 2009)。本研究では探査機「かぐや」の地形カメラから構成された数値標高モデル(DTM)を使って、グラーべンの詳細地形を検討した。その結果、かつて岩床状のマグマだまりが存在したことを推定したので、その予察的結果を紹介する。

着目したのは、ふちが隆起しているグラーべンである。表側のいくつかの海でグラーべンの詳細地形を観察した結果、こうした特徴をもつグラーべンを晴れの海と湿りの海で1つずつ見つけた。それら2つのグラーべンの幅は1km程度、深さは0.2km程度、ふちの隆起量は50m程度である。

ふちが隆起している様子は、ちょうど「肩」の隆起したリフトと同様の地形断面を示す。そこで、こうしたリフトの地形を説明するために、弾性板の撓みモデルを上記の2つのグラーべンに適用した。月の海で水平に横たわる堆積岩体の下に、岩床状のマグマだまりが存在し、グラーべンによる負の荷重がその堆積岩体に作用するとしてflexural isostasyを想定するわけである。海の領域なので、堆積岩といつても、玄武岩溶岩・イジェクタ・パレオレゴリスの互層からなると考えてよい。その場合、同岩体は弾性体として振る舞うと仮定する。さらにグラーべンが傾斜角の等しい2条の正断層によって落ち込んでいると仮定し、現在の地形からマグマだまりまでの深さ L 、断層の傾斜 α 、有効弾性厚 T_e を推定するための逆問題を構成した。

それを解いた結果は、2つのグラーべンで $L = 500 \sim 1000\text{m}$, $\alpha = 50^\circ \sim 80^\circ$ となつた。 T_e のほうは約40~100mで、マグマだまりにふたをする堆積岩体の厚さ(L)よりもずっと小さい。このことは、堆積岩体の層と層のあいだのスリップやマグマの熱による塑性流動を考えれば自然なことである。

月の海の層構造： MI データを用いた LRS 反射面の同定

○押上 祥子¹, 奥野 信也¹, 山口 靖¹, 大竹 真紀子², 春山 純一², 小野 高幸³

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

³東北大学大学院理学研究科

かぐやに搭載された月レーダサウンダー (LRS) は、月の海全体の 9% の領域で地下数百 m に横たわる反射面を検出した。Ono et al. (2009) では、海表面の岩相マップ (Hiesinger et al., 2000; 2003) 中のユニット境界と LRS 反射面との対応関係から、検出された反射面は過去の月面に蓄積し、その後噴出した溶岩に埋もれたレゴリス層であると推測している。一方、Oshigami et al. (2009) は、Hiesinger et al. (2000; 2003) が決定した岩相年代に基づいて、大部分の反射面の年代が 34~36 億年より古いことを明らかにし、レゴリスモデルを支持した。

これらの議論を裏付けるために、晴れの海に位置する Bessel クレータの内壁に注目した。このクレータ壁面のマルチバンドイメージ (MI) データから作成した FeO 含有量マップからは、明瞭な層構造が検出される。そこで、クレータ壁面に見られる組成境界との比較を通じて LRS 反射面の同定を試みた。その結果、クレータ形成時にオーバーターンが起こったと仮定した場合に推定されるクレタリム構造に基づくと、地下反射面は MI データから検出される組成境界、すなわちユニット境界に一致することが明らかとなった (図 1)。

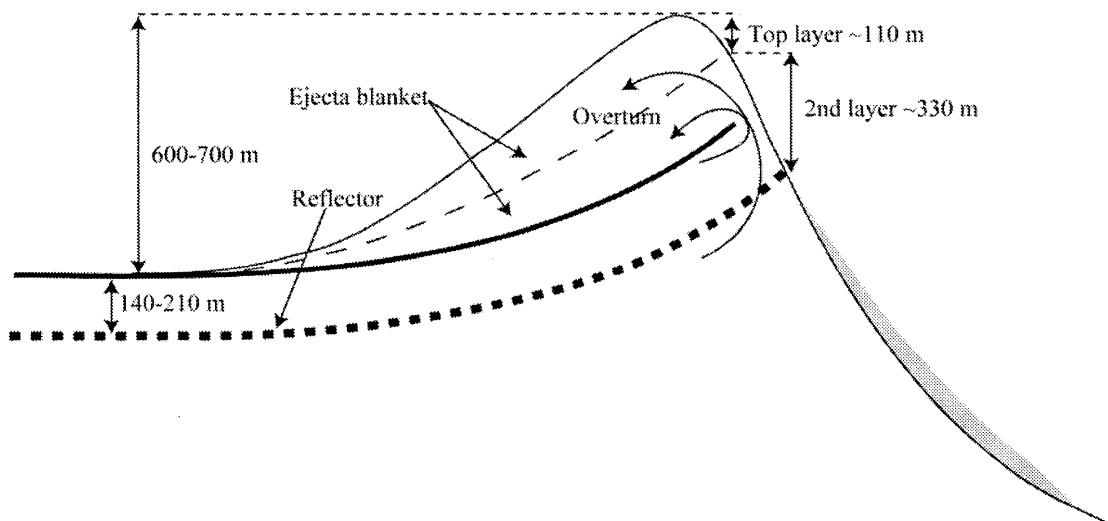


図 1. オーバーターン (Melosh, 1989) を仮定した場合に推定される Bessel クレタリムの横断面構造。LRS 反射面は MI データで検出される上から 2 層目の下面に一致する。

巨大氷衛星の内部分化における鉱物脱水作用の寄与 Dehydration of hydrous rock contributing to the internal differentiation of giant icy satellites

○木村 淳^{1*}, 倉本 圭¹

¹惑星科学研究センター/北海道大学

From gravity data acquired by the Galileo spacecraft, it has been found that Ganymede has a small value of the moment of inertia factor, which suggests a highly differentiated interior, while that Callisto, another Jovian moon with similar size to Ganymede, shows larger value of the moment of inertia implying incomplete differentiation. Although many studies have proposed hypotheses but there still remain many difficulties. Here we suggest another hypothesis to create the dichotomy between two moons and focus on the contribution of a dehydration process of pristine rock-metal-mixed core in both moons.

木星の衛星であるガニメデとカリストは似たようなサイズを持っているが、その内部に対して推定される構造には大きな違いがある。ガリレオ探査機による衛星周辺の重力場観測から見出された慣性能率によれば、ガニメデ内部は極めて明瞭な分化構造（金属核、岩石マントル、H₂O 層）を取るのに対して、カリストの分化状態は不完全と推測されている。また土星の衛星タイタンについても同様の観測がなされ、カリストと同様に不完全な分化構造を持つと考えられている。サイズが似ているにも関わらず分化状態が大きく異なることを説明するべく、様々な観点に基づく多くの研究が行われてきた。本研究では新たな視点として、含水鉱物の脱水過程がもたらす内部分化度への影響を考える。

ガニメデやカリスト、そしてタイタンは、それらの平均密度から体積の約半分を H₂O 主体の成分が占めている。このことから、木星や土星系での衛星集積段階においては岩石成分が含水鉱物化している可能性が十分に考えられる。集積完了後、金属と岩石成分の混合した初期核は岩石中の放射性核種の壊変熱によって加熱され始め、岩石の脱水温度に達するとそのレオロジー、すなわち熱輸送率が急激に変化する。ガニメデとカリストは似たサイズを持つが、岩石成分の含有量はカリストの方が約3割小さい。これはとりもなおさず放射性熱源量が異なることを意味し、この違いがもたらす脱水過程の有無によって衛星間の熱史に明瞭な分岐が生じた可能性がある。

本研究では熱史に関する数値シミュレーションを用いてこの可能性を考察し、ガニメデとカリスト、そしてタイタン間に見られる内部構造の違いを説明する。また衛星のサイズや H₂O—岩石含有比を様々に変えたパラメタスタディを行い、熱史や内部分化度に分岐が生じる一般的な条件を見出す。

海惑星の大気構造：大気中での中心星放射の吸収が射出限界に与える影響について ○黒川宏之, 中本泰史¹

¹東京工業大学

惑星が海を持つことができる上限となる惑星放射量は射出限界と呼ばれ、成層圏、対流圏それぞれによって決まる2つの射出限界が知られている(Nakajima et al. 1992)。

射出限界については Abe & Matsui (1988)や Kasting(1988)による詳細な計算を用いた研究の他に、Nakajima et al.(1992),などのシンプルなモデルを用いて射出限界のメカニズムや個々の効果を解析した研究が行われてきた。そのうちのひとつである Pujol & Fort (2002)では、放射平衡大気モデルを用いて、大気中での中心星放射の吸収が成層圏の射出限界に与える影響について調べられた。

本研究では Pujol & Fort (2002)の計算モデルを Nakajima et al. (1992)と同様の放射対流平衡大気モデルに拡張し、中心星放射吸収が射出限界に与える影響を調べた。その結果、以下のことがわかった。

1. 成層圏の射出限界の変化

中心星放射の吸収が対流圏界面より上空で起こる場合、成層圏の射出限界は大きくなる。一方で圏界面付近で起こる場合は小さくなる。

2. 対流圏の射出限界の変化

中心星放射の吸収により加熱された成層圏からの放射が、対流圏からの放射に上乗せされることにより、対流圏の射出限界は実効的に大きくなる。

3. 対流圏の射出限界の消失

中心星放射の吸収の効果により、成層圏の温度構造が変化することで、惑星放射に対して光学的に熱い成層圏が形成される場合がある。この場合、対流圏が存在したとしても惑星放射に影響しないため、対流圏の射出限界は存在しない。

破壊により決まる原始惑星の最終質量

小林浩¹, Alexander V. Krivov¹, ○田中秀和²

¹ イエナ大学天文学研究所

² 北海道大学低温科学研究所

微惑星から原始惑星へのステージにおいて、原始惑星が火星程度のサイズになると、その強い重力で周りの微惑星を振り回すため微惑星の衝突速度が非常に大きくなる。その結果、微惑星同士の衝突で微惑星は破壊され、その破片同士が繰り返し衝突する(衝突カスケード)。破片は1m程度になるとガス抵抗によって中心星に落下するため、取り除かれる。そのため、原始惑星の周りの天体の面密度を低下し、原始惑星の成長が遅くなる。天体の衝突・破壊を表現する破壊のモデルは室内実験や数値シミュレーションを基に構築されているが、衝突天体の物質依存性や構造依存性などがあるため、まだまだ不定性がある。そこで、衝突カスケードの破壊モデルの依存性を解析的に調べ、定量的にモデル依存性を示すことができた。さらにこの解析を、破壊を考慮したときの原始惑星の質量を見積もることができ、質量分布を考慮した統計的シミュレーションと一致する結果を得た。原始惑星の成長は、直接微惑星を集積することによってか、または微惑星同士の衝突・破壊によって生成された破片を集積によるか2つの過程がある。両方の場合において解析解を導出し、シミュレーションと比較した結果、以下のことが分かった。微惑星が10kmより大きい場合では、カスケードによる微惑星の消失に時間がかかるため、原始惑星は主に微惑星を直接集積する。微惑星が衝突カスケードにより消失するまでに成長できた質量が原始惑星の最終質量になる。一方、微惑星がそれより小さいときは、カスケードの時間が短いため、微惑星は速やかに破片になり、その破片を原始惑星は集積する。このときは、破片のガス抵抗による消失とその集積のバランスで原始惑星の最終質量は決まる。破壊を考慮したときの原始惑星の最終質量は林モデルにおいて火星質量と得られた。衝突カスケードにかかる時間は微惑星が大きい程長いので、微惑星が大きい程、大きな原始惑星が期待できる。惑星形成標準モデルにおいて、木星のような巨大ガス惑星形成は、惑星核が10 地球質量程度になると静的に大気を支えられなくなり、急速に大気を集めることによって起こる。破壊を入れた我々の結果では、このような質量に原始惑星が達するのは、林モデルの10倍の面密度の原始惑星円盤で、微惑星が100km以上の場合のときである。さらに、大気による衝突断面積の上昇の効果を加味すれば、100kmの微惑星の場合は林モデルの3倍でも、惑星核が形成できる可能性がある。面密度が林モデルの5倍程度まで高ければ、微惑星が1-100kmでいずれの場合でも十分な大きさの惑星核を形成できる可能性がある。

ダークマターハローによる 太陽系天体の軌道進化

○鈴木 貴之. 樋口 有理可. 井田 茂
東京工業大学 地球惑星科学専攻

本研究では太陽系近辺に存在しているダークマターハローが太陽系天体にどのような軌道変化をもたらすのかを明らかにすることを目的とし、ダークマターハローが太陽系天体に与える速度分散を調べた。宇宙に存在する質量のうち、光や電波などによって観測できない質量をダークマターといふ。最近の研究により、ダークマターは、ハローと呼ばれる球状の構造を持っており、そのハローは銀河団サイズのものから地球質量サイズのものまで存在すると考えられている。ダークマターハローは小さな構造が先に出来、それが積み重なって巨大構造が出来上がる、いわゆるボトムアップと言う方法で作られたと考えられる。本研究では、ダークマターハローが太陽系天体に対して等速直線運動で通過するモデルを考え、その際ダークマターハローの持つ質量プロファイルを考慮に入れたインパルス近似による解析的手法と数値的手法の両方を用いて考察し、恒星の通過による速度分散と比較を行った。太陽系の天体はダークマターハローや恒星などと数多く遭遇することによってランダムな摂動を受けているはずである。摂動が等方的ならば摂動による速度変化の期待値はゼロになるが、期待値からずれた値をもつ確率は時間とともに増加していく。つまり、もともとの軌道からずれる確率が時間とともに増大していく。この確率分布の広がりを表すのが速度分散である。そのため、摂動の強さは単位時間あたりに増える速度分散で評価することができる。その結果、 $10^{-6}M_{\odot} \sim 10^3 M_{\odot}$ の範囲のダークマターハローが与える速度分散が恒星通過による速度分散とオーダーで等しくなった。しかし $10^{-6}M_{\odot} \sim 1M_{\odot}$ の範囲のダークマターハローによる速度分散は恒星通過による速度分散の $1/1000$ のオーダーであり、一般にはダークマターハローによる摂動は恒星通過に比べて十分小さいと言えることが分かった。

乱流円盤内の微惑星集積

○台坂淳子、小久保英一郎

国立天文台

微惑星円盤が形成されたさい、円盤内では磁場によって引き起こされる MRI 乱流が存在していると思われる。線形解析理論によると、静かなガスの円盤の中では、月質量以上の天体は Type-I migration により、中心星に落下してしまうことがしらされている。しかし、上記の乱流円盤では微惑星集積がどのように集積するのか、Type-I migration が卓越し、結局原始惑星は中心星に落下するのか、あるいは、それを防げるのか、本格的な N 体計算は行われてはいない。原始惑星から惑星が形成される段階での少数多体計算は Ogihara et al. (2007) により行われている。我々は微惑星の段階からの集積を検証する。

ガス惑星周りの原始衛星系ガス円盤の構造

○谷川 享行^{1,3}、大槻 圭史^{2,3}、町田 正博⁴、小林 浩⁵

¹ 北大低温研、² 神戸大理、³ 惑星科学研究センター、⁴ 国立天文台、⁵ イエナ大天文

巨大ガス惑星の周りに存在する衛星系のほとんどは規則衛星、つまり惑星の赤道面付近をほぼ円軌道で回っていることから、衛星は惑星周りにかつて存在していた周惑星円盤（＝原始衛星系円盤）の中で形成したと考えられている。また、近年の数値流体シミュレーションにより、ガス惑星が原始惑星系円盤ガスの降着によって成長する時に、必然的に惑星の周りにガス円盤が形成されることが明らかになってきた。しかし、それらの研究は衛星形成に主眼を置いていたために、周惑星円盤構造に対する詳しい解析は行われていない。そこで本研究では、ガス惑星形成時に出来る周惑星円盤構造を高解像度で求め、周惑星円盤構造に着目して流れ場を詳しく解析した。

衛星形成は主に惑星半径の数十倍（惑星の軌道半径の数百分の一）以内で行われ、その領域を十分に空間的に分解するために、惑星近傍のみを効率よく高空間分解能で計算可能な多重格子法を用い、かつ惑星近傍のみを切り出した局所近似回転座標系を採用した。計算により得られた流れ場を解析した結果、周惑星円盤中の中心面付近のガスは広い領域に渡って外側へ移動しており、惑星への実質的なガス降着は、周惑星円盤を経由せず上空から一気に惑星近傍へと落下していることが明らかになった。また、原始惑星系円盤中で中心面付近にいるガスは惑星へと降着できないことも確認した。得られた流れの描像から、衛星形成環境や形成シナリオについて議論する予定である。

高軌道傾斜角メインベルト小惑星を対象とする 広域サーベイ観測

○寺居剛¹, 伊藤洋一¹

¹神戸大学

メインベルト小惑星(MBAs)は、惑星形成最終段階に原始惑星による重力散乱や永年共鳴の移動によって軌道が力学的に励起され、軌道離心率や傾斜角が大きく増大したと考えられている[1]。それに伴って小惑星間の相対速度が大きくなり、 10 km s^{-1} に達するような衝突が頻発した[2]。しかし、このような超高速度衝突の破壊強度 Q_D^* はよく分かっておらず、軌道励起期における MBAs の衝突進化は不明である。我々は高い軌道傾斜角を持つ MBAs の平均衝突速度が 10 km s^{-1} 程度であることに着目し[3]、観測によってそれらのサイズ分布を調べた。

観測は高軌道傾斜角を持つ、直径 1 km 前後の微小 MBAs を対象として行った。8.2-m すばる望遠鏡および可視広視野撮像装置 Suprime-Cam(視野 $34' \times 27'$)を使用し、高軌道傾斜角天体のサーベイに有利な高黄緯領域(黄緯+ 25°)を観測した。また、Suprime-Cam のアーカイブデータも使用した。検出した小惑星の移動速度と等級から軌道要素と直径を推定し、直径 0.7–2 km および軌道長半径 2.5–3.3 AU の天体 146 個をサイズ分布作成のサンプルとした。さらに、直径 2 km より大きなサイズ範囲には公開されている小惑星カタログのデータ(Asteroid Orbital Elements Database および SDSS Moving Objects Catalog)を使用した。

以上のデータから得られたサンプルを軌道傾斜角 15° を境に 2 つのグループに分け、それぞれの累積サイズ分布を作成した。直径 0.7–50 km の範囲をべき乗則で近似すると、低傾斜角 MBAs の指数は -2.17 ± 0.02 、高傾斜角 MBAs の指数は -2.02 ± 0.03 という結果が得られた。すなわち、高傾斜角 MBAs は傾斜の浅いサイズ分布を持つことが分かった。MBAs のサイズ分布べき指数は主に直径–衝突破壊強度 Q_D^* 曲線のべき指数によって与えられる[4]。高傾斜角 MBAs が低傾斜角 MBAs に比べてサイズ分布傾斜が浅いことは、 $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ の超高速度衝突では直径– Q_D^* 曲線の重力支配域における傾斜がより急であることを示唆している。この結果から、軌道励起期における MBAs は異なるサイズ間での衝突破壊強度差が現在よりも大きく、小さな天体ほど相対的に破壊されやすい環境で衝突進化が進行したと推測される。

参考文献

- [1] Petit, J.-M. et al. 2002, Asteroids III, 711.
- [2] Bottke, W. F. et al. 2005, Icarus, 179, 63.
- [3] Gil-Hutton, R. 2006, Icarus, 183, 93.
- [4] O'Brien, D. P. & Greenberg, R. 2003, Icarus, 164, 334.

火星大気中の Ne と Ar の濃度及び同位体比の進化

○ 野口聖彦¹, 柄澤史也¹, 橋省吾¹, 阿部豊¹, 田近英一¹

¹東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

はじめに：火星は温暖湿潤な気候から寒冷乾燥気候に変化してきたと考えられている。火星気候の変動は大気圧の変動と関連している可能性があり、気候変動の理解には二酸化炭素大気の進化を理解することも重要である。大気進化を議論する上で、希ガスは化学的に安定であるため、内部からの脱ガスによる供給と宇宙空間への散逸という物理過程だけで記述でき、大気進化推定の有用な指標となる。本研究では火星史にわたる大気中のNeとArの存在度及び同位体比の変動に注目し、大気進化がそれらの量に与える影響を検討する。

モデル：Tajika and Sasaki (1996) による火星内部からの脱ガスモデルを基に、Jakosky et al.(1994) によって検討された宇宙空間への散逸過程を組み込んだモデルを作成し、希ガスの收支に影響を与えるCO₂分圧の時間変化、火星内部からの脱ガスのピークの時期、火星磁場の消滅の時期、均質圏界面から外圏底までの拡散による同位体分別の程度をパラメータとして希ガス量とその同位体比の変動を調べた。特にCO₂分圧が、1)誕生から現在まで時間に対して線形的に減少、2)正弦関数として周期的に変化、3)現在のまま一定、の3つのケースを検討した。

結果：CO₂分圧の時間変化とともに、⁴⁰Ar濃度、³⁶Ar/³⁸Ar、²⁰Ne/²²Neが変動することが分かった。CO₂分圧を周期的に変動させる場合、同位体比の振動が確認され、特に周期10⁸年の場合に、10億年前から現在までの期間でNe同位体比のみが大きく変動する結果を得た(図1)。この結果は、火星隕石から推定される火星大気の²⁰Ne/²²Neの多様性が(²⁰Ne/²²Ne≈7~10: e.g., Pepin, 1991; Garrison and Bogard, 1998; Park and Nagao, 2006)、自転軸傾斜の周期的変動(e.g., Laskar et al. 2004)による大気圧の時間変化で説明される可能性があることを示唆する。脱ガスのピークと磁場の消滅の時期は、それぞれ⁴⁰Ar濃度、³⁶Ar/³⁸Arをわずかに変化させる程度であり、均質圏界面から外圏底までの拡散による同位体分別の程度は、脱ガスと散逸が均衡した状態で達成される³⁶Ar/³⁸Ar、²⁰Ne/²²Neの定常値を大きく変化させることも分かった。

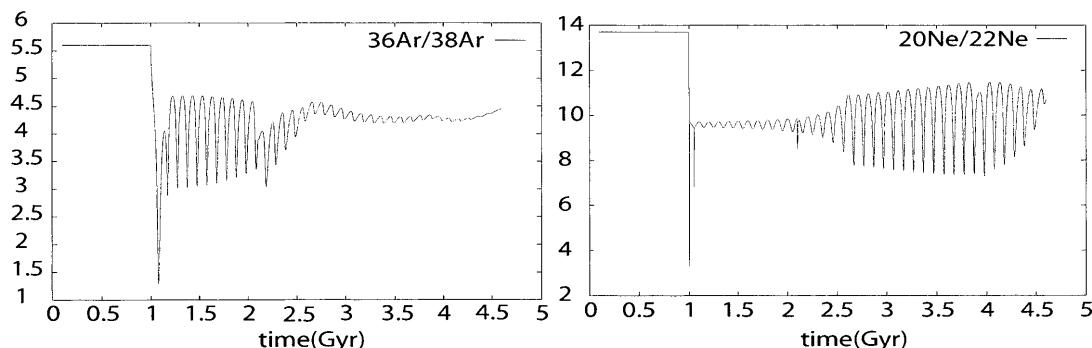


図1：大気中 ³⁶Ar/³⁸Ar(左図), ²⁰Ne/²²Ne(右図)の時間変動 [CO₂分圧の変動周期=0.1(Gyr), 脱ガスピーク=3.8(Ga), 磁場消滅=3.6(Ga), 同位体分別係数=0.4 (=均質圏界面から外圏底までの距離/温度)]

火星の砂丘上のガリー：南半球中高緯度帯における形態的特徴と分布 Gullies over sand dunes on Mars: Morphological characteristics and distributions in the mid-high latitude of the southern hemisphere

○前田 俊介¹, 富本英昭¹

¹東京大学 総合研究博物館

火星の表面ではその形成に水が関わっていると考えられている地形が様々に見つかっているが、ガリーは少なくともそのうちの一部が現在においても活動を続けていることから注目を集めている。ガリーの形成プロセスに、液体の水が関わっているかどうかについては未だに明確に理解されていないが、ガリーがいかにして形成されたかは、現在の火星表面においての水循環を理解するために、非常に重要な役割をはたすと考えられる。

ガリーは一般に、最も上流の部分に漏斗型のアルコープと呼ばれる崩落地形を持ち、そこから1本、ないし数本程度のチャネルへとつながり、その終端はファンと呼ばれる三角洲状の下部堆積物によって構成される地形である。しかしながら、Russell Crater の内部に存在する砂丘上のガリーは、明瞭なアルコープを持たず、またファンも持っていない。そして、講演者たちは、Russell Crater 内のガリーは一般的のガリーとは異なった形成過程、ないし形成までのタイムスケールを持つことがこの違いを生じさせていると考えている。以前までの研究で、講演者たちはこの奇妙なガリーの形成が低粘性の流れによるものであり、形成までのタイムスケールは比較的短いということを主張している。

この研究では、講演者たちはガリーの形成の過程を理解するために、一般的なガリーと奇妙なガリーの形態的特徴の違いについて注目した。講演者たちはまず、二種類のガリーがどのような場所に位置しているかと、その地域の地表面がどのような特徴を示しているかを調べるために、南半球の中高緯度地帯 (60°S から 45°S) を撮影した High Resolution Imaging Experiment(HiRISE)の画像 750 枚以上を丹念に調べた。その結果、講演者たちは Hellas Planitia と Argyre Planitia の間の地域で、以前 Russell Crater で見つかったもの以外の奇妙なガリーを新しく発見した。そして講演者たちは二種類のガリーの分布とその形状についてマッピングを行った。講演者たちの事前の結果として、一般的なガリーが地表面の状態によらず広く分布しているのに対し、奇妙なガリーは砂丘上にしか存在しないことを示した。これらから、ガリーの形状はそれが位置している場所の地表面の状態に大きく影響されると考えられる。また、Gamma-Ray Spectrometer によって取得された表層下の水についてのデータでは、南半球中高緯度帯で広く水が存在することは無いとされていたが、以前の研究から少なくとも局所的にはガリーを形成するのに十分な量の水が地下に存在していることが示唆される。

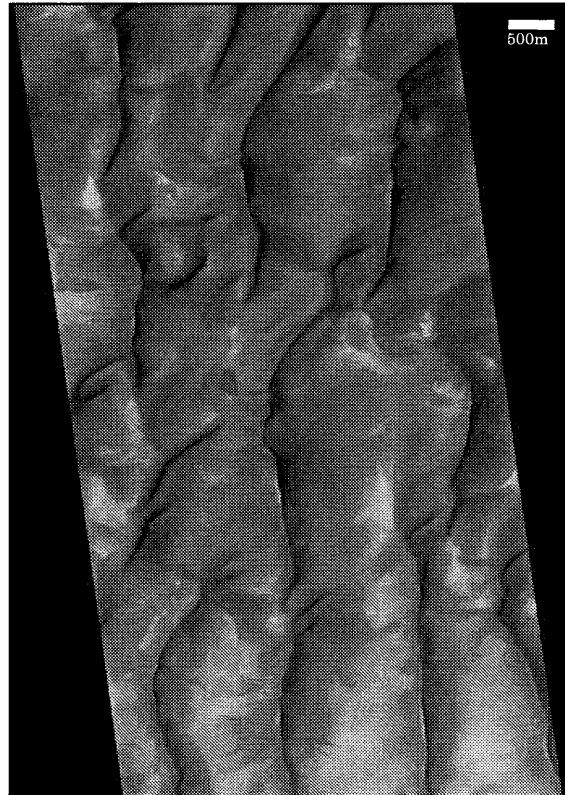


図 1 : HiRISE の写した Kaiser Crater 内の砂丘
(PSP_010749_1325)

月における最後の海の火成活動

○諸田智克¹、春山純一¹、大竹真紀子¹、松永恒雄²
 本田親寿³、横田康弘²、木村淳⁴、小川佳子³、平田成³、出村裕英³、岩崎晃⁵、杉原孝充⁶
 佐伯和人⁷、中村良介⁸、小林進悟¹、石原吉明⁹、武田弘⁵、Harald Hiesinger¹⁰

¹ 宇宙研、² 国環研、³ 会津大、⁴ 北海道大、⁵ 東大、⁶ JAMSTEC、
⁷ 大阪大、⁸ 産総研、⁹ 国立天文台、¹⁰ Westfälische Wilhelms-Universität

海のマグマ噴出の活動期間を正確に理解することは、月の熱史の解明のために不可欠である。アポロ・ルナミッションで持ち帰られた岩石サンプルに含まれる玄武岩の放射年代から、海の火成活動は少なくとも、43億年前から31億年前まで続いていることが分かっている [e.g., Taylor, 1982; Taylor et al. 1983; Nyquist and Shih, 1992]。更に最近の月隕石の分析から、43.5億年前には海の火成活動が始まっていたことが明らかとなった [Terada et al., 2007]。

一方、リモートセンシングデータを用いた、層序関係、クレータ数密度などの研究から [Boyce, 1976; Wilhelms, 1987; Hiesinger et al., 2000, 2003]、嵐の大洋と雨の海ではアポロサンプルから得られた年代よりも最近にマグマ噴出が起こったと考えられてきた。しかし、これらの地域では高解像度の画像データが一部の領域に限られていたため、火成活動終了時期に関する正確な理解はなされていなかった。本研究では、月の火成活動の終了時期を決定するために、かぐや搭載の地形カメラで得られた高分解能画像データを用いたクレータ数密度の測定に基づいて溶岩流の年代決定を行った。

結果として、最後のマグマ噴出は15~20億年前であることがわかった。20億年よりも若い溶岩流はアリストラルカスクレータとケプラーカスクレータの周辺に集中しており（図1）、これらの領域は、放射性熱源の濃集領域の中心部と一致する。また、最後のマグマ噴出は非常に大規模であり、15~22億年前に噴出したマグマ量は、月の裏側で最大の海の総量に匹敵するほどである。

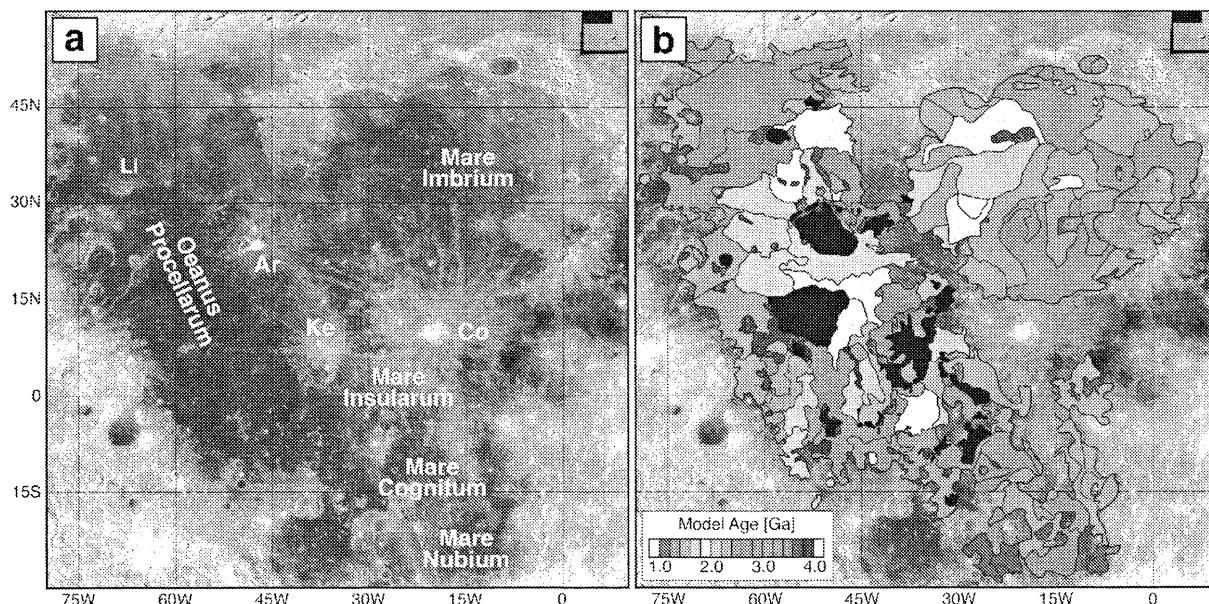


図1. 右) 嵐の大洋と雨の海周辺の地形カメラモザイク画像. 左) 溶岩流年代マップ.

Type I migration in radiatively efficient disks

光学的に薄い円盤内でのタイプI惑星移動

○山田耕¹, 稲葉知士²

¹神戸大学惑星科学研究中心, ²早稲田大学国際教養学部

地球質量程度の原始惑星が原始惑星系円盤ガスの中で誕生すると、それらの間で必然的に重力相互作用が生じる。惑星と円盤ガスとの間の重力相互作用によって、円盤内には密度波が励起される。一方、惑星は励起した密度波から潮汐トルクを受けるため、惑星の軌道は変化する。この軌道変化はタイプI惑星移動と呼ばれ、惑星系形成において重要な物理作用の一つである。タイプI惑星移動の方向およびその速度は、円盤ガスの熱的な構造に依存して変化する。過去の多くの研究は、簡単化のために動径方向に円盤の温度分布が一定であるという仮定で調べられてきた。それらの結果は、外側の密度波からの潮汐トルクが内側の密度波のそれよりも大きくなり、惑星は内側に移動するというものである。また、移動のタイムスケールを見積もると円盤の寿命よりも短いタイムスケールで惑星が中心星に落ちることも指摘されている。しかし、最近、エネルギー方程式を考慮した数値計算が行えるようになり、円盤ガスのエントロピーが動径方向に沿って減少する場合、惑星は外側に移動するということがわかつってきた。

過去の研究が採用してきた等温の状態方程式は、ショックなどによって発生した熱が即座に散逸すると仮定して用いられてきた。しかしながら、円盤ガスの冷却率はその冷却過程の性質(例えば、輻射輸送など)に強く依存する。そこで、我々は光学的に薄い円盤内において輻射輸送、つまりオパシティの大きさが惑星移動にどのような影響を与えるのかに注目して、2次元のグローバル流体計算を用いて惑星移動のオパシティ依存性を調べた。

ガスの方程式は、ソース項と移流項を続けて解くオペレーター分割法を用いて解き、ソース項の計算は2次のルンゲクッタスキームで解く。移流項の計算には、有限体積法を用いてMUSCL-Hancockスキームで解く。

本研究により、以下のことが明らかになった:

- エントロピーの動径分布($\propto r^\lambda$)において-0.4よりも小さい負のベキ(λ)を持ち、かつ熱散逸のない円盤では惑星は外に移動する。つまり、惑星にかかる全トルクが正である。
- 全トルクは円盤のオパシティが増えると小さくなる。林モデルの1/100程度の値よりも大きいオパシティ値の場合、 λ が-0.4以下でも内側移動となる。
- 惑星にかかる全トルクは惑星質量の2乗にだいたい比例して増加する。

金星大気の 1 kmスケール擾乱の数値実験

○山本勝¹

¹九大応力研

地球の気象学や海洋学では、「風や気温の微細構造の再現」や「渦拡散係数の見積り」が盛んに行われている。金星の場合、角運動量や硫黄系の微量ガスを供給する地表面付近の「微細な対流や渦の挙動」や「それによる渦輸送」が重要な研究対象となる。今回の講演では、「（放射対流平衡で見積もられている）大きな渦拡散に対応する対流運動」と「ホットスポットに関連した地表面熱フラックスによる対流混合層の形成・発達」の2点を中心に気象モデルを用いた実験結果を発表する。これらの数 kmスケール渦の挙動は、金星 GCM の sub-grid scale のパラメタリゼーションにおいて重要である。

本稿では、弱風条件(0.1 – 1 m/s)における金星地表面付近(4km X 4km X 4km)の数値実験について記述する。モデルは WRF の LES case についてパラメーターを金星の条件に変更した。放射の時定数（1万日）や日変化（117 地球日）に比べてかなり短い時定数の現象なので、放射加熱や日変化は無視した。対流調節実験では、上層(> 2 km) は安定成層に、下層(< 2 km) は初期温位勾配を $-1.0 \sim -5.0 \text{ K/km}$ に設定した。初期温位勾配が大きいほど、熱輸送、物質輸送、運動量輸送の鉛直フラックスは増大し、個々の対流セルの大きさは小さくなる。開始から 1 時間ほど後に対流調節が起り、急激に「温位やトレーサーの混合」や「混合層の上部と下部で反対向きの流れ」が生じる。その後、領域平均の温位や流れは sub-grid scale 拡散で徐々に変わっていく。どのケースでも、対流調節時に $10^2 \sim 10^3 \text{ m s}^{-2}$ の大きな熱渦拡散係数が見られる。この値は Matsuda and Matsuno (1978) の鉛直 1 次元放射対流平衡で見積もられた渦拡散係数と矛盾しない。今回のような弱基本流（対流の流速よりも弱い）実験では、局所的な水平風の鉛直シアによって、運動量輸送向きや大きさが変わり、運動量拡散係数の見積もりまで至らなかった。

対流混合層実験では、ホットスポットの熱フラックスがわからないので、地面からの熱フラックス Q を変えた計算を行い($0.000 \sim 0.264 \text{ Kms}^{-1}$)、混合層の発達やそれに伴う渦拡散係数を調べた。 Q が小さいと、対流混合層は維持されず、初期に対流が起きた後、徐々に弱まり無くなる。他方、 Q が大きいと、時間とともに成長する。減衰から成長へ移り変わる敷居値 Q では、混合層が定常的に維持される。 Q が大きいケースでは、 $10^2 \sim 10^3 \text{ m s}^{-2}$ の大きな熱渦拡散係数が混合層内に見られる。

今後は、GCMや雲輸送モデルのパラメタリゼーションに向けて、本モデルを雲層に適用した結果について議論し、整理する。

すばる望遠鏡+Suprime-Camによる太陽系小天体のスリットレス分光観測

○吉田二美、八木雅文、仲田史明、小宮山裕、古澤久徳¹

大野貴博^{2 3}、岡村定矩²、中村士⁴

¹国立天文台

²東京大学

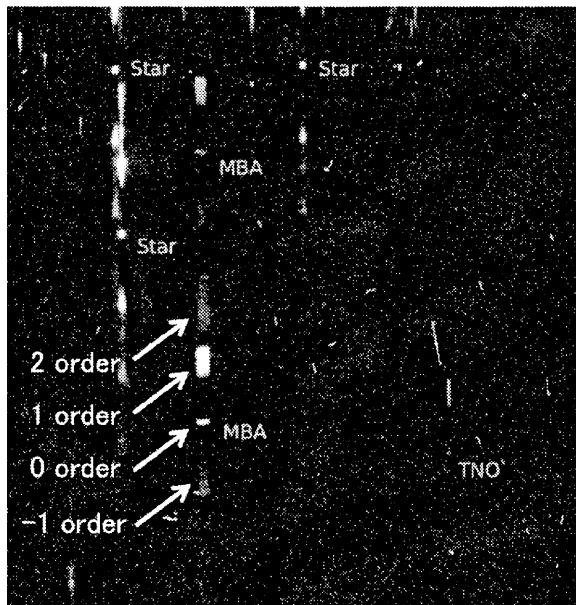
³文部科学省

⁴帝京平成大学

小惑星の分光観測は物質組成を推定する上で重要であるので、精力的な観測がスリット分光で行われている。しかしながら、スリット分光の場合、小惑星を分光器のスリット内に落とす必要があるので、あらかじめ小惑星の軌道決定を行い、小惑星の移動に合わせて望遠鏡で追尾することが必要になる。またこの方法では一度に一つの小惑星しか分光できないので、観測効率が悪い。これに対して、スリットレス分光ではカメラの視野内の小惑星を一度に分光でき、露出前後の小惑星の動きから軌道決定も同時に可能になるというメリットがある。

すばる望遠鏡では 8.2 m という大口径と、Suprime-Cam の広視野を活かして一度に約 100 個の暗い小惑星 ($R < 25$ mag) を検出でき、さらに最近導入されたグリズムフィルターを使って、 $R < 23$ mag の小惑星については低 S/N ながらも 4500–8400 Å の範囲でスペクトルを取得することが可能になった。 $R = 23$ mag はメインベルトの中心付近で直径約 500 m の小惑星の明るさに相当するので、これらの装置を使えば、今まで全く知られていない sub-km サイズのメインベルト小惑星の分光データが得られることになる。

今回はこれらの装置を用いて、我々が 2009 年 5 月に行ったパイロット観測の結果を報告する。



Suprime-Cam グリズム分光データの例

系外水惑星の自転軸傾斜角が気候に及ぼす影響

○渡邊 吉康¹, 田近 英一¹

¹東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

系外惑星の発見数はこの数年で飛躍的に伸び、その軌道要素（軌道離心率、軌道長半径）が多種多様であることが分かってきた。惑星の自転軸傾斜角についての観測は困難であるが、自転軸傾斜角は一般的に様々な値を取りうることが知られている（Laskar and Robutel, 1993）。また、一般に自転軸傾斜角は大きく変動する。自転軸傾斜角の大きさは、惑星が受け取る日射量の緯度分布及び季節変化に大きな影響を及ぼすため、気候に及ぼす影響は大きい。一方、地球は炭素循環を通じて気候を長期的に安定に保ってきたことが知られており（Walker et al., 1981），系外惑星でも大気中の二酸化炭素分圧の調節機能は重要であると考えられる。惑星の自転軸傾斜角や炭素循環が気候に及ぼす影響について議論している研究例はいくつかあるが（例えば、Williams and Kasting (1997)），こうした惑星の気候の「安定性」や「多重性」を系統的に調べた研究はない。

本研究では、水惑星の気候システムが、大気中の自転軸傾斜角の大きさによってどのような挙動特性の違いを持つのかについて、多重安定平衡解の構造変化に着目し、惑星放射の二酸化炭素分圧依存性を考慮した南北一次元EBM（エネルギー平衡モデル）を用いて系統的に調べた。その結果、自転軸傾斜角が小さい場合には、氷が全く存在しない“無凍結解”，季節的に氷が部分的にひろがる“季節的部分凍結解”，一年を通して氷が部分的に覆う“部分凍結解”，一年を通して全球が氷に覆われる“全球凍結解”といった安定解が存在するが、自転軸傾斜角の増大とともに季節的部分凍結解、部分凍結解の存在領域が縮小していくことが分かった。

講演では、多重安定平衡解が自転軸傾斜角によってどのように変わりうるのかを、日射量分布や南北温度分布の違いに着目して議論を行う。さらに、二酸化炭素が火山活動によって供給され、大陸地殻によって消費される“炭素循環”が働く惑星における気候状態についても考察する。

ALMA(Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)初期運用へ向けて

○齋藤正雄、西合一矢、奥村幸子¹

¹国立天文台アルマ推進室

ALMA(Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)プロジェクトとは、東アジア（日本が主導）・北米・ヨーロッパ・チリの諸国が協力して進めているミリ波サブミリ波干渉計の国際プロジェクトです。直径 12m の高精度アンテナ 50 台と「ACA システム」と呼ばれる高精度アンテナ 16 台を、チリ・アンデス山中の標高 5000m の高原に設置し、超高分解能、高感度を実現します。今年度は初期運用の call for proposal が始まります。

初期運用では、まずアンテナ台数 16 台の干渉計として観測開始となります。16 台とはいえ、既存のミリ波サブミリ波干渉計より 10 倍以上の感度となります。サブミリ波帯では、分子輝線や連続波を観測することでガス相の化学組成分布や運動・温度、また固体相(ダスト)の熱放射を観測することができます。ポスターでは、具体例として、近傍星形成領域にある原始惑星系ガス円盤や系内天体の観測予測を紹介しつつ、ALMA の初期運用時の性能などの観測を考える上で必要な情報を提供します。

ALMA は共同利用観測施設として、一般研究者に開放され利用可能ですが、そのためには観測提案を提出して受理される必要があります。それらの対応とユーザー支援は全てユーザー向けの窓口 ARC(ALMA Regional Center アルマ地域センター)が行います。日本の大学や研究施設等に所属している人は国立天文台三鷹キャンパスにある東アジア ALMA 地域センター (EA-ARC) を利用します。ポスターでは、ALMA 観測を行うまでの具体的手順と EA ARC による支援体制についても紹介します。特に ALMA から提供されるツール群は観測提案を練る上でも提出する上でも重要となるので、それらの入手方法および使用に関しては重点的に紹介します。

EA ARC は、より多くのユーザーが、よりスムーズに ALMA を利用し、より多くの科学的成果を出せるように、ALMA 情報の提供、観測提案作成・投稿、観測計画書作成、データ解析などに関するユーザー支援活動を行います。そのための質問受付やチュートリアルや会議開催なども行っています。

著者索引：第一著者名（発表番号）

あ行		
安達 俊貴	315	門野 敏彦 P013
阿部 新助	222, P025	桂 武邦 305
荒井 朋子	211	上岡 周平 P028
荒川 雅	109, P001	神前 喬 202
荒川 政彦	P007	亀田 真吾 115
生駒 大洋	310	唐牛 譲 205
石黒 正晃	P026	河村 恵里 111, P003
石津 尚喜	319	北里 宏平 P014
石橋 高	301	木村 淳 P030
石原 吉明	330	木村 亮 122
伊藤 孝士	P027	國友 正信 112, P004
市川 浩樹	120	黒岩 琢登 102
井上 洋介	215	黒川 宏之 P031
今井 悠太	110, P002	黒澤 耕介 302
今村 剛	116	小玉 貴則 123
岩田 隆浩	328	小松 吾郎 329
岡田 達明	335, P008, P009	小林 憲正 124
岡本 尚也	P010	小林 進悟 P015
岡本 千里	P011	小林 浩 P032
小嶋 稔	104	さ行
上畠 真之	107	齋藤 正雄 P044
上本 季更	207	佐伯 和人 214
大竹 真紀子	203	酒井 理紗 212
大野 宗祐	303	坂谷 尚哉 213
岡本 千里	306	佐々木 晶 208
小川 和律	216	佐野 孝好 311
荻原 正博	326	鳶生 有理 113, P005
奥住 聰	316	城野 信一 101
小郷原 一智	118	菅原 賢 221
小澤 萌	304	杉原 孝充 206
押上 祥子	P029	鈴木 静香 209
か行		鈴木 貴之 P033
片岡 香織	P012	関根 康人 226
加藤 真理子	317	関谷 実 322

た行		堀 安範	321
台坂 淳子	P034	ま行	
高木 征弘	117	三浦 均	108
高木 靖彦	334	三浦 保範	201
高沢 晋	114, P006	諸田 智克	210
高部 彩奈	P016	道上 達広	307
橋 省吾	333	森島 龍司	312
田中 今日子	320	道越 秀吾	313
田中 智	P017	松倉 大士	323
谷川 享行	P035	森薦 宏太	325
寺居 剛	P036	松本 侑士	327
寺薦 淳也	P018	前田 俊介	P038
な行		諸田 智克	P039
永木 恵太	P019	や行	
中島 美紀	324	保井 みなみ	P023
中村 昭子	P020	薮田 ひかる	106
新居見 励	309	山岸 明彦	125
納多 哲史	121	山田 耕	P040
野口 聖彦	P037	山田 竜平	217
は行		山本 聰	204
羽倉 祥雄	308	山本 哲生	225
橋爪 光	105	山本 勝	P041
花山 秀和	223	山本 幸生	219
春山 純一	218	吉川 真	332
樋口 有理可	314	吉田 二美	P042
平田 直之	119	わ行	
平田 直之	P021	和田 浩二	103
廣瀬 重信	318	渡部 潤一	220
藤田 幸浩	P022	渡邊 吉康	P043
藤村 彰夫	331	渡邊 宏弥	P024
本田 充彦	224		

日本惑星科学会 2010 年秋季講演会実行委員会

実行委員長 渡邊誠一郎

実行委員 古本宗充 山口靖 荒川政彦

城野信一 河村恵里

印刷所

名大生協印刷部