

日本惑星科学会 秋季講演会予稿集 2011

2011 年 10 月 23 日(日)～25 日(火)

相模女子大学 翠葉会館

主催：日本惑星科学会

日本惑星科学会2011年度秋季講演会@相模原

(1) 一般講演会

場所： 相模原市立博物館

日時： 2011年10月22日(土) 13:30~16:00

講演： (1) 土山 明(大阪大学大学院理学研究科・教授)

「太陽系起源物質とはやぶさリターンサンプルの初期分析」

(2) 関根康人(東京大学大学院新領域創成科学研究科・講師)

「宇宙に生命を探す」

(2) 秋季講演会

場所： 相模女子大学・翠葉(すいよう)会館

日時： 2011年10月23日(日)~25日(火) (3日間)

1日目(10/23(日))

08:20 - 09:00 レジストレーション
09:00 - 09:10 開催挨拶, 連絡事項
09:10 - 10:10 特別セッション1<最優秀発表賞> (座長: 長沢真樹子)
10:10 - 10:20 (休憩)
10:20 - 11:48 口頭セッション11: 小天体・隕石 (座長: 石黒正晃, 関口朋彦)
11:48 - 13:00 (昼食)
13:00 - 14:00 ポスターセッション1
14:00 - 16:01 口頭セッション12: はやぶさ (座長: 中村智樹, 橘 省吾)
16:01 - 16:15 (休憩)
16:15 - 18:27 口頭セッション13: 月科学 (座長: 杉原孝充, 石原吉明)

2日目(10/24(月))

08:40 - 09:35 口頭セッション21: 惑星観測 (座長: 佐藤毅彦)
09:35 - 09:45 (休憩)
09:45 - 11:57 口頭セッション22: 惑星探査 (座長: 平田成, 佐伯和人)
11:57 - 13:00 (昼食)
13:00 - 14:00 ポスターセッション2
14:00 - 16:01 口頭セッション23: 原始惑星系円盤 (座長: 田中今日子, 谷川享行)
16:01 - 16:10 (休憩)
16:10 - 17:00 学会総会
17:00 - 17:50 最優秀研究者賞特別講演: 諸田智克氏 (座長: 佐々木晶)
17:50 - 18:00 (休憩)
18:00 - 20:30 懇親会(場所: マーガレットホール2階学生食堂「Cafeteria 101」)

3日目(10/25(火))

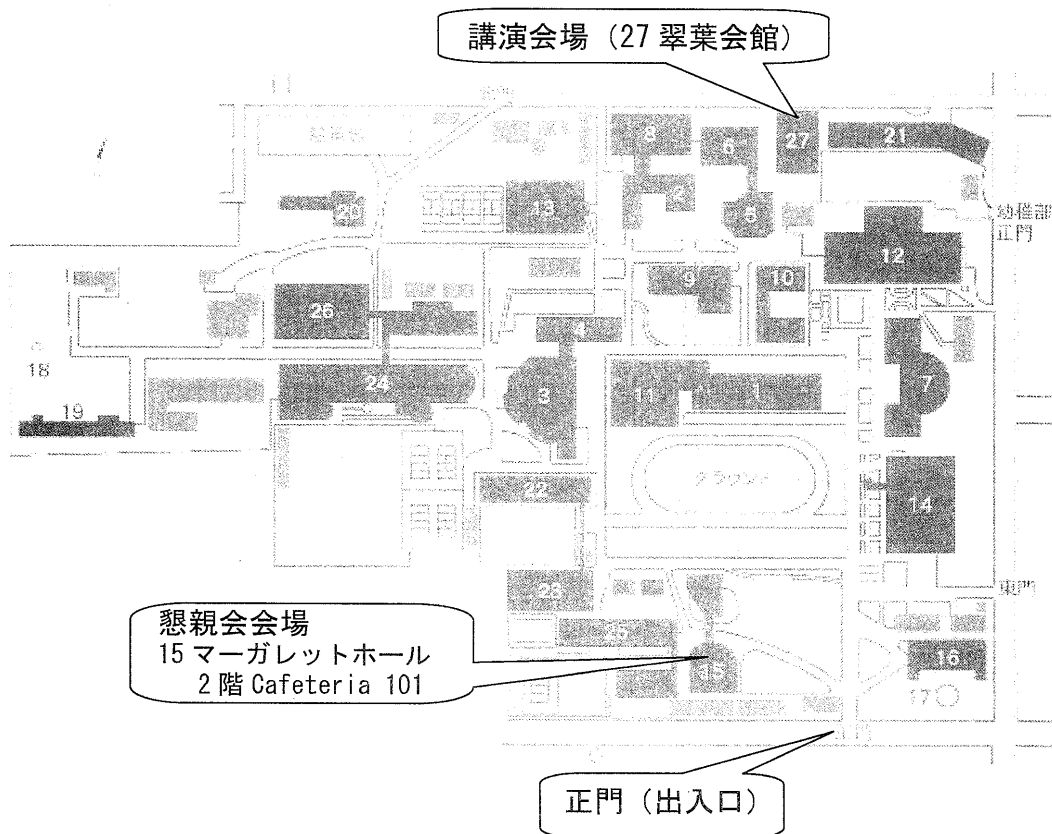
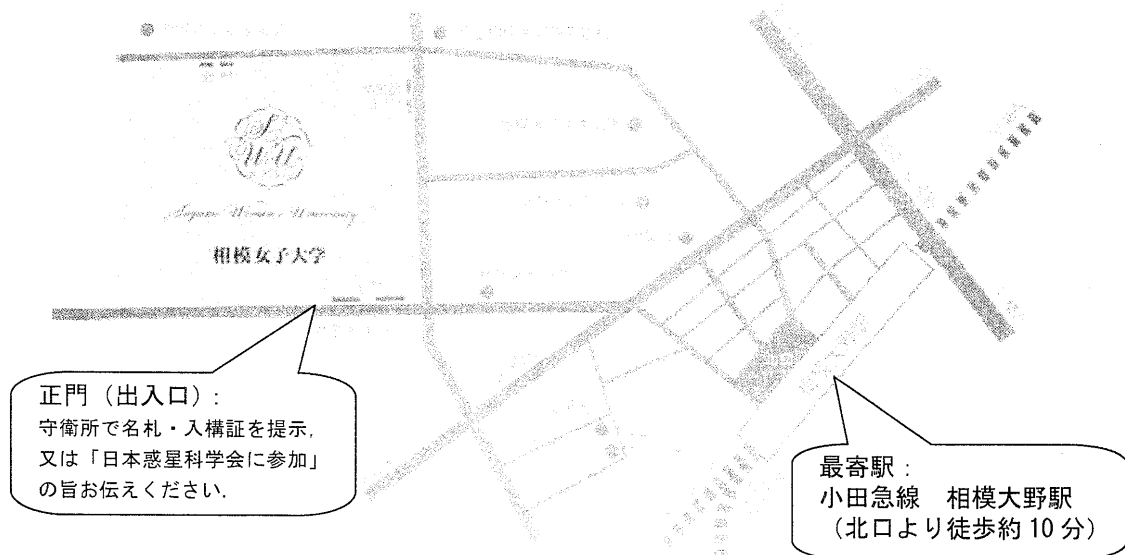
08:40 - 09:57 口頭セッション31: 惑星形成の力学過程 (座長: 樋口有理可, 佐々木貴教)
09:57 - 10:10 (休憩)
10:10 - 11:49 口頭セッション32: 惑星環境進化 (座長: 玄田英典, 石渡正樹)
11:49 - 13:00 (昼食)
13:00 - 14:00 ポスターセッション3
14:00 - 14:44 口頭セッション33: 系外惑星 (座長: 生駒大洋)
14:44 - 14:55 (休憩)
14:55 - 16:45 口頭セッション34: 太陽系における衝突科学 (座長: 中村昭子, 山本聡)
16:45 - 16:56 (休憩)
16:56 - 17:51 口頭セッション35: 室内実験・物性科学 (座長: 荒川政彦)
17:51 - 18:00 閉会挨拶

日本惑星科学会2011年度秋季講演会・会場案内

於：相模女子大学・翠葉（すいよう）会館

住 所 〒252-0383 神奈川県相模原市南区文京 2-1-1

代表番号 042-742-1411



日本惑星科学会 2011 年度秋季講演会・アクセスマップ

★相模大野駅までの所要時間

<飛行機>

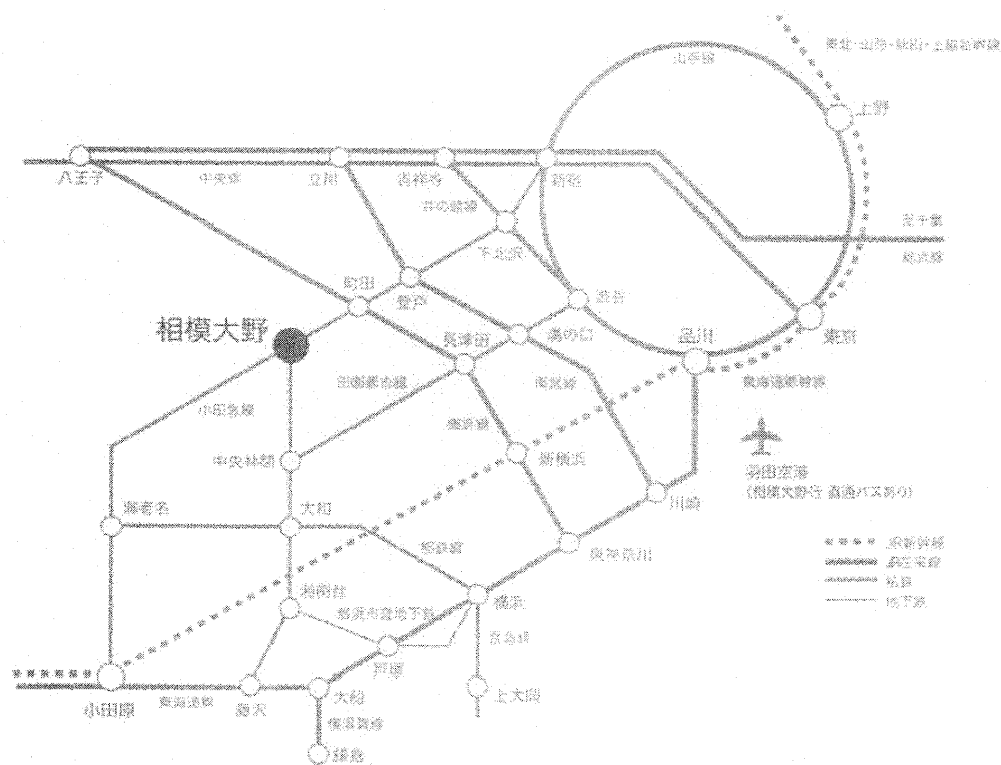
- ・羽田空港より相模大野までの直通バス 90 分（毎日 20 数便）

<新幹線>

- ・東京より 55 分（東京-新宿：中央線）
- ・新横浜より 30 分（ＪＲ横浜線「町田」駅で小田急線に乘換え）
- ・小田原より 50 分（小田急線）

<近郊電車>

- ・新宿より 32 分（小田急線）
- ・渋谷より 40 分（京王井の頭線「下北沢」駅で小田急線乗換え）
- ・横浜より 35 分（相鉄線「大和」駅で小田急線乗換え／ＪＲ横浜線「町田」駅で小田急線に乗換え）
- ・町田より 2 分（小田急線）
- ・中央林間より 4 分（小田急江ノ島線）
- ・藤沢より 21 分（小田急江ノ島線）
- ・八王子より 35 分（ＪＲ横浜線「町田」駅で小田急線乗換え）



口頭発表プログラム

会場：3階ホール

発表時間：質疑時間3分を含めて特別セッションが15分、一般セッション11分

★★★ 1日目 10/23(日) ★★★

09:10 - 10:10 特別セッション1<最優秀発表賞> (座長：長沢真樹子)

09:10 SP1-01, 月衝突盆地の長期粘弾性変形

○鎌田 俊一 (東大理), 杉田 精司 (東大新領域), 阿部 豊 (東大理), 石原 吉明 (国立天文台), 原田 雄司 (上海天文台), 並木 則行 (千葉工大), 岩田 隆浩 (JAXA), 花田 英夫, 荒木 博志 (国立天文台)

09:25 SP1-02, 若い星団内大質量星近傍における原始惑星系円盤のガス散逸

○田村 隆哉, 野村 英子 (京大理), 磯部 洋明 (京大宇宙ユニット), 犬塚 修一郎 (名大理)

09:40 SP1-03, 隕石中の炭酸塩の年代測定から探る含水小惑星の形成と進化

○藤谷 渉, 杉浦 直治 (東大理), 佐野 有司 (東大大気海洋研), 比屋根 肇 (東大理)

09:55 SP1-04, 平均運動共鳴軌道における惑星系の軌道安定時間に対する臨界惑星数について

○松本 侑士, 長沢 真樹子, 井田 茂 (東工大理)

10:10 - 10:20 (休憩)

10:20 - 11:48 口頭セッション11: 小天体・隕石 (座長：石黒正晃, 関口朋彦)

10:20 S11-01, 小惑星4ベスタのBR₂'バンドの位相関数

○長谷川 直 (JAXA), 宮坂 正大 (東京都), 時政 典孝 (にしはりま天文台), 十亀 昭人 (東海大), イブノビツ マスル (マイダナク天文台), 吉田 二美 (国立天文台), 石黒 正晃 (ソウル大), 安部 正真 (JAXA), 黒田 大介 (国立天文台)

10:31 S11-02, テンペル第2彗星のダスト雲形成

○猿楽 祐樹 (JAXA), 石黒 正晃 (ソウル大), 花山 秀和 (国立天文台), 臼井 文彦, 上野 宗孝 (JAXA)

10:42 S11-03, 213P/Van Nessの観測とダスト構造

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

10:53 S11-04, 107P/Wilson-Harringtonの可視測光観測: タンブリング運動あるいは衛星を伴う可能性

○浦川聖太郎 (日本スペースガード協会), 阿部新助 (国立中央大・台湾), 石黒正晃 (ソウル大), 北里 宏平 (金津大), 黒田大介 (国立天文台), 長谷川直 (JAXA), 太田耕司 (京大), 河合誠之 (東工大), 清水康広, 長山省吾, 柳澤顕史 (国立天文台), 吉田道利 (広島大), 吉川真 (JAXA), JSGA 107P 観測チーム

11:04 S11-05, メインベルト小惑星(596) Scheila 表面での衝突に関する観測的証拠

○石黒 正晃 (ソウル大), 花山 秀和 (国立天文台), 長谷川 直, 猿楽 祐樹 (JAXA), 渡部 潤一, 藤原 英明, 寺田 宏 (国立天文台), 河合 誠之 (東工大), 柳澤 顕史, 黒田 大介, 宮地 竹史, 福島 英雄 (国立天文台), 太田 耕司 (京大), 浜野和 博巳 (浜野和天文台), 中村 昭子 (神戸大), Henry Hsieh (ハワイ大), Jeremie Vaubailion (パリ天文台), Junhan Kim (ソウル大), Jeonghyun Pyo (KASI)

11:15 S11-06, あかりによる太陽系外縁天体と特異小惑星の中間-遠赤外線測光観測

○関口 朋彦 (北海道教育大), 長谷川 直, 臼井 文彦 (JAXA), 大坪 貴文 (東北大)

11:26 S11-07, 赤外線天文衛星「あかり」による小惑星カタログ AcuA

○臼井 文彦, 長谷川 直 (JAXA), 黒田 大介 (国立天文台), 石黒 正晃 (ソウル大), 大坪 貴文 (東北大), T. G. Mueller (MPE)

11:37 S11-08, Bensour 隕石(LL6, LL5)の化学組成・鉱物組成の不均一性: はやぶさサンプル分析との関連

○永野 宗, 土'山 明 (阪大理), 下林 典正 (京大理), 瀬戸 雄介 (神戸大理), 今井 悠太, 野口 遼, 松本 徹,
松野 淳也 (阪大理)

11:48 - 13:00 昼食

13:00 - 14:00 ポスターセッション 1

14:00 - 16:01 口頭セッション 12: はやぶさ (座長: 中村智樹, 橋 省吾)

14:00 S12-01, はやぶさ帰還試料キュレーションの現状

○矢田 達, 藤村 彰夫, 安部 正真, 岡田 達明, 石橋 之宏, 白井 慶, 上梶 真之, 唐牛 譲 (JAXA), 八亀 彰吾
(東大理), 中村 智樹 (東北大理), 野口 高明 (茨城大理), 岡崎 隆司 (九州大理), 向井 利典, 上野 宗
孝, 吉川 真, 川口 淳一郎 (JAXA)

14:11 S12-02, イトカワ母天体の材料物質

○中村 智樹 (東北大理), 野口 高明 (茨城大理), 田中 雅彦 (物材研), Mike Zolensky (NASA/JSC), 木
村 真 (茨城大理), 中藤 亜衣子, 大神 稔皓, 石田 初美 (東北大理), 土山 明 (阪大理), 岡崎 隆司 (九
大理), Scott Sandford (NASA/ARC), 脇田 茂 (東北大理), はやぶさ キュレーションチーム (JAXA)

14:22 S12-03, イトカワ母天体の熱進化

○坂本 尚義 (北大), 中村 智樹 (東北大理), 伊藤 正一, 坂本 直哉, 阿部 憲一, 橋口 未奈子, 片山 樹里,
加藤 千図, 川崎 教行, 小林 幸雄, 女池 竜二, 朴 昌根, 武井 将志, 若木 重行, 山本 広佑 (北大), 橋爪 光,
土'山 明, 瀬戸 雄介 (阪大), 長尾 敬介 (東大), 野口 高明 (茨城大), 海老原 充 (首都大), 奈良岡 浩,
北島 富美雄, 岡崎 隆司 (九大), T. R. Ireland (ANU), M. E. Zolensky (NASA/JSC), 安部 正真, 藤村 彰
夫, 川口 淳一郎, 向井 利典, 上梶 真之, 矢田 達, 吉川 真 (JAXA)

14:33 S12-04, イトカワ母天体物質の起源

○海老原 充 (首都大), 関本 俊 (京大), 白井 直樹 (首都大), 浜島 靖典, 山本 政儀 (金沢大), 熊谷 和
也, 大浦 泰嗣 (首都大), Trevor Ireland (ANU), 北島 富美雄 (九大), 長尾 敬介 (東大), 中村 智樹 (東
北大), 奈良岡 浩 (九大), 野口 高明 (茨城大), 岡崎 隆司 (九大), 土山 明 (阪大), 上梶 真之 (JAXA),
坂本 尚義 (北大), Michael Zolensky (NASA/JSC), 安部 正真, 藤村 彰夫, 向井 利典, 矢田 達 (JAXA)

14:44 S12-05, イトカワ上の礫と微粒子の組織が語るイトカワの過去

○野口 高明 (茨城大), 中村 智樹 (東北大理), 木村 真 (茨城大), Mike Zolensky (NASA/JSC), 田中 雅
彦 (物材研), 土'山 明 (阪大), 岡崎 隆司 (九大), はやぶさ キュレーションチーム (JAXA)

14:55 S12-06, イトカワでのレゴリス生成と進化

○土'山 明 (阪大理), 上梶 真之 (JAXA), 松島 亘志 (筑波大), 道上達弘 (福島高専), 門野敏彦 (阪大レ
ーザー研), 中村智樹 (東北大理), 上杉健太郎 (SPRING8/JASRI), 中野司 (AIST), Scott A. Sandford (NASA/ARC),
野口遼, 松本徹, 松野淳也, 永野崇, 今井悠太 (阪大理), 竹内晃久, 鈴木芳生 (SPRING8/JASRI), 大神稔皓 (東
北大), 片桐淳 (筑波大), 海老原充 (首都大), Trevor Ireland (ANU), 北島富美雄 (九大), 長尾敬介 (東
大), 奈良岡浩 (九大), 野口高明 (茨城大), 岡崎隆司 (九大), 坂本尚義 (北大), Michael Zolensky (NASA/JSC),
はやぶさキュレーションチーム (JAXA)

15:06 S12-07, イトカワでのレゴリス年代学

○長尾敬介 (東大), 岡崎隆司 (九大), 中村智樹 (東北大理), 三浦弥生 (東大), 大澤崇人 (原研), 馬上
謙一 (東大, 北大), 松田伸太郎 (東大), 海老原充 (首都大), Trevor R. Ireland (ANU), 北島富美雄,
奈良岡浩 (九大), 野口高明 (茨城大), 土'山 明 (阪大), 上梶真之 (JAXA), 坂本尚義 (北大), Michael
E. Zolensky (NASA/JSC), 白井慶, 安部正真, 矢田達, 石橋之宏, 藤村彰夫, 向井利典, 上野宗孝, 岡田達明, 吉
川真, 川口淳一郎 (JAXA)

15:17 S12-08, イトカワにおける宇宙風化

○野口 高明 (茨城大), 中村 智樹 (東北大理), 木村 真 (茨城大), Mike Zolensky (NASA/JSC), 田中 雅
彦 (物材研), 橋本 隆仁, 今野 充 (日立ハイテク), 中藤 亜衣子, 大神 稔皓 (東北大理), 岡崎 隆司 (九大),
はやぶさキュレーションチーム (JAXA)

15:28 S12-09, イトカワに降りそそぐ外来物質: 始原的な炭素質物質

○北島 富美雄 (九大), 小飼 真人, 大河内 拓雄 (SPRING-8/JASRI), 奈良岡 浩 (九大), 石橋 之宏, 安部

- 正真, 藤村 彰夫 (JAXA), 岡崎 隆司 (九大), 矢田 達 (JAXA), 中村 智樹 (東北大), 野口 高明 (茨城大), 長尾 敬介 (東大), 土山 明 (九大), 坂本 尚義 (北大), 海老原 充 (首都大), 向井 利典 (JAXA), Scott A. Sandford (NASA/ARC), 岡田 達明, 白井 慶, 上野 宗孝, 吉川 真, 川口 淳一郎 (JAXA)
- 15:39 S12-10, イトカワに降りそそぐ外来物質: アミノ酸などの有機物
○奈良岡浩 (九大), 三田肇 (福岡工大), 浜瀬健司 (九大薬), 斎藤香織, 福島和彦 (名大農), 藪田ひかる (阪大), 北島富美雄 (九大), Scott Sandford (NASA/ARC), 岡崎隆司 (九大), 野口高明 (茨城大), 中村智樹 (東北大), 長尾敬介 (東大), 海老原充 (首都大), 坂本尚義 (北大), 土山明 (阪大), 安部正真, 白井慶, 上野宗孝, 矢田達, 石橋之宏, 岡田達明, 藤村彰夫, 向井利典, 吉川真, 川口淳一郎 (JAXA)
- 15:50 S12-11, イトカワサンプルから「はやぶさ2」サンプルへ
○橋 省吾 (東大), 澤田 弘崇, はやぶさ2 サンプリグチーム (JAXA)
- 16:01 - 16:15 (休憩)
- 16:15 - 18:27 口頭セッション13: 月科学 (座長: 杉原孝充, 石原吉明)
- 16:15 S13-01, 「かぐや」ガンマ線分光計による高速中性子の月面強度分布
○藤林 ゆかり (早大), 晴山 慎, 唐牛 譲 (JAXA), 小林 進悟 (放医研), 山下 直之, O. Gasnault (CNRS), R. C. Reedy (PSI), 長岡 央, 早津 佳那子, 長谷部 信行 (早大)
- 16:26 S13-02, 月面破碎岩試料における炭素とレアアース元素の濃縮について
○三浦 保範 (山口大)
- 16:37 S13-03, 月隕石中の低トリウム斜長岩岩片と古いベースンとの関連および資源的利用
○武田 弘 (千葉工大), 唐牛 譲 (JAXA), 山口 亮 (極地研), 長岡 央 (早大), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 矢沢 勇樹 (千葉工大), 諸田 智克 (国立天文台), 廣井 孝弘 (ブラウン大)
- 16:48 S13-04, 月アリスタルコス台地に広がる火砕性堆積物の化学組成と結晶度の推定
○有本 龍三 (東大), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研), 岩田 隆浩 (JAXA)
- 16:59 S13-05, かぐや分光データを用いた月高地地殻の鋳物量比と Mg# の推定
○大竹 真紀子 (JAXA), 武田 弘 (千葉工大), 松永 恒雄, 横田 康弘 (国環研), 春山 純一 (JAXA), 諸田 智克 (国立天文台), 山本 聡 (国環研), 小川 佳子 (会津大), 廣井 孝弘 (ブラウン大), 中村 良介 (AIST), 唐牛 譲 (JAXA), 佐伯 和人 (阪大)
- 17:10 S13-06, SELENE 地形カメラデータに基づく月面標高モデル
○春山 純一 (JAXA), 原 誠一, 日置 和之 (NTT データ), 岩崎 晃 (東大), 諸田 智克 (国立天文台), 大竹 真紀子 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研), LISM ワーキンググループ
- 17:21 S13-07, 新たな衝突盆地特徴量決定法の開発と月衝突盆地への適用: 衝突盆地形成過程への制約
○石原 吉明, 諸田 智克 (国立天文台), 猿渡 有希, 澤田 明宏, 平松 良浩 (金沢大)
- 17:32 S13-08, 月の南極エイトケン盆地の構造と年代
○佐々木 晶, 石原 吉明, ホーセンス・サンダー, 諸田 智克, 松本 晃治, 花田 英夫 (国立天文台), 岩田 隆浩, 大竹 真紀子 (JAXA)
- 17:43 S13-09, 月面クレーター内における衝突メルト分布の検証
○栗山 祐太郎 (東大), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 松永 恒雄 (国環研), 岩田 隆浩 (JAXA)
- 17:54 S13-10, 月探査衛星「かぐや」MI データを用いた月クレーター内壁、中央丘における正反射特性の検出
○大隈 裕一郎, 佐伯 和人 (阪大), 大竹 真紀子 (JAXA)
- 18:05 S13-11, クレーター中央丘の構造と構成物質
○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), 本田 親寿 (会津大), 諸田 智克 (国立天文台), 小川 佳子 (会津大)
- 18:16 S13-12, アポロ月震計データで見る月のクレーター生成率不均質
○川村 太一 (東大), 諸田 智克 (国立天文台), 小林 直樹, 田中 智 (JAXA)

★★★ 2日目 10/24(月) ★★★

08:40 - 09:35 口頭セッション 21: 惑星観測 (座長: 佐藤毅彦)

- 08:40 S21-01, Evidence of a meteoroid impact or variability of solar wind flux in Mercury's sodium tail
○亀田 真吾 (立教大), 鍵谷 将人, 岡野 章一 (東北大)
- 08:51 S21-02, 火星大気における HD0/H20 比測定の科学的意義および HD0/H20 循環の 3 次元シミュレーション
○黒田 剛史 (東北大), 佐川 英夫, 笠井 康子 (NICT), 笠羽 康正 (東北大)
- 09:02 S21-03, 木星面発光現象の意義と検出観測に向けて
○渡部 潤一 (国立天文台), 田部 一志 (櫛リブラ), 杉田 精司 (東大), 柳澤 正久 (電通大), 伊藤 孝士 (国立天文台)
- 09:13 S21-04, 木星型惑星を想定した H2-He 大気の鉛直一次元放射対流平衡モデル: 大気冷却率と熱構造の下部境界条件依存性
○高橋 康人 (北大), 倉本 圭, 石渡 正樹 (北大, CPS)
- 09:24 S21-05, 天王星型惑星不規則衛星の光度変化観測
○寺居 剛 (国立天文台), 伊藤 洋一 (神戸大), David Jewitt (UCLA)
- 09:35 - 09:45 (休憩)

09:45 - 11:57 口頭セッション 22: 惑星探査 (座長: 平田成, 佐伯和人)

- 09:45 S22-01, 月惑星探査に基づく太陽系年代学の構築
○渡邊 誠一郎 (名大), 小林 浩 (イエナ大), 諸田 智克 (国立天文台), 荒川 政彦 (神戸大)
- 09:56 S22-02, 小惑星探査ミッション「はやぶさ 2」の進捗状況について
○吉川 真, 南野 浩之, 中澤 暁, 安部 正真, 津田 雄一, 「はやぶさ 2」プロジェクトチーム (JAXA)
- 10:07 S22-03, はやぶさ 2 のサイエンス
○安部 正真, 吉川 真 (JAXA), はやぶさ 2 サイエンスチーム
- 10:18 S22-04, はやぶさ 2 搭載レーザ高度計の科学目標
○平田 成 (会津大), はやぶさ 2 プロジェクトリモートセンシングサブチーム, 水野 貴秀 (JAXA)
- 10:29 S22-05, 「はやぶさ 2」搭載中間赤外カメラ (TIR) による科学観測
○岡田達明 (JAXA), 中村良介 (AIST), 福原哲哉 (北大), 田口真 (立教大), 今村剛 (JAXA), 関口朋彦 (北海道教育大), 長谷川直 (JAXA), 小川佳子 (会津大), 松永恒雄 (国環研), 和田武彦 (JAXA), 荒井武彦 (国立天文台), 北里 宏平 (会津大), 山本 幸生, 太刀川純孝 (JAXA), はやぶさ 2 リモートセンシングサブチーム
- 10:40 S22-06, はやぶさ 2 衝突装置の科学目標
○高木 靖彦 (愛知東邦大), はやぶさ 2 衝突装置科学チーム
- 10:51 S22-07, はやぶさ 2 に向けた、X 線 CT による新しい地球外物質分析手法の開発
○上根 真之 (JAXA), 上杉 健太郎, 竹内 晃久, 鈴木 芳夫, 星野 真人 (SPRING-8/JASRI)
- 11:02 S22-08, SELENE-2 の着陸地点推薦
○佐伯 和人 (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, 唐牛 譲, 小林 直樹, 春山 純一 (JAXA), 杉原 孝充 (JAMSTEC), 本田 親寿 (会津大), 佐藤 広幸 (ASU)
- 11:13 S22-09, ペネトレータ地震計ネットワークによる月震観測
○山田 竜平, 白石 浩章 (JAXA), 竹内 希 (東大地震研), 小林 直樹, 田中 智 (JAXA), 村上 英記 (高知大), 石原 靖 (JAMSTEC), 岡元 太郎 (東工大), 早川 雅彦, 早川 基 (JAXA), Raphael Garcia (トゥールーズ大), Philippe Lognonne (IPGP)
- 11:24 S22-10, 月面観測機器の越夜技術: 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), 大嶽 久志, 田中 智 (JAXA)

11:35 S22-11, MELOS 火星探査計画の検討状況

○佐藤 毅彦, 久保田 孝 (JAXA), 宮本 英昭 (東大), 今村 剛, 松岡 彩子, 岡田 達明, 尾川 順子 (JAXA)

11:46 S22-12, 火星表面におけるメタン酸化菌探査 (MELOS 生命探査 SWG)

○山岸 明彦 (東葉大), 吉村 義隆 (玉川大), 久保田 孝, 春山 純一 (JAXA), 小林 憲正 (横国大), 本多 元 (長岡技術大), 内海 裕一 (兵庫県大), 才木 常正 (兵庫県立工技センター), 宮川 厚夫 (静岡大), 長沼 毅 (広島大), 大野 宗祐 (千葉工大), 三田 肇 (福岡工大), 戸野倉 賢一 (東大), 佐々木 晶 (国立天文台), 宮本 英昭 (東大)

11:57 - 13:00 昼食

13:00 - 14:00 ポスターセッション2

14:00 - 16:01 口頭セッション23: 原始惑星系円盤 (座長: 田中今日子, 谷川享行)

14:00 S23-01, 原始惑星系円盤の形成: 原始惑星系円盤からのガス降着流の解析

○谷川 享行 (CPS, 北大低温研), 大槻 圭史 (CPS, 神戸大), 町田 正博 (九大)

14:11 S23-02, 原始惑星系円盤におけるダストと磁気乱流の共進化

○奥住 聡 (名大), 廣瀬 重信 (JAMSTEC)

14:22 S23-03, 原始惑星系円盤デッドゾーンの磁場構造

○廣瀬 重信 (JAMSTEC)

14:33 S23-04, 光蒸発によるデッドゾーン外側でのギャップ形成

○森島 龍司 (UCLA)

14:44 S23-05, 光学的に厚い円盤での惑星移動

○山田 耕 (神戸大, CPS), 稲葉 知士 (早大)

14:55 S23-06, 微惑星まわりの弧状衝撃波: 水素分子の解離を含めた流体シミュレーション

○山崎 布美香, 中本 泰史 (東工大)

15:06 S23-07, 原始惑星成長期における微惑星衝撃波による微惑星蒸発

○田中今日子, 山本哲生 (北大), 三浦均 (東北大), 長沢真樹子, 中本泰史 (東工大), 田中秀和 (北大)

15:17 S23-08, 原始惑星系円盤の非一様密度分布とダスト集積

○瀧 哲朗 (東工大), 藤本 正樹 (JAXA), 井田 茂 (東工大)

15:28 S23-09, ガス抵抗およびダスト層内の乱流を考慮したダスト層の重力不安定性

○竹内 拓 (東工大)

15:39 S23-10, 渦における微惑星形成: 解析解から惑星系を議論する

○河村 恵里, 渡邊 誠一郎 (名大), 稲葉 知士 (早大)

15:50 S23-11, 分子動力学計算によるダスト微粒子相互作用の解明

○田中 秀和 (北大低温研)

★★★ 3日目 10/25(火) ★★★

08:40 - 09:57 口頭セッション 31: 惑星形成の力学過程 (座長: 樋口有理可, 佐々木貴教)

- 08:40 S31-01, 惑星による微惑星一時捕獲過程
○末次 竜 (神戸大), 大槻 圭史 (神戸大, CPS), 谷川 享行 (北大低温研, CPS)
- 08:51 S31-02, 粒子間の衝突と重力相互作用に起因する土星リングの粘性
○安井 佑貴 (神戸大), 大槻 圭史 (神戸大, CPS), 台坂 博 (一橋大)
- 09:02 S31-03, 土星形成に伴う木星トロヤ群の散乱
尾花 勝太, ○佐々木 貴教 (東工大)
- 09:13 S31-04, 長周期彗星の軌道分布: 観測と理論の比較
○樋口 有理可 (東工大), 小久保 英一郎, 伊藤 孝士 (国立天文台)
- 09:24 S31-05, 数値的KAM安定性による三体系の安定限界線
○斎藤 正也 (統計数理研), 谷川 清隆 (国立天文台), Victor V. Orlov (サンクトペテルズブルク州大)
- 09:35 S31-06, 軌道計算による巨大惑星周りの衛星系形成の解明
○荻原 正博 (名大), 井田 茂 (東工大)
- 09:46 S31-07, ダークマタハローおよび巨大分子雲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)
- 09:57 - 10:10 (休憩)

10:10 - 11:49 口頭セッション 32: 惑星環境進化 (座長: 玄田英典, 石渡正樹)

- 10:10 S32-01, 水の散逸を考慮した海惑星から陸惑星への進化による HZ 内側境界への影響
○小玉 貴則, 玄田 英典, 阿部 豊 (東大理), Kevin Zahnle (NASA/ARC)
- 10:21 S32-02, 炭素循環を考慮した高軌道離心率惑星の表層環境とハビタビリティ
○門屋 辰太郎 (東大理), 田近 英一 (東大・新領域), 渡邊 吉康 (東大理)
- 10:32 S32-03, 自転軸傾斜角が炭素循環の機能する系外地球型水惑星の気候に及ぼす影響の検討
○渡邊 吉康 (東大理), 田近 英一 (東大・新領域), 門屋 辰太郎 (東大理)
- 10:43 S32-04, 陸惑星の完全蒸発限界: 地表の水輸送を考慮した1次元EBMでの検討
○高尾 雄也, 玄田 英典, 小玉 貴則, 阿部 豊 (東大理)
- 10:54 S32-05, 同期回転惑星大気における熱収支の自転角速度依存性
○納多 哲史 (神戸大), 石渡 正樹 (北大), 中島 健介 (九大), 高橋 芳幸 (CPS, 神戸大), 森川 靖大 (Parmy), 西澤 誠也, 林 祥介 (CPS, 神戸大)
- 11:05 S32-06, 共通のプログラムスタイルを持つ大気大循環モデルと雲解像モデルの開発
高橋 芳幸 (神戸大, CPS), 杉山耕一朗 (北大低温研), 小高 正嗣, ○石渡 正樹 (北大理), 佐々木洋平 (京大理), 西澤 誠也 (神戸大, CPS), 中島 健介 (九大理), 竹広 真一 (京大数理研), 林祥介 (神戸大, CPS)
- 11:16 S32-07, Lax-Friedrichs 法による流体力学的大気散逸の数値計算
○梅本 隆史 (北大), 倉本 圭 (北大, CPS)
- 11:27 S32-08, 初期地球大気における有機物ヘイズの生成実験と表層環境の安定性への応用
○笹森 務仁, 関根 康人 (東大・新領域), Erik J Larson (コロンビア大), 杉田 精司 (東大・新領域)
- 11:38 S32-09, 薄い周惑星円盤で集積する巨大氷衛星の原始大気の放射特性とその保温効果
○岡田 英誉 (北大), 倉本 圭 (北大, CPS)

11:49 - 13:00 昼食

13:00 - 14:00 ポスターセッション3

14:00 - 14:44 口頭セッション33: 系外惑星 (座長: 生駒大洋)

- 14:00 S33-01, 水に富むスーパーアースの内部構造と質量散逸
○黒崎 健二, 生駒 大洋 (東工大), 堀 安範 (国立天文台)
- 14:11 S33-02, M型星周りの惑星形成と多様性: 観測との比較
○堀 安範, 小久保 英一郎, 押野 翔一 (国立天文台)
- 14:22 S33-03, M型星周りの惑星形成と多様性: 寡占的成長段階
○押野 翔一, 小久保 英一郎, 堀 安範 (国立天文台)
- 14:33 S33-04, 系外惑星の公転軌道傾斜角の系統的測定: 軌道が傾いた惑星は意外に多い
○成田憲保 (国立天文台), 平野照幸 (東大), 佐藤文衛 (東工大), 青木和光, 田村元秀 (国立天文台)
- 14:44 - 14:55 (休憩)

14:55 - 16:45 口頭セッション34: 太陽系における衝突科学 (座長: 中村昭子, 山本聡)

- 14:55 S34-01, 分化隕石母天体の衝突破壊と進化: 衝突実験からのアプローチ
○岡本 千里 (JAXA), 荒川 政彦 (神戸大), 長谷川 直 (JAXA)
- 15:06 S34-02, 炭素質コンドライト模擬物質を用いた衝突実験
○池崎 克俊 (阪大), 矢野 創, 岡本 千里 (JAXA), 橘 省吾 (東大), 今栄 直也 (極地研), 土山 明 (阪大), 長谷川 直 (JAXA), 中村 昭子 (神戸大), 富山 隆将 (JAMSTEC)
- 15:17 S34-03, 多孔質焼結シリカと石膏を用いた超高速衝突実験
○荒川 政彦 (神戸大), 藤田 幸浩 (名大), 中村 昭子, 岡本 尚也 (神戸大), 門野 敏彦, 重森 啓介, 弘中 陽一郎, 佐野 孝好, 境家 達弘 (阪大)
- 15:28 S34-04, 細かいガラスビーズ層への衝突で見られるランパートクレーターに似たエジェクタ地形の形成過程
○鈴木 絢子 (CPS), 門野 敏彦 (阪大), 中村 昭子, 荒川 政彦 (神戸大), 和田 浩二 (千葉工大), 山本 聡 (国環研)
- 15:39 S34-05, 構成粒子数と標的形狀・衝突角度が焼結体の衝突破壊に与える影響
○町井 渚, 中村 昭子 (神戸大)
- 15:50 S34-06, 空隙の大きな小天体へのダスト衝突: ダスト破壊と貫入深さとの関係
○岡本 尚也, 中村 昭子 (神戸大), 長谷川 直, 黒澤 耕介 (JAXA), 池崎 克俊, 土山 明 (阪大)
- 16:01 S34-07, 複数回衝突が及ぼす氷ターゲットの衝突破壊強度への影響
○羽山 遼, 荒川 政彦 (神戸大)
- 16:12 S34-08, 高強度レーザーによって衝撃圧縮された鉱物の変成分布
○永木 恵太, 境家 達弘, 近藤 忠 (阪大理), 門野 敏彦, 弘中 陽一郎, 重森 啓介 (阪大レーザー研)
- 16:23 S34-09, 衝撃圧縮による珪酸塩の電離: 珪酸塩の状態方程式の確立に向けて
○黒澤 耕介 (JAXA), 門野 敏彦 (阪大レーザー研), 杉田 精司 (東大新領域), 重森 啓介, 弘中 陽一郎, 佐野 孝好 (阪大レーザー研), 境家 達弘 (阪大理), 大野 宗祐 (千葉工大), 羽村 太雅 (東大新領域), 橘 省吾 (東大理), 藤岡 慎介 (阪大レーザー研), 松井 孝典 (千葉工大)
- 16:34 S34-10, 衛星リモートセンシングによるスペクトルデータを用いた地球衝突クレータ判別の研究
○山本 聡, 松永 恒雄 (国環研), 中村 良介 (AIST), 関根 康人 (東大), 平田 成 (会津大)
- 16:45 - 16:56 (休憩)

16:56 – 17:51 口頭セッション 35 : 室内実験・物性科学 (座長 : 荒川政彦)

- 16:56 S35-01, 天体表層レゴリスの熱物性 : ガラスビーズを用いた熱伝導率測定実験
 ○坂谷 尚哉 (東工大), 小川 和律, 飯島 祐一 (JAXA), 本田 理恵 (高知大), 田中 智 (JAXA)
- 17:07 S35-02, 火星凍土を模擬した氷・固体粒子混合物のレオロジーに関する実験的研究
 ○保井 みなみ, 荒川 政彦 (神戸大)
- 17:18 S35-03, ゾルゲル法で作成した GEMS 粒子平均組成を持つ非晶質珪酸塩の加熱結晶化実験
 ○松野 淳也, 今井 悠太, 野口 遼, 土'山 明 (阪大理)
- 17:29 S35-04, アミノ酸前駆体の太陽系環境下での変成―地上実験と宇宙実験による検証―
 ○小林 憲正, 川本 幸徳, Palash K. Sarker (横国大), 桑原 秀治 (東大新領域), 大林 由美子, 金子 竹男 (横国大), 三田 肇 (福岡工大), 藪田 ひかる (阪大), 吉田 聡 (放医研), 鳴海 一成 (原研), 神田 一浩 (兵庫県大), 山岸 明彦 (東薬大), たんぽぽ WG
- 17:40 S35-05, 星周コランダムの異方的凝縮速度の決定
 ○瀧川 晶, 橘 省吾, 永原 裕子, 小澤 一仁 (東大理)

ポスター発表プログラム

会場：2 階会議室，1 階ロビー

(ポスターの掲示は3日間可能です。各ポスターの掲示会場およびコアタイムは下記の通りです)

特別セッション1<最優秀発表賞>

コアタイム：1 日目 (10/23(日)) 13:00-14:00, 会場：1 階ロビー

SP1-01P, 月衝突盆地の長期粘弾性変形

○鎌田 俊一 (東大理), 杉田 精司 (東大新領域), 阿部 豊 (東大理), 石原 吉明 (国立天文台), 原田 雄司 (上海天文台), 並木 則行 (千葉工大), 岩田 隆浩 (JAXA), 花田 英夫, 荒木 博志 (国立天文台)

SP1-02P, 若い星団内大質量星近傍における原始惑星系円盤のガス散逸

○田村 隆哉 (京大理), 野村 英子 (京大理), 磯部 洋明 (京大宇宙ユニット), 犬塚 修一郎 (名大理)

SP1-03P, 隕石中の炭酸塩の年代測定から探る含水小惑星の形成と進化

○藤谷 渉, 杉浦 直治 (東大理), 佐野 有司 (東大地球海洋研), 比屋根 肇 (東大理)

SP1-04P, 平均運動共鳴軌道における惑星系の軌道安定時間に対する臨界惑星数について

○松本 侑士, 長沢 真樹子, 井田 茂松本 侑士, 長沢 真樹子, 井田 茂 (東工大理)

特別セッション2<実習会, アウトリーチ>

コアタイム：2 日目 (10/24(月)) 13:00-14:00, 会場：1 階ロビー

SP2-01P, かぐや搭載マルチバンドイメージャのデータ公開状況と同データの利用促進に向けた取り組み

○大竹 真紀子 (JAXA)

SP2-02P, かぐや搭載地形カメラデータに基づいた東の海における表面年代決定およびその溶岩流の厚さの推定

○石山 謙 (東北大), 大隈 裕一郎 (阪大), 諸田 智克 (国立天文台), 平田 成 (会津大)

SP2-03P, 惑星科学研究センター (CPS) によるスクール・実習・研究会の企画・開催への支援の取り組み

○木村 淳 (CPS, 北大), 中川義次, 林祥介 (CPS, 神戸大), 木村宏 (CPS), 杉山耕一郎 (CPS, 北大), 高橋芳幸, 西澤誠也, 鈴木絢子 (CPS), 谷川享行 (CPS, 北大), 山田耕 (CPS), 納田明達 (CPS, 北大), 惑星科学研究センター

SP2-04P, 堆積岩への衝突クレーター形成実験

○鈴木 絢子 (CPS), 長谷川 直 (JAXA), 門野 敏彦 (阪大), 中村 昭子 (神戸大), 杉田 精司 (東大), 荒川 政彦 (神戸大)

SP2-05P, 新鮮クレーター形状に関する統計研究：海と高知の違い

○巖生 有理 (名大), 神前 喬 (阪大)

SP2-06P, クレータサイズ頻度分布計測によるオリエンターレ盆地の年代推定について

○末次 竜, 安井 佑貴 (神戸大)

SP2-07P, オリエンターレ盆地における溶岩噴出年代の推定

○長 勇一郎 (東大), 保井 みなみ (神戸大), 諸田 智克 (国立天文台), 平田 成 (会津大)

SP2-08P, CPS 衝突実験実習の取り組み

○荒川 政彦 (神戸大), 門野 敏彦 (阪大), 杉田 精司 (東大), 中村 昭子 (神戸大), 鈴木 絢子 (CPS), 関根 康人 (東大), 山下 靖幸 (中部大), 長谷川 直 (JAXA), 大野 宗祐 (千葉工大)

一般ポスターセッション 1

コアタイム：1 日目 (10/23(日)) 13:00-14:00, 会場：2 階会議室

S11-01P, 22P/Kpoff のダスト構造と非対称ジェット

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

S11-02P, マイダナク天文台に於ける若い小惑星族の測光観測 2006-2010

○吉田 二美, 伊藤 孝士 (国立天文台), 野沢 由依 (日本女子大), 高橋 茂, 沖田 喜一 (国立天文台), 大谷 浩 (京大), 柳沢 俊史, 黒崎 裕久 (JAXA), Mansur Ibrahimov, Shuhrat Ehgamberdiev, Anastasia Marshalkina, Rivkat Karimov, Otabek Burhonov, Yusufjon Tillayev, Bahadir Hafizov (UBAI), 浦川 聖太郎 (JSGA)

S11-03P, ボルダーターゲットにおけるクレーター生成効率：小惑星表面での装甲効果への実験的アプローチ

○平田 成 (会津大), 中村 昭子, 町井 渚, Carsten Guettler (神戸大)

S11-04P, 小惑星表面の浮遊ダストの観測可能性について

○千秋 博紀, 小林 正規, 和田 浩二, 並木 則行 (千葉工大), 平田 直之, 宮本 英昭 (東大)

S11-05P, スターダスト彗星粒子 T111・T112 の鉱物学的特徴：TEM と FE-SEM による観察

○小松 睦美 (早大), 三河内 岳, 宮本 正道 (東大), Timothy Fagan (早大), Michael Zolensky (NASA/JSC), 大隅 一政 (高輝度光科学研究センター)

S11-06P, マーチソン (CM2) 隕石から抽出したヒボナイト包有物の NanoSIMS による Al-Mg 同位体分析

○佐々木 翔吾, 比屋根 肇, 藤谷 渉 (東大理), 高畑 直人, 佐野 有司 (東大大気海洋研)

S13-01P, 月 South Pole-Aitken 盆地の地形・鉱物分布からみる地質構造

○上本 季更 (東大), 大竹 真紀子, 春山 純一 (JAXA), 山本 聡, 松永 恒雄 (国環研), 中村 良介 (AIST), 横田 康弘 (国環研), 諸田 智克 (国立天文台), 小林 進悟 (放医研), 岩田 隆浩 (JAXA)

S13-02P, 月面観測のための放熱制御装置 (サーマルルーバー) の熱真空評価

○坂谷 尚哉 (東工大), 小川 和律, 飯島 祐一, 星野 健, 大嶽 久志, 田中 智 (JAXA)

S13-03P, レーダーサウンダと地形カメラの観測に基づく衝突クレーター周辺における月表層の誘電率分布の推定

○石山 謙, 熊本 篤志, 小野 高幸, 寺田 直樹, 加藤 雄人 (東北大), 山口 靖, 押上 祥子 (名大)

S13-04P, ライナーガンマ領域の電波減衰特性：かぐや月レーダーサウンダーの例

○坂東 雄一, 熊本 篤志, 中村 教博, 長濱 裕幸 (東北大)

S13-05P, 月表面地形・表層構造を考慮した月の地震波伝播モデリング

○岡元 太郎 (東工大), 小林 直樹 (JAXA), 竹中 博士 (九大), セレーネ 2 月広帯域地震計チーム

S21-01P, ヘブラス・パレスとヘファエスタス・フォッサの体積計算

○佐藤 文仁 (東大), 宮本 英昭 (東大, PSI), Alexis Rodriguez (PSI)

S21-02P, 電気通信大学における木星火球の観測

○亀井 亮祐, 柳澤 正久 (電通大)

S21-03P, 土星系中型質量衛星における多様性の起源：SPH 流体コードを用いたジャイアントインパクトのシミュレーション

○藤田 航, 玄田 英典 (東大理), 関根 康人, 杉田 精司 (東大新領域)

一般ポスターセッション2

コアタイム：2日目(10/24(月)) 13:00-14:00, 会場：2階会議室

S22-01P, はやぶさ2近赤外分光計の開発現状

○北里 宏平(会津大), 安部 正真(JAXA), 高木 靖彦(愛知東邦大), 松浦 周二, 津村 耕司(JAXA), 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)

S22-02P, はやぶさ2サンプルの微量揮発性元素分析に向けたキャッチャコンテナ内ガス回収システムの開発

○三浦 弥生(東大), 岡崎 隆司(九大), 長尾 敬介, 橋 省吾(東大), 澤田 弘崇(JAXA), はやぶさ2サンプリングチーム

S22-03P, はやぶさ2 サンプラーホーンを用いた小惑星表面試料採取に向けた基礎実験

○橋省吾(東大), 澤田弘崇(JAXA), 橋岡秀彬, 小池みずほ, 森愛美, 森里文哉, 中村海, 高木智章(東大), 岡崎隆司(九大), 久好圭治(阪大), 春日丘高校定時制科学部, はやぶさ2サンプリングチーム

S22-04P, 「はやぶさ2」搭載小型ランダー-MASCOT

○岡田 達明, 矢野 創, 津田 雄一, 久保田 孝, 吉光 徹雄(JAXA), Tra-Mi Ho, Lars Witte, Stephan Ulamec, Hans-Joerg Dittus, Tilman Spohn(DLR), Jean-Pierre Bibring(IAS), Pierre Bousquet(CNES), はやぶさ2着陸探査サブチーム

S22-05P, SELENE-2 に向けたその場元素分析のためのガンマ線・中性子分光計の開発状況

○三谷 烈史(JAXA), 小林 進悟(放医研), 唐牛 譲(JAXA), 長谷部 信行(早大), GNS チーム

S22-06P, SELENE-2 の着陸地点推薦

○佐伯 和人(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, 唐牛 譲, 小林 直樹, 春山 純一(JAXA), 杉原 孝充(JAMSTEC), 本田 親寿(会津大), 佐藤 広幸(ASU)

S22-07P, 次期月探査計画 SELENE-2 の検討状況(2)

○田中 智, 三谷 烈史, 大嶽 久志, 小川 和律, 小林 直樹, 飯島 祐一, 橋本 樹明, 星野 健, 大槻 真嗣(JAXA), 木村 淳, 倉本 圭(北大, CPS)

S22-08P, ペネトレータを使った月内部構造探査

○村上 英記(高知大), 田中 智, 小林 直樹, 白石 浩章, 早川 雅彦, 山田 竜平(JAXA), 石原 靖(JAMSTEC), 岡元 太郎(東工大), 竹内 希(東大), 早川 基(JAXA), 月内部構造探査WG

S22-09P, MELOS を用いた宇宙測地学的手法による火星回転変動計測

○岩田 隆浩(JAXA), 石原 吉明, 松本 晃治, 菊池 彦彦(国立天文台), 原田 雄司(上海天文台), 佐々木 晶(国立天文台)

S22-10P, 惑星探査ローバカメラのオンボード分析にむけて ―ターゲット発見とデータ要約―

○鎌田 慎也, 本田 理恵(高知大)

S23-01P, 原始惑星系円盤の化学構造と ALMA による分子輝線観測: ガス温度構造と光蒸発過程

○野村 英子(京大), Catherine Walsh, T. J. Millar(クィーンズ大ベルファスト)

S23-02P, ASTE10m による Beta Pic Moving Group に属する原始惑星系後期円盤天体の CO(3-2) 輝線探査観測

○清兼 和紘(東大), 齋藤 正雄, 西合 一矢(国立天文台), 林 正彦(東大), 相川 祐理(神戸大), 川辺 良平(国立天文台), 塚越 崇(東大), 武藤 恭之(東工大), 安井 千香子(国立天文台)

S23-03P, シア乱流における永年重力不安定と微惑星形成

○道越 秀吾, 小久保 英一郎(国立天文台), 犬塚 修一郎(名大)

S23-04P, 画架座ベータ星周囲のデブリ円盤構造に対する惑星の影響とその観測可能性

○武藤 恭之(東工大), Hanno Rein(プリンストン高等研), Alexis Brandeker(ストックホルム大)

S23-05P, 原始惑星系円盤におけるダストとガスの抵抗による乱流の減衰

○石津 尚喜, 道越 秀吾(国立天文台)

一般ポスターセッション3

コアタイム：3日目(10/24(火)) 13:00-14:00, 会場：2階会議室

S31-01P, オールト雲起源新彗星の力学進化

○伊藤 孝士(国立天文台), 樋口 有理可(東工大)

S32-01P, 化石形状を記憶する準流体惑星の真の極移動：潮汐変形による歪みエネルギーの効果

○原田 雄司(上海天文台)

S32-02P, 同期回転惑星の海洋循環についての基礎的考察

○松尾 花枝, 中島 健介(九大理)

S33-03P, 光化学大気モデルの構築と地球型系外惑星への応用

○洪 鵬, 関根 康人, 杉田 精司(東大新領域)

S33-04P, 系外惑星大気による中心星光の屈折と色収差

山本 哲生(北大), ○中本 泰史(東工大)

S34-01P, 人工隕石落下としての「はやぶさ」リエントリー：リエントリーに伴う衝撃波のインフラサウンド・地震波観測と解析結果

○石原吉明(国立天文台), 平松良浩(金沢大), 山本真行(高知工大), 古本宗充(名大), 藤田和央(ARD/JAXA)

S34-02P, 衝突閃光での黒体放射

○高橋 悠太, 柳澤 正久(電通大)

S34-03P, 衝突蒸気雲の膨張速度

○海老名 良祐, 柳澤 正久(電通大)

S34-04P, 高速度衝突閃光：多孔質衝突体の場合Ⅲ

○柳澤 正久(電通大)

S34-05P, 隕石への超高速衝突実験と塵回収

○中村 昭子, 岡本 尚也(神戸大), 門野 敏彦, 重森 啓介, 弘中 陽一郎, 佐野 孝好(阪大レーザー研), 境家 達弘(阪大理), 瀬戸 雄介(神戸大), 藤田 幸浩(名大), 荒川 政彦(神戸大), 大野 宗祐(千葉工大), 黒澤 耕介(JAXA), 竹内 拓(東工大)

S34-06P, 低密度エアロゾルへの衝突・貫入過程の高速カメラ撮影：多様な構造を持つ粒子の場合

○門野 敏彦(阪大レーザー研), 新居見 励(阪大理), 奥平 恭子(会津大), 長谷川 直(JAXA), 田端 誠(JAXA, 千葉大), 土山 明(阪大理)

S34-07P, 発泡アルミへの衝突クレーター形成実験

○小野瀬 直美, 東出 真澄(ARD/JAXA), 長谷川 直(ISAS/JAXA)

S34-08P, 等質量氷ダスト球の衝突付着に関する実験的研究

○脇生 有理(名大), 荒川 政彦(神戸大)

S35-01P, 模擬惑星間塵環境下でのアミノ酸関連分子の軟X線に対する安定性

○川本 幸徳, 岡部 拓人, 大林 由美子, 金子 竹男(横国大), 高橋 淳一(NTT), 三田 肇(福岡工大), 神田 一浩(兵庫県大), 小林 憲正(横国大)

S35-02P, 蛇紋石による多環式芳香族炭化水素の吸着関係について

○橋爪 秀夫(物材研)

S35-03P, 氷衛星エンセラダスの熱水環境に対する実験的制約

○関根 康人(東大新領域), 渋谷 岳造(JAMSTEC), 桑谷 立(東大新領域), 鈴木 勝彦(JAMSTEC)

S35-04P, 非晶質ケイ酸塩の水質変成実験によるコンドライト変成過程における無機有機相互作用の研究

○野口 遼, 土山 明, 藪田 ひかる, 市川 聡(阪大)

S35-05P, レーザー誘起絶縁破壊分光法(LIBS)による鉱物の分類と定量：月鉱物のその場測定に向けて

○石橋 高, 荒井 朋子, 和田 浩二, 小林 正規, 大野 宗祐, 千秋 博紀, 並木 則行, 松井 孝典(千葉工大), 亀田 真吾(立教大), 長 勇一郎, 杉田 精司(東大)

S35-06P, Olivine 組成メルト凝固における結晶成長と Mg-Fe 分配の数値計算

○三浦 均, 塚本 勝男(東北大)

月衝突盆地の長期粘弾性変形

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

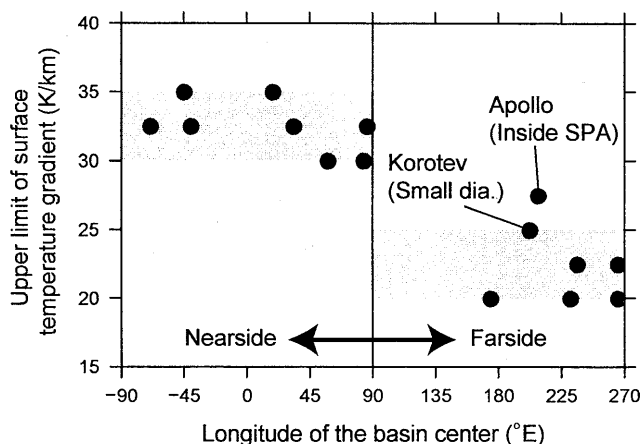
¹⁾東大、²⁾国立天文台、³⁾上海天文台、⁴⁾千葉工業大学・惑星探査研究センター、⁵⁾JAXA/ISAS

月面には、月形成後数億年以内に形成したとされる衝突盆地が多く見られる [e.g., Stöffler & Ryder, 2001]。数千万年から数億年といった地質学的時間スケールにおいては、地殻やマントルは流動し、衝突盆地の地形は緩和する。岩石の粘性は温度に非常に強く依存するため、衝突盆地の変形度合いは月の初期熱進化を探る手がかりとなり得る。

衝突盆地の緩和度合いは、表面地形と地殻マントル境界面（モホ面）での起伏から推定される。「かぐや」ミッションでの、子衛星による電波リレーを用いた月裏側重力計測の結果、月裏側重力場データの計測精度は飛躍的に向上した [Namiki et al., 2009]。その結果、月裏側の多くの衝突盆地はアイソスタシーを回復しておらず、隕石重撃期に月裏側は既に非常に冷たかったことが示唆された。これまで温度の推定には、定常一様な粘性の地殻という非常に簡略化されたモデル計算 [Solomon et al., 1982] が用いられてきた。しかし、盆地形成期には弾性リソスフェアの急激な発達が起こるため [e.g., Konrad and Spohn, 1997]、熱進化計算と粘弾性計算を組み合わせることが必要である。

この問題を解決するため、我々は放射壊変による発熱と永年冷却による熱進化モデルを、長期粘弾性変形計算に組み込んだ。そして、「かぐや」重力観測を元にしたモホ起伏図を用いて、衝突盆地の初期地形の復元を試みた。本年の地球惑星科学連合大会において、我々は裏側高地の盆地の解析結果を報告した。本発表では、月表側も含めた主な盆地 26 個の解析結果をまとめて報告する。計算条件によっては地殻厚が負という、非現実的な初期地形が盆地 15 個について得られた。これは、実際の月内部の温度が、計算で仮定した月内部の温度より低かったことを示している。この結果から、盆地形成期における温度構造の制約を行った。表面温度勾配の上限値は地域によって異なっており、月表側では 30-35 K/km、裏側高地では 20-25 K/km である(下図)。同様にモホ温度についても上限値を算出したが、地殻厚の地域依存性が大きいいため、モホの上限温度に地域依存性は見られなかった。

地殻厚の分厚い裏側高地で低い表面温度勾配の上限値が得られたということは、高地地殻深部の放射性元素濃度について重要な示唆を与える。熱進化計算の結果、隕石重撃期に厚さ 70 km 地殻の表面温度勾配が 20 K/km を下回るためには、トリウム濃度 ≤ 0.5 ppm であることが示唆された。したがって、高地地殻は深部でもトリウムに枯渇していることが示唆された。



図：盆地形成期における、表面温度勾配の上限値と盆地の中心緯度の関係。左側が月表側。温度構造に表裏二分性が見られる。裏側で ≥ 25 K/km となるのは Apollo と Korotev のみ。前者は South Pole-Aitken 盆地の中のため地殻が薄く、後者は盆地の直径が小さい。そのため、緩和には高温が必要となり、高い温度勾配値が得られた。

若い星団内大質量星近傍における原始惑星系円盤のガス散逸

○田村隆哉¹、野村英子¹、磯部洋明²、犬塚修一郎³

¹京都大学、²宇宙ユニット、³名古屋大学

原始惑星系円盤における円盤ガス散逸は、ガス惑星形成だけでなく微惑星形成にも関わる根本的な問題である。光蒸発は、特に質量の大部分を担う円盤外側で、ガス散逸を担う主要な機構の一つであると考えられている。とりわけ星の多くはクラスター内で形成されるため、クラスター内の近傍の大質量星からの強い紫外線によって引き起こされる原始惑星系円盤の光蒸発過程を調べることは、一般的な円盤進化を知る上で重要である。星団内では、原始惑星系円盤からの遷音速ガス流が円盤近傍の大質量星からの紫外線により電離され電離面を形成していることが観測されており、大質量星の存在が近傍の原始惑星系円盤の進化に影響を与えうることが示唆されている。

我々は、このような大質量星近傍の原始惑星系円盤の光蒸発による円盤ガス散逸を、数値計算によって調べている。本研究では、電離面の半径や円盤放出率が大質量星からの距離にどの程度依存するかを調べた。また、円盤面密度進化、電離面半径や円盤放出率についての円盤の中心星質量依存性、ダストサイズ依存性を調べた。これらは惑星形成の場である原始惑星系円盤を特徴づける物理量であり、その具体的な値を調べることは惑星形成論にとって重要である。

本研究の結果、中心星の質量が軽い(重い)と蒸発に必要な温度は低く(高く)なり、蒸発しやすく(し難く)なること、また、円盤内でダストが成長すると、ダスト上の光電加熱率の低下に伴い円盤表層部の温度は低くなるものの、紫外線がより密度の高い赤道面付近まで浸透するようになり、ある半径における光蒸発率は上昇することがわかった。

本講演ではさらに、円盤面密度進化の計算をもとに円盤全体からの光蒸発率の時間進化を調べ、星団中での円盤ガス散逸のタイムスケールの多様性について述べる。また、大質量星からの距離と原始惑星系円盤の外縁半径・電離面の大きさの関係についての計算結果とOrion星雲内のTrapezium星団のproplydsの観測結果とを比較し、円盤の初期状態や光蒸発と中心星への降着を考慮した円盤進化モデルの妥当性について議論する予定である。

隕石中の炭酸塩の年代測定から探る含水小惑星の形成と進化

○藤谷 渉¹、杉浦直治¹、佐野有司²、比屋根 肇¹

¹ 東京大学・大学院理学系研究科・地球惑星科学、² 東京大学・大気海洋研究所

初期太陽系における微惑星の形成は、微小なダストから惑星の形成へ至る途中の重要な過程である。隕石に含まれる鉱物の形成年代は微惑星の形成と進化のタイムスケールを知る手掛かりとなる。本研究では、含水鉱物を含む隕石に着目し、かつて液体の水が存在していた小惑星の集積年代、熱史と内部の物質進化の解明を試みた。

CM コンドライトは比較的激しい水質変成の痕跡を示し、変成の際に形成した二次鉱物が多く見られる。二次鉱物の中でも炭酸塩は微量元素として Mn を含むため、二次イオン質量分析計 (SIMS) を用いて ^{53}Mn - ^{53}Cr 放射年代 (半減期 370 万年) を求めることができる。また炭酸塩の酸素同位体比などから形成時の温度や水・岩石比などが推定されており (Clayton & Mayeda, 1984)、水質変成が起こった環境を推定することができる。得られた炭酸塩の年代データと、その形成環境とを組み合わせ、隕石母天体の集積年代やその後の熱史を議論することができる。

しかしながら、SIMS による炭酸塩の分析は極めて難しい。装置の性格上、分析試料にマッチした適切な標準試料を準備しない限り、Mn/Cr 比を正確に求めることが困難だからである。そのため先行研究では Mn/Cr 比の推定が不十分であり、その結果、太陽系最古の物質である CAI (4568.2 Ma) より古い年代が得られるなど、未だ正確な年代値は報告されていない (例えば de Leuw et al., 2009)。

そこで本研究では、炭酸塩の標準試料を実験室で合成し、Mn/Cr 比を正確に求める手法を開発した。そして、その手法を用いて 4 種類の変成度が異なる CM コンドライト (Murchison, Y791198, ALH83100, Sayama) を分析した。その結果、初めて正確な炭酸塩の年代を求めることに成功し、分析した炭酸塩は 4563.4 Ma に形成したことがわかった。これは先行研究と比べて最大で 700 万年若く、炭酸塩の年代が CAI よりも古くなってしまい、という矛盾は解決された。また驚くべきことに、4 つの CM コンドライトは誤差の範囲で同一の年代を示した。分析した炭酸塩はその酸素同位体比から異なる温度 (0 ~ 130 °C) で形成したと考えられるため、この結果は CM コンドライト母天体が集積後に急加熱を経験したことを物語っている。この急加熱のシナリオは、熱源が短寿命放射性核種・ ^{26}Al の崩壊エネルギーであることを強く示唆する。その仮定のもと、炭酸塩の年代データを満足するように母天体の熱史を一次元熱伝導方程式によってシミュレーションし、含水小惑星の集積年代を制約することを試みた。その結果、CM コンドライト母天体は CAI 形成から少なくとも 300 万年以降に集積したことがわかった。

SP1-04

平均運動共鳴軌道における惑星系の軌道安定時間に対する臨界惑星数について
○松本侑士, 長沢真樹子, 井田茂 (東京工業大学 地球惑星科学専攻)

本発表では、数値計算による平均運動共鳴軌道に捕獲された惑星系の軌道安定時間の振る舞いを紹介する。

現在、複数の岩石・氷惑星が存在している系が 9 個、惑星候補天体からは 158 個(Borucki et al., 2011)発見されている。これらの系の惑星は中心星近傍で発見されており、軌道移動を経験したことが示唆される。タイプ I 軌道移動の線形計算の値を用いた N 体計算は、惑星は軌道移動しながら成長し、円盤内縁付近で平均運動共鳴に入り安定化することを示した(Terquem & Papaloizou 2007)。しかし、観測された惑星の多くは共鳴軌道になかった。これは何らかの原因で共鳴に入らなかったか、共鳴から外れたと考えられる。

Ogihara & Ida (2009)は線形計算より弱い軌道移動での惑星集積を N 体計算で行った。このとき、惑星は一度共鳴軌道に捕獲されるがガス散逸後に軌道不安定を起こし、最終的に内縁付近に偏らない共鳴軌道にない惑星系が形成した。

軌道移動の強さによって共鳴軌道が不安定を起こす場合があることは知られるようになったが、どのパラメータが原因で不安定化するかはわかってはいない。そこで我々は共鳴軌道における安定時間とそのパラメータ依存性を調べた。同一平面上で $m+1:m$ の共鳴軌道に惑星を入れ、その安定時間を軌道計算により測定した。

この結果、惑星数がある数以上になると急激に安定時間が減少していることを発見した。この急激に安定時間が減少する惑星数を臨界惑星数とする。惑星質量を固定したとき、惑星間の軌道間隔をヒル半径で規格化した値を小さくすると臨界惑星数は小さくなり、また、軌道間隔を固定したとき、惑星質量が小さくなると小さい値をとった。

共鳴にない系外惑星系は、臨界惑星数を超える数が共鳴に捕獲され、ガス散逸後に軌道不安定を起こしたと考えられる。また、これら結果を用いて、形成される惑星系を軌道移動のタイムスケールと結びつけて議論する。

小惑星 4 ベスタの B R z' バンドの位相関数

○ 長谷川 直¹・宮坂 正大²・時政 典孝³・十亀 昭人⁴・イブラヒモフ マンスール⁵・
吉田 二美⁶・石黒 正晃⁷・安部 正真¹・黒田 大介⁸

¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・²東京都・³にしはりは天文台公園・⁴東海大学・
⁵マイダナク天文台・⁶国立天文台・⁷ソウル大学・⁸国立天文台岡山天体物理観測所

小惑星の位相関数を正確に求めるには位相角数度以下のデータが必須であるが、過去小惑星 4 ベスタの測光観測では位相角 1 度以下のデータが取得されていなかった。2006 年の衝の時に 4 ベスタの位相角は最小 0.11 度になる事が観測前に分かっていた。そこで、4 ベスタの位相角 1 度以下のデータを含めた観測データを取得し、そのデータ元に 4 ベスタの位相関数を求める事が本研究の目的である。

4 ベスタの測光観測は宇宙研に設置した 0.064m 望遠鏡・宮坂天文台 0.36m 望遠鏡・西はりま天文台 0.60m に同架された 0.076m 望遠鏡・マイダナク天文台 0.60m 望遠鏡を用いて、位相角 0.12 度～23.8 度までの B, R, z' の三色のデータを取得した。

取得したデータを IAU-HG システムを用いて解析を行うと $H_b=3.93$, $G_b=0.24$, $H_R=2.77$, $G_R=0.21$, $H_{z'}=2.95$, $G_{z'}=0.20$ という値を得た。今回得られた G パラメーターは従来の値 ($G=0.32-0.35$, MPC17257, Largerkvist et al. 1989, 1990, 1992) と比較して低めの値になった。従来の値と異なるのは今回取得されたデータが 1.5 度以下のデータがあった為で、1.5 度以下のデータを省いて解析を行うと、従来の G の値と近い値になった。尚、絶対等級は 1.5 度以下のデータを入れると明るくなり、4 ベスタの絶対等級は従来から言われている値より大凡 0.05-0.1mag 高いことが分かった。

次にハプケモデルを用いての解析を行った。ハプケモデルの解析には今回取得したデータに加えて Velichko et al. (2008) の 4 ベスタの V バンドのデータを用いて、解析を行った。過去の Bowell et al. (1989) の 4 ベスタのハプケモデルの値と今回の観測の値を比べると amplitude of the opposition effect と the width of the opposition peak は低くなった。IAU-HG システムの時と同様も低位相角のデータの存在が原因である。

本研究のデータと低位相角データがある小惑星のデータのみを用いて、geometric albedo と amplitude of the opposition effect・width of the opposition peak の関係性を調べると、負の相関があることが分かった。この事は高いアルベドの天体ほど低位相角の衝効果が鋭くなり、急である事を示している。衝突効果の原因は coherent backscattering mechanism と shadowing mechanism が考えられるが、高いアルベドの天体ほど coherent backscattering mechanism が効いてくるとい事が考えられる。

テンペル第2彗星のダスト雲形成

○猿楽祐樹¹, 石黒正晃², 花山秀和³, 臼井文彦¹, 上野宗孝¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²ソウル大学, ³国立天文台

彗星から放出されたダストは、放出速度、太陽輻射圧の効果の違いによって異なる軌道をとる。また、太陽からの距離や自転の効果によって変化する放出量、観測時の位置関係によって、様々な形状のダスト雲が観測される。このように彗星のダスト雲は、彗星活動の履歴を反映したものであり、その形状を調べることで、彗星活動の履歴をさかのぼって知ることができる。近年では、彗星のアウトバーストや小天体同士の衝突でできたと考えられるダスト雲の観測例も増えており、ダスト雲の観測は、母天体上で起きた現象の解明にも役立つ(本講演会、石黒他)。

テンペル第2彗星は、(1)軌道の大部分でコマの明るさは無視できるほど暗い、(2)コマの形状が偏っている、(3)非重力効果が小さい、(4)自転周期が安定している、などの理由から、質量当たりの活動が弱い彗星と考えられる。その一方で、赤外線天文衛星 IRAS や Spitzer 宇宙望遠鏡によるダストトレイルの観測から、mm-cm サイズの大きいダストを大量に放出していることも分かっている。我々は、2010年に観測好機を迎えたテンペル第2彗星の撮像観測を行い、どのようなダスト放出によって、観測されたダスト雲の形状を説明できるかを調べた。

観測は、2010年10月2-7日に、木曽観測所105cmシュミット望遠鏡を用いて行った。彗星の軌道に沿って視野をずらしながら観測を行い、核の前後2.5度、計5度をカバーした。その結果、今回の回帰によって形成された塵雲(コマ/テイル)だけでなく、前回の回帰時に放出された塵で形成されたと考えられるダストトレイルも検出された。

サイズ分布、放出速度、放出率をパラメータとして、放出されたダストの軌道を計算し、ダスト雲のモデル画像を作成する。その中から、観測画像をうまく再現できるパラメータの組み合わせを探した。テンペル第2彗星は、自転軸の方向、活動領域の位置が推定されている(Sekanina 1991)。様々な方向へのダスト放出を模擬した結果、コマ/テイルおよび、ダストトレイルの形成についても、Sekaninaによって推定された自転軸と活動領域を用いたモデルによってよく再現できた。得られたパラメータから、この彗星のダスト放出の特徴について議論する。

213P/Van Ness の観測とダスト構造

○花山 秀和¹ 石黒 正晃² 猿楽 祐樹³ 渡部 潤一¹

¹国立天文台 ²ソウル大学 ³宇宙航空研究開発機構

213P/Van Ness は 2005 年にアメリカのローウェル天文台で発見され、2011 年に回帰した周期 6.3 年の短周期彗星である。この彗星は、核周辺に淡く広がったダスト構造を持つ一方で、近日点通過後の 2011 年 7 月にはエッジオン付近で観測できる位置関係にあり、軌道に沿って細長く伸びたダスト構造も見つかっている。

2011 年 8 月下旬から 9 月上旬にかけて、213P/Van Ness は地球から 1.2AU の距離にまで近づき明るくなるため、我々は石垣島天文台の口径 105cm むりかぶし望遠鏡と MITSuME3 色同時撮像カメラを用いて 7 月中旬から 213P/Van Ness の観測を行った。その中で、7 月 29 日に観測した細長いダスト構造の一部に、213P/Van Ness 本体の分裂核と思われる彗星状の天体(以下、B 核と呼ぶ)を新たに発見した。

発見時の B 核の明るさは 20 等で視直径は 3"、尾の長さは 0.5' 程度、213P/Van Ness(明るさ 13 等)との離角は 5.1' であった。親彗星核の大きさを 0.5-3km と仮定すると、B 核の大きさは 20-100m と見積もることができる。

213P/Van Ness は短周期彗星であるが、2005 年まで発見されず、また発見からまもなくして急激に増光したことが明らかになっている。本講演では 213P/Van Ness と B 核について、観測結果を述べるとともに、B 核の分裂時期を推定し、アウトバーストとの関連について議論する。

107P/Wilson-Harrington の可視測光観測： タンブリング運動あるいは衛星を伴う可能性

○ 浦川聖太郎¹、阿部新助²、石黒正晃³、北里宏平⁴、黒田大介⁵、長谷川直⁶、
太田耕司⁷、河合誠之⁸、清水康広⁵、長山省吾⁵、柳澤顕史⁵、吉田道利⁹、吉川真⁶、
JSGA 107P 観測チーム¹

¹ 日本スペースガード協会、² 台湾中央大学、³ ソウル大学、⁴ 会津大学、⁵ 国立天文台、⁶ JAXA、

⁷ 京都大学、⁸ 東京工業大学、⁹ 広島大学

近年、彗星のようにダストやガスを放出する小惑星が小惑星帯で発見されている。これらの天体は、main-belt comets (MBCs) と呼ばれている。MBCsは、彗星のように揮発性物質に富み、有機物を含むことが期待される天体が小惑星帯に存在することを示唆しており、注目されている。MBCsの彗星活動を起こす原因として、他の太陽系小天体が衝突し表面物質が放出されたという説や、あるいはその衝突により、表層下の揮発性物質が表面に露出され、熱的な影響も合わせて彗星活動の原因となったという説が考えられている。一方、地球近傍小天体の中には、過去に彗星活動を示し、その後ダストやガスの放出が検出されず、見かけ上、小惑星に遷移した天体(彗星・小惑星遷移天体/枯渇彗星核天体)がある。遷移の要因のひとつとして、揮発性物質の枯渇が考えられている。

代表的な彗星・小惑星遷移天体に107P/Wilson-Harrington(107P)がある。107Pは、1949年の発見時に彗星活動が見られたものの、その後ダストやガスの放出は検出されておらず、4015番の小惑星番号も合わせて与えられている。軌道は、 $a=2.638\text{AU}$ 、 $e=0.624$ 、 $i=2.78^\circ$ であり、アポロ群地球近傍小天体に分類される。107Pは、枯渇彗星核と考えられている一方で、その軌道力学的な起源は木星族彗星である可能性が4%、小惑星帯にある可能性が65%と報告されている(Bottke et al. 2002)。従って、107Pは元来、MBCsのような天体であり、その彗星活動の原因が他天体衝突であることも十分考えられる。彗星活動の原因が、他天体衝突であれば、自転運動に非主軸回転(タンブリング)が起こっていると思われる。我々は、国内外の5つの中小口径望遠鏡を用いて、107Pの可視測光観測を行い、そのライトカーブから自転状態や形状の推定を行った。その結果、ライトカーブには6回の光度ピークがあり、自転周期が0.2979日であることが分かった。また、1周期の間に自転周期と3:1の関係にある0.0993日の微小な光度変化を検出した。ライトカーブから次のような2つのモデルが考えられる。1) 107Pはタンブリングを起こしている。その形状の三軸比は1.0:1.0:1.6 の縦長の楕円体をしている。2) 107P はタンブリングを起こしていない。その形状の三軸比は1.5:1.0:1.0 の横長の楕円体をしている。6回のピークは形状を反映したものである。あるいは衛星を伴っている可能性を示唆している。

メインベルト小惑星(596) Scheila 表面での 衝突に関する観測的証拠

石黒 正晃¹, 花山 秀和², 長谷川 直³, 猿楽 裕樹³, 渡部 潤一², 藤原 英明², 寺田 宏²,
河合 誠之⁴, 柳澤 顕史², 黒田 大介², 宮地 竹史², 福島 英雄², 太田 耕司⁵,
浜野和 博巳⁶, 中村 昭子⁷, Henry Hsieh⁸, Jeremie Vaubailon⁹, Junhan Kim¹, Jeonghyun Pyo¹⁰

¹ソウル大学、²国立天文台、³宇宙研、⁴東工大、⁵京大、⁶浜野和天文台、⁷神戸大
⁸ハワイ大学、⁹パリ天文台、¹⁰KASI

2010 年 12 月 11 日、メインベルト小惑星(596)Scheila 近傍に奇妙な形状の尾が発見された[1]。それらは、通常観測される彗星の尾と異なり、3つの異なる方向に延びた成分で構成されていた[2-3]。私たちの研究グループでは、石垣島天文台むりかぶし望遠鏡、国立天文台すばる望遠鏡、ハワイ大学 2.2m 望遠鏡を用いて、約 3 ヶ月にわたり(596)Scheila の撮像観測を実施した。

まず、チリ雲の形状は、観測波長に依らず一定であることがわかった。更に、そのスペクトルは(596)Scheila 本体とよく似ていた。つまり、尾として観測される構造は、ダスト粒子による散乱光であると考えられる。このダスト雲は、時間と共に次第に拡がり、発見から 2 ヶ月で検出することができなくなってきた。ところが、その後も淡い直線上のチリ雲が(596)Scheila 本体から延びていることに気が付いた。この構造の検出に成功したのは、本研究グループがはじめてである。この構造のシンクロン解析から、ダストの放出時刻は 2011 年 12 月 3.5 日 $\pm$ 1.0 日とわかった。また、シンサイン解析から、最大で約 100 μ m のダスト粒子が放出されたことも明らかになった。更に、浜野和天文台における小惑星本体の自転周期の観測から、この小惑星の自転周期は、2006 年 1 月と比較して数秒のずれもないことがわかった。その一方で、ライトカーブの形状が変化していることが判明した。

他の研究グループによる分光観測でガス輝線が観測されなかったことから、ダスト放出の原因は、氷の昇華であると考え難い[4]。更に、自転周期が変化していないことから、自転速度増大による崩壊の可能性は除外できる。(596)Scheila サイズ（直径 120km[5]）の天体表面から、100 μ m サイズの固体微粒子がレビテーションによって放出されることはない。したがって、何らかの天体が(596)Scheila に衝突したと考えるのが適当である[2]。

3つの奇妙なダスト雲の形状を再現するためのモデル計算を行った。その結果、インパクトコーンとダウンレンジブリュームによるダスト放出を仮定すると、観測画像をうまく再現することができた。45° の斜め衝突を仮定すると、インパクトは(596)Scheila 後方から衝突したと推定される。また、ダスト粒子の速度から、衝突地点は脆い物質で構成されていたと推測できる。この結果は、(596)Scheila 本体が始源的な小惑星（T 型）に分類されていることと矛盾しない。以上の観測・計算結果を踏まえ、数十メートルサイズの天体が、2011 年 12 月 3 日に(596)Scheila 表面に衝突したと結論づけた[6]。

References:

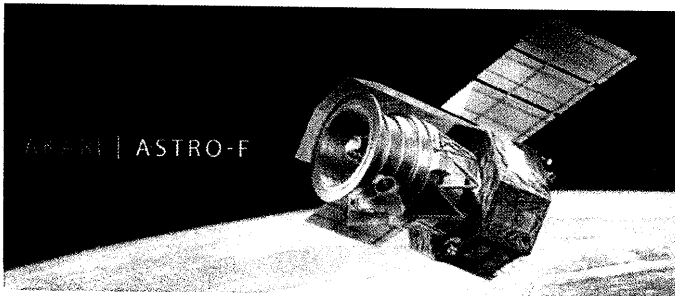
- [1] Larson et al. CBET 2583, 1, 2010, [2] Ishiguro et al. ApJL (in press), [3] Jewitt et al. ApJ 733, L4, 2011, [4] Bodewits et al., ApJ 733, L3, 2011, [5] Usui et al. PASJ (in press), [6] Ishiguro et al. *submitted to ApJL*

S11-06

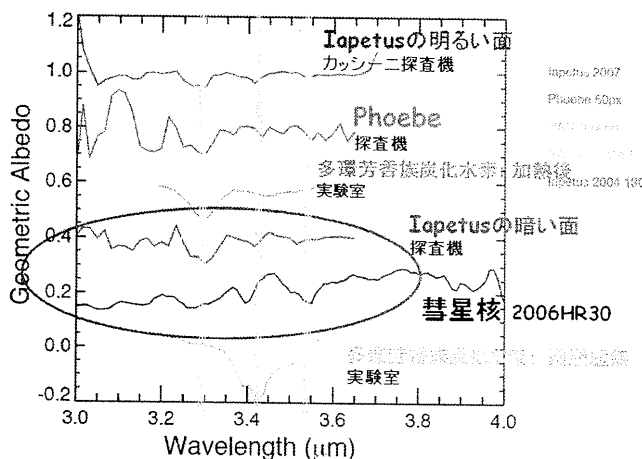
あかりによる太陽系外縁天体と特異小惑星の 中間-遠赤外線測光観測

○関口朋彦¹、長谷川直²、臼井文彦²、大坪貴文³

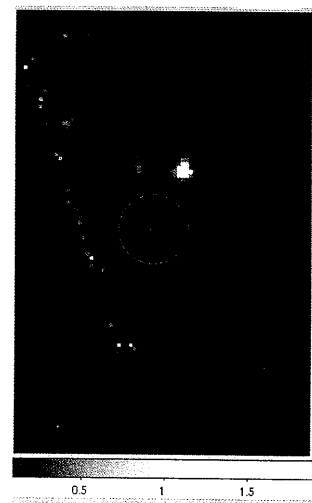
¹北海道教育大学、²ISAS/JAXA、³東北大学



赤外線衛星あかり (ASTRO-F) は太陽同期極軌道 (高度 750km) を取る有効口径 68.5cm の天文観測衛星である。我々は太陽系の微惑星候補天体である太陽系外縁天体や、彗星のような軌道を取る特異小惑星に対する赤外線観測を遂行した。日心距離の大きな準惑星や TNOs などの遠方の低温天体に対しては遠赤外線サーベイヤ (FIS) を用いた遠赤外線測光観測を行い、日心距離が 15AU 以内のケンタウルス天体に対しては FIS による観測に加え、近・中間赤外線カメラ (IRC) による中間赤外線測光観測、また近日点距離の小さな特異小惑星に対しては IRC による中間赤外線の測光観測に加え、IRC による近赤外線分光観測を行っている。今回、Usui et al. (2011, in press) によって発表された IRC サーベイによる小惑星の観測結果を用いて、同様の解析手法を用いて小天体のサイズとアルベドに対する再解析を行ったのでここに報告する。準惑星 : Eris (2003 UB313)、Makemake (2005 FY9)、Haumea (2003 EL61) の 3 天体は FIS の観測からは検出することができなかった。TNOs とケンタウルス天体の FIS の観測では、一部 80_μm 帯での検出に成功し、小惑星の標準的熱モデル (STM) を採用した熱特性解析の結果、Chiron, Chariklo, Huya の有効直径 (D) と幾何学アルベド (pv) はそれぞれ、[D=250 km, pv=0.07], [D=219 km, pv=0.08], [D=384 km, pv=0.10] が得られている。本講演では、これまで天文学会で報告してきた内容を一部抜粋して取り上げ、IRC サーベイによる多数の小惑星の観測結果との比較検討を行い、解析結果における誤差の評価も合わせて報告する。



裸の彗星核天体(不活動彗星) P/2006 HR30 のあかり近赤外線(3μm 帯)分光の例: カッシーニ探査機による土星の衛星の分光との比較



TNO Huya のあかり遠赤外線(80μm 帯)撮像の例

赤外線天文衛星「あかり」による小惑星カタログ AcuA

○臼井 文彦¹、長谷川 直¹、黒田 大介²、石黒 正晃³、大坪 貴文⁴、T.G. Mueller⁵

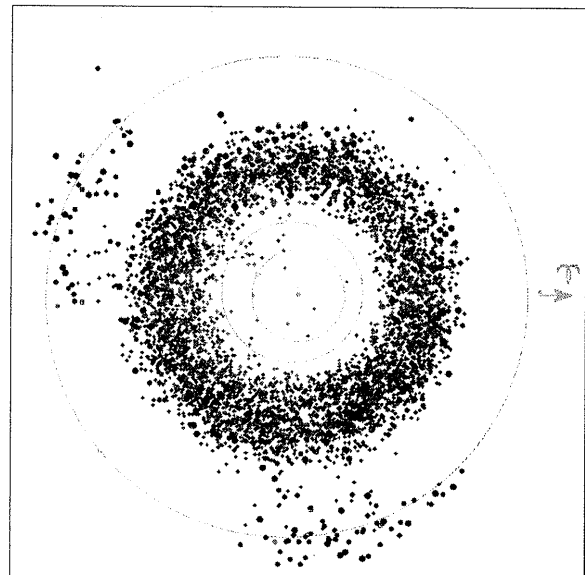
¹ISAS/JAXA、²国立天文台、³ソウル大、⁴東北大、⁵MPE

我々の太陽系は、太陽と8つの惑星と5つの準惑星、それらに付随する衛星の他に、小惑星、彗星、惑星間塵などで構成されている。この中で、現在までに知られている小惑星は約50万個になるが、大部分はその形成以降に浸食・熱変成・再熔融をしていないので太陽系形成時の情報を保持していると考えられている。そのため、小惑星の物理状態を調べることは非常に重要である。

本研究では、赤外線天文衛星「あかり」搭載の近・中間赤外線カメラによって取得された全天サーベイ観測データに基づいて、軌道要素が既知の小惑星に対してサイズおよびアルベドに関するカタログ構築を行った。「あかり」は2006年2月に打ち上げられ、全天サーベイ観測は冷媒の液体ヘリウムが枯渇する2007年8月まで継続された。この間に全天の97%以上のサーベイ観測を実施した。この観測データを元に赤外線天体カタログが作られている(Ishihara et al. 2010)。これには、比較的低温の星や、塵を含む暗黒星雲、あるいはそれらの集合体である銀河などがまとめられている。一方、小惑星は移動天体なので、同一位置座標上での複数回の検出確認を行っている点源カタログには掲載されていない。そのため、サーベイデータの間接生成物を使用し、独自の解析手法を開発して小惑星の抽出を行った。

先行研究として1983年米英蘭によって打ち上げられたIRAS衛星では約2,200個の小惑星についてカタログ化が行われていた

(Tedesco et al. 2002)が、本研究ではその数を2倍以上の、5,120個に増やすことができた(Usui et al. 2011)。これは全天サーベイ観測に基づいているため、黄経方向に無バイアスに小惑星がサンプルされている。図は、「あかり」で検出された小惑星の分布を、2006年2月22日における位置で黄道面上に投影したものである。地球、火星、および木星軌道も描き加えてある。検出されているのは中間赤外線領域で明るいメインベルト・近地球型およびトロヤ群の小惑星である。



Bensour 隕石 (LL6, LL5) の化学組成・鉱物組成の不均一性：はや

ぶさサンプル分析との関連

○¹永野宗、¹土山明、²下林典正、³瀬戸雄介、¹今井悠太、¹野口遼、¹松本徹、¹松野淳也¹大阪大学大学院理学研究科、²京都大学大学院理学研究科、³神戸大学大学院理学研究科

昨年6月小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰ったサンプルは、大きくとも100 μ m程度であり、多くは10 μ m以下の粒子である[1]。試料が微小な場合、試料から得ることのできる化学組成や含まれる鉱物の割合はイトカワ表面を構成する物質を代表しないと思われる。そこで、試料が小さくなるとバルクと比べて化学組成や鉱物組成がどのように変化するかを、隕石組織と関連して調べる必要がある。はやぶさ探査機の赤外観測によりイトカワの表面物質はコンドライト隕石(LL5, 6)に類似していると考えられている[2]。そこで、本研究ではBensour 隕石(LL6)とALH-78109(LL5)をもちいて、元素マッピングをおこなうことにより、サンプルサイズを小さくすると化学組成や鉱物組成がどの程度変動するかを定量的に調べた。元素マッピングは、研磨薄片上の約4 mm $\times$ 4 mmの領域2カ所において、13元素(Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Si, Ti)について行った。また、得られた元素マップから鉱物マップを作成した。

得られた元素マップおよび鉱物マップを、画像上において4分割、16分割と分割数を大きくしていき、各分割数で分割された領域での特性X線強度や鉱物モードの標準偏差を求めた。特性X線強度や鉱物モード、および分割数を増やしていくことによるこれらの標準偏差の変化は、2つの測定領域で大きく異なることはなく、今回測定した領域が隕石のおおよその平均的な特徴を代表していると考えられる。各元素について、特性X線強度で規格化した標準偏差が分割数を大きくするとどのように増加するかを比較した。P, NiやCrといった存在度の小さな元素は、SiやMgといった存在度の大きな元素に比べて、規格化した標準偏差が大きい。これは、このような存在度の小さな元素が局所的に分散して存在している特定の鉱物に濃集しているためである。一方、存在度が小さくても規格化した標準偏差が比較的小さい元素(K, Mn, Ti)もあり、これらの元素はモードの大きな鉱物中に低濃度で存在していることによるものである。今回の解析により、はやぶさサンプルの初期分析で分配された粒子サイズ[3]において、LL6 コンドライトで各元素のばらつきがどの程度になるかを定量的に予想することができる。

[1] Nakamura T. et al. (2011) abstract in 42nd LPSC. [2] Abe M. et al. *Science*, **312**, 1334-1338.

[3] Tsuchiyama A. et al. (2011) abstract in this conference.

はやぶさ帰還試料キュレーションの現状

○ 矢田 達 (JSPEC/ISAS/JAXA)、藤村 彰夫 (JSPEC/ISAS/JAXA)、安部 正真 (ISAS/JSPEC/JAXA)、岡田達明 (ISAS/JSPEC/JAXA)、石橋之宏 (JSPEC/JAXA)、白井慶 (ISAS/JAXA)、上相真之 (JSPEC/JAXA)、唐牛讓 (JSPEC/JAXA)、八亀彰吾 (東大・理)、中村智樹 (東北大・理)、野口高明 (茨城大・理)、岡崎隆司 (九州大・理)、向井利典 (JAXA)、上野宗孝 (ISAS/JAXA)、吉川 真 (ISAS/JSPEC/JAXA)、川口 淳一郎 (JSPEC/ISAS/JAXA)

小惑星サンプルリターン探査は、理学的・工学的意義を併せ持つ、波及分野の広い科学探査である。S型小惑星イトカワのリモートセンシング探査・試料採取を行った小惑星探査機はやぶさは、2010年6月にその再突入カプセルを地球に帰還させた[1,2]。JAXA惑星物質試料受入設備ではクリーンチェンバー内における高真空環境でのサンプルコンテナの開封、高純度窒素雰囲気でのサンプルキャッチャー内からの粒子の回収、光学及び電子顕微鏡による初期記載を行ってきた[3]。

我々は、サンプルコンテナ内のキャッチャーにより粒子を回収するために、高純度窒素環境にあるチェンバー内に静電制御マニピュレーターシステムを開発・導入し、実運用を行っている。このマニピュレーターを使ってキャッチャーからの直接の粒子回収を試みたが、Al金属製のキャッチャー表面での粒子の認識が難しい事、キャッチャーの構造が複雑で、マニピュレーターの針を安全にキャッチャー内面に近づけるのが難しいなどの理由から非効率的だった。

より効率的な回収を目指して、キャッチャー内面をテフロン性のヘラでかき、そのヘラを直接電子顕微鏡に導入して分析を行う方法を試みた。その結果、テフロンへらにかき取られた粒子の半定量分析により、1500個以上の粒子について、その鉱物組み合わせ・量比などからそれらの粒子がイトカワ起源であるという結果を得た[4]。しかしながら、ヘラ上に回収された粒子の大部分が粒径 $10\mu\text{m}$ 以下と上述のマニピュレーターでは小さすぎて扱えないため、試料配分の供する試料の回収は現時点では出来ていない。

そこで、キャッチャーに石英ガラス製の板を取り付けて、上下反転してキャッチャーに振動を与えることでキャッチャー内粒子を板上に落下させ、石英板を回収する方法を試みた。その結果、キャッチャーA室、B室それぞれの回収を行った石英板上に合計2000個以上の $10\mu\text{m}$ 以上の粒子が光学顕微鏡により確認された。

その石英板からマニピュレーターにより1個ずつ粒子を拾い出し、電子顕微鏡による半定量元素分析で、ケイ酸塩鉱物的組成を持つものをイトカワ起源である可能性の高い粒子として同定していった。これまでにA、B室合計150個ほどの粒子の回収・元素分析を行い、その内50個強のキャッチャーA室粒子の初期分析チームへの配分を実施した。

今年中に初期分析チームへのキャッチャーB室粒子の配分とNASAへの粒子配分を実施する予定である。更に来年には第1回の国際公募分析のための粒子配分を実施する予定である。

References: [1] Fujiwara A. et al. 2006. Science 312, 1338. [2] Abe M. et al. 2011. Abstract #1638. 42nd Lunar & Planet. Sci. Conf. [3] Fujimura A. et al. 2011. Abstract #1829. 42nd Lunar & Planet. Sci. Conf. [4] Nakamura T. et al. 2011. Abstract #1766. 42nd Lunar & Planet. Sci. Conf.

イトカワ母天体の材料物質

Primitive materials of the parent body of asteroid Itokawa

○中村智樹¹、野口高明²、田中雅彦³、Mike Zolensky⁴、木村真²、中藤亜衣子¹、
大神稔皓¹、石田初美¹、土山明⁵、岡崎隆司⁶、Scott Sandford⁷、脇田茂¹、は
やぶさキュレーションチーム⁸

¹ 東北大学・² 茨城大学・³ ARES, NASA・⁴ 物質・材料研究機構・⁵ 大阪大学・⁶
九州大学・⁷ ARC, NASA・⁸ JAXA, 宇宙科学研究所

小惑星探査機はやぶさにより持ち帰られた微粒子約50試料の初期分析の結果、小惑星イトカワの起源や形成過程 [1-3]、レゴリスの形成進化 [4]、宇宙風化作用と太陽風照射史 [5-6]について、さまざまな成果が得られた。本学会の一連の講演では、イトカワの過去から現在に至るプロセスを時間経過の順に紹介する予定である。

我々の研究グループでは、38試料の粒子の鉱物学的研究を行った。その結果、これらの粒子を構成する鉱物種、および鉱物化学組成が平衡LLコンドライトと同一であることがわかった。しかしながら、鉱物学的特徴が粒子間である程度の違うことがわかった。38試料のうち、32試料がLL5-6コンドライトの特徴を示す（高熱変成タイプと分類）のに対し、残りの6試料は加熱温度の低い岩石学的タイプ4の特徴を示した（低熱変成タイプと分類）。このことは、はやぶさが回収した一部の粒子は、天体内部での強い熱変成をまぬがれ、変成前の物質の情報を残していることを意味する。

輝石温度計より、高変成タイプは約820℃で長期間の熱変成を受けていることがわかった。この温度に到達するには、現在のイトカワよりも大きな天体が必要である。つまり、イトカワには母天体があり、その母天体が衝突現象により破壊され、再集積して現在のイトカワになったと考えられる。

低熱変成タイプの粒子を詳細に分析した結果、これらの粒子のカンラン石、輝石は高変成タイプよりもMgに富み、メソスタシスガラスを保存しており、コンドリュールの痕跡を残している粒子も見つかった。また、強い衝撃変成を受けている粒子が多いことがわかった。これらのことは、低熱変成度の粒子は、原始惑星系円盤の固体粒子の情報を残しており、イトカワ母天体表層に存在していた時に、そこで強い衝撃を受けていたことを示唆する。

References: [1] T. Nakamura *et al.* *Science* in press. [2] H. Yurimoto *et al.* *Science* in press. [3] M. Ebihara *et al.* *Science* in press. [4] T. Tsuchiyama *et al.* *Science* in press. [5] T. Noguchi *et al.* *Science* in press. [6] K. Nagao *et al.* *Science* in press.

イトカワ母天体の熱進化

○ 坂本尚義¹, 中村智樹², 伊藤正一¹, 坂本直哉¹, 阿部憲一¹, 橋口未奈子¹, 片山樹里¹, 加藤千図¹, 川崎教行¹, 小林幸雄¹, 女池竜二¹, 朴昌根¹, 武井将志¹, 若木重行¹, 山本広佑¹, 橋爪光³, 土山明³, 瀬戸雄介³, 長尾敬介⁵, 野口高明⁶, 海老原充⁷, 奈良岡浩⁸, 北島富美雄⁸, 岡崎隆司⁸, T. R. Ireland⁹, M. E. Zolensky¹⁰, 安部正真¹¹, 藤村彰夫¹¹, 川口淳一郎¹¹, 向井利典¹¹, 上相真之¹¹, 矢田達¹¹, 吉川真¹¹

¹ 北海道大学, ² 東北大学, ³ 大阪大学, ⁴ 神戸大学, ⁵ 東京大学, ⁶ 茨城大学, ⁷ 首都大学東京, ⁸ 九州大学, ⁹ オーストラリア国立大学, ¹⁰ NASA, ¹¹ JAXA

はやぶさにより持ち帰られた試料を用いてイトカワ物質の熱進化を研究した。そのため、鉱物組織、鉱物間・鉱物内の組成分布、微量元素分布、酸素同位体分布、マグネシウム同位体分布を測定した。

イトカワ微粒子は、少数の例外を除き、次のような特徴を呈する。平衡普通いん石の鉱物組み合わせをもち、平均粒径数十ミクロンの焼結組織を示す。鉱物内の化学組成の不均一分布は見られない。鉱物間の化学組成は化学平衡分布を示す。希土類元素を含む微量元素組成は鉱物間において化学平衡分配と調和的である。酸素同位体組成は鉱物毎にほぼ一定の値を示す。鉱物間の酸素同位体組成は化学平衡がほぼ成り立っている。

以上の結果は、イトカワ微粒子は変成作用をうけていることを示している。鉱物組成より見積もられた変成温度は約 800°C であり、酸素同位体組成より求められた温度は約 650°C である。化学組成温度より酸素同位体温度の方が低温に見積もられる点は、酸素同位体組成にやや不均一が見られることと調和的である。この小さな酸素同位体の不均一は、酸素の自己拡散係数が Mg-Fe の交換拡散係数より小さいことに対応していると考えられる。このような高温の変成作用を差渡し 500m あまりのイトカワで起こすことは難しいと考えられる。

以上の結果から、変成作用による体積拡散により Mg 同位体は微粒子内で一様分布をしていることがわかる。初期太陽系には ²⁶Al が存在していたので、Mg 同位体分析により ²⁶Al の存在量を見積もることにより変成作用が起こった時期を推定できる。

²⁶Al-²⁶Mg 系のアイソクロンをオリビン、斜方輝石、斜長石のマグネシウム同位体分析により求めた。Mg 初期同位体比は $\delta^{26}\text{Mg}=0.00\pm0.07(2\sigma)\%$, ²⁶Al/²⁷Al 初期値は $3\pm8(2\sigma)\times10^{-8}$ であった。この結果からイトカワ微粒子の変成作用は CAI 形成後 630 万年以降であったことが示される。

以上の結果より次のような熱進化を考えることができる。はやぶさ採取試料は、小惑星イトカワ形成以前に、数十キロメートルサイズの天体（イトカワ母天体）内部に位置しており、イトカワ母天体は太陽系形成後数千万年以内に母天体中心部 800°C 以上の熱変成を経験した。

イトカワ母天体物質の起源

○海老原充¹, 関本俊², 白井直樹¹, 浜島靖典³, 山本政儀³, 熊谷和也¹, 大浦泰嗣¹,
Trevor Ireland⁴, 北島富美雄⁵, 長尾敬介⁶, 中村智樹⁷, 奈良岡浩⁵, 野口高明⁸, 岡崎隆司⁵,
土山明⁹, 上相真之⁹, 塚本尚義¹⁰, Michael Zolensky¹¹, 安部正真¹², 藤村彰夫¹², 向井利
典¹², 矢田達¹²

¹ 首都大, ² 京都大, ³ 金沢大, ⁴ ANU, ⁵ 九大, ⁶ 東大, ⁷ 東北大, ⁸ 茨城大, ⁹ 阪大, ¹⁰ 北大,
¹¹ NASA, ¹² JAXA

はやぶさ探査機は2003年5月に打ち上げられ、2005年9月に小惑星イトカワに到着した。惑星表面での種々の観察の後、2010年6月に地球に帰還した。試料回収カプセルが無事に回収され、顕微鏡観察の結果、1500個以上の粒子が見いだされたが、その多くが地球外物質と判断された[1]。本研究では回収された試料粒子の中から最大級の粒子1個の元素組成を中性子放射化分析法(INAA)で元素組成を求めた。中性子照射は京都大学原子炉実験所研究用原子炉で行い、中性子照射後、試料から放出されるガンマ線測定を同実験所、及び金沢大学低レベル放射能実験施設で行った。

測定の結果、Na, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, Irの8元素の定量値を得ることができた。分析した粒子は橄欖石からなり、EPMAで求めた表面物質のFe/Mg比とINAAによるFeの質量から、この粒子の全岩質量を求めることができた。INAAによる定量ではFe, Scが非常に正確に求めることができた。地球のように金属核を持つ惑星ではかなりのFeは中心核に分配されているために、そのケイ酸塩試料中のFe/Sc比はコンドライト隕石の値よりも小さい。またFeはScに比べて橄欖石に適合するので、橄欖石中のFe/Sc比はケイ酸塩全岩の値よりも大きくなる。イトカワから回収された試料のFe/Sc比は地球や火星の橄欖石の値よりも大きく、普通コンドライト質隕石から分離した橄欖石の値に似ていた。

イトカワ試料中のCo, Ni, Irの含有量は普通コンドライトから分離した橄欖石の値より高いことが分かった。これら元素が親鉄元素であることから、これらの元素は微小金属粒に含まれていると仮定し、その質量として1~2質量%の値を得た。このイトカワ試料中の金属が持つIr/Ni比, Ir/Co比はCIコンドライトの持つ値よりも約5倍小さいことが分かった。同様のNi, Co, Ir間の分別は非平衡普通隕石中のコンドルールでもみつかっており[2]、イトカワの表層物質中には非平衡コンドライトに似た物質が存在することが分かった[3]。

[1] Nakamura T. et al. (2011) Science (in press). [2] Grossman J. N. and Wasson J. T. (1982) GCA 46, 1081-1099. [3] Ebihara M et al. (2011) Science (in press).

イトカワ上の礫と微粒子の組織が語るイトカワの過去

○野口高明¹, 中村智樹², 木村眞¹, Mike Zolensky³, 田中雅彦⁴, 土山明⁵, 岡崎隆司⁶,
はやぶさキュレーションチーム⁷

¹茨城大学・²東北大学・³ARES, NASA・⁴物質・材料研究機構・⁵大阪大学・⁶九州大学・
⁷JAXA, 宇宙科学研究所

はやぶさ探査機搭載のマルチバンド分光カメラ AMICA による小惑星イトカワ表面の画像は、イトカワ表面の 80%が、ほとんど細粒物質によって覆われていない岩塊（ボルダー）が占める地形であることを明らかにした[1, 2]。小惑星エロスの場合、ボルダーが周囲のレゴリスと色調に違いがないことから、ボルダー表面に細粒のレゴリス物質の薄層が付着していると考えられるのとは異なる[3]。イトカワは平均半径 160 m という小天体であるため、平均脱出速度はおおよそ 0.2 m/s しかない[2]。このため、イトカワ表面に他の天体が衝突して岩片が放出されても多くはイトカワに集積することができず散逸し、ボルダー表面に細粒物質はほとんど存在できないと考えられる。細粒物質を欠くため、タッチダウンリハーサル時に撮像された像から、ボルダーの組織を調べることができた[4]。イトカワ表面のボルダーは、大まかには 2 通りに分けられる。一つは、ボルダー表面が凹凸に富み、不均質な破壊強度を持つと思われるものである。凹凸の著しいものでは突出部分それぞれが違う明度を持ち、突出部を埋める部分は比較的明度が高い。こうした組織から、相対的に硬い岩片の間を細粒な物質が埋めた角礫岩と考えても矛盾はないだろう。また、非常に均質な破面を持ち、かなり均質な破壊強度をもつことを示唆するボルダーも存在する。

イトカワから回収された塵試料は、LL コンドライト隕石に非常によく似た岩石・鉱物学的特徴を持っている[5]。ボルダーの多くが角礫岩的組織を持つことと、LL コンドライトでは角礫岩がおおよそ 50%を占めていることを考慮すると、回収された塵粒子の多くは、角礫岩的組織を持つボルダーの微細な破片である可能性があるだろう。一方、後者の組織は一般的な LL コンドライトには見られない。衝撃によってかなり溶融した普通コンドライト隕石は、そうでないものよりも均質でより高い破壊強度を持つ[6]ことを考慮すると、後者のボルダーはそのような隕石と類似の岩質を持っているかもしれない。現在のところ、メルトより結晶化したことが確実な塵試料はないが、今後見つかる可能性はあるだろう。もし、角礫岩的組織という解釈が正しいならば、これらのボルダーは大きさ数十 km 以上の天体でなければ形成されない[4]。イトカワ塵粒子が数十 km はある天体の内部で形成されたものがほとんどであること[5]を考慮すると、イトカワの母天体の表面近くに、すでに天体内部に存在した岩塊が存在し、それらの破片が角礫岩になったか、母天体のカタストロフィックな破壊の際に天体内部の岩石が角礫岩となったかといった可能性があるだろう。

AMICA 画像は、MUSES-C Regio を敷き詰めるペブルサイズの礫の表面も細粒物質でおおわれてはいないことが示していたが[7]、イトカワ塵粒子は回収された。回収された試料が MUSES-C Regio のペブルが隕石の衝突で破壊されて発生した微小な岩片のわずかな生き残りか、巨礫が低重力下で移動している間に摩耗し形成されたものかといった、塵粒子の形成メカニズムを検討することが、粒子の起源の詳細な検討に必要となってくるだろう。

References: [1] J. Saito *et al.*, *Science* **312**, 1341-1344 (2006). [2] H. Miyamoto *et al.*, *Science* **316**, 1011-1014 (2007). [3] S. Murchie *et al.*, *Icarus* **155**, 145-168 (2002). [4] T. Noguchi *et al.*, *Icarus* **206**, 319-326 (2010). [5] T. Nakamura *et al.* *Science in press*. [6] M. Miyamoto *et al.*, *Mem. Natl. Inst. Polar Res.* **25**, 331-343 (1983). [7] H. Yano *et al.*, *Science* **312**, 1350-1353 (2006).

イトカワでのレゴリス生成と進化

○土山 明¹、上相真之²、松島亘志³、道上達弘⁴、門野敏彦⁵、中村智樹⁶、上杉健太郎⁷、中野司⁸、Scott A. Sandford⁹、野口 遼¹、松本 徹¹、松野淳也¹、永野 崇¹、今井悠太¹、竹内晃久⁷、鈴木芳生⁷、大神稔皓⁶、片桐 淳³、海老原 充¹⁰、Trevor Ireland¹¹、北島富美雄¹²、長尾敬介¹³、奈良岡 浩¹²、野口高明¹⁴、岡崎隆司¹²、塚本尚義¹⁵、Michael Zolensky¹⁶、はやぶさキューレーションチーム²

(¹ 阪大院理、² JAXA-ISAS、³ 筑波大院システム情報工学、⁴ 福島高専、⁵ 阪大レーザー研、⁶ 東北大院理、⁷ Spring-8/JASRI、⁸ GSJ/AIST、⁹ NASA-AMES、¹⁰ 首都大院理工、¹¹ ANU、¹² 九大院理、¹³ 東大地殻化学、¹⁴ 茨城大理、¹⁵ 北大院理、¹⁶ NASA-JSC) ¹

はやぶさ探査機により小惑星イトカワの MUSES-C Regio と呼ばれる微細粒子から成る地域より採取されたサンプルは、2010 年 6 月に地球に帰還した。現在、少なくとも数 100 μm 以下のイトカワ起源と考えられる微細粒子が 1500 個以上見出されている[1]。これらは、小惑星からはじめてもたらされたサンプルであると同時に、アポロ計画やルナ計画によってもたらされた月のレゴリスに次ぐ、第 2 番目の地球外天体のレゴリスサンプルでもある。

これらの粒子の初期分析[1]のひとつとして、大型放射光施設である Spring-8 の BL47XU において、イトカワ粒子 1 粒ずつについてマイクロ CT 撮影をおこない（実効的な空間分解能は 200 あるいは 500 nm）、これらの 3 次元構造および外形を求めた[2]。これより求めた粒子全体の鉱物モード組成や密度は LL コンドライトのものと類似していた。粒子には、月レゴリスにみられるアグルーチネートのような大規模な融解組織は見られず、また粒子のサイズ分布や 3 次元形状分布も月レゴリスとは異なるものであった。得られた 10-100 μm 程度の粒子サイズの範囲では、その累積サイズ分布の対数での勾配はおおよそ -2 であり、MUSES-C Regio では mm-cm 程度のサイズのレゴリス粒子が多いというはやぶさ探査機の観測結果[3]を説明できる。一方、3 次元形状（3 軸比）分布は衝突破壊実験の破片の分布[4]と統計的に区別できず、今回分析した粒子がおそらくはイトカワ表面での衝突によってできたものであることを示唆している。また、イトカワ粒子の表面は通常シャープなエッジをもっているが、今回調べた粒子の 1/4 程度は一部丸みを帯びたエッジをもっていることがわかった。これらの丸みを帯びた粒子は、衝突破壊によってできた破片が、別の衝突で励起された振動で粒子が動くことにより（granular process）、機械的に摩耗されたと考えられる。

[1] Nakamura, T. et al. (2011). *Science*, in pres.

[2] Tsuchiyama, A. et al. (2011). *Science*, in pres.

[3] Yano, H. et al. (2006). *Science*, 312: 1350.

[4] Cappacioni, et al. (1982). *Nature*, 308: 832.

イトカワでのレゴリス年代学

○長尾敬介¹, 岡崎隆司², 中村智樹³, 三浦弥生¹, 大澤崇人⁴, 馬上謙一^{1,9}, 松田伸太郎¹, 海老原充⁵, Trevor. R. Ireland⁶, 北島富美雄², 奈良岡浩², 野口高明⁷, 土山明⁸, 上相真之^{8,11}, 塚本尚義⁹, Michael. E. Zolensky¹⁰, 白井慶¹¹, 安部正真¹¹, 矢田達¹¹, 石橋之宏¹¹, 藤村彰夫¹¹, 向井利典¹¹, 上野宗孝¹¹, 岡田達明¹¹, 吉川真¹¹, 川口淳一郎¹¹

¹ 東京大学・² 九州大学・³ 東北大学・⁴ 日本原子力研究開発機構・⁵ 首都大学東京・⁶ Australian National University・⁷ 茨城大学・⁸ 大阪大学・⁹ 北海道大学・¹⁰ NASA Johnson Space Center・

¹¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

はじめに: ハヤブサは2010年6月13日、小惑星イトカワの試料を採取して帰還した。イトカワは反射スペクトル観測に基づいて、LL5-6タイプのコンドライトに類似していると予想されていた[1]。試料はJAXA宇宙研に作られたキュレーション施設のグローブボックス内で、回収及び基礎的な分析が行われた後に初期分析に供された。試料への地球希ガス汚染や、水や酸素による変質を避けるため、グローブボックスは希ガス濃度が低いクリーンな窒素ガスで満たされている[2]。大気の無い小型小惑星表面物質は、比較的低エネルギー (keV) の太陽風 (SW) に曝されて、表面から数100 nm程度までその粒子が打ち込まれている。これに加えて、高エネルギー (MeV) 太陽宇宙線 (SCRs) と銀河宇宙線 (GCRs) 照射により、特徴的な同位体組成を持つ宇宙線照射起源核種が深さ1 m程度まで生成・蓄積される。これら宇宙線起源希ガスやSW希ガスは、試料がSWや宇宙線に曝された歴史、ひいては小型小惑星レゴリスのガーデニングや消失割合を示すと考えられる。

希ガス分析: 希ガス同位体分析した3個の粒子は比較的クリーンな表面を持つオリビンで、推定重量は0.06, 0.06, 0.12 μg である。試料からの希ガス抽出にはNd-YAGレーザーを用い、低温200と300 $^{\circ}\text{C}$ で加熱後に高温で溶解させた。希ガス同位体は、東京大学地殻化学実験施設のModified-VG5400 (MS-III)希ガス用質量分析計で測定した。

結果と考察: 3個の微粒子の全てに高濃度のHe, Ne, Arが検出され、その同位体組成および元素組成ともにSWとほぼ同様であった。この結果は、これら粒子がSWに直接曝された歴史を持つものであり、イトカワのレゴリス最表層から採取されたものであることを証明している。測定したSW-²⁰Ne濃度とSWのfluxを用いて推定したSW照射期間は数100年となる。段階加熱による希ガス放出プロファイルは、粒子ごとに異なるSWの打ち込みと消失の歴史を経験してきたことを示しているため、実際のSW照射積算時間はもっと長くなるはずであるが、数1000年を大きく上回することは無いであろう。高濃度のSWが存在することは、これら粒子が、レゴリスの最表層でSCRsとGCRsの両方の照射を受けたことを示しているにもかかわらず、宇宙線照射による核反応で生成する宇宙線起源²¹NeがNe同位体比測定精度内では検出されなかった。今回の測定精度であれば必ず検出出来るという²¹Ne濃度を仮定して求めた照射期間の上限値は、測定した粒子がレゴリス最表層に存在していた場合には3 Myr、表層付近で最も生成率が下がる5 g/cm²の深さで8 Myrとなるため、実際の照射期間は数分の1以下であろう。このような短い照射年代は、強い重力を持つ月のレゴリスで見られる数100 Myrという長い年代と対照的である。イトカワのような微小天体のレゴリスについて初めて求められた以上の結果は、表層物質が容易に太陽系空間に失われ続けていることを示していると考えられる。

References: [1] M. Abe *et al.*, Science **312**, 1334-1338 (2006). [2] R. Okazaki *et al.*, Lunar Planet. Sci. Conf. Abst. #1653 (2011).

イトカワにおける宇宙風化

○野口高明¹, 中村智樹², 木村眞¹, Mike Zolensky³, 田中雅彦⁴, 橋本隆仁⁵, 今野充⁵, 中藤亜衣子², 大神稔皓², 岡崎隆司⁶, はやぶさキュレーションチーム⁷

¹茨城大学・²東北大学・³ARES, NASA・⁴物質・材料研究機構・⁵日立ハイテクノロジーズ・⁶九州大学・⁷JAXA, 宇宙科学研究所

S型小惑星は、地球と交差する軌道を持つものもある近地球型小惑星の中では最も多いことが知られている。隕石は小惑星からもたらされたと考えられているにもかかわらず、隕石の中で最も数の多い普通コンドライトと、近地球小惑星に最も数の多いS型小惑星のスペクトルが合わないため、**S-type conundrum**といわれてきた[1]。この問題については、S型小惑星は、隕石のほとんどを占める普通コンドライトは特定の数少ない小惑星からやってきているか、スペクトルが得られないほど小さい小惑星からやってきているという考え方と、普通コンドライトと非常によく似た物質からできている小惑星があっても、宇宙風化によってスペクトルが変化してしまうため、見かけ上、両者は異なっているのだという二つの考え方があった。普通コンドライトとほぼ同じスペクトルを持つQ型とS型の間は連続的であること、S型小惑星上で進行中の宇宙風化を探査機の分光観測で見出したことなどから、後者の考え方の方が支配的である。しかし、それを証明するには、実際にS型小惑星から試料を持ち帰り、普通コンドライトとほぼ同じ物質からできていることを示すことと、回収試料のごく表面が宇宙風化を起こしていることを実証する必要があった。今回の初期分析でイトカワの表面物質はLLコンドライトに非常によく似ていることが明らかになり、LLコンドライトが宇宙風化を受けると、S型スペクトルを持つようになることが明らかになった[2]。本研究では小惑星の宇宙風化は月と同じかどうかを調べた。

鉱物試料の透過電子顕微鏡用断面試料を準備するには、集束イオンビーム(FIB)法がよく使われる。しかし、試料作成時の金属鉄極微粒子の酸化を防ぐため、蒸留水以外の液体を用いて超薄切片法で試料作成した。試料は、日立ハイテクノロジーズ社の走査透過型電子顕微鏡(STEM)を用いて、高分解能の高角度散乱暗視野像(HAADF)-STEM および明視野(BF)-STEM像観察と元素分析を行った。10試料中5試料のかんらん石やCaに乏しい輝石の表面から深さ約60ナノメートルまでの範囲に、鉄に富む超微粒子が存在していた。

HAADF-STEM像と元素の分布図を比較すると、表面から約15ナノメートルまでのごく表面には、Fe, S, Mgに富む超微粒子が存在していた。BF-STEM像から、この超微粒子はアモルファス物質中に存在していた。S以外にも、最表面層からはAlやKなどかんらん石や輝石には含まれない元素が検出された。また、斜長石のごく表面にも、Fe, S, Mgに富む超微粒子を含むアモルファス層が存在していた。これらのことから、この最表面層は周囲の鉱物由来のVapor depositionであると考えられる。一方、かんらん石と輝石の最表面層のすぐ下の部分では、これらの鉱物の結晶構造が部分的に壊され、金属鉄超微粒子が多数観察された。この組織は、太陽風中の重いイオンや、太陽フレア中の陽子などによって、結晶構造が破壊されながら、同時に、鉱物に含まれる2価の鉄イオンFe²⁺イオンが還元されて金属鉄超微粒子が形成されたことを示唆する。これは、月試料では金属鉄超微粒子がVapor deposition中に形成されているのは大きく異なっている。

References: [1] C. R. Chapman, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **32**, 359-367 (2004). [2] T. Nakamura *et al.* *Science* in press.

イトカワに降りそそぐ外来物質: 始原的な炭素質物質

Materials accumulating on the surface of asteroid Itokawa:
Primitive carbonaceous matter

○北島富美雄¹、小飼真人²、大河内拓雄²、奈良岡 浩¹、石橋之宏³、
安部正真³、藤村彰夫³、岡崎隆司¹、矢田 達³、中村智樹⁴、
野口高明⁵、長尾敬介⁶、土山 明⁷、塚本尚義⁸、海老原 充⁹、向井利典³、
Scott A. Sandford¹⁰、岡田達明³、白井 慶³、上野宗孝³、吉川 真³、川口淳一郎³

¹九大院理、²Spring-8/JASRI、³ISAS/JAXA、⁴東北大院理、⁵茨城大理、
⁶東大地殻化学、⁷阪大院理、⁸北大院理、⁹首都大院理工、¹⁰NASA/ARC

炭素質コンドライトに含まれる炭素の大部分は不溶性の高分子物質 (IOM) である。この物質は縮合芳香環がメチレン結合やエーテル結合によって架橋された構造を基本的に持っている。その構造は母天体の熱変成に伴い徐々にグラファイトに近づいていくが、その程度は熱変成の進行度の指標となり、熱分解 GC、ラマン分光、赤外分光、XANES などの手法によって調べることができる (e. g. Kitajima et al., 2002; Sandford et al., 2006; Cody et al., 2008; Kebukawa et al., 2010)。

小惑星「イトカワ」の表面はカンラン石に富む鉱物組成を示し、LL5~6 コンドライトに類似していると予想されていた (Abe et al., 2006)。LL5~6 コンドライトのマトリックスにおける平均炭素存在度は 0.04~0.19%と報告されており (Makjanic et al., 1993)、それほど高くはないが、「イトカワ」は Rubble-pile object と考えられている (Fujiwara et al., 2006) ことから、外来物質としてより炭素に富むフラグメントを含んでいる可能性もある。そこで、「イトカワ」から持ち帰られた微粒子について、その中に不溶性炭素質物質 (IOM) が含まれているかどうかを確認することを主な目的として、顕微ラマン/赤外による分析を行った。

5 個の微粒子 (RA-QD-0017、-0033、-0044、-0049、-0064) について分析を行った。サンプルを非破壊で、できる限りそのままの状態で行うため、新たにダイヤモンド製のサンプルホルダーを製作した。このホルダーは輸送容器を兼ねるとともに微粒子をホルダーから取り出すことなくラマン/赤外分光計に装着し、分析を行うことができる。

5 個の微粒子すべてがカンラン石に帰属されるラマンバンドを示し、これが主要な構成鉱物であると考えられる。しかし、炭素質隕石中の IOM が必ず示す G-バンド、D-バンドはどの微粒子からも観察されなかった。また、赤外スペクトルにおいても微粒子のスペクトルは標品として分析したカンラン石のスペクトルに酷似し、隕石から最も頻繁に観察される有機物の赤外吸収である脂肪族 C-H 伸縮など炭素に帰属できる吸収は観察されなかった。したがって、今回分析した 5 個のどの微粒子中にも IOM が含まれている証拠は得られていない。しかし、今回分析した微粒子は僅かに 5 個であり、「はやぶさ」によって回収された残りの微粒子中に炭素に富むフラグメントが含まれている可能性は残されている。

イトカワに降りそそぐ外来物質：アミノ酸などの有機物

Materials accumulating on the surface of asteroid Itokawa:
Organic compounds including amino acids.

- 奈良岡浩¹、三田肇²、浜瀬健司³、斎藤香織⁴、福島和彦⁴、藪田ひかる⁵、
北島富美雄¹、**Scott Sandford**⁶、岡崎隆司¹、野口高明⁷、中村智樹⁸、
長尾敬介⁹、海老原充¹⁰、塚本尚義¹¹、土山明⁵、安部正真¹²、白井慶¹²、
上野宗孝¹²、矢田達¹²、石橋之宏¹²、岡田達明¹²、藤村彰夫¹²、
向井利典¹²、吉川真¹²、川口淳一郎¹²

¹九大理, ²福岡工大工, ³九大薬, ⁴名大農, ⁵阪大理, ⁶NASA/ARC, ⁷茨城大,
⁸東北大理, ⁹首都大東京, ¹⁰東大理, ¹¹北大理, ¹²ISAS/JAXA

有機物を構成するC,H,N,Oは宇宙において最も存在度の高い元素である。分子雲に多くの有機分子が同定されている他に、太陽系の始原的物質である炭素質隕石や彗星にもさまざまな有機化合物が検出されている。これらの有機化合物は太陽系の生命誕生に役割を果たしたのかについては多くの議論がある。普通コンドライト(LL5-6)起源物質からなると考えられる小惑星イトカワ表面に存在するかは小惑星の進化を考える上でも興味深い。

一般に岩石質タイプ5-6の普通コンドライトは600-900°C程度の熱を受けており、小惑星生成時の有機物が存在するとは考えにくい。しかし、アポロ計画によって持ち帰られた月の表層土には数十ppbのグリシン・アラニンなどのアミノ酸が検出されており、その起源として、彗星などから有機物が運ばれたり、太陽風によってHCNなどが有機物前駆体として表層土に打ち込まれた可能性が指摘されている。今回、初期分析の一環として、はやぶさが回収した主にかんらん石からなる微粒子の有機溶媒抽出物について、アミノ酸などの有機化合物分析を行ったので、その分析手法と結果を報告する。結果として、超高感度蛍光検出高速液体クロマトグラフや飛行時間型二次イオン質量分析計によって検出されたアミノ酸やその他の有機物は分析ブランクと変わらないレベルであり、はやぶさ粒子固有な有機化合物を検出することはできなかった。装置の感度などから存在していたとしてもppmレベル以下である。ppbレベルの分析をするために、抽出法や分析ブランクを現在改良中である。

また現在、はやぶさ2やNASAのOSIRIS-Rex計画によって、炭素質な表面をもつ小惑星からのサンプルリターンが計画されているが、そのような小惑星に有機化合物を探索する意義についても議論する。

イトカワサンプルから「はやぶさ2」サンプルへ

○橘 省吾¹・澤田 弘崇²・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 ²宇宙航空研究開発機構

「はやぶさ」回収試料のキュレーションおよび初期分析によって、回収試料がイトカワ起源であることが明らかになり、人類が地球外天体から能動的に採取した試料は、月、Wild2 彗星につづき、三例目となった。小惑星試料としては世界初である。初期分析によって、イトカワ回収試料が熱変成を受けた平衡 LL コンドライトであること、熱変成は太陽系最古の物質 CAI 形成から 600 万年以降も続いていたことが明らかとなった。イトカワサイズの天体で、800℃を越える高温まで表面物質を長期間加熱することは不可能であり、そのような高温変成経験物質が表層に存在するという事実は、イトカワはより大きな母天体（数十 km サイズ）が熱変成後に破壊され、再集積したラブルパイル天体であることを意味し、ラブルパイル天体の存在が物質科学からも実証された。さらに、微粒子表面に宇宙風化層の存在やマイクロインパクトの証拠、数百年程度の太陽風撃ち込みを示唆する希ガスが確認された。一方で銀河宇宙線の撃ち込みは 10^7 年以下であることが示唆され、イトカワ表層物質が効率よく攪拌されているか宇宙空間に放出されているかを示している。

「はやぶさ」回収試料の初期分析から得られた数多くの知見を統合すると、太陽系史にわたって内部から表層まで活動的な小惑星の姿が浮かび上がってくる。これらの知見に基づき、「はやぶさ2」回収試料でめざすサイエンスを再整理してみる。「はやぶさ2」計画では、C 型小惑星 1999JU3 表面試料のサンプルリターンをおこない、回収試料の分析から、分子雲（もしくはそれ以前の銀河系内）や初期太陽系円盤での揮発性元素 CHON の進化、ならびに微惑星内での水存在下での有機物進化を解明し、太陽系最初期からの地球・海・生命材料物質の進化を追う。候補天体 1999JU3 は地上観測により含水鉱物分布の不均質が指摘されている (Vilas, 2008)。また、炭素質コンドライトの水質変成鉱物の年代測定より、炭素質コンドライト母天体が数十 km 程度のサイズはあったことを示唆されている。イトカワがラブルパイル天体であることが確実となったことを考えると、1km 程度の大きさしかない 1999JU3 も元はより大きな微惑星であり、異なる深さで異なる環境での水質変成を受けた物質が再集積した可能性が高いと考えられる。「はやぶさ2」では表面付近の複数箇所のサンプリングをおこなう予定であるが、元の微惑星の異なる深さでの試料が入手できることが期待される。大型の C 型小惑星では困難な（元天体の）内部物質採取が可能となる。これにより、1999JU3 の母天体の進化の姿を解き明かす（すなわち、地球の海や生命材料の供給源となった初期太陽系の微惑星を明らかにする）ことをめざす。

イトカワ同様、1999JU3 も地球近傍小惑星である。軌道計算によれば、 $\sim 10^7$ 年前には金星軌道までに到達し、現在よりも高温に表層がさらされた可能性もある (Michel & Delbo, 2010)。このような高温は揮発性物質を対象とした研究には不利であるが、イトカワ試料が示したように表面試料の攪拌や剥離が $< 10^7$ 年以下の時間スケールで起こっているのであれば、近地球軌道での太陽光による変成が最小限である試料の採取が期待され、上記サイエンスの展開が十分に可能となる。

「かぐや」ガンマ線分光計による 高速中性子の月面強度分布

○¹ 藤林ゆかり、² 晴山慎、² 唐牛謙、³ 小林進悟、⁴ 山下直之、⁴ O.Gasnault、⁵ R.C.Reedy
¹ 長岡央、¹ 早津佳那子、¹ 長谷部信行

¹ 早稲田大学理工学研究所、² 宇宙航空研究開発機構、³ 放射線医学総合研究所
⁴ Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France、⁵ Planetary Science Institute, USA

月表層の元素組成分布の情報は、月の進化と起源を考える上で重要である。月周回衛星「かぐや」に搭載されたガンマ線分光計 (KGRS) は、エネルギー分解能が優れた Ge 半導体検出器を利用して、月表層の元素濃度分布地図を作成し、月の局所的な地域だけでなく月全体の生い立ちを知る上で、重要な制約を与えることを目的としている[1]。

これまでに、月面天然放射性元素の絶対濃度の決定法の開発[2]により、Kの全球濃度分布地図が作成され[2]、さらに Th と U の全球濃度分布地図が作成された[3]。

月面の天然放射性元素を除く元素由来のガンマ線は、高エネルギー銀河宇宙線が月表層物質と衝突して生成された 2 次中性子を介して、月表層物質の原子核が励起することにより発生する。従って、主要元素の月面濃度を推定するためには、その元素のガンマ線強度分布と月面中性子強度分布とを合わせて、複合的な解析が必要である。しかしながら「かぐや」には中性子検出器が搭載されてないため、月面元素濃度分布作成に向けて、月面中性子の強度分布を新たな手法を用いて導出することとした。

KGRS は大きな Ge 結晶を持つため、Ge 結晶内の Ge 原子核による中性子非弾性散乱や中性子捕獲により放出されるガンマ線をも検出することができる。このうち非弾性散乱の場合、Ge 原子核から放出されるガンマ線エネルギーと Ge 原子核の反跳エネルギーの和が検出器内に付与されるために、エネルギースペクトルに現れるピークは高エネルギー側に長いテールを引き、その形状から “Sawtooth Peak” と呼ばれる。つまり、Sawtooth Peak は、高速中性子を直接検出していることを意味している。実際に、KGRS で観測されたスペクトルデータには 6 つの Sawtooth Peak が見られる。本研究では、このうち 692 keV に現れる Sawtooth Peak に着目して解析した。ここでは、月面高速中性子の強度分布を見積もる方法[4]について検討し、高速中性子強度分布地図の作成を試みた。

これまでの月研究から月の海の岩石には鉄やチタンなどの比較的重い元素が多く含まれており、そのような重元素が多く含まれている地域では高速中性子強度も高いことが明らかにされている[5]。本研究で得られた高速中性子強度分布も同様に海の地域で高い強度を示しており、過去の観測結果と同様の特徴を示した。

[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] Hareyama et al., Proc. 42nd LPSC. 1687.pdf, 2011.

[5] Lawrence et al., JGR 107, 5130.

月面破碎岩試料における炭素とレアアース元素の濃縮について On concentration of carbon and rare-earth elements on lunar breccias samples

三浦保範

山口大学・EUR-AIC 大学

1. はじめに：

地球の鉱物には炭素とレアアース(希土類, REE)元素を含む酸化物・リン酸塩・炭酸塩・ケイ酸塩鉱物が多種知られている。また、これらに、カルシウムを含む炭酸塩鉱物も数種知られている(Calcioburbankite, Kamphaugite, Abenakiite など)。それらの鉱物の成因は、形成される場所で推測されているが、活動の変化の顕著な地球惑星では様々な場所で発見され明確な要因が絞れない。その点、地球的な海水などの風化や変質のない月面試料に、もし REE 元素が濃縮すると、地球内外で唯一古く採集でき形成過程を残す試料であり、その解明により複雑で未解明な地球の形成過程に重要な情報が期待できる。

2. 炭素と REE の存在度の違い：

地球(地殻)と隕石の元素存在度の違いは、アポロ月面試料においても確認され、約 30 種の元素は地球外(隕石)に多いことが知られている。その中で炭素は地球外に多いが、REE 元素については地殻にやや多い地殻元素である(Fig. 1)。したがって、その中で REE 元素は直接の隕石衝突起源でないが、隕石からも運ばれて濃縮しやすい元素であると考えられる。

3. 月面の炭素と REE：

炭素と希土類元素(REE)の含有量は、月試料の 4 種の代表的な海の玄武岩(マントル性)、高地岩石、衝突破碎岩とレゴリス表土において顕著な違いがみられ、炭素の多いインパクト破碎岩にレアアース元素が最も多く含まれていることが分析データでわかった(Fig. 2)。

4. 月面岩石の形成過程の研究：

月面試料の REE 元素中の特定の元素の違いにより、高温内部マントル起源の試料(海の玄武岩など)、と地表浅部の低温溶融試料(衝突など)に分けられる。これを応用すると、月の各種試料の形成確認や未解明な試料の新たな形成情報が得られることがわかった。

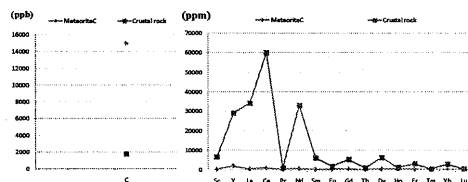


Fig. 1. 炭素と REE 存在度

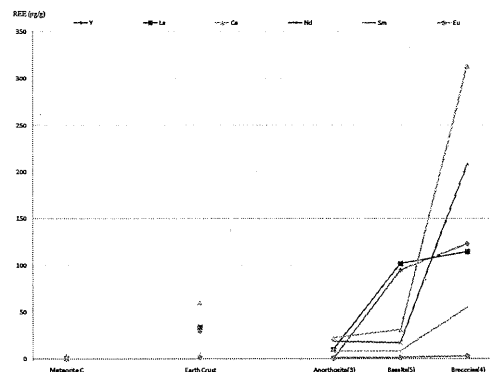


Fig. 2. 隕石, 地球, 月面試料中の炭素・REE 含有量比

月隕石中の低トリウム斜長岩岩片と古いベースンとの関連および資源的利用

○武田弘¹, 唐牛譲², 山口亮³, 長岡央⁴, 大竹真紀子・春山純一⁵, 矢沢勇樹⁶, 諸田智克⁷,
廣井孝弘⁸

¹東大理系地球惑星・千葉工大フォーラム研, ²JAXA 月惑星探査プログラムグループ, ³国立極地研, ⁴早稲田大理工学研, ⁵JAXA 宇宙科学研, ⁶千葉工大・生命環境科学, ⁷国立天文台 RISE 月探査, ⁸ブラウン大学地質学研

固体惑星物質進化の見方によると、月は始原的物質の小天体と地球の丁度中間にあたり、惑星初期のマグマ大洋からの地殻とマントルの分離の記録を留めている。この月最古の地殻の形成過程を解明するには、月最古の真の地殻が残っている可能性が高いと考えられている地域の探査とそこから来た可能性のある月隕石の研究が必要である。デリクレー・ジャクソン盆地の南には、月で最も高く地殻がもつとも厚く、トリウムの最も少ない地域があり、そこからのサンプルリターンが望まれる。

SELENE-2 では、その第一歩として、その最低トリウム地域[1]の表側に延びているズッキウス・クレーター付近が着陸地点として提案されている。この地点の南西にはバイィ・ベースンがある。このベースンは直径が約 300km あり溶岩で満たされてなく、「かぐや」で探査された月の裏側のベースンの特徴を持っているので興味深い。さらに将来の有人月探査地域として、南極が提唱されているが、その付近での科学的探査候補地としてバイィ・ベースンを推奨したい。

Th 含有量の低く Fe 量の低い月隕石は月裏側より来たとされている。その中にほぼ斜長石のみよりなる岩片が見出され、その低 Th、高 Mg ナンバー、古い Ar-Ar 年代と最近のリモセン・データーより、月裏側のベースンとの関連が提唱されている。デリクレー・ジャクソン盆地の形成年代はかぐやのクレーター直径と頻度の関係より 42.5 億年と推定され[2]、またこの付近から来たとされている月隕石の同位体形成年代とも一致している。バイィ・ベースンの形成年代も同様に 42 億年[2]と古く、低 Th 地域であることより、デリクレー・ジャクソン盆地に先駆けて探査されるべき地域と考えられる。月裏側より来たとされている月隕石 Dhofar 489 中の斜長岩岩石片の新しい PTS および Dhofar911 中の斜長岩岩石片の PTS の鉱物・岩石学的研究も行ったが、これらの斜長岩はほぼ純粋の斜長石[3] (An96) よりなり、砂漠での風化の影響を除けば、地殻形成時の組織を保っている。この様な Ca に富む斜長石は酸に容易に分解し Si, Al, Ca を分離できるので資源的利用に役立つ。生物を出来る限り使わぬ月での食料生産用として、腐食土の可溶性成分であるフルボ酸による斜長石の分解による土壌の生成も検討した。

参考文献：[1] Kobayashi S. et al., *LPS* 41, #1795, 2010. [2] 諸田智克他, 月の衝突盆地の層序と月初期の衝突史, *PPS024-10, JGUM*, 2011. [3] Ohtake M. et al. *Nature* 461:236-240, 2009.

月アリストアルコス台地に広がる火砕性堆積物の化学組成と結晶度の推定

Chemical composition and crystallinity of pyroclastic deposits over
the Aristarchus Plateau on the moon○ 有本龍三^{1,2}、大竹真紀子²、春山純一²、松永恒雄³、岩田隆浩²¹東京大学大学院、²宇宙科学研究所、³国立環境研究所

月面には、平滑で反射率の低い Dark Mantle Deposits (DMD) と呼ばれる領域が存在しており、玄武岩よりも深いマグマソースが起源である火砕性粒子 (pyroclastic beads) が堆積していると考えられている。月の進化や誕生の情報を含むマントル深部の組成を知るためには DMD の化学組成の決定が重要である。また、pyroclastic beads の結晶化レベルやその分布が分かれば、冷却速度などを推定する手がかりとなる。さらに、堆積する beads の TiO_2 量を推定することで、周囲の mare とのマグマソースの関係性を説明することが出来る。しかし、これまでの DMD の観測 (地上望遠鏡観測、Clementine 探査機による UVVIS 観測) では空間分解能の低さや観測波長域が原因で、DMD と特定されている領域に実際に pyroclastic beads が堆積しているかどうかや DMD の詳細な化学組成は正確には検証できていない。

本研究では、月面の DMD の中でも最も広範囲に分布しており、比較的最近 (Eratostenian) まで火成活動が続いていたと考えられている (Chevrel et al., 2009) Aristarchus 台地に広がる DMD に焦点を当てた。これまで、Aristarchus 台地に堆積する beads は DMD の中でも最もガラス質に富み (Lucey et al., 1986)、そのガラスは TiO_2 量が約 7wt% の orange glass に近い組成であると報告されている (Gaddis et al., 2003)。そこで、過去の報告と比較しつつ、堆積する粒子の結晶度と TiO_2 量を推定することを研究目的とした。研究手法としては、月周回衛星「かぐや」に搭載された Multiband Imager (MI) から得られた観測データをもとに、DMD の画像解析と堆積する粒子のスペクトル解析を行った。画像解析では、Clementine 用に開発された RGB 画像 (R = 750/415, G = 750/950, B = 415/750) と MI 用に開発された RGB 画像 (R は 950nm、G は 1050nm、B は 1250nm での吸収の深さに対応する) を作成し、DMD と考えられる領域を可視的に特定した。スペクトル解析では、堆積する粒子の反射率と吸収の深さのスペクトル形状を、DMD に見られる代表的な glass (green・yellow・orange) や black beads のそれらと比較することで、堆積するガラスの種類を判別した。また、Clementine のデータから求める結晶度の推定方法 (Weitz et al., 1998) よりも詳細に DMD の結晶度を示すことのできる (Kobayashi, 2009) が開発した BIplot を用いて、結晶度と TiO_2 量を推定した。

解析結果から、堆積する pyroclastic beads は、非常にガラス質なものが多いことが分かり、過去の報告と一致した。また、これまで堆積する glass は TiO_2 量が約 7wt% の orange glass であると考えられてきたが、 TiO_2 量が約 3~4wt% の yellow glass に近い吸収の特徴を示した。

かぐや分光データを用いた月高地地殻の鉄物量比と Mg# の推定

Modal mineralogy and Mg# of the lunar highland crust estimated by Kaguya spectral data

○大竹真紀子¹、武田弘²、松永恒雄³、横田康弘³、春山純一¹、諸田智克⁴、山本聡³、
小川佳子⁵、廣井孝弘⁶、中村良介⁷、唐牛譲¹、佐伯和人⁸¹宇宙航空研究開発機構、²千葉工大、³国立環境研究所、⁴国立天文台、⁵会津大、⁶ブラウン大、⁷産総研、⁸大阪大M. Ohtake¹, H. Takeda², T. Matsunaga³, Y. Yokota³, J. Haruyama¹, T. Morota⁴, S. Yamamoto³,Y. Ogawa⁵, T. Hiroi⁶, R. Nakamura⁷, Y. Karougi¹, and K. Saiki⁸¹JAXA/ISAS, ²Chiba Institute of Technology, ³NIES, ⁴National Observatory Japan,⁵The University of Aizu, ⁶Brown University, ⁷AIST, ⁸Osaka University

月周回衛星かぐや (SELENE) および他衛星によって取得された分光データやγ線分光計データ等の解析により、月高地地殻の組成に関する新しい情報が得られつつある。一方で、斜長岩の形成過程を知る上で役立つ苦鉄質鉄物の量や、斜長岩が親マグマから結晶化した時点でのマグマの分化程度を知る上で重要なパラメータである、斜長岩に含まれる苦鉄質鉄物の Mg# (モル比での $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) \times 100$) に関する情報は、いまだに得られていない。

そこで本研究では、かぐや搭載スペクトルプロファイラ (Spectral profiler; SP) データを用い、月高地地域全球における斜長岩に含まれる苦鉄質鉄物の量とそれら苦鉄質鉄物の Mg# の推定を行った。これら値を全球的に調べることによって、従来、地殻厚や溶岩流噴出量の違いとして認識されてきた月の表裏二分性が地殻の化学組成に (特に Mg# に) も見られるのかどうかを知るとともに、裏と表の地殻形成タイミングの違いの有無やマグマオーシャンの組成について考察する。

解析手法は、あらかじめモデル計算による反射スペクトルを斜長岩に含まれる苦鉄質鉄物、宇宙風化度、Mg# 等の条件を変えて作成し、これらモデルスペクトルを用いて苦鉄質鉄物量および Mg# の推定に適したスペクトル形状のパラメータを決定し、これらの関係式をそれぞれ作成した。一方、SP の全データを入力として月面の緯度・経度毎の平均反射スペクトルを求め、各平均反射スペクトルに対して前述の選定したスペクトル形状パラメータを計算した。これら求めた観測値に、あらかじめモデルスペクトルを用いて作成した各パラメータの関係式を適用することで、各緯度・経度における苦鉄質鉄物の量と Mg# を推定した。

解析の結果、苦鉄質鉄物の量と Mg# の両方について月の表と裏で異なる傾向が見られ、月の裏では表に比べ苦鉄質鉄物の含有量が高く、かつそれら苦鉄質鉄物の Mg# も高いことが解った。苦鉄質鉄物の含有量だけでなく Mg# についても表と裏で二分性が見られたことは、月の表と裏側の地殻が異なるマグマオーシャンの分化段階において形成された (表と裏で地殻形成タイミングが異なった) ことを示唆するものであり、高地地殻形成過程の理解につながる。また、従来知られている値よりも高い Mg# を持つ地殻物質の存在が示されたことは、それら地殻が形成された時点での月マグマオーシャンの組成や、さらに月マグマオーシャン全体の化学組成を推定することにもつながる重要な情報である。

SELENE 地形カメラデータに基づく月面標高モデル

Lunar Digital Elevation Model produced from SELENE Terrain Camera data

○春山 純一(JAXA/ISAS)、原 誠一(NTT データ CCS)、日置 和之(NTT データ CCS)、
岩崎 晃(東京大学/先端科学技術センター)、諸田 智克(国立天文台/RISE 月探査プロジェクト)、大竹 真紀子(JAXA/ISAS)、松永 恒雄(国立環境研/環境計測研究センター)、
LISM ワーキンググループ

我々は、SELENE 搭載に搭載された地形カメラによるステレオデータを基に、月面標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)を作成に取り組んでいる。SELENE 搭載地形カメラは、水平分解能 10m の前方・後方に 15° 傾く 2 本の光学系を持ち、それぞれに二次元 CCD が取り付けられており、プッシュブルーム方式で月面ステレオペアデータを取得できるように設計された。また、地形カメラは刈幅はノミナルモードで約 35 km と設定され、2 時間の周回の後にオーバーラップを有することができるように設計された。月面では、太陽高度は 2 時間ではほとんど変わらない。したがって、オーバーラップのある画像からは、非常に良質な広域モザイク画像が作成された。地形カメラは、1 年半にわたる SELENE ミッション期間を通して、グローバルステレオ観測を行い、月面のほぼ 100% の領域のステレオペアデータを取得することに成功した。

これまで、地形カメラの視線ベクトルなどの修正を地形カメラの全球ステレオペア画像から、SELENE 高度計データやマルチバンドイメージャデータなどとの相互検証なども行いつつ、全球における月面数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)の作成を試みてきた。その結果、本講演では、地形カメラデータを元にした DEM の 3 次元絶対位置精度向上検討の状況を報告し、また、科学利用可能性を論じる。

新たな衝突盆地特徴量決定法の開発と月衝突盆地への適用：衝突盆地形成過程への制約

○石原吉明¹・諸田智克¹・猿渡有希²・澤田明宏²・平松良浩²

1. 国立天文台, 2. 金沢大学

衝突現象が固体表面を持つ天体において、表層や内部構造進化の大きな駆動力の1つである事は論をまたない。しかし実験室スケールの衝突とは規模が大きく異なる盆地形成スケールの衝突において何が起きたのかはよくわかっていない。そのため、まずは基礎情報として衝突盆地の構造を理解することが重要であり、衝突盆地の特徴量（リング中心位置・サイズ・高さ）を可能な限り正確に決定する事が必要である。しかしながら、衝突盆地の中心位置やリング径決定は、先行研究では主として写真データや地形データを基にした visual inspection によっており、定量性・客観性に問題があった。本研究では、球関数モデルに基づく定量的・客観的な計測手法を新たに提案する。また、新手法を「かぐや」により得られた測月データに適用し、月の衝突盆地の特徴量の再決定を試み、現在の衝突盆地形状をもとに、盆地形成過程について考察を加える。

天体衝突で形成される衝突盆地は極端な斜め衝突の場合を除き、軸対称の凹構造もしくはリング構造であることが期待される。これは衝突盆地の中心が北極に位置する場合、衝突盆地の大局的な構造は、衝突盆地のサイズに対応する次数およびそれ以下の次数の球関数のゾーナル項（位数=0の項）の足し合わせのみで表されることを意味する。この性質から衝突盆地の中心位置は、

1. 衝突盆地の仮想中心を北極とするように球関数モデルを回転
2. 盆地を含むキャップ型に局在化し、盆地外の構造の影響を最小化
3. ゾーナル成分の寄与率を計算

の3ステップの演算を多数の仮想中心に対して行うことで、ゾーナル成分が最も卓越する位置として客観的・定量的に決定可能である。

本研究では上記の新手法を、月の衝突盆地に適用し、中心位置を決定するとともに、リングサイズ・リング高さの計測を行った。多重リングをもつ衝突盆地については、いくつかの次数においてゾーナル成分が卓越するため、それぞれについて中心を決定した。使用したデータは、「かぐや」に搭載されたレーザ高度計のデータ解析によって得られた月形状球関数モデルおよび1/16度グリッド地形データである。盆地中心位置については仮想中心位置を緯度・経度とも0.1度刻みで変化させ、最もゾーナル成分の卓越する位置を求めた。リングサイズ決定の際には、月形状係数の低次の項のみを用いて地形図を作成し、衝突盆地の地形断面図から地形の勾配が0になる位置を抽出し、さらに、月全球地形1/16度グリッドデータを用いて作成した地形図と照らし合わせ、衝突盆地のリング構造を正しく表していると考えられる点のみを選択した。リングサイズは各中心からの距離を平均して求めた。リング高は、リングの平均標高と中心位置の標高の差として算出した。

Wilhelms (1987)により存在が報告されている衝突盆地について、新手法で解析を行った。リングの形状が楕円形や多角形の衝突盆地は球面調和関数を用いての中心位置決定はできなかった。これは多角形や楕円率が高くなると、ゾーナル成分の寄与率が高い次数がスプリッティングを起す事が主たる原因であり、今後判定基準を整備する事によって、本手法の枠組みで中心位置決定は可能となると考えている。また、本手法で逆に楕円度の判定にも行える可能性が示唆される。

多重リングを持ついくつかの衝突盆地はリングによって中心位置が異なった。中心位置オフセットの最大値はMoscoviense Basinにおける92 kmであり、Ishihara et al. (2011)では本盆地を近接2重衝突盆地と解釈している。リングサイズ決定を行った結果、外側のリングとその内側のリングの直径はベキ乗の関係にあることが確認できた（ただし、先行研究の結果とはベキが異なる）。リングの直径とリングの高さもベキ乗の関係にあり、これらのことからリングの形成メカニズムには規則性がある事が再確認された。また、表面地形とモホ面の起伏から推定される第1近似的な掘削キャビティ形状とインナーリング位置を比較すると、インナーリングに対応する場所はそれほど深部の物質が上昇していない可能性が示唆される。

月の南極エイトケン盆地の構造と年代

Structure and Age of the South Pole Aitken Basin of the Moon

○ 佐々木晶¹、石原吉明¹、ホーセンス・サンダー^{1#}、諸田智克^{1§}、松本晃治¹、花田英夫¹、
岩田隆浩²、大竹真紀子²

¹国立天文台 RISE 月探査プロジェクト、²宇宙科学研究所

[#]現：NASA ゴダード研究所、[§]現：名古屋大学環境学研究科

¹Sho Sasaki, ¹Yoshiaki Ishihara, ^{1#}Sander Goossens, ^{1§}Tomokatsu Morota, ¹Koji Matsumoto,

¹Hideo Hanada, ²Takahiro Iwata, ²Makiko Ohtake

¹RISE Project, National Astronomical Observatory, ²ISAS/JAXA

[#]Now at NASA Goddard Space Flight Center, [§]Now at Nagoya University

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。クレメンタイン探査機の地形データや、鉄、トリウム分布から、南極エイトケン盆地は楕円形で斜め衝突を反映しているという主張がされている。かぐやの測月データでもこれは確認された。中心部でも少なくとも25-30kmの厚さの地殻が存在すると思われる。この部分は円形に近く、南極エイトケン盆地全体の中心からは南側にオフセットしている。中心部の地殻は衝突メルトとすると、その地形の傾き（南側に傾斜）は南極エイトケン盆地形成直後のポテンシャルを反映していると考えられる。月全体の変形による効果も考えても、南極エイトケン盆地形成時の月の自転速度が現在は現在よりも速い。月が地球に近かった、もしくは衝突により自転速度が速くなり潮汐ロックがはずれた状態になったと考えられる。

Using 4-way Doppler tracking with relay satellite OKINA, KAGUYA obtained the first precise gravity field of the lunar farside. Multi-frequency differential VLBI observation using OKINA and OUNA improved the accuracy of gravity, through precise determination of OKINA's orbit. The current gravity model is SGM100i involving VLBI data. Laser altimeter (LALT) on board KAGUYA obtained the first precise global topography of the Moon with range accuracy of 5m. The correlation of spherical harmonics coefficients between gravity and topography become higher than that of the previous model. Combined with topography data, we estimate Bouguer anomaly and the crustal thickness variation of the Moon. The South Pole-Aitken basin (SPA) is the largest (2500km in diameter), deepest and presumably oldest impact basin in the solar system. SPA was characterized by an ellipse with axes 2400 by 2050 km, but more precise topography and gravity data are necessary to discuss the structure of large basin like SPA. We use localized representation of gravity potential where Slepian functions were used to estimate the gravity field over certain areas of the Moon and a spherical cap area with a radius of 40 degree from the SPA center. The direction of an ellipse denoting the depression is similar to the previous result. The region with the thinnest crust is offset southward from the center of SPA. Crustal shape at the SPA center might be affected by rotation velocity of the Moon.

月面クレーター内における衝突メルト分布の検証

The Distribution of Impact Melt within the Lunar Crater

○栗山祐太朗^{1,2}, 大竹真紀子², 春山純一², 松永恒雄³, 岩田隆浩²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻,

² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

³ 国立環境研究所地球環境研究センター

クレーターにおける衝突メルトの分布や量を知ることは、衝突の条件や衝撃変成の規模を知ることに役立つと考えられており、固体惑星のクレーター形成過程を知る上でも重要である。

小天体の衝突によって岩石が溶融して形成される衝突メルトは、主にクレーターのフロアーやその周辺に存在するとされ、中央丘の上に分布しているという事例やシミュレーション結果は今まではほとんど報告されてこなかった。しかし、最近の研究で、月周回衛星かぐや (SELENE) のマルチバンドイメージャ (MI) の画像により、フロアーだけでなく中央丘上にも滑らかな領域が存在しているように見える月面クレーターが報告され、その滑らかさと分布から衝突メルトの可能性も指摘された[1]。

そこで本研究では中央丘をもつ Jackson クレーターに着目し、滑らかな領域とそれ以外の領域において、かぐやの MI によるスペクトルデータの解析と、NASA の月周回衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) による高分解能カメラ (LROC) の画像による形状・組成情報を用いて、中央丘上を含むクレーター内における衝突メルトの分布を調べた。組成情報の推定は MI データのスペクトル形状とアポロサンプルのスペクトル形状とを比較することで行った。ここで“滑らかな領域”とは、MI 及び LROC の画像の分解能で表面に岩塊などの凹凸が見られない領域のことを指している。

解析の結果、中央丘上の MI 画像で滑らかに見えていた領域の中でも、LROC の高解像度画像で見たときにも滑らかな部分と、表面がやや粗い粒子に覆われている部分の二種類あることを確認できた。そのうち前者は MI データのスペクトル形状から衝突メルトと考えられるが、後者は輝石のスペクトルの形状を示しており現在詳細を検討中である。また、LROC 画像からは、中央丘上にメルトがフロアーに向かって流動したような痕跡や、メルトが冷却するときに形成される表面の割れを伴った構造も確認でき、中央丘上に衝突メルトが存在したことが改めて示唆された。

本発表では、中央丘上のメルトの分布と斜度データとの比較や、クレーターのフロアーや壁面に分布するメルトについても言及する

[1] Ohtake et al. 2009, Nature, 461

月探査衛星「かぐや」MI データを用いた 月クレータ内壁、中央丘における正反射特性の検出

大隈裕一郎¹、佐伯和人¹、大竹真紀子²

¹ 大阪大学、² 宇宙航空研究開発機構

リモートセンシングによる月の表面物質研究では、可視近赤外光反射スペクトルから鉱物情報を抽出するために月面表層における光散乱特性の研究が行われてきた。月は常に隕石衝突にさらされており、表面のほとんどがレゴリスと呼ばれる粉体で覆われている。そのため、月面画像の反射率校正は粉体の散乱特性を前提に行われており、粉体と異なる散乱特性についてはほとんど考慮されていなかった。しかし、月クレータ内壁や中央丘ではレゴリスを被っておらず地殻岩石が露出している箇所も存在すると考えられ、そのような場所での散乱特性とは粉体と異なるはずである。そして、粉体と異なる散乱特性をもつのであれば、反射率校正を行う際にも粉体と異なる散乱特性関数を考慮しなければならなくなる。

本研究では粉体と異なる散乱特性の中でも最も検出が容易であると期待される正反射特性に着目して、月探査衛星「かぐや」MI (Multiband Imager) の分光データと地形データを用いて月面正反射特性の検出を行った。入射方向に対する正反射方向と観測方向の成す角 (Gap Angle) という新たな観測幾何パラメータを提案し、観測幾何条件が複数存在する月クレータ内壁や中央丘において正反射幾何条件の存在の有無を確認した。その結果、Giordano Bruno、Robertson、Aristillus、O'day、Ohm、Jackson、Kepler クレータの内壁や、King、Jackson クレータの中央丘に Gap Angle が低くなる地域が存在することがわかった。これら正反射幾何条件の場所すなわち Gap Angle が小さい場所について、実際に反射率が高くなっている場所が複数見つかった。これらの地域について別の観測周回で撮影された画像と比較し、同じ場所で Gap Angle が大きくなっている場合との反射率変化を調べた。変化の要因は正反射特性だけでなく局所地質や、ピクセル以下のスケールの地形起伏等にもよるので解釈は単純ではないが、得られたデータを元に、正反射特性の存在とその地域の地質・地形特徴について議論する。

クレータ中央丘の構造と構成物質

○杉原孝充¹、大竹真紀子²、春山純一²、松永恒雄³、横田康宏³、本田親寿⁴、諸田智克⁵、
小川佳子⁴

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、⁵国立天文台

クレータ中央丘では、インパクトによるクレータ形成時に、掘削最深部から引き上げられてきた物質が観察できると考えられている。こういった性質を利用して、衛星軌道上からのリモートセンシング分光観測データを利用して、月地下深部の地殻構成物質を調査する試みが行われてきている。しかし、クレータ形成時にどのように中央丘が上昇してきたのか、その過程についてはほとんど理解されていないため、中央丘で見られる岩相変化の多様性の成因についての議論は、まだ十分に進んではない。このような問題意識の基に、Tychoを含めて、中央丘の地形を分類し、そこに観察される岩相分布との関係を調査した。

クレータのサイズには依らず、月の場合、クレータ中央丘は2つの種類に分類される。一つは、Tychoに代表されるような、上空からみたとき、多角形の外形をもつ中央丘で、直径に対して比高が大きいことで特徴づけられるタイプ（Type 1）であり、もう一つはコペルニクスに代表されるような、小さな中央丘が分散して観察されるタイプ（Type 2）である。Type 1の特徴として特に重要なのは、多角形錐の形状を持つ中央丘が大小様々な岩石ブロックの集合体によって構成されており、その頂部ではインパクトメルトが集積している点である。頂部のインパクトメルトは岩石ブロックの境目などの谷部などに沿って、中央丘の麓に向かって流出している場合も頻繁に観察される。このような産状から、Type1の中央丘はインパクト後のリバウンドにおいて、ターゲット地域の地下が比較的強固であったため、比較的破碎されやすい部分だけが破碎し、大きな岩石ブロックが一点に集合しながら形成したと推定される。対して、Type2の場合、一つ一つの中央丘が独立した岩石ブロックであることが多く（Type1の場合と同様に、複数のブロックの集合体になっている場合もある）、地下ですでにかなり小さく破碎されていた岩石ブロックがそのまま上昇してきた可能性が示唆される。このとき、Type1の中央丘は地下の基盤岩の特徴を示している可能性が高いが、インパクトメルトの岩相を中央丘で観察される岩相と比較すると、必ずしも同じ特徴を示さず、中央丘で観察される岩相が三次元的に広域に分布していない可能性も考慮する必要がある。

アポロ月震計データで見る 月のクレーター生成率不均質

○川村太一^{1,2}、諸田智克³、小林直樹²、田中智²

¹東京大学大学院、¹ISAS/JAXA、¹国立天文台、

太陽系の多くの衛星では、自転周期と公転周期が同期しており、常に公転運動の進行方向に同一面を向けている。この同期回転は衛星表面において、クレーター生成頻度に空間的な不均質を引き起こすことが予想される。理論的に、その不均質の程度は(1)衝突天体の惑星系に対する相対速度、(2)衛星の公転軌道速度に依存すると考えられる。外惑星の衛星は公転軌道速度が大きいので、クレーター生成率不均質の程度はかなり大きいと予想され、研究が進んできた。一方、月も同様に同期回転しているが、公転軌道速度が比較的小さいために不均質の影響は無視されてきた。しかし近年、月面のクレーター分布から、実際に月でもクレーター生成頻度が不均質であることが明らかとなったことで、様々なアプローチから月のクレーター生成率不均質研究が行われるようになった。本研究ではアポロの月震計データに記録された隕石衝突のデータからクレーター生成率不均質を検証した。アポロの月震観測では1744の隕石衝突が観測されている。月震観測は1969-1977の約8年間ほぼ絶え間なく月面の衝突現象を観測しており、micrometeoriteと呼ばれる1g程度の物体の衝突から約10tの隕石の衝突まで幅広い衝突現象を観測している。これほど長期間、連続的に幅広い規模の衝突現象を観測し続けた例と言うのは珍しく、これらの隕石衝突のデータは現在の月、地球近辺での衝突現象に様子を知らするための貴重なデータであると言える。これまでの月震データを用いた隕石衝突の研究は月の内部構造の推定したものがほとんどであり、その空間分布などに注目した例は少ない。本研究では月震データから震源が決められている隕石衝突の衝突地点の空間分布に注目する。発表では観測点の配置や感度差の影響も考慮した上で月震データから見る月面の隕石衝突の分布を検証し、その不均一性について議論する。

Evidence of a meteoroid impact or variability of solar wind flux in Mercury's sodium tail

○亀田真吾¹ 鍵谷将人² 岡野章一²

¹立教大学理学部 ²東北大学惑星プラズマ大気研究センター

水星は非常に希薄な大気を持っており、表面気圧は 1 兆分の 1 気圧以下である。表面においてスケールハイトが平均自由行程より大きく、地表面が外圈底となっている。惑星探査機マリナー 10 号に搭載された紫外線分光器が太陽風起源と思われる水素、ヘリウム、酸素原子の発光を検出しており、地上観測によりナトリウム、カリウム、カルシウムの発光も検出されている。最近では、水星探査機メッセンジャーによりマグネシウム、カルシウムイオンの発光も検出された。これらの金属原子は太陽光脱離、熱脱離、化学スパッタリング、太陽風イオンスパッタリング、微小隕石衝突によって起きていると考えられている。

これまでに検出された原子の中では、ナトリウムの発光量が最も大きく、地上望遠鏡による観測が比較的容易であるため、ナトリウム原子の生成散逸過程に関する研究が進められてきた。ナトリウム大気の特徴は、惑星上で一様に分布しているのではなく高緯度に濃集する傾向があり、さらにその分布が時間変動を起こしているという事である。水星は固有磁場を持っており、磁気圏を形成している。太陽風イオンが磁気圏のカusp領域から惑星表面に降り込み、スパッタリング効果によって表面物質を放出させると考えられているが、これまでに大気密度変動と太陽風変動が同時に観測されたことが無い上、スパッタリングによる放出量を大きく超える量のナトリウムが検出されており、結論には至っていない。

2011 年 3 月にメッセンジャー探査機が初めて水星周回軌道投入に成功し、観測を開始している。その直後に我々はハワイ・ハレアカラ観測所の望遠鏡を使って水星ナトリウム大気光観測を行なった。水星ナトリウム大気は、地表から放出されたナトリウムが太陽放射圧により反太陽方向に流されることで尾のような形状を成している。3 月 26 日に行なった観測の結果は、尾部側に通常よりもナトリウム原子が多いことを示しており、観測直前に大気放出量に急激な時間変動が起きたことを示している。考えられる要因は、太陽風流量のあるいは隕石衝突量の急激な変動であり、本発表ではこれらについて議論を行なう。

火星大気における HDO/H₂O 比測定の科学的意義および HDO/H₂O 循環の 3 次元シミュレーション

○黒田剛史¹, 佐川英夫², 笠井康子², 笠羽康正¹

¹東北大・理・地球物理 ²NICT

現在の火星地表面は非常に乾燥しているが、その一方で過去には液体の水が潤沢に存在していたのではと思わせる地形が数多く観測されている。その水の一部は現在北極氷床や地下に存在する一方、多くの水が太陽風により宇宙空間に散逸されたと考えられている。このような火星の気候変動と密接に関わる水循環や大気散逸を探る上で重要な指標となりうるのが、火星大気中および氷床の HDO/H₂O 比(以下「水(氷)の D/H 比」と称す)を調べることによる水の起源の測定である。

HDO は H₂O よりも蒸気圧が低いため、氷の中にとどまりやすい。そのため大気と氷の間で水蒸気交換が活発に行われている領域の氷や水の D/H 比は次第に高くなる。地上望遠鏡からの赤外観測により求められた火星大気中の水の D/H 比は、カラム平均値の水平分布で地球海洋における平均値(SMOW)の 2~8 倍と非常に大きな幅を持つ[1]。H₂O および HDO 循環の 3 次元数値シミュレーション[2]により示された水の D/H 比の計算結果は、低~中緯度域では最新の観測結果[3]と整合するものの、大気水蒸気量に対する傾向については、乾燥するほど水の D/H 比が高くなる観測結果[4]とは逆の結果を示している。その理由としてはシミュレーションに散逸の効果が導入されていないため、大気中の氷や水の D/H 比が次第に高くないことなどが考えられる。

さらに水の D/H 比は地球大気研究においては水循環における物理プロセスを可視化するツールとして用いられており[5]、よって火星においてもそれを詳しく調べることは、現在の火星環境における水循環の様子、特に地表~大気間の水蒸気の出入りを知るための手掛かりとなることが期待される。このように、水の D/H 比は火星の過去および現在を知る上での鍵となるもので、観測・シミュレーションの両面から今後より詳しい研究を行っていくことが望まれる。

2020 年代初頭の打ち上げが検討されている火星探査機・MELOS 気象オービタ[6]に搭載予定のサブミリ波サウンダ FIRE (Far Infra-Red Experiment)では、世界でまだ前例のない火星周回軌道から水の D/H 比の 3 次元分布とその時間変化について詳細なマッピングを行う予定である。そしてその観測データを理論的に解釈するツールとして、我々は火星大気大循環モデル DRAMATIC MGCM [7,8]へ HDO 循環を導入した 3 次元シミュレーションを進めている。本発表ではシミュレーションの方法と計算結果を提示し、FIRE/MELOS と協力して解明すべきサイエンスについて議論を行う。

[1] Villanueva et al., Abstract of 'Third International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations', 2008.

[2] Montmessin et al., J. Geophys. Res., 110, B03006, doi:10.1029/2004JB000357, 2005.

[3] Tsvakov et al., Planet. Space Sci., 59, 163-168, 2011.

[4] Fisher et al., J. Geophys. Res., 113, B00A15, doi:10.1029/2000TJb000070, 2008.

[5] Crankenberg et al., Science 305, 1374-1377, 2004.

[6] 今村剛 他, 日本惑星科学会誌「遊星人」18, 76-78, 2005.

[7] Hiroda et al., J. Meteor. Soc. Japan, 83, 1-14, 2005.

[8] Hiroda et al., Abstract of 'Third International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations', 2008.

木星面発光現象の意義と検出観測に向けて

Jovian impact flashes and toward their monitoring

○渡部潤一¹、田部一志²、杉田精司³、柳澤正久⁴、伊藤孝士¹

¹国立天文台、²(株) リブラ、³東京大学、⁴電気通信大学

Junichi Watanabe¹, Isshi Tabe², Seiji Sugita³, Masahisa Yanagisawa⁴, and Takashi Ito¹

¹*National Astronomical Observatory of Japan,*

²*Libra Co.,*

³*University of Tokyo,*

⁴*The University of Electro-communication*

アマチュア天文家によって、2010年6月と8月に相次いで観測された木星面での発光現象は、その大きさが数m~数十m程度の小天体衝突による流星発光であると考えられている。相次いで、このような現象が偶然にも捉えられたことは、われわれがこれまで予想していたよりも、小天体の衝突が頻発している可能性が高いことを示唆している。

もともと巨大惑星領域での小天体のサイズ分布は極めて不定性が大きい。特に10km未満の小天体は、彗星活動でもない限り、大型地上望遠鏡を用いても直接には観測ができない。衛星表面のクレーターカウントからの推定も研究者による乖離が大きく、天王星と木星の衛星からの推定値は0.1kmサイズでは1桁の差がある。太陽系外縁天体からの推定に至ってはクレーターカウントと比較すると2桁以上も異なっている(Zahnle et al. 2003)。2010年に観測された二例だけを考えると、10mサイズの木星への衝突頻度は太陽系外縁天体および天王星の衛星のクレーターカウントにより推定されるサイズ分布の間、つまり年間0.5-10個程度となる。ただ、二例が偶然に捉えられた下限値であることを考えれば、組織的な監視観測によってさらに大きな値を得ることは十分に考えられる。

木星面発光現象の監視観測により、巨大ガス惑星をいわば天然の小天体検出器として用いることで、この領域のサイズ分布を決定できる可能性がある。地球における流星発光現象は、衝突天体の大きさだけでなく、突入速度に強く依存するが、木星では極めて強い重力によって、衝突の方向に依らず、ほぼ同じ速度(秒速60-64km)となるために、サイズを決定する際の不定性がほとんどないというメリットがあるからである。この手法は、巨大惑星領域における1km以下の小天体サイズ分布についての情報が得られる有力な手段であり、同時にクレーター学、特に巨大惑星の氷衛星のクレーター形成に関する理解にもつながる可能性がある。

本発表では、木星発光現象の意義と共に、日本の熟練したアマチュア天文家の協力を得ながら、現在進めつつある系統的・組織的な観測網構築へのアプローチを紹介する。

木星型惑星を想定した $\text{H}_2\text{-He}$ 大気の 鉛直一次元放射対流平衡モデル： 大気冷却率と熱構造の下部境界条件依存性

○高橋 康人¹, 倉本 圭^{1,2}, 石渡 正樹^{1,2}

¹ 北海道大学大学院理学院, ² 惑星科学研究センター(CPS)

木星型惑星は水素分子を主とする厚い大気を持ち、その大気構造は基本的に放射対流平衡状態にあると考えられる。従来の鉛直大気構造の数値モデルは、地上および探査機による観測によって得られた気温分布を再現することに重点が置かれてきたが、大気組成および境界条件に対する依存性や、大気冷却率について系統的には調べられていない。大気冷却率は鉛直対流強度を決定する重要な要素であると同時に、大気冷却率の大小によって雲対流の挙動が大きく変化し、凝結性成分の鉛直分布に影響する可能性が指摘されている(Sugiyama et al. 2011)。また大気組成や境界条件への依存性をあきらかにすることは、惑星の熱進化や多様な系外惑星を理解する上で重要である。

そこで本研究では独自に木星型惑星大気を想定した放射対流平衡モデルを開発して解析を試みた。放射過程の計算は Appleby and Hogan (1984)の二方向近似による定式化をベースとした。大気の不透明度については $\text{H}_2\text{-H}_2$ 及び $\text{H}_2\text{-He}$ 衝突誘起吸収(Borysow 1985, 1988)を波長別に考慮した。また、加熱率が負になる大気下層部(対流圏)において、モデルにおける下部境界(2 bar 面)から等温位の乾燥断熱温度分布が成立するよう対流調節をおこなった。

以上のモデルを用い、まず木星を想定した純粋 H_2 大気における放射対流平衡構造を求め(図)、その特徴について考察した。2 bar 面での温度を実際の木星大気に近い 160 K と置いた場合、成層圏の最低温度は 78 K となった(左図)。これは実際の木星大気の成層圏における気温の極小値よりも 30 K ほど低いが、これは現状のモデルでは太陽放射が考慮されていないためと考えられる。対流圏における大気冷却率(加熱率の反数)は、気圧の上昇につれて 0.8 bar 付近で極大(1×10^{-4} K/Jovian day)を持ち、そこから減少に転じる(右図)。2 bar 面付近で冷却率は再上昇するが、これは数値計算上の境界条件を置いている影響による。ガリレオプローブの大気冷却率データは 0.1 bar 面付近と 1 bar 面付近に二重の極大を持ち、また極大値はいずれもおおよそ 8×10^{-3} K/Jovian day となっている(Smorovsky et al. 1998)。このモデルとの著しい差異はガリレオプローブの投下点が周囲よりも高温の空域であったことによる可能性がある。講演では $\text{H}_2\text{-He}$ 混合大気について境界条件を変化させた場合の放射対流平衡解も示し、相互比較の結果を議論する予定である。

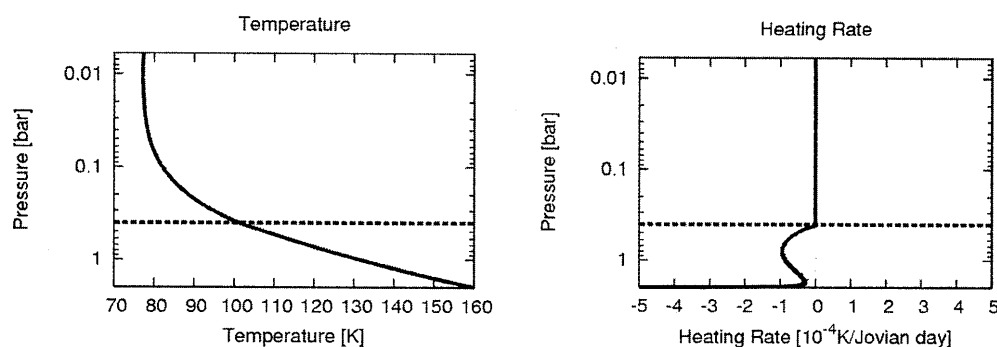


図: 純粋 H_2 大気の放射対流平衡解における気温分布(左)および加熱率分布(右)。破線は対流圏界面を表す。本計算では木星の赤道域を想定し重力加速度を 24.82 m/s^2 とした。

天王星型惑星不規則衛星の光度変化観測

○寺居剛¹, 伊藤洋一², David Jewitt³

¹ 国立天文台, ² 神戸大学, ³ UCLA

巨大惑星の衛星は力学的特徴から規則衛星(regular satellites)と不規則衛星(irregular satellites)に分類される。不規則衛星は規則衛星に比べてホスト惑星から離れており、離心率や傾斜角が大きな軌道を持つ。また、その大半は逆行軌道である。これらの特徴から、不規則衛星は規則衛星のように周惑星円盤中で集積によって形成されたのではなく、元は太陽周りを公転していた小天体をホスト惑星が捕獲したものと考えられている[1]。しかし、不規則衛星の起源はまだ分かっていない。不規則衛星の供給源として、ホスト惑星の軌道近傍に位置する天体の他、外縁部や小惑星帯から運搬された天体が考えられる。前者であれば不規則衛星は巨大惑星領域で形成された微惑星の生き残りということになり、後者であれば太陽系初期に起こったと指摘されている小天体の大規模軌道進化[2]を示す証拠となる。いずれの場合も太陽系の起源と進化を探る重要な手掛かりが得られるため、不規則衛星の起源を調べることは大変重要である。

先行研究では、不規則衛星の可視光カラーを測定し、他の小天体グループと比較するということが行われているが[3]、起源の特定には至っていない。カラーの他に天体の表面特性を示す物理量として opposition surge が挙げられる。これは衝(太陽・天体・観測者が一直線に並ぶ位置)近傍で位相角(太陽・天体・観測者のなす角)が 0 度に近づくにつれて天体が急激に増光する現象であり、その光度変化曲線(位相曲線)は天体表面の組成や構造に依存することが知られている[4]。そこで本研究では不規則衛星の opposition surge を測定して様々な小天体グループを比較することにより、表面特性の類似性を調べた。

我々はすばる望遠鏡を用いて天王星および海王星の不規則衛星を対象とした可視測光観測を実施した。観測は連続 2 夜およびその 1 か月後の 1 夜に行い、天王星衛星 2 個(Sycorax, Prospero)と海王星衛星 1 個(Nereid)について異なる位相角での光度変化のデータを取得した。解析の結果、Prospero と Nereid の位相曲線傾斜は外縁天体のそれと類似の値を示したのに対し、Sycorax は木星トロヤ群や土星・天王星の規則衛星と似た値を持つことが分かった。この結果は不規則衛星の起源が多様であることを示唆している。講演ではそれらの起源について詳細な議論を行う。

参考文献

- [1] Jewitt, D. and Haghighipour, N. 2007, ARA&A, 45, 261.
- [2] Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., and Morbidelli, A. 2007, AJ, 133, 1962.
- [3] Grav, T., Holman, M. J., Gladman, B. J., and Aksnes, K. 2003, Icarus, 166, 33.
- [4] Muinonen, K., Piironen, J., Shkuratov, Y. G., Ovcharenko, A., and Clark, B. E. 2002, in Asteroids III (University of Arizona Press, Tucson), 123

月惑星探査に基づく太陽系年代学の構築

○渡邊誠一郎¹, 小林浩², 諸田智克^{3,1}, 荒川政彦⁴

¹名古屋大学大学院環境学研究科

²フリドリッヒ-シラー(イエナ)大学天体物理研究所

³国立天文台 RISE 月探査プロジェクト

⁴神戸大学大学院理学研究科

太陽系の歴史は小惑星や彗星の衝突を通じて、クレーターという形で月惑星表面に刻印される。月惑星探査によるその場測定やサンプルリターンでクレーター生成の衝突メルトの絶対年代を決めることができれば、太陽系の年代記を構築でき、衝突が地球史に与えた影響なども議論可能となると期待できる。これは小惑星探査を含めた固体惑星探査全体を貫く総合的テーマの一つとなる。講演では、そのための理論的枠組みを提示する。

太陽系での各種イベント（巨大ガス惑星形成や木星・土星平均運動共鳴時、円盤ガス散逸による永年共鳴移動など）と地球型惑星・月でのクレーター形成史を結びつけるためには、(1)45億年にわたるメインベルト小惑星(MBA)の軌道進化過程と、各イベントがMBAの軌道進化に及ぼす影響、(2)MBAの衝突破砕カスケード(特に従来無視されてきたクレータリングによる破片生成を取り入れること、例えば[1])、(3)Yarkovsky効果(YORP効果との連関を含む)などMBAの軌道長半径変化メカニズム(例えば[2])、(4)木星との平均運動共鳴(J3/1, J5/2, J2/1等)や永年共鳴(ν_6)によるMBAの地球近傍小惑星(NEA)への変化率、(5)カオスの拡散によるMBAの火星交差軌道を経たNEAへの変化率、(6)NEAの地球型惑星・月への衝突フラックス、(7)クレーターに関するスケーリング則(衝突天体の物性や月惑星表層の物性・構造などを考慮したもの)、(8)彗星・KBO起源天体の供給フラックス等の総合的定量化が必要だが、素過程の理解進展で、それが可能な状況になりつつある。

一方で、月惑星探査により、キークレーターの形成絶対年代を決めることで、天体毎のクレーター生成率の時系列変化の確定し、さらに天体表面の場所によるクレーター生成率の空間変化[3]や、一次/二次クレーターの区別、天体表層の物性・構造などを明らかにできる。また、小惑星探査により、母天体形成、破壊による現天体形成、地球近傍領域到達などの年代を決めるとともに、小惑星の力学特性やレゴリス層の厚さ、自転進化などを明らかにできる。これらを総合することで、実証的な太陽系年代学を構築していくことが可能となる。

[1] Kobayashi, H., Tanaka, H., 2010, *Icarus* 206, 735—746

[2] Morbidelli, A., Vokrouhlický, D., 2003, *Icarus* 163, 120—134

[3] Morota, T., Ukai, T., Furumoto, M., 2005, *Icarus* 173, 322—324

小惑星探査ミッション「はやぶさ2」の 進捗状況について

○吉川真¹、南野浩之¹、中澤暁¹、安部正真¹、津田雄一¹、

「はやぶさ2」プロジェクトチーム

¹宇宙航空研究開発機構

小惑星探査ミッション「はやぶさ」の後継ミッションとして検討されてきた「はやぶさ2」は、本年度（2011年度）からプロジェクト化された。現在、概念設計、基本設計、そして詳細設計と作業を進めているところである。2014年の打ち上げを目指して作業を進めているがその進捗状況について報告する。

2005年11月、「はやぶさ」探査機による小惑星イトカワからのサンプル採取が予定された手法でできず、さらに探査機にも深刻なトラブルが発生してしまったことを受けて、確実に小惑星物質を採取するために新たなサンプルリターンミッションとして「はやぶさ2」が2006年に提案された。提案された当初は、「はやぶさ」とほぼ同じ探査機でほぼ同じことを行う想定であった。これは、技術実証をなるべく早く行いたいという理由のため、「はやぶさ」で生じた不具合は改修した上で早期の打ち上げを目指したのである。ただし、探査する天体はサイエンスのアウトプットがより多くなるように、S型のイトカワとは異なるC型の小惑星1999 JU3が選定された。2011年前後の打ち上げを想定して検討は進められたがプロジェクトとして認められず、打ち上げを2014年に遅らせて検討は継続された。早期の打ち上げはできなかったが、打ち上げが遅れたことで、“ほぼ同じことを行う”という想定から新しいことにも挑戦するということに方針が変更された。そして、衝突装置という人工的にクレーターを作る装置について検討を進め、最終的には直径は数メートルではあるが人工的なクレーターを作って、地下物質も採取するというミッションとして検討が進められた。

2010年6月、「はやぶさ」が地球にカプセルを戻すことに成功し、同年11月には、カプセルの中からイトカワの物質が確認された。この状況を踏まえて、2011年度から「はやぶさ2」をプロジェクトとして開始することが認められた。そして、2011年5月1日、「はやぶさ2」プロジェクトチームが発足した。探査対象天体は1999 JU3のまま変更はなく、そのために、打ち上げウィンドウは2014年（バックアップが2015年）である。「はやぶさ」の経験があるとは言え、打ち上げまでの時間が通常の惑星探査ミッションよりかなり短いので、現在、進捗のスケジュールを管理しながら作業を進めているところである。現状は、2011年6月までで、サブシステムの基本設計が終了し、9月にはシステムの基本設計も終了する予定である。基本設計終了後は、ただちに詳細設計に取りかかっており、詳細設計の大部分は2011年内に終了させる予定となっている。2012年からは製作・組み立て・試験と続くことになる。

「はやぶさ2」は、最初の提案の時の想定よりかなり遅れてしまったが、「はやぶさ」のミッションを最後まで見届けることができたので、「はやぶさ」の経験をフルに取り込むことができる。次世代の小天体探査に向けたステップとして、より確実に探査を行う技術確立することを目指しつつ、C型の微小地球接近小惑星というこれまで人類が見たことのない天体の探査によって、惑星科学へ新たな貢献をしていきたい。

はやぶさ 2 のサイエンス

○安部正真¹, 吉川真¹, はやぶさ 2 サイエンスチーム

¹ 宇宙航空研究開発機構

はやぶさ 2 は小惑星イトカワからのサンプルリターンに成功したはやぶさミッションに続く小惑星からのサンプルリターンミッションである。探査対象天体は 1999JU3 ではやぶさの探査対象であったイトカワと同じ近地球型小惑星であるが、小惑星のスペクトル型は C 型であり、イトカワの S 型とは異なる。これまで、地上観測から S 型小惑星と C 型小惑星の太陽系内の存在範囲が異なっていることや、隕石の研究から S 型小惑星に対応すると考えられている普通コンドライトと C 型小惑星に対応すると考えられている炭素質コンドライトを構成する水や有機物の存在量が異なることが明らかになっている。これは、C 型小惑星が S 型小惑星とは太陽からの距離が異なる場所で形成された天体であることを物語っているが、C 型小惑星が実際に炭素質コンドライトと対応する天体なのかや、炭素質コンドライトのサブグループである、CI, CM, CV/CO などの水質変成度や酸素同位体の異なる物質が、どのように形成されているのかは、まだ十分明らかになっていない。実際に小惑星に探査機を送り込み、小惑星表面の複数地点からサンプルを採取することにより、C 型小惑星表面上にどの程度物質の不均一性があるのかを明らかにすると、C 型小惑星と炭素質コンドライトの対応を明らかにするだけでなく、C 型小惑星の天体内部での水質変成（熱変成）の過程や C 型小惑星形成時に取り込んだ物質の酸素同位体およびその他の物質的情報から、C 型小惑星形成前および形成後の天体の物質進化に関する情報を紐解くことができると考えている。特に C 型小惑星には、S 型小惑星の探査では調べるのが困難であった、水や有機物などの低温凝集物やそれらの相互作用について調べることができると考えており、S 型小惑星の研究からは明らかにならなかった、太陽系の低温領域の形成時の情報や、微惑星形成前の始原物質の情報が得られる可能性がある。これらの研究は隕石の研究でも行われているが、サンプルリターンによって、地球物質による汚染を極力抑えた形で分析することができるため、これまでにない新たな発見が期待できる。またはやぶさ 2 では衝突装置を小惑星表面に衝突させ人工的なクレータ形成を試みる。この実験を通して、地上試験では確認できないスケールの微小重量下での衝突現象を観測することができる。期待されるデータは、クレータサイズ・形状やイジェクタに関する情報で、小惑星の集積や破壊現象を考える上での重要なスケージング測が明らかになるだけでなく、重力計測などから推定される密度や天体内部の空隙率などの物理的な情報と合わせて、天体の形成過程に関する情報を紐解くことができると考えている。

はやぶさ 2 搭載レーザ高度計の科学目標

○平田成¹, はやぶさ 2 プロジェクトリモートセンシングサブチーム, 水野貴秀²

¹会津大学, ²宇宙科学研究所

LIDAR (Light Detection And Ranging) は小惑星表面に向けてレーザ光パルスを照射し、小惑星表面からの反射光パルスが戻ってくるまでの時間を計測することで小惑星表面までの距離を計測するシステムである。LIDAR は小惑星探査機「はやぶさ 2」の航法誘導制御系を構成するバス機器として開発、搭載され、小惑星近傍における探査機の自己位置同定のための重要なデータを取得する一方で、理学観測機器としても用いられる。

理学機器としての LIDAR の目標は以下の 4 つである。1) 小惑星のバルク密度と空隙率の測定、2) 小惑星内部の密度構造の推定、3) 小惑星表面のラフネスの測定、4) 小惑星表面のアルベドの測定。これらの中で最も重要なのが、小惑星のバルク密度と空隙率の測定である。撮影時の自己位置同定済みのカメラ画像から小惑星の三次元形状を推定し、探査機がスラスタ噴射を行わない自由落下中の LIDAR 測距値から小惑星の重力・質量を推定することで、バルク密度を見積もり、隕石物質（探査機帰還後には実際の試料）の密度から空隙率を求めることを計画している。

小惑星探査機「はやぶさ」の重要な成果の一つは、小惑星イトカワが rubble-pile 構造を持っていたという発見である。これは、イトカワの特異な形状、40%という非常に大きな平均空隙率、そしてイトカワ表面の多数の boulder の存在によって明らかになった。しかし、イトカワが rubble-pile 構造を持っていることの意味についてはまだ十分な議論がなされていない状態である。これは、多数の小惑星の中でイトカワの rubble-pile 構造が特異なものなのか、普遍的なものなのか依然として不明である、ということが影響していると考えられる。「はやぶさ 2」の探査対象天体である小惑星 1999JU3 はイトカワの約 2 倍のサイズであり、これが rubble-pile 構造を持つか否かという問題は、直径 1 km 以下の小天体の内部構造を考える上で決定的な意味を持つはずである。

rubble-pile 構造小惑星は、より大きな天体の衝突破壊破片が再集積することによって形成される。従って、rubble-pile 構造小惑星が普遍的であれば、母天体の衝突破壊の破片サイズ分布が即娘天体のサイズ分布とはならないことを示唆する。また、rubble-pile 構造は見かけの破壊強度が高いとされているため、一旦天体が rubble-pile 構造をとると、それ以降の衝突に対して耐える確率が上がることになる。つまり、rubble-pile 構造小惑星の生成率の大小が、小惑星の衝突破壊・再集積過程によるサイズ頻度分布進化に影響を与えるということになる。本発表ではこの問題について、モデルからの予想や観測データの比較などに基づくより詳しい検討を加え、議論する。

「はやぶさ 2」搭載中間赤外カメラ (TIR) による科学観測

○岡田達明¹, 中村良介², 福原哲哉³, 田口真⁴, 今村剛¹, 関口朋彦⁵, 長谷川直¹,
小川佳子⁶, 松永恒雄⁷, 和田武彦¹, 荒井武彦⁸, 北里宏平⁶, 山本幸生¹, 太刀川純孝¹,
はやぶさ 2・リモートセンシングサブチーム¹

¹JAXA, ²産総研, ³北海道大, ⁴立教大, ⁵北海道教育大, ⁶会津大, ⁷国環研, ⁸NAOJ

次期小惑星探査機「はやぶさ 2」に搭載する中間赤外カメラ (TIR) は小惑星表面からの熱赤外放射を 10 ミクロン帯で 2 次元撮像することにより, 世界初の小惑星サーモグラフィを行う観測装置である. 金星探査機「あかつき」搭載の中間赤外カメラ (LIR) と同型であり, 短期開発を確実にするとともに, 320×240 画素をもつ非冷却 2 次元ボロメータアレイで比較的広角視野 (12° × 16°) を有する特性を活かした観測を実施する.

C 型小惑星は低アルベドであり, 太陽光の大部分を吸収し, 約 10 μm にピークをもつ熱放射を行うため, 中間赤外帯 (8~12 μm) に検出帯域をもつ TIR は熱撮像に適する. 表面温度は表層の熱の浸み込みやすさ (熱伝導率) や保温力 (比熱) から決まる熱慣性によって変わる. 小惑星の自転による各地域ごとの温度プロファイルから, 各地域での熱慣性など熱物性を調べることができる.

「はやぶさ 2」の主目的は C 型小惑星からのサンプルリターンであり, リモセン機器の主任務はサンプル採取地点の選定, サンプル回収運用の情報提供, およびサンプル採取地点の産状把握である. TIR は地点選定に必須な表層状態 (レゴリス, 砂利, 岩) を危険で燃料消費の多い接近運用せずに判別できること, 探査機の安全な運用計画の立案に必須な小惑星からの熱放射分布を得ること, サンプル採取地点付近の熱物性の分布を高解像度で得て, 表層の状態や熱履歴推定に必要な情報を得ることで貢献する.

TIR による科学観測として, 各地域の現在の温度および過去の熱履歴から表層物質, 特に有機物の熱変成や鉱物の水質変成の進行を推定する. 小惑星 1999JU3 の軌道履歴の推定 (Michel et al, 2011) では近日点が 0.7AU 付近まで変化したこともあり, 熱慣性によっては過去に 500K を超える高温を経た可能性がある. C 型小惑星の平均密度は一般に低い, 岩塊どうしの隙間が多い構造なのか, 岩塊自体が高空隙かは分かっていない. イトカワに見られるような巨大岩塊は母天体内部で圧密を受けた物質だが, 変成岩のように高密 (高熱慣性) か堆積岩のように低密, あるいは高空隙率 (低熱慣性) か評価できる. また, 巨大クレータがあれば, 露出する内部構造の熱物性を調べることで直接的に評価できる. これらは C 型小惑星の形成過程や熱史の理解に重要な役割を果たす.

そのほか, 軌道・自転変化を引き起こす Yarkovsky 効果や YORP 効果, 地形観測 (夜側含む) や衛星探索など熱赤外カメラの特性を活かした観測を行い, 他の観測機器と合わせて小惑星の科学研究に貢献する.

はやぶさ 2 衝突装置の科学目標

○高木靖彦¹、はやぶさ 2 衝突装置科学チーム²

¹愛知東邦大学、²JAXA

「はやぶさ 2」は、サンプル採取装置、遠隔観測機器（可視カメラ、レーザー距離計、中間赤外線カメラ、近赤外分光器）、小型ランダーと共に、小型搭載衝突装置を科学探査のための機器として搭載していく。小型衝突装置には、「衝突体を天体に衝突させる実証を行う」という工学目標が第一にあるが、ここでは理学目標についてまとめる。

1. 装置概要

小型搭載衝突装置は、重さ約 2 kg の無酸素銅のライナーを爆薬の燃焼（爆轟）により約 2 km/sec に加速し、小惑星表面に衝突される装置である。爆轟により衝突装置自体は破壊され、破片は四方八方に高速度で飛散することになる。そのため、衝突装置を切り離れた後の母船は、発火までの間に小惑星の陰に退避する必要があり、衝突の瞬間を母船から観測することはできない。それに代わるものとして、分離カメラの検討が行われているが、探査機総重量の問題からオプション扱いになっている。

2. 科学目標

(1) 小惑星内部物質に関する知見を得る

目標天体 1999 JU3 は、近地球軌道にいる間に表面のかなりの部分が 500 K 程度まで加熱され、表面の有機物のある程度は分解されたと考えられている。しかし、表面下 5 cm の部分になると 400 K 以下に抑えられていると予測される。したがって、これ以上の深さにある物質を露出させ、それを遠隔観測機器で観測する、可能ならばサンプリングを行う。それにより、近地球での熱的影響を受けていない物質の知見を得るとというのが第一の目標である。

(2) 小惑星内部構造に関する知見を得る

形成されたクレーターの形状を可視カメラで 5 cm 程度の空間分解能で観測することにより、小惑星の内部構造に関する知見を得ることをめざす。また、分離カメラでイジェクタ・カーテンの放出角度を観測することができれば、衝突点直下の物質の空隙率を推定する手がかりとなる。

(3) 再集積過程に関する知見を得る

クレーター周辺に堆積したイジェクタの厚さ分布が観測されれば、クレーター掘削段階での流線モデルを用いることにより放出物の速度分布を推定可能となり、放出物の再集積過程、さらには小惑星の形成過程に関する何らかの知見を得ることが可能となる。

はやぶさ 2 に向けた、X線CTによる新しい 地球外物質分析手法の開発

○上相真之¹、上杉健太郎²、竹内晃久²、鈴木芳夫²、星野真人²

¹JAXA/JSPEC

²JASRI/SPRING-8

はやぶさ 2 は炭素質コンドライトの母天体であると考えられている C-type 小惑星でのサンプルリターンを計画している。炭素質コンドライトは岩石鉱物の他に有機物や水など、地球外の多くの貴重な物質を含んでおり、この隕石をできるだけ非破壊で詳細に分析する手法を確立することは重要である [1]。

X線CTは隕石を非破壊で3次元的に観察する手法として近年盛んに用いられ始めており [2-3]、Stardust やはやぶさの初期分析でも非常に重要な役割を果たしている [4-5]。しかし、三次元データの取り扱いの難しさや定量の困難から、X線CTは多くの場合主に組織観察に用いられてきた。しかし、実際にはX線の吸収量から物質の定量解析も可能であり、組織観察と組み合わせることで極めて詳細な分析が可能である [6]。本研究ではこの定量性に着目し、はやぶさ 2 で得られた試料を放射光X線CTで定量的に観察・分析するための技術開発として、複数の炭素質コンドライトのX線CT観察・分析を行った。また、その問題点解決のために、新しいCTの装置開発を行った結果も併せて報告する。

本研究ではCM, CV, CO, CI など、複数のクラスの炭素質コンドライトを観察、分析した。隕石の構成物質、特に珪酸塩のX線吸収量は主に鉄の含有量に影響される。X線の吸収量は線吸収係数で表されるが、この線吸収係数をヒストグラム化し、そのピーク特性を調べる事で、内部の主要構成物質とその化学組成、つまり鉄の含有量を定量的に調べる事が出来る。X線CTでは隕石内部の組織も解析できるため、ヒストグラムを利用してコンドリュールとマトリクスそれぞれの組成を分析することが可能である。ヒストグラムの解析にはガウス関数によるフィッティングを行い、ピーク位置、半値幅などを求めた。解析の結果、コンドリュールとマトリクスのピーク位置、つまり平均的な鉄の含有量には相関が見られ、また、その比率は隕石ごとに特徴的だった。これはコンドリュールとマトリクスの形成環境、あるいは前駆物質に何らかの共通性があったことを示して居ると考えられる。また、この特徴的な鉄の含有量の比率を用いることで、X線CTを用いて、組織観察だけでなく組成からも、定量的に炭素質コンドライトのクラスを調べる事が可能であることが、同時に示唆される。

しかし、この解析においては、ヒストグラムのピークに該当する鉱物が何であるのかは判別できない。これはX線の吸収量が珪酸塩同士で非常に近い値を持っているからであり、かんらん石と輝石をヒストグラムから区別することは、1mmを超える大きな試料の場合は不可能である。そこで我々は鉱物相を同定するために新しく、X線回折とX線CTを組み合わせた、XRD-CT装置を開発し、試験を行った。その結果、serpentine, olivine, tochilinite, pentlandite等の鉱物を分離して観察することが可能であることが分かった。現在までの所、3次元観察を行うには多くの問題があり、そのままでは使用できないが、将来的には吸収X線CTとこのXRD-CTを組み合わせることで、非破壊で詳細な観察・分析が可能となる

Reference: [1] Matsumoto et al., 2011, MAPS, A5421 (abstract) [2] Tsuchiyama et al., 2005, Am Mineral, 90, 132 [3] Ebel and Rivers, 2007, MAPS, 42, 1627 [4] Nakamura et al., 2008, Science, 321, 1664 [5] Tsuchiyama et al., 2011, Science, in print [6] Uesugi et al., 2010, EPSL, 299, 359

SELENE-2 の着陸地点推薦

○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⁴、

小林直樹⁴、春山純一⁴、杉原孝充⁵、本田親寿⁶、佐藤広幸⁷

¹大阪大学、²千葉工業大学、³国立天文台、⁴宇宙航空研究開発機構、

⁵海洋研究開発機構、⁶会津大学、⁷アリゾナ州立大学

日本の次期月着陸探査計画 SELENE-2 が、2010 年台半ばの打ち上げを目指して宇宙航空研究開発機構において計画されている。目的は、(1) 着陸・移動・長期滞在技術の開発と実証、(2) 月の科学探査と月の利用可能性調査、(3) 国際貢献と国際的地位の確保、の三点である。月の表側、中・低緯度地域への着陸をめざしており、着陸機、ローバー、周回衛星から構成される予定である[1]。2010 年 3 月に月着陸地点検討会議が SELENE-2 プリプロジェクトのサブチームとして発足した。本検討会議の役割は、月惑星科学における第一級の課題解決のため、SELENE-2 探査が目指す科学目標を明確に設定し、目標達成のためにはどこに着陸し、どのような戦略で観測を行うべきかについて議論・提案することである。2010 年 6 月に日本惑星科学会をはじめ、広く月科学に関心のある地球惑星科学関連の研究者に呼びかけ、21 グループから、35 件の科学テーマと約 70 箇所の着陸地点の提案が寄せられた。提出された提案を検討会議から選出されたコアメンバー（本稿の著者）で検討し、月科学の課題として「太陽系初期における月・地球系の形成過程の解明」および、「集積後の月の水平垂直構造の進化過程の解明」の二大テーマを設定した。そして、二大テーマのいずれかに多角的なアプローチが可能な着陸地点をコアメンバーで抽出した。これらの過程を経て、今日もっとも優先すべきサイエンスを実行するための、それぞれに特色のある複数の着陸候補地と探査計画案が絞り込まれた。主な着陸候補地点は、Copernicus、Mare Humorum、Marius Hills、Hansteen Alpha、Zucchius、縦穴、Reiner Gamma、Tycho、Apollo14、Ina、の 10 箇所である。SELENE-2 には、広範な分野の学会から提案が集まっているために、異なる分野の科学提案の意義をお互いに理解し、比較検討することには困難が伴う。そこで、メーリングリストを立ち上げ、着陸地点レビュー原稿等、資料を閲覧できるサーバーも準備し、検討会のメンバーが各着陸地点についての情報を共有し、議論できる仕組みを整備した。また、科学成果の達成の可否を厳しく相互に検証できるように、評価項目を準備し、検討参加者が評価投票をすることを目標に、自分の専門分野外の科学提案の議論にも積極的に参加する雰囲気づくりも行った。講演では、各地点の探査計画案と評価内容を紹介する。

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

ペネトレータ地震計ネットワークによる 月震観測

○山田竜平¹, 白石浩章¹, 竹内希², 小林直樹¹, 田中智¹, 村上英記³, 石原靖⁴,
岡元太郎⁵, 早川雅彦¹, 早川基¹, Raphael Garcia⁶, Philippe Lognonné⁷,
¹ISAS/JAXA, ²東大地震研, ³高知大学, ⁴JAMSTEC, ⁵東京工業大学,
⁶トゥールーズ大学, ⁷IPGP

2010年8月、日本の月内部構造探査計画 LUNAR-A で開発が始められた槍型の観測装置「ペネトレータ」は、20年の歳月を経てその耐衝撃性技術の完成が確認された。ペネトレータは高速貫入型プローブであり、複雑な姿勢制御や熱制御機構を省略できるため、従来の軟着陸機と比較しても格段に小型・軽量である。そのため、一度のミッションで多数のペネトレータを周回衛星に搭載できるので、惑星表面に観測ネットワークを構築するのに優れたシステムである。本発表においては、このペネトレータ搭載用として開発された地震計の観測性能と、地震計観測ネットワークを月面に展開した場合に期待される科学的成果を評価したので、その結果について報告する。

ペネトレータ搭載地震計の観測性能は観測試験と環境試験、数値計算により評価した。観測試験は月面設置時に想定される貫入衝撃よりも大きい衝撃加速度(10000G以上)を加えたペネトレータを地震観測所に設置して、リファレンス地震計と比較することで行った。また、環境試験ではペネトレータ月面埋設時に想定される月レゴリス内の温度-20℃での地震計の周波数応答とノイズレベルを調べた。この月面下で想定される地震計の応答とノイズレベルを用いて地震計の検出限界を評価した。更に、アポロ月震観測で得られた波形データを基にペネトレータの月地震イベントに対するS/Nについても評価を行った(Yamada et al., 2009)。

一方、期待される科学的成果については、先に調べたペネトレータ搭載地震計の性能でどの程度の月震イベントを検出でき、ネットワーク探査によりこれまでの月内部構造モデルをどの程度改善できるか評価した結果を示す。特に、ペネトレータは月の裏側への設置を想定しているので、月表側震源からのコア通過波を検出する事も期待される。本研究では、アポロ月震探査で決定された活動度の高い深発月震源から発生するイベントの振幅値を、アポロ観測時の活動度を基に見積もり、ペネトレータ搭載地震計の検出限界と比較することで、直達波やコア通過波がどの程度観測されるか評価する。それから、月内部構造調査にとって、ある最適な観測ネットワーク配置を想定したとき(Yamada et al., 2011)、検出可能なイベントデータから、これまでの月内部1次元構造モデルがどの程度改善されるかも議論する予定である。

月面観測機器の越夜技術: サバイバルモジュールの開発 Lunar survival module for scientific instruments on lunar surface

○小川 和律¹, 飯島 祐一¹, 坂谷 尚哉¹, 大嶽 久志¹, 田中 智¹

○ Kazunori Ogawa¹, Yu-ichi Iijima¹, Naoya Sakatani¹, Hisashi Otake¹, Satoshi Tanaka¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹ Japan Aerospace Exploration Agency

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

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得て、内部の密度、物理状態、組成、地殻厚、コアの有無などについての制約条件を推定し、月の起源、熱史などの議論を発展させることができる。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。温度制御機構は、これら長期観測機器の成功を左右する重要な開発課題である。

現在まで、我々が提案する月面サバイバルモジュールについて、熱数学モデルによる評価、熱性能評価用試作機を用いた熱パラメータの確認などを行い、熱設計の有効性を示してきた。サバイバルモジュールは機器と周囲の地面を山形が多層断熱膜 (MLI) で覆い、内部機器を地下の温度安定層と積極的に熱結合させるという、環境をうまく利用する手法により、昼夜の温度変動を 0 から 40°C までの範囲に抑える。またモジュール内部に組み込む、山形 MLI 展開機構、また通信系、データ処理系、電源系などのサブシステムについて、検討と一部の試作・実証試験を行ってきた。

本発表では、モジュール内サブシステムの開発状況を中心に報告する。熱設計の鍵となる山形の 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、月面で展開する。このための機構は、折り畳み MLI の展開性、駆動方式などに新規開発要素があり、とりわけ入念な検討と実証が必要であるため、展開方式のトレードオフを実施し、試作機を製作して試験を行ってきた。また、磁力計・月震計のノイズ低減のため、モジュール内部に極めて静かな磁場環境が要求されている。このため、磁場源となりうる要素について早期より磁場試験を実施して、対策検討を行ってきた。

MELOS 火星探査計画の検討状況

○佐藤毅彦¹・久保田孝¹・宮本英昭²・今村剛¹・松岡彩子¹・岡田達明¹・尾川順子¹

火星複合探査 MELOS ワーキンググループ

¹宇宙航空研究開発機構・²東京大学

火星複合探査 MELOS (Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy の略) ワーキンググループでは、2020 年頃の打ち上げを目指して検討を行っている。米を中心に精力的な火星探査が続けられ、火星の複雑な様相が明らかになってきた。しかし固体惑星・表層・大気圏・プラズマ圏などがどのように絡み合っている現在の火星環境となったのか、その歴史を精度よくモデル再現するための「系」としての理解はまだこれからで、MELOS はそこに挑もうとする(諸外国ミッションとともに)火星のシリーズ探査である。

MELOS には複数のグループが探査計画を提案している。周回サイエンスとしては、火星気象学(今村ら:ダストや水などの物質循環、「あかつき」金星探査とともに比較惑星気象学の一部をもなす)、火星大気散逸科学(松岡ら:「のぞみ」が目指し、いまでも重要性を失っていない科学への再挑戦)が提案されている。着陸サイエンスとしては、ローバーによる表層環境探査、火星生命探査、固定ステーションネットワークによる内部構造探査、無着陸によるサンプル(ダストと大気)リターンが提案されている。「あかつき」の金星周回軌道投入失敗を踏まえるならば、探査のステップとしては「惑星周回軌道投入の確実な成功」を成しとげることが重要である。そこで MELOS シリーズの最初である MELOS1 は周回機主体のミッションとし、そこに大気突入 Entry、降下 Descent、着陸 Landing の実証モジュールを組み合わせた構成とする。着陸サイエンス提案をフルスケールで EDL モジュールに搭載することは現実的ではないが、小粒でも光るサイエンスを実施できるよう搭載ペイロードについて検討が重ねられている。

秋季講演会の前に二つの周回サイエンス案から一つへの絞り込みを実施している(本稿の執筆時点では未実施)。講演会ではその結果を報告する。周回サイエンスが固まれば、それと組み合わせてメリット(火星科学として、またはミッション運用上)の高い着陸サイエンスが決まることになり、それを含めて見えてきた MELOS1 のミッション全体像を報告する。

Japan Astrobiology Mars Project (JAMP)

火星表面におけるメタン酸化菌探査 (MELOS 生命探査 SWG)

○山岸明彦¹、吉村義隆²、久保田孝³、春山純一³、小林憲正⁴、本多元⁵、内海裕一⁶、才木常正⁷、宮川厚夫⁸、長沼毅⁹、大野宗祐¹⁰、三田肇¹¹、戸野倉賢一¹²、佐々木晶¹³、宮本英昭¹²
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静岡大、⁹広島大、¹⁰千葉工大、¹¹福岡工大、¹²東京大学、¹³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なからである。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）が生存してい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中で温度、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かと推定している。

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 MELOS 計画のサブグループとして検討中の探査方法について報告する。

原始衛星系円盤の形成：原始惑星系円盤からのガス降着流の解析

○谷川 享行^{1,2}、大槻 圭史^{1,3}、町田 正博⁴¹ 惑星科学研究センター、² 北大低温研、³ 神戸大理、⁴ 九大理

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ないために、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。得られた流れ場を解析した結果、惑星への実質的なガス降着は、原始惑星系円盤の比較的上空（円盤スケールハイト程度より上）から周惑星円盤外縁部を飛び越えて一気に惑星近傍の周惑星円盤へと落下していることが明らかになった。一方、中心面付近のガスについては、原始惑星系円盤から周惑星円盤へ流入することができず、逆にヒル圏内からラグランジュポイント L_1 , L_2 を通って流出していることが分かった。さらに、上空から周惑星円盤への降着流に関して、質量と角運動量の降着フラックス分布を惑星からの距離の関数として数値計算より求め、それらをべき関数でのフィットを行った。これを、例えば動径方向 1 次元粘性円盤モデルに適用することで、本研究のような高解像度数値計算では得ることのできない周惑星円盤の長期進化を追うことが可能となり、衛星形成環境の時間進化を調べることが可能となる。

原始惑星系円盤におけるダストと磁気乱流の共進化

○奥住聡¹, 廣瀬重信²¹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、このことから円盤は MRI が形成される上層部と形成されない下層部（赤道面部）の2層構造をもつと考えられている(Gammie 1996)。ここで興味深い点は、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・空間分布によって決まるという点である(Sano et al. 2000)。このことは、ダストと円盤の乱流が相互に影響を及ぼしながら進化することを示唆する。

我々はこれまでに、このようなダストと磁気乱流の共進化過程を明らかにするため、2層構造をもつ円盤内での乱流強度を MHD 数値シミュレーションによって調べ、電離度分布から乱流強度を推定する経験公式を得ている(Okuzumi & Hirose 2011)。今回は、この経験公式を利用して、2層円盤中におけるダストの成長/破壊の統計的シミュレーションを実施した。この結果、円盤を貫く縦磁場がある程度弱く、かつ付着力の強い氷ダストが豊富にある環境では、ダストが大規模な衝突破壊を免れて成長し続けられることを明らかにした。この結果は、微惑星形成に対する障害の1つと考えられてきたダストの衝突破壊が、円盤の各領域の環境（磁束、温度）によっては回避されることを示すものである。

原始惑星系円盤デッドゾーンの磁場構造

○廣瀬重信（海洋研究開発機構）

現在では、原始惑星系円盤の質量降着ストレスの起源は、磁気回転不安定性が駆動する磁気乱流にあるという考えが一般的となっている。ただし、円盤内部は電気抵抗が大きいため、磁気乱流が生じない「デッドゾーン」となるため、通常、磁気ストレスは（非熱的電離が効く）円盤表面でのみ働くと考えられている。

一方、デッドゾーンでは磁気乱流こそ生じないものの、必ずしも磁場が弱いというわけではない。なぜなら、何らかの方法で動径成分が供給されれば、それをもとに、差動回転によって方位角成分（トロイダル磁場）が増幅されるからである。そして、このトロイダル磁場が効率よく取り除かれられない場合には、デッドゾーンでの磁気ストレスも増大しうる。

本研究では、シアリングボックス近似によるローカルなMHD計算を用いて、デッドゾーンにおけるトロイダル磁場の増幅が、抵抗分布にどのように依存するかを調べた。それによると、特に、デッドゾーン境界の位置が相対的に上方にある場合（表面密度が高い場合に相当）に、デッドゾーンに非常に強いトロイダル磁場を持つ平衡状態に至ることがわかった。この平衡状態では、通常のデッドゾーンを持つ場合と比べると、磁気エネルギーの積分値は約20倍、ストレスの積分値は約5倍であり、垂直方向の力学構造も大きく異なる。

一方、グローバルに見ると、デッドゾーンで強められたトロイダル磁場は、動径方向に散逸し得る。本講演では、その散逸効果を近似的に取り入れたシアリングボックス計算の結果から、デッドゾーンにおけるトロイダル磁場の増幅と（動径方向の）散逸のバランス、また、その結果成立する平衡状態における磁場構造についても議論する。

光蒸発によるデッドゾーン外側でのギャップ形成

○森島龍司¹

¹カリフォルニア大学ロサンゼルス校

散逸過程にある原始惑星系円盤はトランジションディスクとよばれ、一般的にディスクの内側は光学的に薄く、外側は光学的に厚いことが観測から知られている。内側の光学的に薄い領域の大きさは大きいものでは 70 AU に達する。さらに大部分のトランジションディスクでは、中心星へのガス降着が続いていることが知られ、降着率は典型的な T タウリディスクの値よりやや低い程度である。トランジションディスクの内側領域ではダストの成長等により、オパシティーが減少していることが示唆されるが、それだけでは、外側領域との境界が明快であることが説明できない。巨大惑星がギャップを形成している可能性があるが、中心星から数十 AU 離れたところに巨大惑星が存在することが一般的であるかは、成長のタイムスケールの問題などからは疑問が残る。一方、光蒸発でもディスク中にギャップ形成が起こるが、観測されているような大きなサイズのものはモデルでは再現されていない。

これまでの光蒸発の研究では、ディスクの粘性係数が一定としたものだけが考えられてきたが、本研究ではディスクにデッドゾーンと呼ばれる低粘性係数領域が存在する場合の計算を行った。磁気回転不安定によりディスクに乱流が起こっているとし、粘性係数は Suzuki et al. (2010) に基づいたものを使用した。ディスクの温度構造には、粘性加熱と中心星からの輻射を考慮にいたした。光蒸発は中心星からの X 線加熱により起こるとし、Owen et al. (2010, 2011) が導いた質量損失率を使用した。ガスディスクの一次元粘性進化の式を数値的に解き、ディスクの面密度、温度、質量降着率の時間進化を求めた。

計算の結果、光蒸発による質量損失率が中心星へのガス降着率を上回る場合、デッドゾーンの外側にギャップが形成することが分かった。ギャップの大きさは、観測されているものと非常によく一致した。ギャップが形成しても、内側にはデッドゾーンが存在し続けているので、観測されているような高い質量降着率が再現されることも分かった。

本研究では、さらに上述したディスク中での惑星移動を計算した。ディスクにギャップを開ける巨大惑星はガスと同じ速度で動径方向に移動することが知られていて、これはタイプ II マイグレーションと呼ばれる。もし、デッドゾーン中の外側領域で巨大惑星が形成した場合、これらは最初内側に移動するが、やがて外側に移動を始め、最終的に 5–20 AU 付近に落ち着くことが分かった。このような惑星移動は、強い光蒸発がある場合デッドゾーンの外側でのガスの流れが外向きであることと、デッドゾーンの外側境界が巨大惑星よりも速い速度で内側に移動することで説明される。

Planet migration in an optically thick disk

光学的に厚い円盤での惑星移動

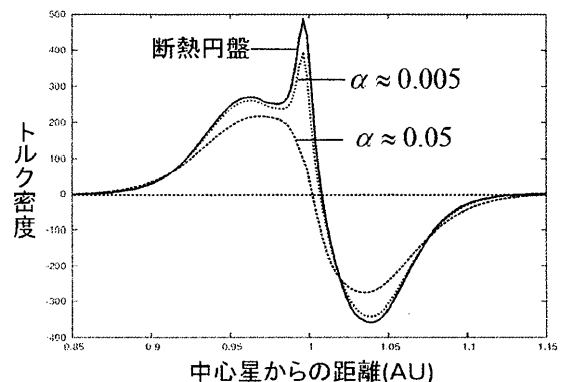
○山田耕^{1,2}, 稲葉知士³¹神戸大学, ²惑星科学研究センター, ³早稲田大学国際教養学部

地球質量程度の惑星とガス円盤との重力相互作用は、惑星の軌道に大きな影響を与える。エネルギー方程式を考慮しない過去の研究では、円盤のライフタイムよりも短い時間で惑星が内側(中心星方向に落下)に動くという結果を示していた。しかし、エネルギー方程式を考慮した最近の研究により、円盤の熱的な構造が密度波を変えることがわかってきた。Yamada & Inaba (2010)では、光学的に薄い円盤を想定して円盤構造と輻射による冷却効果が惑星移動にどのような影響を与えるのかについて調べた。その結果、輻射冷却が0の条件下(このような円盤を断熱円盤と呼ぶ)で円盤構造を変化させた場合エントロピー分布のベキ(λ とする)が $\lambda = -0.4$ の時に惑星にかかるトルクが0となり、 λ が小さくなると移動方向と速度が外向き(中心星から離れる方向)で大きくなることがわかった。

本研究では光学的に厚い降着円盤内での惑星移動に着目し、その様子について調べる。光学的に厚い円盤の温度分布は粘性加熱と輻射冷却とのバランスで決まるため、dust opacityに依存する。そのため、シリケートなどがダストの主成分の領域1、氷が主成分の領域3、その中間領域2で温度分布のベキが異なる。この分布から λ を計算すると、領域1と3では $\lambda < -0.4$ 、領域2では $\lambda > -0.4$ となることがわかった。断熱円盤を仮定すると、Yamada & Inabaの結果から領域1では惑星は外に動き、領域2では惑星が内に動くことになる。これは、領域1と2境界で惑星が止まり、そこに惑星が集まる可能性を意味している。領域1と2の境界位置は粘性率やdust opacityの値に依存しているが(Hasegawa et al. 2011)、降着円盤で観測されている粘性値とdust opacity値を使うと概ね1AU付近にくる。しかし、実際は輻射の効果や粘性の効果により上述した予想が成り立たない可能性もある。

本研究ではどのような輻射効率と粘性の時に領域1, 2境界で惑星が止まるのかについて2次元のグローバル流体計算を用いて調べた。粘性加熱率と輻射冷却率の比を一定にしたまま、粘性率を α 値で約0.05から0.005まで変化させた計算を行い、 $\alpha < 0.01$ の時に領域1で惑星は外移動になることがわかった。これは、粘性が低いと惑星にかかる共回転トルクが強まるためである。図は領域1にある惑星にかかるトルク密度を示している。粘性率が小さくなると惑星近傍のトルクが増えていることがわかる。これに伴って、全トルクも増加し、外移動に転じる。一方で、領域2では粘性率に関わらず惑星は内側に移動するため、低い粘性率の時に領域1, 2境界で惑星の移動速度が0になる。

図：トルク密度(縦軸は無次元化されている)を示す。
実践は断熱円盤の場合、点線は粘性率($\alpha = 0.05$)の場合、破線は $\alpha = 0.005$ の場合。惑星は1AUに置き、領域1, 2境界は1.4AUである。



微惑星まわりの弧状衝撃波： 水素分子の解離を含めた流体シミュレーション

○山崎布美香¹、中本泰史¹

¹東京工業大学 地球惑星科学専攻

原始惑星系円盤内を超音速で運動する微惑星の周りには、弧状の衝撃波が発生する。この弧状衝撃波によって、微惑星の蒸発やコンドリュールの形成が起こるのではないかと考えられている。これらの現象について調べるには、微惑星まわりの流れの様子を詳しく追う必要がある。

しかし、円盤内で発生する衝撃波の先行研究では、様々な化学反応を含めた1次元平行平板での衝撃波の計算(Iida et al., 2001)や、断熱の条件で2次元での微惑星まわりの弧状衝撃波の計算(Ciesla et al., 2004, Nakajima 2010(master thesis))が行われているが、化学反応を含めた2次元での衝撃波の計算はこれまでに行われていない。

そこで本研究の目的は、原始惑星系円盤内で衝撃波が起こる際に支配的になるとと思われる化学反応（水素分子の解離・再結合反応）を組み込んだ流体力学計算コードを作成し、衝撃波を含む流れに与える化学反応の影響を調べることである。今回は近似的に、流体計算の時間ステップごとに水素分子の解離・再結合の平衡を仮定して計算を行った。

第一段階として1次元の計算を行った結果、水素分子の解離・再結合の効果を流体計算に加えると、衝撃波後面での温度が水素分子の解離が起こる温度に到達する時には、解離を考慮しない場合よりも衝撃波後面での温度が下がり、一方で密度は高くなることが分かった。

2次元計算を行うと、断熱の計算では微惑星前面の温度が5000Kにも達する。水素分子の解離は2000K程度で活発に起こり、温度上昇はその付近で抑えられるので、水素の解離を無視することはできない。また、これに伴って再結合も起こることにより、水素分子の解離・再結合を入れた計算では、断熱の場合とは流れの様子が大きく変わる。

講演では、これらの反応を含めた2次元の流体計算の詳細な解析結果について議論する。

原始惑星成長期における 微惑星衝撃波による微惑星蒸発

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 東北大学、³ 東京工業大学

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

It has been shown that bow shocks associated with a planetesimal orbiting with supersonic velocity relative to the gas in a protoplanetary disk lead to formation of chondrules and crystals found in meteorites. In the previous studies, attention has mainly been paid to thermal evolutions of dust particles entrained in the gas when they pass through the bow shock. In the present study, we noticed heating and evaporation of a planetesimal itself. We evaluated surface temperatures and evaporation rates of planetesimals based on the results of the previous studies of planetesimal bow shocks and formation of protoplanets. We found that icy planetesimals evaporate efficiently by bow shock heating in the stage of formation of protoplanets, where strong bow shocks are produced by gravitational perturbations by the protoplanets.

原始惑星系円盤内で微惑星の離心率が大きくなり円盤ガスと微惑星間の相対速度が音速を越えると、微惑星の進行方向前面に衝撃波が生じる。微惑星衝撃波に関する従来の研究では、主に衝撃波面に突入するガス内に存在するダスト微粒子の加熱と熱進化に着目してきた¹。しかし、衝撃波後面で加熱されたガスが微惑星を吹きつけることにより、微惑星本体が加熱し蒸発が起きる可能性がある。本研究では微惑星衝撃波による微惑星の加熱および蒸発を記述するモデル化を行い、衝撃波の強さと微惑星の蒸発率との関係について調べた。円盤モデルとして最小質量モデル²を用いた場合、snow lineの外側となる軌道長半径 3-4AU 付近において、衝撃波速度が数 km/s 以上になると、微惑星の表面温度は 200K 程度まで上昇し、100km サイズの氷微惑星は数百万年以下で蒸発する。

原始惑星系円盤内で微惑星の離心率が上昇するケースとして、原始惑星の暴走成長期にモデルを適用した。標準理論によると、微惑星の形成後、微惑星の一部が暴走成長し原始惑星を形成する³。原始惑星が形成されると、周りの微惑星は重力散乱によりはね上げられ離心率が上昇する⁴。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。原始惑星の周りにおいて、大きな微惑星はガス抵抗があまり効かないために離心率が高くなる。その結果、数地球質量以上の原始惑星の周りに存在する大きな微惑星は蒸発が効率的に起き、数 10-100km サイズ以下の微惑星が残る。この微惑星蒸発が効く領域は小惑星帯付近と一致するため、snow line より外側にある岩石質の小惑星の存在を説明するかもしれない。また本結果は原始惑星が形成されるようなステージにおいても、円盤ガス中にダストがまき散らされることを示唆しており、 10^7 年の長い円盤年齢に渡ってダストが観測される結果⁵を説明するかもしれない。

References: [1] Miura, H. et al. *ApJ*, 719, 642-654 (2010), [2] Hayashi, C. *Progr. Theor. Phys.* 70 (Suppl.), 35-53 (1981), [3] Kokubo, E., and Ida, S. *Icarus* 143, 15-27 (2000), [4] Tanaka, H., and Ida, S. *Icarus* 139, 350-366 (1999), [5] Birnstiel, T. et al. *A&A*, 503, L5-L8 (2009)

原始惑星系円盤の非一様密度分布とダスト集積

○瀧哲朗¹, 藤本正樹², 井田茂¹

¹ 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

本研究では、原始惑星系円盤の円盤ガスに非一様な密度分布が存在する場合のダストと円盤ガスの時間進化を、ダストからガスへの抵抗の効果を自己無撞着に入れて局所一次元のモデルで計算した。

円盤ガスに非一様な密度分布が存在するとき、その圧力勾配の影響から付近にスーパーケプラー領域とサブケプラー領域を含む特徴的な回転速度分布が作られるため、それらの領域の境界ではダストが濃集する。このときにダスト密度が十分に高くなることで、ダストは自己重力不安定をおこして微惑星が形成されるという可能性がこれまでに議論されてきた。

しかし、先行研究では集積過程におけるダストからガスへの抵抗の効果が詳しく調べられてこなかったという問題がある。円盤内のダストが濃集していない領域においてダスト-ガスの質量比は圧倒的にガス過剰であり、そのような場合はダストからガスへの抵抗による角運動量の交換は無視できる。しかし本研究で考えるようなダストが濃集していく領域に関しては、次第にダストの運動が支配的になり、ガスはダストに引きずられてケプラー回転に近づくようになる。ダストとガスがともにケプラー回転している領域では、それ以上のダストの移動が起こらないので、ダストは自己重力不安定を起こしうる程度まで濃集できなくなってしまうことが考えられる。

実際に局所計算では、ダストが濃集するとガスの非一様密度分布がならされてしまい、ダスト-ガスの質量比は ~ 0.1 - 1.0 までしか上昇しなかった。これは濃集領域での自己重力不安定の可能性を否定するものである。

このように、ダストとガスが局所的に角運動量を交換する場合においては、ダストの最大密度は自己重力不安定による微惑星形成に不十分であることが分かった。本研究では、このような局所的なダスト-ガスの相互作用に加えて、ガスのよりグローバルな角運動量輸送に注目しこれをモデル化することで、ガスの非一様な密度分布が維持され Kato et al.(2010) によるもっと広い領域での MHD 計算で示されたダストの高密度領域が再現できるのかについても議論する。

ガス抵抗およびダスト層内の乱流を考慮した ダスト層の重力不安定性

○竹内拓¹

¹東京工業大学・地球惑星科学

原始惑星系円盤のダスト層での永年重力不安定について議論する。ダスト層は、ガス抵抗の効果により重力的に不安定である。しかし、乱流によるダストの拡散によって、拡散パラメーター α が 10^{-8} – 10^{-3} より大きいと、安定化されることが最近 Youdin (2011), Shariff & Cuzzi (2011) によって示された。ダスト層の不安定性を許す α の最大値は、ガス円盤やダスト層のモデルによって大きく変わる。私たちは、ダスト層起源の乱流について、拡散パラメーター α の値を、与えられた円盤モデルから求める方法を構築した (Takeuchi et al. 2011)。これを用い、ダスト層で永年重力不安定が起こるための条件を議論する。永年重力不安定が起こるかどうかは、主に、不安定の成長時間がダスト落下の時間より短いかどうかできる。この条件は、ガス円盤の Toomre の Q パラメーター、ガスの公転速度のケプラーからのずれの指標 η が与えられたとき、ダストサイズによらず、ダストガス比がある量 $Z_{\min}$ より大きいことを要求する。これを書いたのが Fig. 1 で、不安定に必要な $\log(Z_{\min})$ の値を等高線で書いてある。これを見ると、標準的な円盤モデル($\eta=10^{-3}$ – 10^{-2} , $Q=10$ – 100)で、 $Z_{\min} > 0.01$ – 0.1 で永年重力不安定は起こる。これは、古典的なダイナミカルな重力不安定が起きる条件よりもわずかに（ファクター2–3程度）低いダストガス比での不安定性の発現を示す。

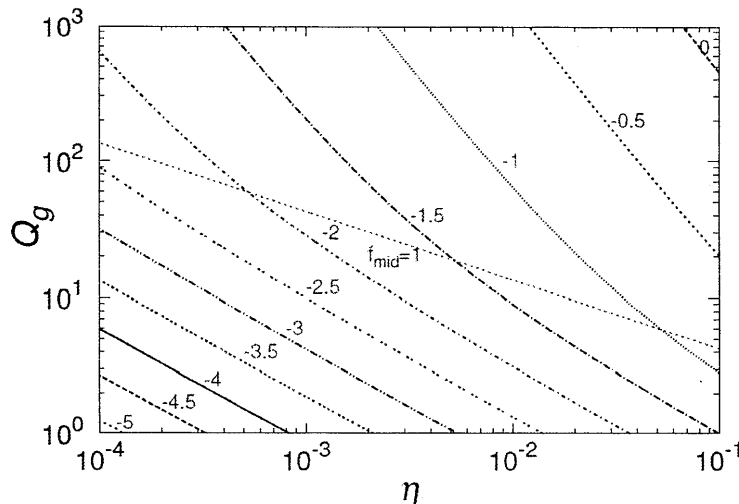


Fig. 1 不安定に必要なダストガス比 $\log(Z_{\min})$. ガスの公転速度のケプラーからのずれ η 、ガス円盤の Toomre の Q パラメーターに対するプロット。

渦における微惑星形成： 解析解から惑星系を議論する

○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

惑星形成の標準モデルでは、原始太陽と原始惑星系円盤ができたあと、円盤ガスが太陽に降着しつつダストが円盤内で成長して惑星となり、現在の惑星系が形成されたと考えられている。しかし、円盤内でのダストの成長過程の中で、ダストから微惑星ができるまでにダストが中心星に落下してしまっただ円盤中から惑星を作る材料がなくなってしまうというダスト落下問題の存在が指摘されている。

渦における微惑星形成という微惑星形成過程は、ダスト落下問題を回避して微惑星を作る方法として提案されているものの一つである。渦は円盤ガスが中心星に降着している段階で円盤中に存在していた可能性が指摘されており（渦そのものが降着を起こす仕組みとも考えられている*¹）、さらに渦はその中心にダスト粒子を集める働きを持つことから、ダスト落下問題を解決するとともに、渦そのものが微惑星形成の場となることが期待される。

本研究ではこれまでに、定常で長寿命な渦の流れが円盤中にあったとして、渦におけるダストの集積を定式化し、例えば 1AU の場所で mm サイズのダストが 1000 年程度で初期の 20 倍の面密度になるまで集まるという結果を得た。さらに、Sekiya 1998^{*2}によるダスト層の自己重力不安定が起こる臨界値が渦モデルにおいても適用できると考えたとき、林モデルの円盤で、1AU で初期の 20 倍程度にまでダストの面密度が渦の中で上昇する状態が達成されると、一度に月の質量の半分程度の総質量の微惑星ができるとの結論を得た。

今回は、以上の結果も用いて、渦があることによってこれまで考えられてきた惑星形成の標準モデルにどのような影響を与えるかということを議論する。例えばコンドリュール形成は渦があった場合にはどのように説明できるかを隕石などから得られた情報とも照らし合わせながら議論する。また、現在の太陽系の惑星を作るためには渦における微惑星形成がどのようにおこればよいか（例えば必要な渦の数）、それは現実的に起こり得たのかということも議論する。

* 1 : 例えば, Barranco & Marcus 2005, ApJ, 623, 1157.

* 2 : Sekiya, M. 1998, Icarus 133, 298.

分子動力学計算による ダスト微粒子相互作用の解明

田中 秀和

北海道大学低温科学研究所

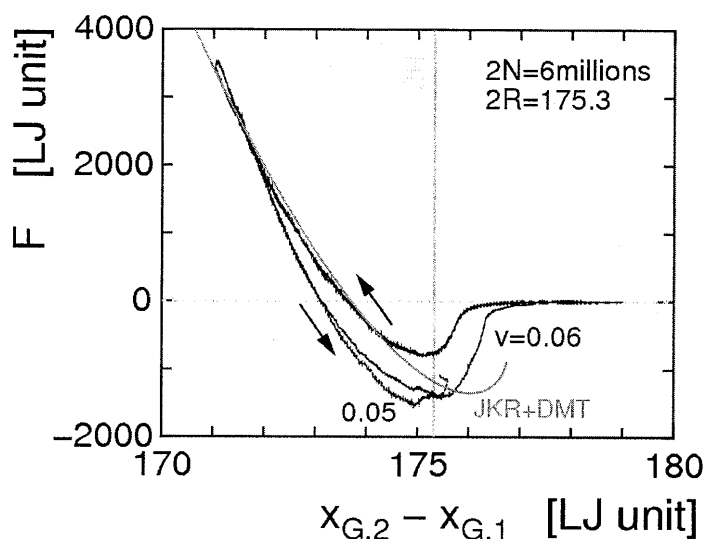
原始惑星系円盤内でのダスト合体成長は微惑星形成過程や円盤内輻射輸送過程、円盤ガス電離状態など惑星形成の多くの素過程において重要なファクターとなっている。その一方、ダスト衝突合体において重要となる微粒子間の付着力や衝突時のエネルギー散逸は工学的に詳細に研究されてきたが、ミクロンサイズより小さい微粒子の相互作用についてはあまり研究がなされおらず未だ不定性が高い。本研究では、多数の「分子」からなる球微粒子2つの相互作用を分子動力学計算を行うことで調べる。これにより、これまで広く用いられてきた微粒子相互作用モデルの有効性と限界を明らかにし、より正確な微粒子相互作用モデルの構築を目指す。

本研究の分子動力学計算では、微粒子構成分子にレナード-ジョーンズ分子を採用し、この分子の面心立方格子結晶でできた球微粒子を考える。初期温度は十分低い場合のみを調べた。微粒子相互作用は衝突計算中に微粒子の加速度をみることにより計測することができる。微粒子サイズを決めるパラメータである構成分子数を百万から1億まで変えて計算を行い、相互作用のサイズ依存性を調べた。衝突速度を変えた計算も多数行い速度依存性を調べた。

右下図には、6百万分子で構成された2つの球粒子の低速衝突計算から得られた微粒子間相互作用力を中心間距離の関数として表したものである。相互作用力は巨視的なJKR理論をミクロな場合に拡張したMaugisモデルでよく表されている。さらに、衝突の往復の間に相互作用力が異なるというヒステリシスがみられた。これはエネルギー散逸による非弾性効果である。このエネルギー散逸は2球付着面の縁部分でおきていることと付着力ゼロの分子動力学計算ではみられないことから、付着力に起因していることがわかる。エネルギー散逸率は、速度や微粒子半径に比例していることも多数の計算から明らかになっている。

さらに、付着した2球が互いに転がる場合や、すべる場合などの計算も行い、転がり抵抗や摩擦力を調べている。これらの結果についても報告する予定である。

以上のような分子動力学計算により、ナノサイズからサブミクロンまでの球微粒子に対して衝突時の相互作用や散逸過程をミクロの視点から詳細かつ直接的に調べることができる。今後、より複雑な系の計算へと発展させていく価値があるであろう。



図：衝突する2球間に働く力

惑星による微惑星一時捕獲過程

○ 末次竜¹ 大槻圭史^{1,2} 谷川亨行^{2,3}

1. 神戸大学大学院理学研究科 2. 惑星科学研究センター 3. 北海道大学低温科学研究所

惑星近傍を微惑星が通過すると、微惑星は惑星と重力相互作用し、近接散乱されて遠方へとばされる。しかし稀に惑星の重力に微惑星が捕獲され、惑星を中心にしばらく公転して近傍にとどまった後、遠方へ飛ばされてゆくことがある。この現象を一時捕獲という。近年、この一時捕獲が短周期彗星の力学進化、不規則衛星の形成といった惑星系形成の重要な役割を担っている可能性が示唆されている。今までの一時捕獲の研究の大半は、微惑星の初期位置が惑星近傍（ヒル圏内）で、そこから惑星に一時捕獲される過程を調べたものである。だが一時捕獲の頻度などは求められていない。近年、Iwasaki & Ohtsuki (2007) で円軌道の場合の一時捕獲過程について詳しく調べられ、一時捕獲の頻度について求められた。その結果、惑星の公転周期の 10 倍以上の微惑星の一時捕獲は、非常に稀であることが示された。また一時捕獲は地球などの太陽系の内部と比較して太陽系の外縁部でよく起こることがわかった。これはヒル半径が太陽から遠ざかるほど大きくなり、微惑星を重力捕獲しやすくなるためである。離心率が小さい場合の一時捕獲過程についても調べられており、離心率が増加すると一時捕獲の頻度も僅かに増加することが示された。順行一時捕獲頻度は逆行一時捕獲の頻度に比べて小さく、長時間の順行一時捕獲は見つからなかった。しかしながら惑星形成後期の巨大惑星によって微惑星の離心率と軌道傾斜角が励起され、ランダム速度が大きい場合の一時捕獲については研究されていない。そこで本論文では、大きな離心率をもった微惑星の一時捕獲についての研究を行った。

研究手法としては太陽中心に公転する惑星、微惑星の三体問題軌道計算を行い、一時捕獲された微惑星の軌道や、一時捕獲の頻度などを詳細に調べた。その結果、一時捕獲軌道は離心率とエネルギーによって四つの型に分類できることがわかった。また一時捕獲頻度は離心率が増加とともに増加し続けることが示され、特にランダム速度卓越領域での増加はシア卓越領域と比べると、急激に増加する。これは上述の一時捕獲の軌道の型が離心率が大きい場合と小さい場合で異なるからである。一方、順行の一時捕獲の頻度は特定の離心率でピークをもつことがわかった。これらのことについて詳しく発表する予定である。

粒子間の衝突と重力相互作用に起因する 土星リングの粘性

○安井 佑貴¹、大槻 圭史^{1,2}、台坂 博³

¹ 神戸大学大学院理学研究科

² 惑星科学研究センター

³ 一橋大学商学部

土星のリングは多数の氷の粒子から形成されている。土星リング中では、これら粒子間の衝突及び重力相互作用によって、角運動量は輸送されている。このような粒子間の相互作用に起因する土星リングの粘性は、土星リングの力学進化及び構造形成を考える上で重要となる。本研究では土星重力、粒子間の衝突及び相互重力に加え、粒子の自転と表面摩擦の効果を考慮に入れた局所 N 体シミュレーションを行い、表面摩擦が粘性に与える影響について詳しく調べた。粘性は Tanaka et al. (2003) の方法に従って計算し、土星からの距離、光学的厚さなどに粘性がどのように依存するのか、幅広く調べた。さらに数値計算から得られた結果を再現する半解析的な近似式の導出も行った。

光学的に薄い場合、粘性の土星からの距離に対する依存性は、ランダム速度の土星からの距離に対する依存性と似た振る舞いをするのが分かった。また土星からの距離に応じて、粘性の表面摩擦に対する依存性が異なることも分かった。土星に近い場合は、粒子のランダム速度は粒子間の非弾性衝突に支配されるので、ランダム速度も粘性も表面摩擦を考慮に入れた方が小さくなる。一方で、土星から遠く、粒子間の相互重力が粒子のランダム速度を支配する場合、表面摩擦は粘性を増加させる方向に働く。これは系が準平衡状態にあるとき、表面摩擦を考慮することで粒子間の非弾性衝突によるエネルギー散逸率が増し、これが粘性加熱によるエネルギー増加率と釣り合うからである。本研究で、粘性は表面摩擦の強さに依存することが明らかになったが、表面摩擦が粘性に与える効果はそれほど重要とならないことも示した。

光学的に厚く、土星からある程度離れた領域では、リング自身の自己重力とシア速度差のため、リング中には縞状の構造が形成される。このような縞状構造が形成される領域では、粘性が著しく増加する (Daisaka et al. 2001)。このように縞状構造が形成されるとき、表面摩擦の効果が強い程、粘性がより増加することが分かったが、縞状構造による粘性増加の効果に比べると十分小さい。また Daisaka et al. (2001) にならい、数値計算結果を再現する近似式を導出した。その結果、縞状構造が形成される領域の粘性はこの近似式でうまく再現できるが、光学的に厚く土星からの距離が遠いところでは一時的なアグリゲイトが形成され、得られた近似式では粘性を大きく見積もってしまうことが分かった。

土星形成に伴う木星トロヤ群の散乱

尾花勝太¹, ○佐々木貴教²

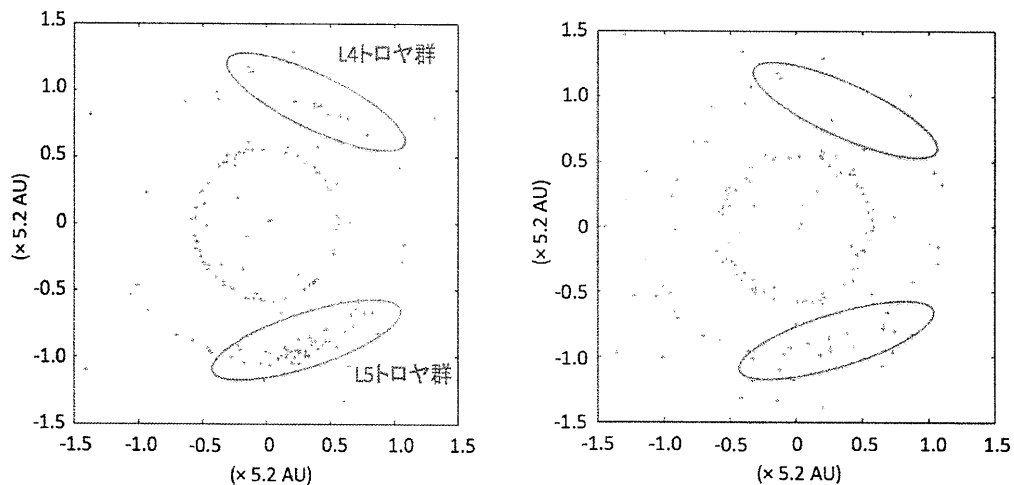
¹東京工業大学 大学院社会理工学研究科 価値システム専攻

²東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻

木星の軌道上には2つの小天体群が存在する。これらは木星トロヤ群と呼ばれ、太陽と木星のなすラグランジュポイントのL4およびL5付近に分布している。木星トロヤ群のL4群とL5群では、累積個数やサイズ分布が明らかに異なっていることが、過去の観測でわかっている。特に近年の観測により、直径約5km以下の天体についてL4群のサイズ分布の傾きが小さくなっていることが明らかになった。

これらの違いを説明するために、大きく2通りの木星トロヤ群形成シナリオが提案されてきた：(1)ガス円盤中でのトロヤ群のその場形成シナリオ、(2)太陽系外縁部からの小天体捕獲シナリオ（ニースモデル）。しかし先行研究ではいずれも特定の状況しか扱っておらず、未だに木星トロヤ群形成についての決定的な定説は存在しない。

そこで本研究では前者のモデル（その場形成シナリオ）を採用し、惑星形成論において妥当といえる様々な状況のもと、特に土星形成の位置やタイミングが木星トロヤ群形成に与える影響について詳しく検討した。その結果、土星の形成により木星トロヤ群が散乱され、トロヤ群のその場形成が阻害される可能性があることがわかった。



(左図) 木星成長後に形成されたL4, L5 トロヤ群。

(右図) 土星成長に伴いトロヤ群が散乱され、特にL4 トロヤ群がほぼ失われている。

長周期彗星の軌道分布：観測と理論の比較

○樋口有理可¹，小久保英一郎²，伊藤孝士²

¹東京工業大学，²国立天文台

オールト雲から進化したと考えられている長周期彗星の軌道分布は、現在は「等方的」であるとされており、これこそがオールト雲が球殻状であるとする根拠でもある。一方、オールト雲が原始惑星系円盤の微惑星が軌道進化したものであることを考えると、その分布は等方ではないことが予測される。

本研究では、まず、スミソニアン天文台が発行する Catalogue of Cometary Orbits 2005 から、理論と比較できる軌道要素分布を生成する。すなわち、オールト雲由来の長周期彗星のみを選び出す作業を行う。主に、短周期彗星由来の天体とクロイツ群などの分裂破片天体を取り除く作業を行う。これらは、黄道面付近と 140 度付近の軌道傾斜角分布の超過の要因とされてきた。しかし、これらを取り除いた後も分布は等方ではなく分布に超過などがあることがわかった。

一方、オールト雲形成の理論から長周期彗星の分布を導くと、観測で見られる軌道傾斜角分布の超過と非常に調和的であることが分かった。また、恒星がオールト雲と近接遭遇することで生成される長周期彗星群(コメットシャワー)が持つ軌道傾斜角分布は、元の軌道傾斜角分布とほとんど相関がなく、あらゆる値を持ちうることが分かった。これは、オールト雲の構造を長周期彗星の軌道傾斜角分布のみで議論することに意味がないことを示す。また、本発表では長周期彗星の遠日点の銀経・銀緯分布の観測と理論予想についても議論する。

数値的 KAM 安定性による三体系の安定限界線

斎藤正也 (統計数理研究所) 谷川清隆 (国立天文台) Victor V. Orlov (St. Petersburg State Univ.)

重力相互作用する三質点 m_0, m_1, m_2 の系が, m_0 に対する m_1 の軌道, m_0 と m_1 の重心に対する m_2 の軌道が, それぞれ交叉しない楕円によって近似される場合, 特に階層三体系と呼ぶ. これは, 惑星系や多重連星系の最も素朴なモデルである. 先行研究では, 連星系まわりの褐色惑星を想定して, 代表例として質量比 $m_0 = m_1 = 0.5, m_2 = 1/100$ の系をとり扱った. 今回の発表では, m_2 が他の 2 体と同程度の質量をもつ場合まで, 取り扱う範囲を広げる.

初期状態での階層的配置が, 過去および未来にわたって維持される場合を階層安定と呼ぶ. ただし, 安定性の判定にはさまざま定義が用いられており, ある 2 体の運動可能領域と残り 1 体の運動可能領域とが分離されていること (Hill 安定性. 元来は制限三体問題で定式化されたが, 現在では一般三体に拡張されている), 近接遭遇が起これないこと, 脱出の十分条件を満たさないこと, 近点通過時のインパルス近似により軌道要素の変化をランダムウォークでモデル化し, 一定期間内の軌道要素の変化が一定範囲に収まること, などが用いられている.

本研究では, KAM 安定性を階層安定性とみなして, 第三天体の質量範囲 $m_2 = 1/100 \sim 1/2$ に対して, 数値的に最外 KAM の位置を求め安定限界線の近似表現を得た. 階層三体系は, 可積分系 (二体問題) に摂動 (惑星間相互作用) が加わることで, 弱いカオス性を帯びた系といえる. KAM 理論は, 弱い摂動の下では, もとの可積分系での運動が定性的には保持される領域が位相空間上に残されることを主張するものである. このような領域 (KAM 安定な領域) では, 軌道は, 位相空間上に同心トーラスの層を形成し, それぞれのトーラスの外に出ることはない. 先行研究 ($m_2 = 1/100$ の場合) では, KAM の外に初期値を取ると, 最終的には m_2 は, 離心率が 1 以上になり, 脱出に至ることがわかった. 今回の研究では, 同様のことが m_2 が m_0 や m_1 と同程度の質量を持つ場合でも, 成立することが確認できた. このことにより, KAM 安定性に基づく系の安定限界の算定を行った.

軌道計算による巨大惑星周りの衛星系形成の解明

○荻原正博¹ 井田茂²

¹名古屋大学・素粒子宇宙物理学 ²東京工業大学・地球惑星科学

巨大惑星周りに存在する規則衛星は、それらの離心率・軌道傾斜角が小さいことから原始の巨大惑星を取り巻く周惑星円盤中で形成したと考えられる。本研究では、周惑星円盤中での衛星集積・軌道進化を円盤ガスの効果を考慮にいた軌道計算によって調べた。

近年の惑星形成の理論計算では、星周円盤と中心星が境界層を通じて接続しているというモデルではなく、中心星近傍には空洞(cavity)があり、円盤には内縁が存在するという描像が考察されている。Sasaki et al. (2010)では、円盤内縁の概念を周惑星円盤に適用したモデル計算を行い、木星衛星系と土星衛星系の違いは円盤内縁の存否といった円盤の境界条件に依ることを示した。

ところで、本研究で用いた重力N体シミュレーションは天体の集積・力学的進化を追う際に重要な手法であるが、巨大惑星周りの衛星系形成ではこの手法を用いた理論計算は殆ど行われていない。Canup & Ward (2006)はN体シミュレーションにより、1つの衛星系内の衛星総質量は衛星の成長とタイプ移動によって自動調整されることを示したが、ガリレオ衛星における平均運動共鳴関係やタイタンが土星衛星系の総質量のほぼ全てを担っていること等の幾つかの重要な観測的事実は未だ重力N体シミュレーションで再現されていない。

また、今後の宇宙望遠鏡による測光観測によって、太陽系外惑星の周りの衛星（系外衛星）が発見されることも期待される(例：Kipping et al. 2009)。よって木星系や土星系に限った条件だけでなく、より一般的な衛星系形成を議論しておくことも重要である。

本研究では、円盤内縁が存在する場合としない場合それぞれについて、衛星集積・軌道進化のシミュレーションを行い、最終的に形成される衛星系の性質を明らかにすることを目的とした。周惑星円盤については、粘性やガス流入フラックスといった不定性のある物理量をパラメータ化した定常降着円盤モデルを用い、広いパラメータ範囲において衛星形成を調べた。これによって、木星・土星衛星系の特徴の再現可能性の議論に加え、系外衛星を含んだより一般的な衛星系形成について考察することが可能となる。

計算の結果、円盤内縁が存在する場合には、円盤内縁の外側に数個の衛星が平均運動共鳴状態で形成し(eccentricity trap; Ogihara et al. 2010)、これらは円盤ガス散逸後も安定であることがわかった。また、広いパラメータ範囲において数個の衛星が共鳴状態で形成することが示された。

円盤内縁が存在しない場合には、数個の衛星が共鳴状態から外れて形成することが確認された。但し、比較的大きな衛星は平均して2個以上形成し、現在の土星衛星系を再現することが難しいという問題点も浮き彫りになった。この問題については、周惑星円盤の面密度分布や衛星成長の局所性などを考察することによってクリアされる可能性が考えられる。本講演では、この問題に対する解決策についても議論する。

ダークマターハローおよび巨大分子雲による 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

太陽系が形成されてから現在まで、オ尔特雲のような太陽系外縁部の天体は、様々な太陽系外天体の重力により摂動を受けてきたと考えられる。本研究では、それらの太陽系外天体として、恒星、巨大分子雲、ダークマターハローを考え、それらが太陽系天体に与えた影響を速度分散を調べることで比較、評価した。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う。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。銀河系の中には、最大ハローを銀河系そのものと考え、 $10^{-6}M_{\odot} \sim 10^{12}M_{\odot}$ のサイズのハローが存在する。これらのダークマターハローの存在頻度は多く見積ると 100 個/pc^3 程度になるが、このダークマターハローが太陽系天体に与える影響についてはまだ詳細に調べられていない。また、星間雲のうち特に密度の高い領域であり、水素が分子の状態で存在している領域を分子雲と呼ぶ。これらの分子雲の典型的な質量は $10^2M_{\odot} \sim 10^6M_{\odot}$ 程であり、質量が $10^6M_{\odot}$ ほどの特に大きなものは巨大分子雲と呼ばれている。この巨大分子雲の重力が太陽系に与えた摂動についての研究もいまだ不十分である。本研究では、ダークマターハローまたは巨大分子雲が太陽系天体に対して等速直線運動で一定の頻度で通過するモデルを考えた。その際、一回の通過による摂動を比較するのではなく、通過頻度を考慮して期待値として摂動の大きさを比較、評価した。その結果、小さなハローが数多く通過する際の摂動よりも、巨大なハローが一回通過する摂動の方が大きな期待値を持つ事が分かった。発表では、ダークマターハローまたは巨大分子雲の形状や個数密度の変化によって、摂動の大きさがどのように変化するかを議論する。

水の散逸を考慮した海惑星から陸惑星への進化による HZ 内側境界への影響

○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、液体の水の存在は重要であると考えられている。液体の水が惑星表面に存在できる中心星からの距離の範囲をハビタブルゾーン (HZ) と呼ぶ。Kasting ら (1993) は、全球的に海がつながっている地球のような惑星の HZ を見積もった。彼らは、HZ の内側境界を水の散逸によって現在の太陽放射の約 90% と見積もり、外側境界を温室効果の維持によって約 110% と見積もった。

一方、阿部ら (2011) は、水の量がごく微量の仮想的な惑星 (陸惑星と呼ぶ) を考えた。陸惑星の重要な特徴は、惑星表面の水分布が大気中の水蒸気の循環にのみに支配されるため、降雨と蒸発が局所的にバランスし、水の局在化が起こることである。彼らは、1 気圧の空気からなる大気を持った、地球サイズの陸惑星について、HZ を現在の太陽放射の約 77% から 170% と見積もった。その結果、陸惑星は、海惑星 (全球的に海に覆われている惑星) よりも広い HZ が持つ可能性が示唆された。

したがって、惑星表面の水の量は HZ を考える上で、とても重要だという示唆が得られた。そこで、我々は、海惑星であった惑星が、恒星の進化につれて陸惑星の状態に変化する可能性があると考え、水の流体的散逸と恒星の進化を考慮した、初期に様々な水量を惑星表面に保持している惑星の水量の変化を計算し、そのときの惑星の状態を調べた。数値計算の結果、水の散逸によって、惑星の状態が海惑星から陸惑星への進化する可能性があるという結果を得た。また、我々は惑星を Water Planet (液体の水が惑星表面に存在している惑星)、Steam Planet (暴走温室状態の惑星、惑星表面には液体の水は存在しない)、Dry Planet (液体の水が惑星表面に存在していない惑星) に分類した。

系外地球型惑星は、必ずしも地球程度の水量を持っているとは限らない。また、これまで発見された系外惑星は、様々なスペクトル型の恒星の周りを回っている。太陽より重い恒星は、太陽に比べ進化が速く、明るい。そのため、そのような恒星を周回する惑星は大規模な水の散逸を経験し、海惑星から陸惑星への進化が起こりやすくなる。一方、太陽より軽い恒星は、太陽に比べ進化が遅く暗いため、恒星を周回する惑星は、大規模な水の散逸を経験せず、陸惑星へと進化しにくい。今回の発表では、恒星の型、恒星からの距離、惑星サイズ、惑星が初期に惑星表面に保持している水量をパラメータに、惑星の状態進化と HZ の内側境界について議論する。

炭素循環を考慮した高軌道離心率惑星の表層環境とハビタビリティ

○門屋辰太郎¹ 田近英一² 渡邊吉康¹¹東大・理 ²東大・新領域

1995 年以来、現在まで約 600 もの系外惑星が発見されている。観測によれば、惑星の質量、軌道長半径、軌道離心率などは、極めて多様であることが明らかになっている。本研究では、これらのうち、とくに軌道離心率に着目し、それが日射量の季節変化を通じて地球のような水惑星の気候状態に与える影響について調べた。

このような先行研究はいくつかあるものの、惑星が取り得る気候状態を、炭素循環を考慮した上で、軌道パラメータを系統的に変えて調べたものはない。炭素循環を考慮した場合、大気中の二酸化炭素分圧が地殻表面の化学風化と火成活動による二酸化炭素の脱ガスのバランスで自己調整されるため、軌道長半径がより大きな軌道領域においても、惑星表層に液体の水が存在できることが予想される。そこで本研究では、炭素循環を考慮し、軌道離心率及び軌道長半径を系統的に変え、南北一次元エネルギーバランス気候モデルに炭素循環を組み込んだモデルを用いて、惑星が取り得る気候状態(惑星表層の温度分布の時間変化)及び二酸化炭素分圧を数値計算によって求めた。

その結果、惑星の軌道離心率が非常に大きい場合には、遠日点側では部分凍結が生じるものの、惑星がハビタブルゾーンにある限り、惑星表層温度は液体の水が存在する範囲に安定して維持されることが明らかになった(炭素循環を考慮しなければ、全球凍結が生じる)。また、炭素循環によって実現される二酸化炭素の平衡分圧は、軌道離心率にはよらず、年平均日射量に依存することが示された。こうした傾向は、脱ガス率や大陸配置が異なる場合も同様である。

自転軸傾斜角が炭素循環の機能する 系外地球型水惑星の気候に及ぼす影響の検討

A study on the effect of obliquity on the climate of water-rich extraterrestrial planet with carbonate-silicate geochemical cycle

○渡邊 吉康¹, 田近 英一², 門屋 辰太郎¹

¹東京大学大学院理学系研究科, ²東京大学大学院新領域創成科学研究科

系外惑星の発見により, その軌道要素 (軌道離心率, 軌道長半径) は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は, 観測は困難であるものの, 理論的には様々な初期値を取りうるばかりか, 大きく時間変動することが知られている. 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を変えることで, 惑星の気候に大きな影響を及ぼす. 一方, 惑星環境の長期的な安定性には, 地球のように炭素循環による大気中の二酸化炭素分圧の調節機構がはたらくことが重要であると考えられている. これまで, 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た研究例はいくつかあるものの, 気候の安定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自転軸傾斜角の大きさと炭素循環の働きによってどのような状態を取り得るのかを理解する目的で, 炭素循環と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エネルギー平衡モデル (EBM) を用い, 系統的な検討を行った. その結果, 以下のような知見が得られた.

1. 自転軸傾斜角が小さい時は, 一年を通して氷が部分的に覆う“永久部分凍結モード”, 季節的に氷が広がる“季節的部分凍結モード”が安定であるが, 自転軸傾斜角の増大とともにこれらの解の安定領域は減少していき, やがて消失する. これは, 自転軸傾斜角の増大とともに, 平均日射量の南北勾配が減少していくことに起因する. また, 年間を通じて氷の張ることのない“無凍結モード”が, 自転軸傾斜角の値によらず, 軌道長半径の小さい条件だけでなく, 軌道長半径が大きい条件でも安定であるという結果が得られた. これは, 高CO₂分圧条件下において南北温度勾配が減少する性質に起因するものである. 地質学的な時間スケールで無凍結状態と全球凍結状態を繰り返す“周期的全球凍結モード”は, 現在の地球の半分の脱ガス率条件下では広範囲な条件において安定となる.
2. 炭素循環の考慮することによって, 無凍結モード, 季節的部分凍結モード, 永久部分凍結モードの安定領域が, 全ての自転軸傾斜角において, 軌道長半径がより大きい条件に広がる. すなわち, ハビタブルな条件は, ハビタブルゾーンの内部でかつ炭素循環がはたらくことが重要であることが示された.

S32-04

陸惑星の完全蒸発限界：地表の水輸送を考慮した 1 次元 EBM での検討

高尾雄也、玄田英典、小玉貴則、阿部豊（東大・理）

地球型生命の存在や進化を考える上で、液体の水の存在は重要だと考えられる。中島ら(1992)は、液体の水が豊富にあり全球的に分布している惑星(海惑星と呼ぶ)について、1次元放射対流平衡灰色大気モデルを用いて、大気構造を解くことによって地表面温度と惑星放射の関係を求め、射出限界の存在について議論した。彼らの結果では、射出限界は、アルベドを 0.3 に固定した場合、1AU での現在の太陽放射の 122%相当であると見積もられた。

一方、阿部ら(2005)は、3次元大気大循環モデルを用いて、惑星表面の水量がごく少量の仮想的な惑星(陸惑星と呼ぶ)の気候について検討した。その結果、降雨と蒸発が局所的にバランスし、低緯度が乾燥し高緯度に水が集中する水の局在化が起こることがわかった。陸惑星の表面に存在する液体の水が全て蒸発する太陽放射(完全蒸発限界)を計算すると、陸惑星の完全蒸発限界は、惑星が持つ初期水量に依存せず、1AU での現在の太陽放射の 170%程度になると見積もられ、海惑星の射出限界を大きく上回ることがわかった(阿部ら 2011)。

完全蒸発限界を考える上で、水の分布と局在化は重要である。しかし、阿部らが用いたモデルでは惑星表面での水輸送は考慮されていない。そこで我々は、完全蒸発限界のメカニズムを定性的に理解する為の第一歩として、水量が少ない惑星表面での水輸送を考慮した場合の惑星気候への影響を簡単なモデルを用いて検討した。

我々は、中島らの大気モデルを拡張し、地表面温度、水蒸気量、惑星放射の関係を調べ、North(1975)が用いた南北 1 次元 EBM(Energy Balance model)に水の潜熱の効果を加え、水輸送効率をパラメータとして完全蒸発限界を検討した。その結果、水輸送効率が良い場合(大気の水蒸気輸送の 1/10)は、太陽放射を大きくしていても、低緯度まで液体の水が存在することができ、完全蒸発限界が、1 AU での現在の太陽放射の 122%であることがわかった。この値は、海惑星の完全蒸発限界と一致し、水量が少ない惑星でも海惑星的な振る舞いをすることがわかった。一方、輸送効率が悪い場合(大気中の水蒸気輸送の 1/500)、水は高緯度付近に局在化し、陸惑星的になることがわかった。そのときの完全蒸発限界は惑星の初期水量に依存し、太陽放射の 140-150%程度であった。

同じ太陽放射と水輸送効率でも、惑星の初期水量によって水の張り出す範囲が異なる事が完全蒸発限界の水量依存性に関係していると思われる。上のモデルを応用して、水の張り出す範囲を固定した実験を行ったところ、完全蒸発限界を決めるメカニズムは次の二つに分けて考えられる事がわかった。

- (1) 水の張り出す範囲と惑星が受ける太陽放射の関係
- (2) 水が安定に張り出せる範囲の決まり方

このうち後者については、大気中の水蒸気輸送と地表の水輸送のバランスから定性的に理解できた。

S32-05 同期回転惑星大気における熱収支の自転角速度依存性

○ 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 神戸大院理, ² 北大院理, ³ 九大院理, ⁴ 惑星科学研究センター, ⁵ Parmy

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と予想されている. 光度が小さい恒星の周囲には, 惑星表面に液体の水の存在を許容する温暖な気候を持つ同期回転惑星が存在する可能性があるとして注目されており, 大気大循環モデル (GCM) を用いた湿潤同期回転惑星に関する数値計算がいくつか行われてきた (Joshi, 2003; Merlis and Schneider, 2010). それらでは, 基本的に現在の地球の設定を用いて, 平衡状態における大気構造の調査が行われてきた. しかし, 大気構造のパラメータ依存性の調査はまだ十分に行われていない.

我々はこれまでに, GCM を用いて自転角速度を変更した数値実験を行い, 循環構造の多様性を調査してきた. その結果, 自転角速度を変更した場合には, 直接循環が卓越する状態, 赤道に超回転が発生する状態, 傾圧擾乱が顕著となる状態など, 様々な循環パターンが得られた (納多他, 2010 年連合大会).

今回は, 異なる循環パターンが得られるそれぞれの場合において, 昼半球から夜半球への熱輸送の形態がどのように変化するかを調べるために, 太陽定数を地球の値に固定した場合について, 大気および地表面の熱収支の自転角速度依存性について調査を行った.

2 モデル

実験に使用した GCM は地球流体電脳倶楽部 大気大循環モデル dcpam5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) である. 大気は乾燥大気 (非凝結性成分) と水蒸気 (凝結性成分) とから成る. 地表面は沼条件 (swamp condition) とした. 短波放射に対しては乾燥大気, 水蒸気ともに透明であり, 惑星放射に対しては水蒸気のみが灰色吸収を行う. 大気や雲による放射の効果は考慮していない. 積雲パラメタリゼーションには対流調節 (Manabe et al. 1965) を用いた. 地表面のアルベドはゼロとした. 惑星半径, 平均地表面気圧は現在地球の値を用いた. 入射放射分布には同期回転日射分布を用いた. 自転角速度 (Ω) はゼロから地球の自転角速度の値 (Ω_E) までの 12 種類を用いた. 系の格子点数は東西方向, 南北方向, 鉛直方向にそれぞれ 64, 32, 16 である. 等温静止大気に微小な温度擾乱を加えたものから 2000 地球日間の積分を行った.

3 結果

夜半球大気における熱収支に関する解析結果を図 1 に示す. おおまかには, Ω によらず, 夜半球の熱収支においては, 地表面からの顕熱輸送および地表面からの長波放射は小さく, 大気上端における長波放射フラックスが昼半球からの顕熱輸送量および凝結加熱とバランスしている.

夜半球大気の加熱源となる昼半球からの顕熱輸送量と凝結加熱の和は Ω に依存しないが, 両者の大小関係は Ω によって以下のように変化する. Ω が小さい場合は顕熱輸送量が卓越するが, $0.3 \Omega_E < \Omega < 0.7 \Omega_E$ では凝結加熱が顕熱輸送量より大きくなる. $\Omega > 0.7 \Omega_E$ では, 再び顕熱輸送量が卓越する. 大小関係が入れ替わる $\Omega = 0.3 \Omega_E, 0.7 \Omega_E$ 付近では, 「はじめに」で述べた, 循環パターンの変化が起こっている.

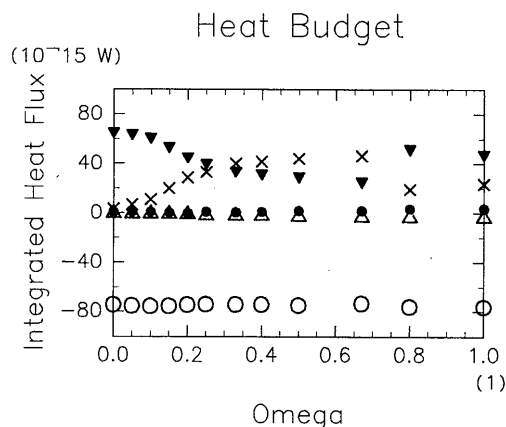


図 1: 夜半球大気における熱収支. 熱フラックスの半球積分値および熱輸送量. 夜半球大気において加熱となるものを正の値としている. 横軸は Ω , 縦軸は熱フラックスの半球積分値および熱輸送量. 縦軸の単位は 10^{15} W. ○ は大気上端における長波放射フラックス, × は凝結加熱, △ は地表面顕熱フラックス, ● は地表面における長波放射フラックス, ▼ は昼半球から夜半球への顕熱輸送量である.

4 まとめ

同期回転惑星設定を用いた大気大循環モデルによる計算の結果, 夜半球大気の加熱源となる, 昼半球からの顕熱輸送量と水蒸気の凝結加熱との大小関係は, 自転角速度の変化に応じて変化した. この変化は循環構造の変化に対応しているようである. 今後は顕熱輸送量, 水蒸気輸送量に関して半球平均値でなく各種物理量の 3 次元分布に基づいた調査を行う予定である.

共通のプログラムスタイルを持つ大気大循環モデルと雲解像モデルの開発

高橋芳幸^{1,7}, 杉山耕一郎², 小高正嗣³, 〇石渡正樹³, 佐々木洋平⁴, 西澤誠也^{1,7}, 中島健介⁵, 竹広真一⁶, 林祥介^{1,7}¹神戸大院理, ²北大低温研, ³北大院理, ⁴京大理, ⁵九大院理, ⁶京大数理研, ⁷惑星科学研究センター

1 モデル開発の目的

太陽系内惑星や, 考えられる太陽系外惑星の大気循環に関して, 雲対流スケールから惑星スケールまで様々なスケールでの数値計算を実行することを目指して, 惑星大気大循環モデルと雲解像モデルの構築を進めている⁽¹⁾。惑星大気中では, 個々の対流から惑星規模循環までの様々な空間スケールの大気擾乱・循環が生成され, それらが相互に影響を及ぼしつつ時間発展する。そしてそれら相互作用の結果として, 惑星大気循環は維持される。現在の計算機能力では, これら幅広い空間スケールに渡るすべての現象を同時に表現することのできるモデル計算を実行することは容易ではない。地球大気においては, それぞれの大気擾乱・循環の性質に関する情報がある程度観測により得られており, これらの情報に基づき擾乱と大規模循環が相互に及ぼす影響を考慮して研究が行われている。しかし, 観測結果が十分に蓄積されていない惑星大気の研究においては, 擾乱・循環個々の特性すら明らかでなく, 相互の影響を仮定することもできない。このため, 惑星大気循環の包括的な理解のためのひとつの方法は, それぞれの空間スケールの個々の擾乱・循環のモデル計算に加えて, それら複数のモデルの結果を相互に参照して解析・考察を行うことであろう。

また, 現象の物理的理解に向けては, 現実的な 3次元モデルを用いた計算だけでなく, 1次元, 2次元モデルでの計算結果との比較が有益な情報を提供することがある。他方, モデルで用いる様々なパラメータを変更した多数のパラメータ計算もまた, 物理的な解釈に役立つことがある。多数のパラメータ計算の実施には, 計算コストの高い 3次元計算でなく, 1, 2次元計算が有用である。このため, 同じモデル設定で, 3次元計算だけでなく 1, 2次元の計算が可能となるようなモデルを持つことが重要となる。

我々は, 雲対流スケールから全球スケールまでの様々なスケールでの数値計算, 及び 1次元から 3次元までの数値計算を包括的に実行することを目指して, 多数のパラメータ実験に耐えうる軽量な大気大循環モデル dcpam と雲解像モデル deepconv を共通のプログラムスタイルで構築することを進めてきた。今回は, dcpam と deepconv の最近の更新状況を報告し, さらに, それらのモデルを用いて行ってきた計算例を紹介したい。

2 モデルの現状

大気大循環モデルに関しては, これまでに地球大気の過程を模した簡単な物理過程・強制を用いた水惑星大気の計算や, 系外惑星を想定した自転と公転が同期した惑星の計算を実施してきた。今回は, 現実的な地球, 火星の大気の計算に向けて, 放射過程を導入し, 地表面過程を更新した。平行して, これまでに複数の研究者によって行われてきた金星を想定した惑星の計算を実施する環境を備えるために, Yamamoto and Takahashi (2003) を参考に, 金星大気の計算のためのニュートン冷却, レイリー摩擦を導入した。また, この大気大循環モデルは, コンパイル時の指定と計算実行時の設定により, 鉛直 1次元, 軸対称 2次元計算も可能となるように設計している。これらにより, 現在では, 地球, 火星, および金星を模した惑星の, 1, 2, 3次元計算が可能となってきた。

雲解像モデルに関しては, これまで簡単な強制を与えた, 地球, 火星, 木星を想定した 2次元の数値実験を行ってきた。今回は, 3次元計算が可能となるようにモデルを拡張し, さらに計算設定の変更によって 2次元計算と 3次元計算を切り替えることができるようにした。また, これまで場当たりの各惑星大気を扱えるよう拡張してきたために煩雑になったソースコードを再構成した。これにより, コードを大循環モデルと同様の構造とし, 例えば放射モデルなどの物理過程に関して共通のコードを用いることができるような構造となるように試みている。

今後, 例えばこれまでに我々のグループで進めてきた火星大気計算において見られた小規模渦のような現象について, 二つのモデルを用いた計算の実施を予定している。その結果の解析・相互比較を進めることで現象の物理機構に関して, 一つのモデルの計算ではわからない詳細に迫りたいと考えている。

参照 URL

- (1) 地球流体電脳倶楽部 dcmmodel プロジェクト:
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/>

Lax-Friedrichs 法による 流体力学的大気散逸の数値計算

○梅本隆史¹, 倉本圭^{1,2}

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

² 惑星科学研究センター(CPS)

初期地球大気は水素・一酸化炭素・メタンといった還元的な成分を含んでいた可能性がある。初期地球大気の組成は水素の宇宙空間への散逸に伴って還元的なものから酸化的なものに変化していったと考えられており、その変化の速さは初期地球が生命前駆物質の合成に適した表層環境を有していたかを議論する上で重要である。旧来の推定では、散逸は大気下層からの拡散律速又は極端紫外線のエネルギー律速に従い、そのため水素は急速に失われたと考えられていた(Watson et al, 1981)。

これに対し、Tian et al. (2005) は初期地球大気からの水素分子の流体力学的散逸について数値的に調べ、上記の見積もりよりも散逸率が小さく、還元的環境が長期間保持された可能性があるとして主張した。しかし、彼らは流体力学的散逸の物理的性質について詳しく触れておらず散逸率が小さくなった理由は明らかにされていない。また、この計算は数値拡散の大きいLax-Friedrichs法を用いており、その精度については再考の余地がある。

そこで本研究では Tian et al. (2005) の追計算を行い、計算の正当性について考察した。計算設定は以下のようにした。計算領域は高度 100km から 15 地球半径とし、グリッド数は 3200、グリッド間隔は下部境界に近いほど小さくした。また加熱率の導出には各高度での密度や幾何学的な効果、EUV フラックス(Wood and Rottman, 2002)と水素分子の吸収断面積(Avakyan et al, 1998)の波長依存性を考慮した。

その結果、彼らの得た散逸率は過小評価の可能性のあることがわかった。これは下部境界付近の急激な密度変化が質量保存を大きく乱すほどの数値拡散が生じ(図参照)、これによって速度・温度・密度構造が影響を受け EUV を吸収する高度が下がり、また質量保存の破れた領域で EUV の吸収が起こるためエネルギー保存も崩れたためと考えられる。グリッド配置などについても検討を行ったが、Lax-Friedrichs 法を用いる限り系の質量保存やエネルギー収支を十分な精度を持って記述する数値モデルの設定は困難と考えられる。

現在、これらの問題を解決する CIP 法を用いた一次元流体モデルを構築しつつある。本講演では、構築中のモデルの有用性とそれから得られた結果についても紹介する予定である。

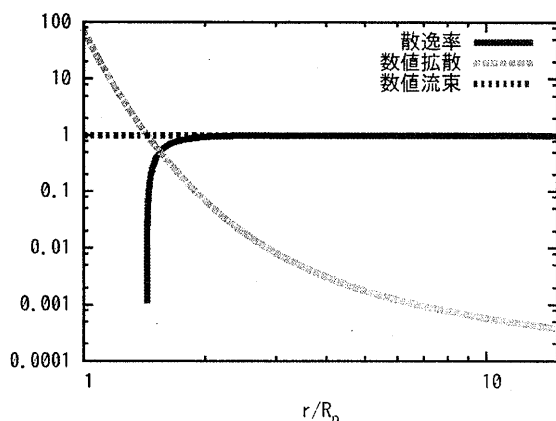


図:Lax-Friedrichs 法による等温モデルでの計算例。下部境界における散逸パラメータ(重力ポテンシャルと気体の熱運動エネルギーの比)=15 に対して得られた散逸率(実線)、質量保存の式の数値拡散(破線)、数値流束(散逸率と数値拡散の和、点線)。縦軸は大気上端における散逸率との比、横軸は下部境界からの距離である。Lax-Friedrichs 法では散逸率に数値拡散を加えることで計算を安定化させている。下部境界付近では数値拡散が卓越し、それを補うように散逸率が負になっている。

初期地球大気における有機物ヘイズの生成実験と 表層環境の安定性への応用

○笹森 務仁¹, 関根 康人¹, Erik J Larson², 杉田精司¹

¹ 東大・新領域, ²Dept. Atmospheric and Oceanic Sciences, Univ. of Colorado, Boulder

太古代の地球では、還元的大気中で有機物ヘイズが生成していた可能性が高いと考えられる[1,2,3]。ヘイズが生成すると、その紫外線遮蔽効果によりアンモニアなどの温室効果ガスが守られる[1]。一方、ヘイズは可視光を遮蔽する反温室効果も持つため[2]、その生成率や光学特性によって表層環境が受ける影響は大きく異なるがその詳細は不明である。

本研究では、紫外光を模擬初期地球大気に照射し、有機物ヘイズを生成する室内実験を行ない、ヘイズ生成率と光学定数を求めた。ヘイズ生成実験は、これまで幾つかの研究グループによって行なわれているが[3]、これらの研究は(1)紫外-可視領域における連続的な光学定数を測定していない、(2)ガス組成に対して系統的に生成率・光学定数を測定していない、という問題点があるため、ヘイズ存在下での表層環境の安定性を議論することができなかった。

本研究では、 H_2/He ランプの紫外光を CH_4 と CO_2 の割合を系統的に変えた混合ガスに照射することで模擬有機物ヘイズを生成し、分光エリプソメトリーを用いて紫外-可視領域の光学定数と生成した有機物の厚さを測定した。また、中間生成気体分子も四重極質量分析計(QMS)を用いて調べ、紫外-可視分光器により、有機物の厚さの増加に伴う H_2/He ランプの光の減衰からヘイズの生成率を求めた。

その結果、 CO_2 の混合比が高いほど光の吸収を表す消散係数が紫外域で高くなり、紫外線遮蔽効果が強く表れることが分かった。またヘイズ生成率は CH_4/CO_2 比が 10 以上では高い値でほぼ一定になるのに対し、10 以下になると急激に生成率が低下し、 CH_4/CO_2 比が 0.1 以下では、ほとんどヘイズの生成がおきないことが分かった。(図 1)

本発表では、これらの結果に基づき太古代の地球など還元的大気をもつ惑星の表層環境についても議論を行なう。

参考文献

[1]Sagan and Chyba, *Science* 276,1217 (1997), [2]Pavlov et al., *J.Geophys.* 106,23267 (2001), [3]Trainer et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103,18035-18042 (2006)

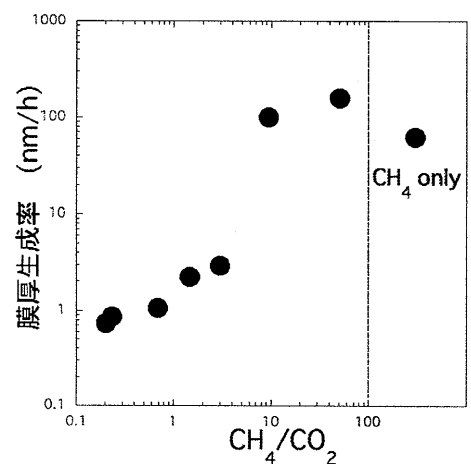


図1. CH_4/CO_2 混合比に対する膜厚生成率の変化

薄い周惑星円盤で集積する巨大氷衛星の 原始大気の放射特性とその保温効果

○岡田英誉¹, 倉本 圭^{1,2}

¹北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻, ²CPS

近年の有力なモデルによれば, タイタンなどの巨大氷衛星は薄い周惑星ガス円盤内で微衛星が集積することにより形成したと考えられている (Canup and Ward, 2002, 2006). その集積期には, 周惑星円盤ガスを捕獲した捕獲成分と, 集積エネルギーを熱源として氷が蒸発した脱ガス成分が混合した原始大気を有する可能性がある. 原始大気の保温効果は衛星の表層環境や熱史に大きな影響を与えうる. 保温効果が十分に大きければ, 衛星の氷成分の蒸発が促進され, 原始大気は重力圏外へ流出すると考えられる. このことは現在のタイタンの二次的大気の形成を説明できるかもしれない.

集積中の巨大氷衛星の原始大気に関する先駆的な研究には, Kuramoto and Matsui (1994) がある. 彼らは衛星が真空中集積した場合の原始大気の保温効果と大気流出の条件を示している. しかし, 彼らのモデルでは周囲に存在する円盤ガスの影響が考慮されていない.

本研究では, 衛星ヒル半径において薄い周惑星円盤と静水力学的に接続している原始大気の放射対流平衡構造を求め, 衛星から放射される放射エネルギーフラックスを見積もる. これと集積エネルギーフラックスを等価と見なすことにより, 集積時間の関数として衛星の地表面温度を推定する. そのために, H_2 -He からなる捕獲成分と H_2O からなる脱ガス成分が混合した新しい原始大気モデルを構築した. このモデルでは, 原始大気が凝湿潤断熱減率に従う温度分布を持つ対流圏と放射平衡にある成層圏からなることを仮定し, 対流圏界面となる圧力をパラメータとする.

まず, Kuramoto and Matsui (1994) と同様に, 大気上端(衛星ヒル半径)からの光学的厚さが $2/3$ となる面を放射面とし, この面からの黒体放射を仮定して, 放射エネルギーフラックスを求めた. H_2 -He ガスと水蒸気の吸収係数には, それぞれの分圧に比例し波長と温度には依らないものとして, 考慮している熱放射の主波長領域に対し妥当な値を与えた. 外部境界条件として, 衛星軌道における円盤ガスの温度および圧力を仮定する. 周惑星円盤の構造を決定するパラメータに不明な点が多いため, これらの値には様々な組み合わせを与えた.

例として, 星雲の温度と圧力の組み合わせを, 30 K, 100 Pa および 30 K, 1 Pa とした場合, 現在のタイタン質量の衛星から大気が流出するのに必要な放射エネルギーフラックスの下限値はそれぞれ, 約 430 W/m^2 , 約 270 W/m^2 と求まった. これは, 原始大気がヒル半径に至るまで全層対流圏となる条件に対応し, この値よりも集積エネルギーフラックスが大きい場合には, 脱ガス成分の膨張によって, 衛星ヒル半径における大気圧が星雲ガス圧を上回り, 原始大気が重力圏外へ流出すると考えられる. これに対して, 集積エネルギーフラックスが小さく, 原始大気が低温となる場合には, ほぼ捕獲成分からなる光学的に厚い大気が形成されること可能性があることもわかった. このような場合には, 放射面の概念を用いた近似は妥当ではなくなると考えられるため, 原始大気各層からの放射伝達を数値的に正確に解いて, 正味の放射エネルギーフラックスを見積もる必要がある. 現在はこのモデルを構築中である. 講演では, より正確な大気放射モデルに基づいて, 原始大気の構造, 原始大気の流出条件, さらにその衛星の熱史への影響について議論する予定である.

水に富むスーパーアースの内部構造と質量散逸

○黒崎健二¹ 生駒大洋¹ 堀安範²

¹東京工業大学 ²国立天文台

1995年に系外惑星が発見されて以来、現在までに500個を超える系外惑星が報告されている。系外惑星の代表的な観測手法として、トランジット法と視線速度法がある。前者から惑星半径、後者から惑星質量がわかるため、2つの観測結果から惑星の平均密度がわかる。この情報は、惑星の内部構造や組成、進化、起源を知る重要な手掛かりとなる。

近年、地球質量の数倍から10倍程度の惑星（スーパーアース）も報告されている。その中で、惑星の平均密度から、水に富むと予想されるスーパーアース（例えば、GJ1214b）も発見されている（e.g. Rogers & Seager 2010; Nettelmann *et al.* 2011）。中心星近傍で発見されるこれらの惑星は、中心星からの強烈なX線およびUV（XUV）の照射に晒され、質量散逸（大気散逸）を経験するはずである。これまでに水素・ヘリウム主体のガス惑星の質量散逸は議論されている（e.g. Vidal-Madjar *et al.* 2003）が、GJ1214bのような水に富むスーパーアースでの質量散逸は議論されていない。水（水蒸気大気）の散逸は、今後、観測で多数発見されると期待される水に富むスーパーアースの（初期）質量分布や軌道長半径分布を考察する上で重要である。

そこで、本研究では、水に富むスーパーアースに注目して、すべて水でできた惑星（水惑星）の熱進化計算を行い、中心星からのXUV照射による水の質量散逸を調べた。中心星からの距離が近く、対流圏界面の位置が浅いほど、水惑星の質量散逸は大きくなることが分かった。また、様々な初期の惑星質量を持つ水惑星について質量散逸を調べた結果、100億年のXUV照射で全ての質量を失わない（蒸発しない）ためには、初期の惑星質量に下限値が存在することが分かった。これらの結果は、惑星の質量－平均密度ダイアグラムで水に富むスーパーアースが存在しうる領域に制限を与える。

M型星周りの惑星形成と多様性：観測との比較

○堀 安範、小久保英一郎、押野翔一(国立天文台)

CoRoT, Kepler 宇宙望遠鏡によって、低質量(地球の数倍程度) の惑星の検出が可能となってきた。これらの惑星探査は、主にF, G, K 型星をターゲットとしている。しかし、中心星と惑星形成の関係を包括的に理解する上で、より低質量な中心星周りでの惑星分布の情報が必要不可欠である。スイスのグループは高精度な可視光の視線速度観測(HARPS) を駆使して、M型星周りでの惑星探査に取り組んでいるが、M型星は可視光では暗過ぎる難点がある。そこで、現在、世界的な潮流として、M型星を狙うべく赤外ドップラーの技術開発が進められている。実際に、日本でも低質量星(M 型星) の惑星探査を目指した赤外ドップラープロジェクト(2014 年観測開始)が進行中である。

そこで、こうした将来の赤外ドップラー観測を見据えて、理論側からM型星周りの惑星形成を検討しておくことは極めて重要である。本講演では、まずM型星周りの惑星について、これまでの観測結果を整理する。そして、標準的な惑星形成の描像に基づいて、コア(固体惑星) 形成時間・円盤散逸時間・ガス降着時間のタイムスケールから予想されるM型星周りの惑星系の多様性を示す。最後に、本結果と観測結果を比較し、惑星移動、円盤散逸や初期円盤質量について議論する。

M 型星周りの惑星形成と多様性:寡占的成長段階

○押野翔一、小久保英一郎、堀安範¹

¹ 国立天文台

1995 年に初めて系外惑星が発見されてから現在までに 500 個を超える系外惑星が発見されている。その多くは、F,G,K 型の恒星で見つかっており、M 型星では 20 個程度の惑星しか見つかっていない。これは M 型星の絶対等級が低く観測が難しいためである。しかし、M 型星は銀河系円盤を構成している星の 7 割程度を占めるといわれており、M 型星での観測は非常に重要となっている。そのため、現在日本では M 型星をターゲットとした赤外ドップラープロジェクトが進められており、今後多くの系外惑星が M 型星の周りで見つかることが期待される。

現在、M 型星における固体惑星の形成過程を明かにするために寡占的成長段階の N 体シミュレーションを行っている。微惑星から原始惑星に成長する段階では初期の暴走的な微惑星捕獲の段階から、原始惑星がほぼ 10 ヒル程度に等間隔に並ぶ寡占的成長段階が存在することが発見されている(Kokubo & Ida 1998)。一方、物理半径-ヒル半径比は中心星質量 M と中心星からの距離 a に対し $\propto M^{1/3} a^{-1}$ で変化するため、M 型星と G 型星では微惑星の重力散乱と集積のタイムスケールが変わってくる。M 型星と G 型星の固体惑星領域を比べると、M 型星での物理半径-ヒル半径比が大きくなる。これは、その場所で働く集積の影響が G 型星のときより大きくなることを意味しており、この効果が寡占的成長段階にどのような影響を及ぼすのか調べる必要がある。本発表では、G 型星と M 型星で出来る原始惑星の質量と間隔の違いについて議論する。

系外惑星の公転軌道傾斜角の系統的測定：軌道が傾いた惑星は意外に多い

○成田憲保（国立天文台）、平野照幸（東京大学）、
佐藤文衛（東京工業大学）、青木和光、田村元秀（国立天文台）

太陽系の 8 つの惑星は、全て太陽の赤道面とほぼ同一平面を同一方向に公転している。これは太陽系の惑星が太陽と同じ方向に回転する原始惑星系円盤の中で誕生し、その中で軌道進化してきたという描像と一致している。このことは全ての系外惑星系においても同じであろうか？

この疑問に答える手段として、私たちのグループではトランジットを起こす惑星系で観測できるロシター効果という現象に着目した。ロシター効果とは、惑星がトランジット中に主星の自転を隠すことによって起こるトランジット中の視線速度のずれであり、惑星の公転軌道傾斜角を天球面上に射影した量（ λ と表わす）を反映している。

私たちのグループでは、過去 5 年間に 10 個以上のトランジット惑星系でロシター効果を測定し、その公転軌道傾斜角の分布を調べてきた。その結果として得られたことは、宇宙の他の惑星系では、太陽系と異なり、主星の自転に対して惑星の軌道が傾いた系が意外と多いという事実である。これはアメリカやヨーロッパなど他のグループの結果とも一致している。この観測事実は、惑星が原始惑星系円盤との相互作用のみで軌道進化しているのではなく、一部の惑星系では惑星同士の重力散乱や伴星の存在による古在機構など惑星の公転軌道傾斜角を傾かせるような機構で惑星の軌道進化が起こっていることを示している。

本講演では、これまでの観測から得られた以上のような結論を発表する。

分化隕石母天体の衝突破壊と進化：衝突実験からのアプローチ

○岡本千里¹, 荒川政彦², 長谷川直¹

¹宇宙航空研究開発機構, ²神戸大学大学院理学研究科

鉄隕石やM-type小惑星は、熱進化により分化した天体の金属コア由来であると考えられている。惑星形成初期にこのような分化天体は多数存在した可能性が示唆されている[Bizzarro et al., 2005]。小惑星では、分化天体の生き残りとして小惑星ベスタが挙げられ、探査機ドーンにより詳細な調査が現在行われている。これら鉄隕石の母天体となったと考えられる分化天体の衝突破壊・破片の放出・再集積条件を調べることは、小天体の多様性や、熱進化した小天体の衝突進化を知る上で重要となる。このような分化天体の衝突現象は、主に数値シミュレーションにより研究が進められてきており、系統的な実験はあまり進んでいない。そこで本研究では、分化隕石母天体模擬試料を用いた衝突破壊実験を行った。特に分化天体の内部構造を系統的に変化させて、衝突破壊条件に対する内部構造の影響を明らかにした。

金属コア—岩石マントルからなる層構造試料を作成するために、金属コアとしては鉄球を使用し、岩石マントルとしてはモルタルと石膏を使用した。小惑星帯は 200K 以下と金属コアが低温脆性を起こす温度領域にある。そこで、金属コアとして、常温でも脆性破壊を示す高炭素クロム鉄鋼を使用した。また、モルタルは岩石に近い動的衝突破壊強度を示すことが分かっている。マントルとして石膏も用いることにより、マントル物性の違いによる衝突破壊結果への影響を調べた。衝突実験は、JAXA に設置された二段式軽ガス銃用い、真空下（～10Pa）で質量～0.2g の球形のナイロン弾丸を速度 4–7 km/s に加速して行った。衝突破壊過程は高速度カメラを 2 台用いてその場観察を行い、衝突点付近の高速度の破片(撮影速度:1 コマ 8μs–32μs)および衝突の反対点付近の低速度の破片速度(撮影速度:1 コマ 50–100μs)の計測を行った。

実験の結果、コア質量比が小さい（マントル層が厚い）場合、石膏マントルに比べて、モルタルマントルの方が、コアへのエネルギー分配率が 2-3 倍程度大きいことが分かった。エネルギー分配率はマントル物質の違いを反映していると考えられる。そこで衝撃物性に関する石膏およびモルタルの違い調べるために、モルタル中での衝撃波の減衰率を調べた。その結果、衝撃波はモルタル層の厚みの 2 乗に反比例して減衰することが分かった。一方、石膏中では、衝撃波は、石膏層の厚みの～4 乗に反比例して減衰した。従って石膏の場合、モルタルに比べてコアに到達するまでに衝撃波がより減衰する。一方、コア質量比が大きい（マントル層が薄い）場合、ほとんど衝撃波の減衰は見られず、マントル物質の違いは見られなかった。また、分化天体の破片放出条件および再集積条件を調べるため、エネルギー密度を一定にし、様々なコア質量比を持つモルタル（および石膏）マントル—金属鉄コア試料の破片速度を計測した。その結果、同程度のエネルギー密度の場合、モルタル破片の速度は石膏破片速度のおよそ 2 倍程度速いことが分かった。よって、同程度のコア質量比で比較した場合、石膏マントルより、モルタルマントルの方が鉄コアとの相対速度は大きくなる。また、石膏およびモルタルマントルの場合ともに、コア質量比が小さい場合($R_{CM} < 0.3$)、破片速度はコア質量比にほとんど依存せず一定であり、マントル物質単体の速度を反映していた。一方、コア質量比が大きい場合($R_{CM} > 0.3$)、モルタルおよび石膏マントルともにコア質量比が 1 に近づくにつれ、破片速度が上昇した。以上より、破片放出速度はマントル物性およびコア質量比に依存すると考えられる。

炭素質コンドライト模擬物質を用いた衝突実験

○池崎克俊¹、矢野創²、岡本千里²、橘省吾³、今榮直也⁴

土山明¹、長谷川直²、中村昭子⁵、富山隆将⁶

¹大阪大学 ²JAXA ³東京大学 ⁴国立極地研究所

⁵神戸大学 ⁶海洋研究所開発機構高知コア研究所

はやぶさ2計画として、C型小惑星「162173 1999JU3」へのサンプルリターンミッションが計画されている。はやぶさ計画と同様の弾丸式サンプラーの搭載が予定されている。サンプルの収量を増加させることを目的として、目標小惑星の表面物質に対応すると考えられる炭素質コンドライトの模擬物質を作成し、弾丸の打ち込み実験を行った。本稿では、ターゲットのサイズによる違いによるクレータサイズ等の変化について述べる。

模擬炭素質コンドライト（以下模擬物質と示す）の作成には、ガラスビーズを用いた。コンドライトを構成するコンドリュールとマトリクスに対応するように、それぞれのサイズに近い250-355 μm と20 μm 以下のガラスビーズを用いた。また、炭素質コンドライト隕石の強度を参考に圧裂引っ張り強度が0.数MPa~数MPaになるようにした(Tuchiyama et al., 2009)。2種のガラスビーズの混合物質（混合比は20%あるいは50%）を焼結させ、焼結温度と時間をコントロールすることにより所定の強度をもつ模擬物質を作成した。

実験ははやぶさ2と同様に火薬銃を用いて行った。プロジェクタイルはSUS(ϕ 10mm、4.6g)を使用し、約200 m/sでターゲットに衝突させた。ターゲットには模擬物質と石膏に埋包した模擬物質を用いた。

ターゲットのサイズの違いにより、破片質量分布、クレータの直径や深さなどに差異がみられた。これらの結果について述べる。

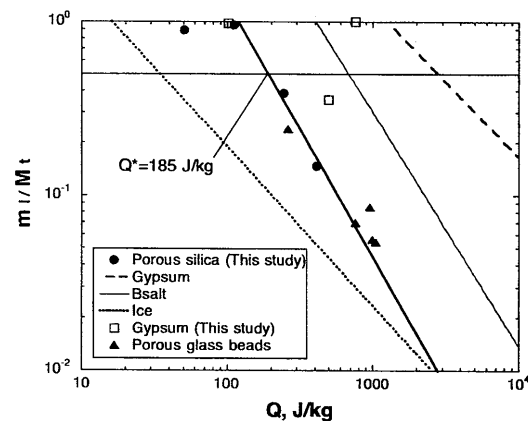
多孔質焼結シリカと石膏を用いた超高速衝突実験

○ 荒川政彦¹, 藤田幸浩², 中村昭子¹, 岡本尚也¹,
門野敏彦³, 重森啓介³, 弘中陽一郎³, 佐野孝好³, 境家達弘³
¹神戸大学, ²名古屋大学, ³大阪大学

はじめに：惑星形成過程とその後の惑星進化における天体衝突は、幅広い速度範囲で起きたと考えられる。これまで室内実験においては数 100m/s から数 km/s で衝突実験が行われてきたが、この速度は惑星構成物質である岩石や氷の音速より遅いか、もしくはほぼ同程度の速度であった。一方、衝突現象を理論的に扱うために重要な衝撃波の発生や伝播は、物質を伝播する音速と衝突速度の比によってその関係が大きく変化することが知られている。月・地球へ衝突する小惑星の速度は 14-18km/s にもおよび岩石の音速を遥かに超えているが、このような高速度での系統的な衝突破壊実験はこれまで行われたことはない。そこで現在は衝突速度 10km/s 以下の実験結果から構築したスケール則を用いて 10km/s を超えるような高速度での衝突破壊強度を推測している。例えば、このような高速度では弾丸サイズの 100 倍を超えるような標的すら完全に破壊できることになるが、これまでにこのような長距離を伝播した衝撃波によって起こる破壊を実証した例はない。そこで本研究では、衝突破壊のスケール則を 10km/s 以上の衝突速度にまで拡張するために Kadono et al. (2009) の手法を用いて衝突実験を行った。

実験方法：衝突実験は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターにおいて行った。このセンターの「激光 XII」高輝度パルスレーザーを用いて球形アルミ弾丸（サイズ 100 μm と 250 μm ）を 8km/s から 40km/s に加速して標的に衝突させた。標的には構成粒子が弾丸よりも遥かに小さい多孔質焼結シリカ（空隙率 44% で構成粒子の初期サイズ 0.3 μm ）と多孔質石膏（空隙率 56% で構成粒子サイズ <1 μm ）を用いた。標的は一边 15mm の立方体であり、弾丸は立方体の構成面に対して垂直に衝突させた。実験後、試料を回収してクレーター形状やサイズ分布を計測した。

実験結果：多孔質焼結シリカ試料には、対称性の高いスポール破壊を伴うクレーターと反対点でのスポーリングが観察された。これは試料中において衝撃波が比較的減衰せずに伝播したことを意味している。一方、多孔質石膏試料ではクレーター孔は小さく、反対点での破壊も観察されなかった。図に最大破片とエネルギー密度の関係を示す。今回のシリカ試料の結果から衝突破壊強度は 185J/kg となり、空隙率約 30% の多孔質ガラスビーズの結果（衝突速度約 2km/s）と良く一致した。衝突速度が 10 倍以上も異なるにもかかわらず、このような一致を示すのは、2km/s 以上の衝突速度では、衝突破壊強度に対する衝突速度依存性が極めて小さいことを意味している。また、石膏の実験結果は、約 3km/s での実験結果と比べて衝突破片が小さくなっているように見える。しかしながら、まだばらつきが大きいいため今後の実験による確認が必要と思われる。



図：最大破片とエネルギー密度の関係

S34-04

細かいガラスビーズ層への衝突で見られるランパート クレーターに似たエジェクタ地形の形成過程

A Formation Mechanism of Rampart-like Ejecta Formed by an Impact on the Layer of Fine Glass Beads

鈴木 絢子¹, 門野 敏彦², 中村 昭子³, 荒川 政彦³, 和田浩二⁴, 山本聡⁵

¹惑星科学研究センター, ²大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ³神戸大学,

⁴千葉工業大学・惑星探査研究センター, ⁵国立環境研究所・環境計測研究センター

The ejecta around a crater that formed by an impact on the layer of fine glass beads shows various morphologies depending on the experimental conditions such as diameter and degree of packing of the glass beads, impact velocity, and ambient atmospheric pressure. We examined the formation mechanisms of the ridged ejecta morphology which looks similar to those of Martian rampart craters. Our experiments clarify that the distal ridges are formed by the thin, radial ejecta flow that originates around the crater rim, other than the sedimentation of ejecta decelerated by the ambient atmosphere. Additionally, it is highly probable that a wake of the projectile going through the atmosphere makes the crater rim collapsed, which results in initiating the ejecta flow.

ガラスビーズ層への衝突クレーター形成実験では、ビーズ直径、パッキング度、衝突速度、周囲の大気圧などの条件を変化させることで、様々なエジェクタ地形が観察される (2010, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会)。太陽系内の固体天体上でも、衝突クレーターのエジェクタ地形は非常に多様性に富んでおり、堆積時のエジェクタの状態や、地表・地下・大気など周囲の環境を反映していると考えられている。エジェクタ地形と形成環境の関係を明らかにすることは、過去の固体天体表層環境を制約することにつながる。中でも我々は、火星のランパートクレーターに良く似たリッジエジェクタの形成過程を調査した。

実験は神戸大学にある縦打ちのガス銃を用いた。弾丸はアルミニウム製の円柱で、直径 10mm、高さ 10mm である。標的はほぼ一様径のガラスビーズ層で、バルク密度は 1.7g/cm^3 であった。結果、リッジが形成される瞬間を高速度カメラを用いて撮影することに成功した。連続エジェクタ先端に見られるリッジは、エジェクタカーテンの根元のすぐ外側で形成される。堆積する場所が動かない表面の場合（例えば板など）はリッジは形成されなかった。リッジは大気で減速された弾道エジェクタが単に降り積もったのではなく、リム付近から発生する。ガラスビーズ層表面を進む放射状の薄い流れで形成されたことがわかった。その放射状のエジェクタ流は、大気中を進行する弾丸の作る伴流が、リムを崩すことで発生している可能性が高い。

構成粒子数と標的形状・衝突角度が焼結体の衝突破壊に与える影響

○町井渚、中村昭子

神戸大学大学院理学研究科

氷小天体は高空隙率であり様々な内部構造を持つと考えられている。氷小天体のバルク強度は焼結によって変化すると考えられる。高空隙率の天体衝突を模擬した実験では、構成粒子サイズが試料サイズに比べ非常に小さいものに対して行なわれてきた(e. g., Love et al., 1993; Michikami et al., 2007; Setoh et al., 2010)。この構成粒子サイズと試料サイズの比を RCS (Relative Component Size) と呼ぶ。RCS が 0.19 の試料の衝突破壊強度は同じ空隙率、引張強度をもち RCS が 10^{-3} の先行研究よりも小さい値であった。そこで、今実験では構成粒子数を増やした場合、すなわち、RCS を 0.19 と 10^{-3} の間にしたときに、衝突破壊強度が小さくなるのかどうかを調べた。

実験に用いた試料は直径 0.73 mm と 1.4 mm のガラスビーズである。これらの試料を用いて直径 5 cm 高さ 2.5 cm の焼結体を作成した。焼結体の RCS はそれぞれ 0.016 と 0.032 である。2 種類の RCS 値をもつ試料について衝突実験を行った。衝突後の試料の最大破片を測定し、各試料の衝突破壊強度を求め、結果を議論する。また、RCS が 0.19 の焼結体について衝突角度や標的形状の影響についても報告する。

空隙の大きな小天体へのダスト衝突： ダスト破壊と貫入深さとの関係

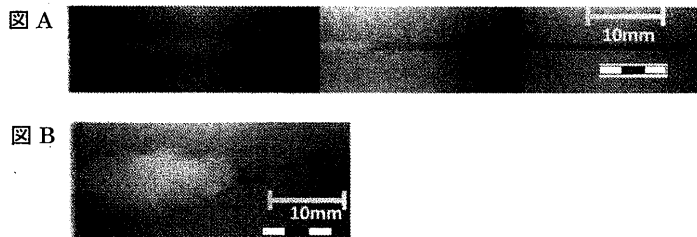
○岡本 尚也¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直², 黒澤 耕介², 池崎 克俊³, 土山 明³

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所, ³大阪大学大学院理学研究科

微惑星や彗星などの始原天体は高い空隙率をもっていると考えられている。これらの天体は、その形成過程において内部にダストを取り込んだと考えられる。始原天体に取り込まれたダストの起源として2つ考えられる。1つは星雲ガス中でダストの合体成長により天体が形成された、すなわち天体の材料物質である。もう1つは、それらの天体が形成し、星雲ガスが晴れ上がった後にデブリ円盤で掃き集めたダストである。後者の場合、ダストはその天体に衝突することで、天体の表面構造進化に影響を与える可能性がある。また、元々の天体の材料物質ではないものが天体表層に捕まえているということが示唆される。したがって、空隙の大きな小天体の表層構造を考えるため、またダストが天体のどこに捕獲されているかを考えるには、天体表面のダストの潜り込み深さが重要となる。

そこで我々は高空隙率天体を模擬したターゲットを用意し、高速衝突による弾丸貫入実験を行った。使用したターゲットの試料は、ソーダライム硼珪酸ガラスを組成とする中空ガラスビーズである。この試料を神戸大学にある高速昇温電気炉で焼結させ、空隙率 94%、密度 0.14g/cm³のターゲットを得た。このターゲットに対して、JAXA/ISASにある二段式軽ガス銃を使用し、衝突速度~2-7km/s で実験を行った。弾丸にはアルミニウムとチタン球を用いている。衝突によって形成されたトラックを、大阪大学にある CT 撮像装置で X 線透過画像を取得し、この構造を調べた。それぞれ“トラック全体”と“トラックの終端で止まった弾丸粒子”の画像を取得した。

アルミニウム球、チタン球のいずれも衝突速度が速いほど貫入深さは短くなる傾向になった。衝突速度が小さいときトラック形状は細長いトラック（キャロット型, 図 A）を形成するが、衝突速度が大きくなるとトラック形状は太短い（カブ型, 図 B）を形成した。また、衝突後の弾丸には、元の球形をなしていないもの、複数の破片に破壊されたものもある。本発表では、速度の 2 乗に比例する一般的な減速モデルを使って実験結果との比較を行い、弾丸の破壊を考慮した潜り込み深さを議論する。



図：衝突トラックの X 線透過画像。

図 A はチタン球、衝突速度 2.6km/s のトラック形状。図 B はチタン球、衝突速度 6.7km/s のトラック形状。

複数回衝突が及ぼす氷ターゲットの衝突破壊強度への影響

○羽山遼¹, 荒川政彦¹

¹神戸大学大学院理学研究科

はじめに

氷天体同士の衝突は、氷惑星・氷衛星、カイパーベルト天体の形成・進化に重要な役割を果たしたと考えられている。そこでこれまで氷試料を用いた衝突破壊実験が数多くなされてきた。実際の氷天体は、カタストロフィックに破壊して散乱する以前に複数回の衝突を経験したと思われるが、これまでの衝突実験では単一衝突による研究が多かった。複数回衝突に関する過去の研究では、事前衝突により発生したクラックにより衝突破壊強度が下がることが報告されている (Gault et al., 1969; Housen, 2008)。さらに、衝突エネルギーの合計が等しく衝突回数を変化させた実験を行った場合、衝突により発生する最大破片と積算エネルギー密度の関係は、単一衝突によって得られたものとほぼ一致することが報告されている。一方、Nakamura et al. (1994)は、衝突破壊で得られたコア破片を2回目の衝突試料として実験を行い、その結果、1回目の衝突が破壊にはほとんど影響しないことを報告している。このような不一致が起こる理由は、衝突により発生するクラックが非均質だからであり、複数回衝突の研究では試料に入ったクラック分布を定量化した上で実験することが必須である。そこで本研究では氷試料を用いた複数回衝突実験を行い、事前衝突によるプレクラック分布と衝突破壊強度の関係を定量的に明らかにすることを試みた。

実験方法

既存クラックが氷試料の衝突破壊強度に与える影響を調べるために、北海道大学低温科学研究所の低温室に設置したガス銃を用いた衝突実験を行った。実験では氷弾丸を氷試料に複数回（最大4回）衝突させた。実験温度は -15°C で、衝突速度は $140\sim 480\text{m/s}$ の範囲で変化させた。氷弾丸は円筒形で、その質量は 1.6g である。氷標的は立方体氷で、その質量は $240\sim 1010\text{g}$ である。実験後、回収した衝突破片の質量を計測した。また、カタストロフィックに破壊されなかった試料は、クラック分布を定量化するために縦波速度と横波速度の測定を行った。その後、次の衝突実験の標的とした。

実験結果と考察

本研究では、積算エネルギー密度が約 100J/kg と一定で、衝突回数が1, 2, 4回と変化させた実験を行った。その結果、試料の初期質量 (M) で規格化した最大破片質量 (m_i/M) は、衝突回数の増加に伴い0.83, 0.26, 0.12と減少することが分かった。2, 4回衝突の m_i/M は、既存の氷-氷1回衝突の m_i/M とエネルギー密度の関係と比較するとかなり小さくなっていることが確認された (Arakawa et al., 2002)。これはプレクラックにより試料強度が下がった結果であると考えられる。一方、規格化した破片の質量 (m/M) が 10^{-4} 以下の破片の積算個数分布は、衝突回数によらず一定であった。これはプレクラックが影響を及ぼすことができる破片サイズには下限があることを示している。

また、クラック密度の増加に伴い物質中の音速は減少することが知られており、この性質はO'Connell and Budiansky (1974)によって試料内部のクラック密度と弾性率の関係式として理論的に示されている。この式を積算エネルギー密度が等しい実験試料に適用した結果、2回衝突の試料の方が1回衝突の試料より音速が減少していることがわかった。積算エネルギー密度が等しい場合でも、クラックは衝突回数に伴い増加し、衝突破壊強度を減少させる効果があると考えられる。

高強度レーザーによって衝撃圧縮された鉱物の変成分布

○永木恵太⁽¹⁾, 境家達弘⁽¹⁾, 近藤忠⁽¹⁾, 門野敏彦⁽²⁾, 弘中陽一郎⁽²⁾, 重森啓介⁽²⁾⁽¹⁾大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻,⁽²⁾大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

衝突現象は惑星形成やクレーター形成、また隕石中の高压相生成などの素過程を理解する上で重要であり、衝突実験においては、その試料を回収することが必須である。過去の研究においては、ガス銃などを用いた衝突模擬実験において試料の回収が行われているが⁽¹⁾、地球形成後期の秒速数十キロに至る隕石衝突に相当する圧力(最大 300-500GPa)には及んでいない。

本研究では近年利用が可能になってきた高強度レーザー装置を使うことで実際の隕石衝突に相当する速度⁽²⁾・圧力での衝突模擬実験を行い、試料の位置情報を残した状態で回収試料の変成状態を調べること、高压鉱物の生成の有無や回収・溶融・その衝撃変成の空間分布などについて評価したので報告する。

出発試料には、これまでに静的・動的圧縮実験によって得られたデータが豊富で隕石中の主成分でもあるオリビンやクォーツの単結晶および粉末試料を用いて、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。回収した鉱物試料の変成・結晶構造・相同定は光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡(SEM)・顕微ラマン分光などによって行った。

今回の実験では約 500GPa までの圧力を経験した試料を空間情報を保持した状態で回収することに成功した。回収した試料には下記の図のように溶融や破壊の状態が異なる分布がみられた。下図は光学顕微鏡の透過光による観察だが、明らかな色の違いにより3つの領域に分けることができる。更に詳しく SEM で観察してみると上部はヒビがなくつりとしていて、中部は塑性変形領域、下部以降は大きなひびが入り弾性破壊を受けていることが分かった。また SEM-EBSD によって上部と中部の結晶構造を観察してみると、中部ではオリビンの回折パターンが観察できるのに対して、上部では回折パターンが見られなかった。よって上部では溶融していた可能性があることが分かった。この上部を顕微ラマン分光によって観察したところオリビンとは異なるピークが見られたが、現在まだこのピークの正体は判明していない。この衝撃変成分布を更に解析することで、クレーター形成や破壊分布、高压相転移についても考察が可能であると考えている。

References

[1]Tschauner, O. et al., Proceedings of the National Academy of Sciences, 106, 13691-13695, 2009

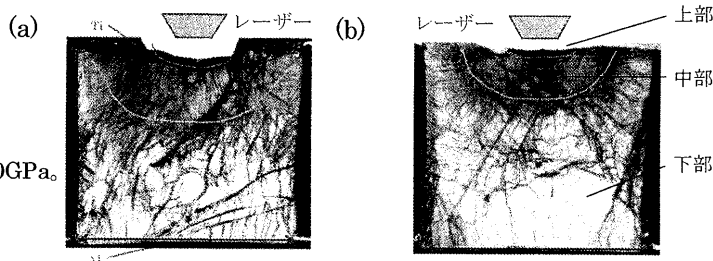
[2]Kadono, T. et al., Journal of Geophysical Research, 115, E04003, 2010.

図.

回収したオリビンの断面の
透過光写真。

(a)オリビン表面での圧力 290GPa。

(b)同圧力 180GPa。



衝撃圧縮による珪酸塩の電離: 珪酸塩の状態方程式の確立に向けて

黒澤耕介¹, 門野敏彦², 杉田精司³, 重森啓介², 弘中陽一郎², 佐野孝好²,
境家達弘⁴, 大野宗祐⁵, 羽村太雅³, 橘省吾⁶, 藤岡慎介², 松井孝典⁵

¹ISAS/JAXA, ²阪大 レーザー研, ³東大 新領域 複雑理工, ⁴阪大 理 宇宙地球科学,

⁵PERC/Chitech, ⁶東大 理 地球惑星科学

要旨:

地球の形成最終期には 10 km/s を超えるような宇宙速度衝突が起こる。この場合、内惑星の主要構成要素である珪酸塩でさえも蒸発する[Ahrens & O'keefe, 1972, *The Moon*; Kurosawa et al., 2010, *GRL*]。珪酸塩蒸気の発生は、地球史の中で多くの重要な役割を演じたと考えられている[例えば Mukhin et al., 1989, *Nature*; Wada et al., 2006, *ApJ*]が、個々の衝突でどの程度の蒸気が発生するのか、発生した珪酸塩蒸気の流体運動、化学進化は未解明である。これは天体衝突で発生するような極限状態においてはエネルギー分配過程を支配する状態方程式が確立していないことが原因である。

今回我々は阪大レーザー研の「激光 XII HIPER」を用いて、石英とカンラン石を~800 GPa まで衝撃圧縮し、エネルギー分配過程を調べる実験を行った[Kurosawa et al., Submitted to *The proceedings of Shock Compression of Condensed Matter 2011*]。具体的には試料の背面から時間分解分光を行い、衝撃波伝播中の温度、反射率、断熱圧縮中の温度、発光輝線種を計測した。その結果 (1)衝撃圧縮時の反射率増加量は物質によって異なること、(2)衝撃圧縮によるエントロピー上昇量は、衝突流体計算でよく用いられる M-ANEOS [Melosh, 2007, *MAPS*]による計算値よりも大きいこと、(3)断熱解放中の温度も M-ANEOS による計算値よりも高いこと、(4)断熱解放中に可視光領域に現れる最初の輝線は酸素のイオンであることがわかった。(1), (4)の結果は衝撃圧縮-断熱解放中の珪酸塩流体中に自由電子が豊富に含まれていることを意味し、天体衝突の極限状態のエネルギー分配では電子が一つのエネルギー貯蔵庫として振る舞うことを示唆する。衝撃圧縮による電離が起こると(2), (3)に述べた実験結果と M-ANEOS の違いは定性的には理解できる。我々が得た時間分解分光の結果は、衝撃圧縮された珪酸塩が臨界点近傍においても激しく解離/電離していることを意味する。M-ANEOS の計算で使用されている原子間相互作用/電離モデルを較正/改良することが珪酸塩の状態方程式確立のためには必要である。発表ではこれらの結果が月形成巨大衝突の描像をいかに変え得るかについても議論したい。

衛星リモートセンシングによるスペクトルデータを用いた地球衝突クレータ判別の研究

○山本 聡¹, 松永 恒雄¹, 中村 良介², 関根 康人³, 平田 成⁴

¹国環研, ²産総研, ³東京大, ⁴会津大

現在地球上には200個弱の衝突クレータが認識されている[1]。この個数は月等の固体表層を持つ他の天体上で見つかる衝突クレータの個数に比べて桁違いで少ない。これは地球において天体衝突の頻度が低いということではなく、発見されている衝突クレータの数自体が少ないことによる。衝突クレータと認識されるためには、(1)円形形状が認識されること、(2)衝撃変性鉱物など天体衝突の物性的証拠が見つかることが必要であるが、地球の場合、そもそも円形候補地形自体が少ない。その理由としては、地球表層では風化浸食作用やプレートテクトニクスの影響により古い地形の保存が良くないこと、また衝突クレータが表層付近に暴露されていたとしても植生や水の影響などにより認識が容易でないことが理由としてあげられる。一方で、地球観測衛星などを用いた衝突クレータ候補地形の全球搜索研究が乏しいため、地球表層に残っている衝突クレータ自体が現在発見されている個数程度でしかないのか、それともたまたま発見されたものが200個弱なのかについてはよくわかっていない。実際にgoogle earthデータを使った搜索により、新しい衝突クレータが発見されたという報告もある[2]。そのため、地球観測衛星リモートセンシングデータを使った搜索研究により、これまで認識されていなかった衝突クレータが多数見つかる可能性も考えられる。

そこで本研究では、ALOS-3衛星搭載予定の高性能ハイパースペクトルセンサー[3]による連続スペクトルデータ(以下、ハイパースペクトルデータと呼ぶ)を用いた、新しい衝突クレータ判別手法の開発を行うことを目的としている。このハイパースペクトルデータによる衝突クレータ認識に対する先駆的研究成果として、月探査機かぐやに搭載されたスペクトルプロファイラによる月面上カンラン石分布の発見があげられる[4]。この研究では、スペクトルプロファイラで取得された、約7000万点におよぶハイパースペクトルデータを用いて、カンラン石が持つ $1.05\mu\text{m}$ の特有吸収バンドに着目して解析を行ったところ、月面上で255点の場所を検知した。それらの検知地点の緯度経度情報をもとに分布図を作成すると、地図上で円形分布を示し、いずれも直径1000km近い巨大衝突盆地の周りに分布することがわかった(例として図1左)。結果として、検知されたカンラン石に富む物質は、巨大天体衝突時に掘り起こされた月深部物質であるという結論にいたった[4]。ここでのポイントは、最初から円形形状やクレータ地形を知ることなく、ただ $1.05\mu\text{m}$ の吸収バンドに注目するだけで、月の太古に形成された天体衝突の痕跡を引き出したということにある。つまり、従来は可視モノクロ波長データを使って衝突クレータの認識が行われてきたが、近赤外波長域も含めたハイパースペクトルデータの特定パターンを解析すれば、従来ではわからなかった天体衝突の痕跡を探しだせる可能性がある。これを地球観測衛星によるハイパースペクトルデータに応用すれば、従来可視観測では限界があった地球での「衝突クレータ候補探し」に対して、新しい展開が得られる可能性が高い。

一方、このハイパースペクトルデータによる地球衝突クレータ判別の基礎研究として、そもそも地球上で衝突クレータと認識されているものが、既存の分光データでどのように観測されているかについて調べておくことは重要である。そこで今回は、日本が開発したASTER(1999年打ち上げられたNASAの地球観測衛星テラに搭載)によるマルチスペクトルデータを用いて、地球上で衝突クレータとして認識されているもののうち表層に暴露されているものについての解析を行い、それぞれの特徴の記述と分類を行った(図1右にASTERデータによる衝突クレータ画像の例を示す)。本発表では、これらの解析結果を基に、特定スペクトルパターンによる自動クレータ抽出アルゴリズムに対する議論を行う。

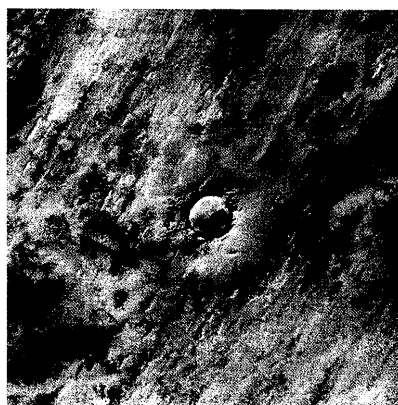
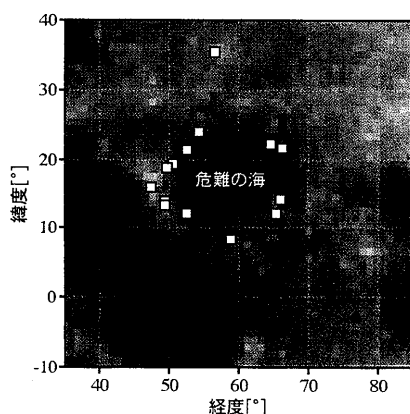


図1: (左) ハイパースペクトルデータの特定スペクトルパターンに着目した研究の例。スペクトルプロファイラで検知された $1.05\mu\text{m}$ に吸収バンドを持つスペクトルを示す場所の月面上分布の例(危難の海周辺)。背景は 750nm での反射率マップ。(右) ASTERデータによる地球衝突クレータの一例。アフリカにある直径 1.9km のTenoumerクレータ。ASTERのSWIRによる擬似合成カラーマップ。

[1] Earth Impact Database, 2011. <<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>> [2] Folco et al., Science, 329, 804, 2010. [3] T. Matsunaga, et al., Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 30, 166-170, 2010. [4] S. Yamamoto, et al., Nature Geoscience, 3, No. 8, 533-536 (NGE0897), 2010.

天体表層レゴリスの熱物性： ガラスビーズを用いた熱伝導率測定実験

○坂谷 尚哉¹, 小川 和律¹, 飯島 祐一¹, 本田 理恵², 田中 智¹

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²高知大学

月や小惑星のような天体表層はレゴリスで覆われており、その熱特性は様々な観点から重要である。以下に例を挙げる。熱流量は表層レゴリスの熱伝導率と温度勾配を測定することによって推定される。アポロ計画によって月の地殻熱流量観測が行われたが、熱伝導率の値は測定方法の違いによって、最大で 3 倍程度異なっている。その原因として、ドリル掘削時のレゴリスの圧密による熱伝導率の変化が指摘されているが、定量的には説明されていない。また、隕石母天体の内部熱進化においてレゴリス層の断熱効果の重要性が指摘されている。しかし、隕石母天体のような微小重力環境において、レゴリスがどの程度の熱伝導率を持つのかは明らかでない。いずれの例においても、レゴリスのような粉体の熱伝導率がどのようなメカニズムによって決まるのかを解明することが重要である。

本研究では粒径や空隙率、温度などのパラメータをコントロールした粉体の熱伝導率を高真空下で測定する。そして熱伝導率のパラメータ依存性を調査することにより、真空環境において粉体の熱伝導率が本質的に何によって決まるのかを解明することを目指している。真空下における粉体の熱伝導率は、粒子を通った熱伝導と粒子間の空隙を介した熱輻射の寄与の合計で表される。したがって、パラメータ依存性を調査しても、それが伝導寄与の影響なのか、輻射寄与の影響なのか、もしくは両者の影響なのかは解らない。メカニズムの理解のためには伝導と輻射の寄与の分離が不可欠だと考えられる。

Merrill (1969) は熱伝導率を $k = A + BT^3$ と仮定して、熱伝導率の温度依存性を調査することにより伝導と輻射の寄与の分離を試みた。ここで、 k は熱伝導率、 A は伝導寄与を表す定数、 B は輻射寄与の温度係数、 T は温度である。彼らは粒径 $10\sim 250\mu\text{m}$ のガラスビーズを用いているが、範囲が狭く、傾向を見るのに十分なデータではないと考えられる。また、空隙率のコントロールも $38\sim 50\%$ と、十分ではない。

そこで、本研究では彼らの方法に従って、粒径 $1000\mu\text{m}$ までのガラスビーズに対して熱伝導率の温度依存性を確認した。ガラスビーズの空隙率はどの粒径に対しても約 40% である。熱伝導率は line-heat source 法で測定した。恒温槽の中に真空槽を入れることによって、サンプルの温度をコントロールした。真空中でのガラスビーズの低熱伝導性のために温度コントロールに時間がかかってしまうが、システム全体を等温にすることができるため、精度のよい熱伝導率測定が可能になる。

実験の結果、輻射寄与は Merrill (1969) の結果とコンシステントで、粒径の増加関数であることが解った。これは粒径の増加にともない、単位長さ当たりの輻射による熱輸送の回数が減るためだと考えられる。一方、伝導寄与は Merrill (1969) の結果と異なり、粒径の増加関数であった。これは単位体積中の接触点の個数および接触面積の違いに起因していると考えられる。これら 2 の寄与が粒径に関してどのように変化するのかを定量的に評価し、得られた結果を説明できるようなモデルを作ることが課題である。

火星凍土を模擬した氷・固体粒子混合物のレオロジーに関する実験的研究

○保井みなみ¹、荒川政彦²

¹神戸大学自然科学系先端融合研究環 ²神戸大学大学院理学研究科

はじめに:火星表面は、数 μm ~数百 μm の砂塵で覆われていることが Phoenix などの火星探査により分かっている。また、Opportunity による地上探査では、火星表面に水があった証拠として cm サイズのヘマタイト粒子が見つかった。このように火星表面は様々な粒径の固体粒子で覆われており、表層の凍土や極冠の氷にもサイズ分布を持った固体粒子が含まれる。火星表面には氷の流動によって形成されたと考えられる地形(例:lobate debris apron)が中緯度域を中心に多く発見されており、この流動地形の形成条件を明らかにするには、それを構成する氷・固体粒子混合物の流動則が必須である。著者らは今までに、この流動則に対する固体粒子の濃度、空隙率、温度の効果を系統的に調べて流動則の改訂を行ってきた。今回は、氷・固体粒子混合物の変形実験を行って流動則に対する固体粒子のサイズ依存性を系統的に調べることにした。

実験方法:試料は直径 710 μm 以下の氷粒子と、球形ビーズを均等に混合したものと 0°C の H₂O 水を交互に少量ずつ容器に入れ、押し固めて作成した。固体粒子のサイズ依存性を調べるため、ビーズサイズは 1 μm 、100 μm 、1mm と変化させ、ビーズ含有率は 10~80wt.%まで系統的に変化させた。実験は北大低温研の低温室に設置された変形試験機を用いて、等歪速度一軸圧縮実験を行った。歪速度は $2.8 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とし、温度は -10°C と一定にした。

結果:流動則は、応力-歪み曲線上の最大応力 σ_{max} と歪速度 $\dot{\epsilon}$ の関係式 $\dot{\epsilon} = A_0 \exp(-Q/RT) \cdot \sigma_{\text{max}}^n$ で表すことができる。ビーズ含有率を一定にして最大応力に対するビーズサイズ依存性を調べた結果、ビーズ含有率が 10wt.%以下では最大応力のサイズ依存性は見られず、ほぼ一定になった。30wt.%以上になると 100 μm ビーズ試料が他の試料に比べて最大応力が大きくなった。さらに 50wt.%以上になると、1mm ビーズ試料が他の試料に比べて最大応力が小さくなり、80wt.%ではさらにその差が広がった(図 1)。また最大応力が最も大きくなる 100 μm ビーズ試料は、含有率が 80wt.%では全ての歪速度範囲で脆性破壊を起こした。流動則ベキ n のビーズ含有率依存性を各ビーズサイズ試料で調べた結果、100 μm ビーズ試料は含有率依存性が見られずほぼ 3~4 になったが、1 μm と 1mm ビーズ試料は含有率の増加と共に n が 3 から 5~6 へと大きくなった。

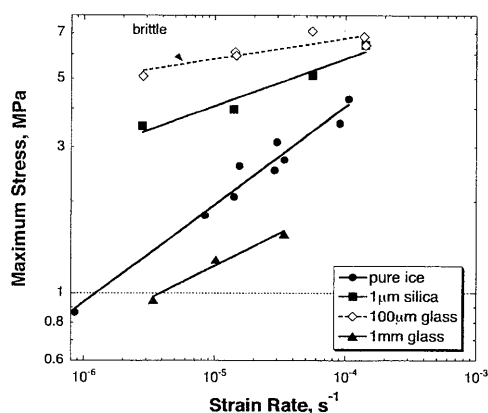


図 1 80wt.%での最大応力と歪速度の関係

ゾルゲル法で作成した GEMS 粒子平均組成を持つ 非晶質珪酸塩の加熱結晶化実験

○松野 淳也¹, 今井 悠太¹, 野口 遼¹, 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

赤外線天文観測によると原始惑星状円盤などの星周領域には、広く結晶質珪酸塩が見つかる。これらの多くは olivine ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) や pyroxene ($(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$) の鉱物であるが、silica (SiO_2) 鉱物も発見 (Sargent et al., 2009) されその成因が注目されている。一方星間空間の珪酸塩は結晶質ではなく、非晶質珪酸塩として存在する。このことから、若い星の星周領域で観測される結晶質珪酸塩は非晶質珪酸塩が加熱を受け結晶化したものであるという考えが一般的である。一方、太陽系形成初期に存在していたと考えられる非晶質珪酸塩物質の一つに、GEMS (Glass with Embedded Metals and Sulfides) がある。GEMS は彗星起源と考えられている無水惑星間塵中に発見されている直径 200-500 nm 程度の球状粒子である。GEMS の主な構成要素は 10-50 nm の微小 Fe-Ni 金属、硫化物と、平均的な化学組成が太陽組成よりも SiO_2 -rich な非晶質珪酸塩からなる matrix である。

非晶質珪酸塩の結晶化過程を調べるために、forsterite 組成 ($\text{Mg/Si} = 2$)、enstatite 組成 ($\text{Mg/Si} = 1$)、太陽組成などの組成をした非晶質珪酸塩の加熱結晶化実験が行われているが、GEMS のように SiO_2 -rich ($\text{Mg/Si} < 1$) での結晶化過程は分かっていない。近年赤外線天文観測で silica 鉱物が見つかったことから、 SiO_2 -rich な非晶質珪酸塩の加熱結晶化過程に興味がある。そこで本研究では SiO_2 -rich な非晶質珪酸塩の加熱結晶化過程を調べるため、GEMS 平均組成を持った非晶質珪酸塩を合成し、その加熱結晶化実験を行った。

非晶質珪酸塩の合成にはゾルゲル法をもちいた。 $\text{MgO}\cdot\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 系の試料を合成し、その組成は平均的な GEMS の matrix として推定された組成である $\text{MgO/SiO}_2 = 0.66$, $\text{FeO/SiO}_2 = 0.06$ (モル比) とした。合成試料を iron-wüstite 雰囲気下、大気圧で加熱し、加熱後の試料に含まれる結晶相の同定を、粉末 X 線回折装置を用いて行った。その結果、700-740°C の加熱 (0.25-16 時間) では、非晶質に特有なブロードなピークと小さな olivine のピークが見られ、750-1100°C の加熱 (0.25-16 時間) では主に pyroxene (orthopyroxene + clinopyroxene) と olivine と非晶質珪酸塩が観測された。1200-1400°C の加熱 (1-14.5 時間) では olivine が観測されず、主に pyroxene (proto-pyroxene + ortho-pyroxene) が結晶化し、いくつかの条件では cristobalite の結晶も見られた。これらの結果から TTT (温度-時間-相変態) 図を得た。

いくつかの GEMS には relict grain と呼ばれる forsterite などの 10 nm 程度の微小結晶が見つかる。これは結晶が星間空間で非晶質化した際の生き残りの結晶である言われている (Bradley and Dai, 2004) が、今回の実験で少量の olivine が先に結晶化したという結果は、GEMS の relict grain は matrix が 700°C 付近で加熱を受け、非晶質珪酸塩から結晶化したものであるという可能性を示唆しており、また Keller and Messenger (2011) では relict grain の見られる GEMS は非常に少ないと指摘していることから、多くの GEMS は relict grain が結晶化するような加熱を経験していないということを示唆している。一方、この組成をもつ非晶質珪酸塩から cristobalite が結晶化するには、1300°C 以上の加熱が必要であり、非晶質珪酸塩の加熱によるシリカ鉱物の生成は考え難い。

アミノ酸前駆体の太陽系環境下での変成 —地上実験と宇宙実験による検証—

Alteration of Amino Acid Precursors in the Solar System: Simulation Experiments on the Ground and in Space

○ 小林憲正¹・川本幸徳¹・Palash K. Sarker¹・桑原秀治¹²・大林由美子¹・金子竹男¹・
三田肇³・藪田ひかる⁴・吉田聡⁵・鳴海一成⁶・神田一浩⁷・山岸明彦⁸・たんぽぽ WG⁹

Kensei Kobayashi¹, Yukinori Kawamoto¹, Palash K. Sarker¹, Hideharu Kuwahara¹²,

Yumiko Obayashi¹, Takeo Kaneko¹, Hajime Mita³, Hikaru Yabuta⁴, Satoshi Yoshida⁵,

Issay Narumi⁶, Kazuhiro Kanda⁷, Akihiko Yamagishi⁸, TANPOPO WG⁹

¹横浜国大院工・²東大院新領域・³福岡工大工・⁴阪大院理・

⁵放医研・⁶原研・⁷兵庫県立大 LASTI・⁸東薬大生命・⁹JAXA

¹Yokohama Natl. Univ., ²Univ. Tokyo, ³Fukuoka Inst. Tech., ⁴Osaka Univ., ⁵NIRS, ⁶JAEA,

⁷Univ. Hyogo, ⁸Tokyo Univ. Pharm. Life Sci., ⁹JAXA

地球上での生命の誕生に先立ち、アミノ酸等の有機物が地球外から供給された可能性が議論されている。隕石や彗星中の有機物は、太陽系生成前の分子雲中で、星間塵アイスマントル中で生成した可能性が示唆され、高エネルギー粒子線等を用いた模擬実験により、高分子態のアミノ酸前駆体が分子雲環境中で生成しうることが報告されている。これが太陽系生成時に微惑星や彗星に取り込まれ、さらなる変成を受けたと考えられる。また、地球への供給は、惑星間塵によるものが多い可能性が示唆されている。しかし、惑星間塵は微小であるため、惑星間での太陽輻射等による変成が問題となるが、これまで、地球生物圏内でのみ採取されていることなどから、その変成に関して不明であった。

われわれは、国際宇宙ステーション曝露部を利用して、惑星間塵の捕集や有機物等の曝露などを計画している（たんぽぽ計画）。曝露実験においては、彗星等に含まれていると考えられるアミノ酸前駆体候補としてヒダントインや高分子態アミノ酸前駆体（模擬星間塵有機物）と、遊離のアミノ酸（グリシン・イソバリン）を選択し、これらを1～数年間、日本実験モジュール「きぼう」曝露部で太陽紫外線・宇宙線に曝露する予定である。

その準備を兼ねて、曝露予定試料の惑星塵環境下での安定性を、種々の高エネルギー光子・粒子の照射実験により検証した。重粒子線照射は放医研 HIMAC を用いて炭素線(290 MeV/u)等を照射した。太陽輻射に関しては、兵庫県立大・ニュースバル BL-6 を利用した軟 X 線～赤外線の白色光を真空下で照射した。γ 線は原研（高崎）で ⁶⁰Co 線源を用いて行った。各照射に対しては、前駆体の方が遊離態よりも安定であり、また、特に軟 X 線照射によりアミノ酸・アミノ酸前駆体の疎水性が増大することが観察された。これらの実験を続けることにより星間有機物の原始および現太陽系環境下での有機物変成と地球への供給のシナリオを構築していく予定である。

星周コランダムの異方的凝縮速度の決定

○瀧川晶¹, 橘省吾¹, 永原裕子¹, 小澤一仁¹

¹東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

コランダム (Al_2O_3) は、太陽系元素存在度の高温ガスからの最初の凝縮物のひとつであり、より低温で凝縮する物質の凝縮核ともなりうるため、原始太陽系円盤や晩期型星周囲でのダスト進化の起点となる物質である。また、コランダムは酸化的な低質量晩期型星に一般に観測される 13 ミクロンピークの放射源とも考えられ、13 ミクロンピークを再現するコランダムの形成条件を理解することは、酸化的な晩期型星でのダスト形成を理解するために非常に重要である。これまでに、低圧下 ($<10^{-4}\text{Pa}$) でのコランダム凝縮実験をおこない、低過飽和比条件 ($S<70$) でモリブデン金属基板上に粒状・c 軸に扁平なコランダムが凝縮し、高過飽和比条件 ($S>70$) で粒状・c 軸に伸びたコランダムが凝縮することを示した。さらにコランダムの赤外スペクトル計算から、13 ミクロンピークの放射源は、低過飽和比で凝縮したコランダムである可能性を示唆してきた。しかし、星周コランダムの形成条件を定量的に決定するためには、コランダム成長異方性に加えて、異方的成長速度を定量的に決定する必要がある。

そこで本研究では、単結晶コランダム基板上へのコランダム凝縮実験をおこなった。実験は真空抵抗加熱炉に設置したイリジウムるつぼ内でおこなった。るつぼ底にいたアルミナ粉末を蒸発させ、るつぼ上部の低温部に設置したコランダムの C(0001) 面、A(11-20) 面に凝縮させた。ガス温度は 1695°C 、凝縮温度は 1590°C 、実験時間は 56-144 時間でおこなった。凝縮物は走査型電子顕微鏡で表面組織を観察し、実験前後のコランダム基板の重量変化と基板表面積からコランダムの [0001] 方向、[11-20] 方向への凝縮速度を求めた。

重量変化からコランダムが厚さ 1 ミクロン程度成長していると考えられる基板上には、mm オーダーで直線的なステップがみられ、結晶面方位に関わらずほとんど二次元島がみられなかった。また、[11-20] 方向と [0001] 方向への凝縮速度の比はおおよそ 1.5 となった。これは、モリブデン基板上でみられた成長異方性と調和的であり、また、晩期型星に観測される 13 ミクロンピーク位置を再現するコランダム粒子の軸比である、c 軸に垂直、平行な方向への長さの比が 1:1.4 という条件とも調和的であり、13 ミクロンピークが低過飽和比で成長したコランダム起源であることを支持する結果となった。

かぐや搭載マルチバンドイメージャのデータ公開状況と 同データの利用促進に向けた取り組み

Current status of data opening and
promotion activity of the Kaguya Multiband Imager data

○大竹真紀子（宇宙航空研究開発機構）

M. Ohtake (JAXA/ISAS)

月周回衛星かぐや（SELENE）に搭載したマルチバンドイメージャ(MI)により取得した月面分光画像データは、これまでに基本的な補正および校正作業を終了しており、すでに輝度値画像を一般に公開している(<https://www.soac.selene.isas.jaxa.jp/archive/>)。現在、より高次の処理を施したデータ(研究者が利用しやすいフォーマットの、緯度・経度で切り分けられた反射率スペクトルデータや鉄、チタン含有量マップなど)の公開に向けて、全球データの処理を実施中である。研究向けのデータ作成と公開を行う一方で、MI データの利用促進に向けた活動として、これまでに MI データ利用のための講習会を実施しており、また、より簡易に MI 画像ブラウズを行うためのソフトウェアの配布、観測機器開発チームに限定しない国内外との共同研究等も行っている。

活動の成果として、現在 MI データを利用中の研究者(惑星科学分野に限る)は国内だけでも25名ほどとなり、利用は進んでいる。ただし、リモートセンシング分光画像を用いた研究の経験者が少なく、新しく取り組み始めた研究者が多いこと、解析方法の理解にやや時間がかかることや従来にない高い空間分解能ゆえに生じる課題、観測機器や観測運用に固有の課題など、さまざまな要因によって研究成果の発表までに時間を要する例も多い。また、現在公開中のデータについては各研究者から、公開データのフォーマットやデータアーカイブ・公開システムの改善を求める意見をいただくことや、本来であれば将来少なくとも数年に渡って必須となるより精度の高い、より使いやすいデータ作成のための計算機や要員等不足など、取得済みの貴重なデータを用いた研究を促進し、より多くの成果を上げるためには課題も多い。

このような現状を踏まえ、本発表では、すでに一般公開されている MI の利用方法や、今後の高次処理済みデータの公開予定、これらデータの利用者を増やすために行っている取り組みを紹介するとともに、公開データをより多くの研究に役立てるためには何をすべきかなど、現状の課題についても議論し、得られた意見を今後のデータ利用促進に向け反映したい。

SP2-02P

かぐや搭載地形カメラデータに基づいた東の海における表面年代決定およびその溶岩流の厚さの推定

○石山 謙¹ 大隈 裕一郎² 諸田 智克³ 平田 成⁴

¹東北大学 ²大阪大学 ³国立天文台 ⁴会津大学

月において、オリエンターレ盆地は最も若い盆地であり、多重リングクレターの起源やそのサイズおよび放出されたエジェクタの分布を研究する上で非常によい盆地である[Moore et al., 1974]。また、オリエンターレ盆地は月の表と裏側の境界に位置する盆地でもあるため、月の二分性を調べる上でも重要であることから、盆地を埋めている東の海の溶岩流の噴出年代やその厚さを調べることは、月の熱的歴史を考える上で非常に重要になる。Greeley et al. [1993]では、東の海においてクレタカウンティングに基づいた解析が行われ、東の海は38.4億年前に形成し、28.5億年前まで火山活動が続いていたことが報告された。また、近年では、東の海における溶岩噴出は37億年前から16.6億年前まで続いていたと報告された[Whitten et al., 2011]。しかし、これらで用いられた画像データの空間分解能は高くないため年代決定誤差は大きく、特にマグマ噴出の終了時期は不確定である。

本研究では、かぐや衛星搭載の地形カメラによって得られた高分解能画像データを使用し、クレター年代学に基づいて、東の海の表面年代および溶岩流の厚さの推定を試みた。結果として、東の海は37億年前に形成され、東の海の北東部に位置する秋の湖(Lacus Autumni)や春の湖(Lacus Veris)は、比較的新しい溶岩流であることが示された。この結果の傾向は、先行研究ともよく一致する。

講演では、先行研究[Whitten et al., 2011; Greeley et al., 1993]における表面年代との対比および領域ごとの溶岩の厚さを示し、考察を行う。

惑星科学研究センター（CPS）によるスクール・実習・研究会の企画・開催への支援の取り組み

Supporting activities of CPS (Center for Planetary Science) for organizers of schools, training courses, and workshops

○木村淳^{1,2}, 中川義次^{1,3}, 林祥介^{1,3}, 木村宏¹, 杉山耕一郎^{1,2}, 高橋芳幸¹, 西澤誠也¹, 鈴木絢子¹, 谷川享行^{1,2}, 山田耕¹, 納田明達^{1,2}, 惑星科学研究センター¹

¹ 惑星科学研究センター, ² 北海道大学, ³ 神戸大学,

Center for Planetary Science (CPS) fosters interactions between professionals and serves as a repository for knowledge of planetary science. Planetary science is an emerging interdisciplinary field, combining aspects of astronomy, geology, meteorology, biology, etc., with its ultimate goal to understand our place in the universe. It is essential for the achievement of the goal to tightly link professionals with various backgrounds and grasp the overall picture of planetary science through the comprehensive knowledge. CPS is the place to realize such a link and a grasp.

As an activity of coordinating education and research in planetary science, CPS gives assistance to organizers of schools, training courses, and workshops. The majority of lectures in a school and oral presentations in a scientific meeting are video-recorded and published on the CPS Web site. We will report on the past education and research programs at CPS as well as multimedia contents under the MOSIR project.

惑星科学研究センター（CPS）では、惑星科学コミュニティへの貢献と人材育成を目指す活動の一環として、スクール（国内外の著名研究者を招いての合宿による教育プログラムの提供）や実習（実験・観測・データ処理・数値計算などの実践的トレーニング）、研究会の開催支援に取り組んでいる。本発表ではこれまでに行われたスクール・実習・研究会プログラムについて報告するとともに、プログラムで用いた資料を CPS サーバに集積しインターネット上に公開する知見アーカイブ活動（mosir プロジェクト）についても紹介する。

2010 年度に主催あるいは開催支援を行った集会企画	
スクールプログラム	実習プログラム
・ 国際プラネタリスクール ・ 惑星科学フロンティアセミナー ・ 地球流体セミナー ・ ワークショップ「地球惑星科学における流体力学」 ・ 森羅万象学校	・ 惑星探査データ解析実習会 ・ CPS 実験基礎実習 ・ CPS 衝突実験実習 ・ 天体観測実習 ・ 地球流体データ解析・数値計算実習
研 究 会	
・ Grain Formation Workshop/「銀河のダスト」研究会 ・ 月惑星探査の来たる 10 年公開討論会 ・ CPS 月惑星探査研究会 ・ アジア地域核データベース開発ワークショップ ・ 惑星大気研究会	・ 「惑星科学と粉体物理の接点を探る」ワークショップ ・ Alfvén 会議 ・ 「恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究」ワークショップ

堆積岩への衝突クレーター形成実験

Laboratory Experiments for Impact Cratering
on Sedimentary Rocks鈴木 絢子¹, 長谷川 直², 門野 敏彦³, 中村 昭子⁴, 杉田 精司⁵, 荒川 政彦⁴,¹惑星科学研究センター, ²JAXA/ISAS, ³大阪大学レーザーエネルギー学研究センター,
⁴神戸大学, ⁵東京大学

Three series of impact cratering experiments on sedimentary rocks have been conducted in the last two years as part of CPS Laboratory Training Course on Impact Experiments. A two-stage light-gas gun at JAXA/ISAS and a powder gun at Kobe University were used. We systematically changed impact velocity (0.8-6.9 km/s), projectile density (1.1-15 g/cm³), and target sedimentary rocks (sandstone at several occurrences, limestone etc.) in order to derive a scaling law of cratering for sedimentary rocks. The derived scaling-law between the non-dimensional parameters is similar to the conventional scaling-laws for igneous rocks and metals within one-order of magnitude.

衝突研究会と惑星科学研究センター (Center for Planetary Science, CPS) が共同で開催している衝突実験実習の一環で、堆積岩に対するクレーター形成実験を2年間に渡って行っている。近年の惑星探査衛星の目覚ましい発展によって、例えば火星では直径数 m のクレーターをも観察できる解像度のデータが取得されており[1], 堆積岩に対するクレータースケーリング則の確立が求められている。

実験には、宇宙科学研究所共同利用施設の二段式軽ガス銃と神戸大学の火薬銃を用いた。パラメータを以下の範囲で変化させた (衝突速度: 0.8-6.9km/s, 弾丸密度: 1.1-15g/cm³, 標的の堆積岩: 揖斐砂岩, 中国砂岩, パキスタン砂岩, 石灰岩)。できたクレーターの等価円直径と深さを計測し、形状を円錐と仮定して体積を算出した。計測結果を用いて、クレーター体積、弾丸の運動エネルギー、弾丸の密度をそれぞれ無次元化し[2], クレーター体積における、弾丸の運動エネルギーと密度の依存性を以下のように導いた:

$$\left(\frac{\rho_t V}{m}\right) = (0.22 \pm 0.02) \left(\frac{Y}{\rho_p v_i^2}\right)^{-0.63 \pm 0.07} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{0.33 \pm 0.16}$$

V はクレーターの体積, m , ρ_p , v_i はそれぞれ弾丸の質量, 密度, 衝突速度, Y , ρ_t はそれぞれ標的の強度, 密度を表す。今回導いたスケーリング則は、これまでに金属標的や火成岩標的に対して導かれたスケーリング則 [e.g., 2, 3, 4] と、1桁の範囲内で一致した。

- [1] McEwen S. et al., (2007) Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), *Journal of Geophysical Research*, **112**, E05S02.
- [2] Holsapple, K., and R. Schmidt, (1982), On the scaling of crater dimensions 2. impact processes, *J. Geophys. Res.*, **87**, 1849-1870.
- [3] Gault, D. E. (1973), Displaced mass, depth, diameter, and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks, *The Moon*, **6**, 32-44.
- [4] Summers J. L. (1959), Investigation of high-speed impact: regions of impact and impact at oblique angles, NASA TN D-94.

新鮮クレーター形状に関する統計研究：海と高知の違い

○寫生 有理¹, 神前 喬²

¹名古屋大学 環境学研究科, ²大阪大学 理学研究科

クレーターは固体天体表層に普遍的に見られる衝突地形である。クレーターの形状は直径と深さの比で大きく特徴づけられるほか、リムの高さ、楕円率、中央丘や多重リング構造の有無など様々な要素がある。月の表面は主に玄武岩からなる海と、主に斜長岩からなる高地が分布している。アポロデータによると、複雑クレーターへと遷移する大きさは海では約 10km、高地では約 20km と、海では高地より小さいサイズで遷移する[1]。また、10km 以下の小さなクレーターでは海と高地で形状に違いはない[2]。一方、クレーター形成メカニズムを考えると、直径 1km 以下の微小クレーターは強度支配域と考えられるため、形状は地表面の力学物性に依存することが予想されている。そこで本研究では、高解像度のかぐやデータを用いて比較的新鮮なクレーター形状を測定し、海と高地とでクレーター形状に違いがあるかどうかを調べた。

解析には、かぐやによって得られた TC オルソマップと DTM マップを用いた。海の調査地域は東経 294-300 度、北緯 18-27 度、高地の調査地域は東経 213-219 度、北緯 18-27 度とした。解析にはリモートセンシング分野で広く使われている ENVI という画像解析ソフトを用いた。DTM と TC のデータを開き、クレーター直径、リム高さ、クレーター深さを測定した。測定するクレーターを選ぶ基準として TC 画像を用い、白く写っている新鮮そうなクレーターをピックアップして測定した。

本研究では、海で 84 個、高地で 99 個のクレーター形状を測定した。その結果、クレーター直径と深さの関係は、海も高地も Pike (1974) の結果とほぼ整合的であった。しかし、海の結果は直径 2km 以下で先行研究よりも系統的に深さが浅いことがわかった。同様に、高地も直径 500m 以下で先行研究よりも浅くなる傾向が見られた。クレーター直径とリム高さの関係は、全体として Pike (1977) [3]と整合的な結果が得られたが、高地ではクレーター周囲の起伏が激しくリム高さの決定が難しいため、分散が大きくなった。また、海は 1km 以下でリム高さが先行研究より低くなる傾向が見られた。高地については、分散が大きくそのような傾向は見られなかった。

本研究は第 4 回惑星探査データ解析実習会の成果に基づいています。世話人、講師の皆様へ感謝いたします。

[1] Pike 1980, *11th LPSC abstract*, p2159. [2] Pike 1974, *GRL*, 7, 291.

[3] Pike 1977, *8th LPSC abstract*, p3427.

クレータサイズ頻度分布計測によるオリエンターレ 盆地の年代推定について

○末次竜、 安井佑貴

神戸大学大学院理学研究科

月の表面には高地と呼ばれる明るく見える場所と、海と呼ばれる暗く見える場所がある。高地は主に斜長岩で構成されており、その表面には大小様々な大きさのクレーターが無数に存在している。そのため高地の形成時期は非常に古いと考えられている。一方、海は玄武岩質の溶岩が巨大衝突盆地を埋めることによって形成された。その表面にクレーターは存在するが、高地に比べるとその数は少なく、大きいクレーターは稀である。また月の表面の2割弱を占めるが、ほとんどが月の表側に分布している。このように月の表面には性質の異なる領域が二つあり、それがまた月の表と裏の二分性を作り出している。オリエンターレ盆地は月の表と裏の境界領域に存在し、この盆地を詳しく解析することは月の二分性を解明する上で非常に重要である。

今回、我々は月探査機「かぐや」の地形カメラによって得られたデータから、クレータ年代学を用いて、オリエンターレ盆地全体とオリエンターレ盆地内の海の年代を求め、火成活動の歴史について考察した。これらの結果について報告する。

なおこの研究は第四回月惑星探査データ解析実習会において行った実習結果をまとめたものである。

オリエンターレ盆地における溶岩噴出年代の推定

○長 勇一郎¹, 保井みなみ², 諸田智克³, 平田成⁴

¹東京大学, ²神戸大学, ³国立天文台, ⁴会津大学

月の海を形成する溶岩流は、月面の最も顕著な地質学的特徴である。海を作る溶岩流は衝突盆地や大きなクレーターの中に発達する傾向がある。これは衝突に伴って地殻が剥ぎ取られて薄くなった分だけマグマが噴出しやすくなるためだとする説があるものの、衝突が溶岩の噴出を誘起するメカニズムはよく分かっていない。なかでもオリエンターレ盆地は、比較的薄い地殻が覆う月表側と分厚い地殻の裏側との境界付近に位置し、月の火成活動の二分性を解明する上で鍵となる領域である。また、巨大盆地としては最も新しい盆地であるため、地形的な特徴付けが容易な位置に噴出した溶岩流がよく保存されており、月の火成活動がいつまで、なぜ活発であったかを知るための格好の材料を提供している。そのためオリエンターレ盆地内の海を作った火成活動の時期と規模の変遷は、月全体の火成活動史と二分性形成メカニズムを理解する上で非常に重要な基礎データとなる。

オリエンターレ盆地および盆地内に発達した海の溶岩の形成年代はこれまでも調べられてきた。なかでも多重リングに沿って生成した **Lacus Autumni** は、月の火成活動としては最も近年まで噴出が続いていた溶岩流の一つであるとされているが、主に画像の空間分解能の悪さから、年代の誤差が大きいままで議論されている(Greeley et al., 1993; Whitten et al., 2011)。

そこで本研究では、オリエンターレ盆地の形成と溶岩噴出のタイミングおよびその規模を調べることを目的とし、かぐやに搭載された地形カメラ(TC)の高解像度画像を用いてクレーターカウンティングを行うことで各溶岩流(Fig. 1 A-F)の年代を推定した。クレーター年代モデルは、Neukum (1983)を用いた。また、噴出した溶岩の厚さを Pike (1977)の方法で推定し、その時期に噴出した溶岩の体積を概算した。

その結果、オリエンターレ盆地は現在から約 38 億年前に形成し、その後 3 億年ほど(35 億年前まで)に盆地の中心部を占める **Mare Orientale** が形成したことが分かった。このときの溶岩の噴出量は $1 \times 10^4 \text{ km}^3$ と見積もられた。更に 15 億年ほど経過した後(20 億年前)に、多重リングに接する **Lacus Veris** および **Lacus Autumni** が形成したことが分かった。形成年代に大きな差があることから、これら二つの海は **Mare Orientale** とは異なるマグマソースから形成されたと考えられ、オリエンターレ盆地の形成に関わる火成活動が盆地を形成した衝突から 20 億年経過した後も続いていたことを示している。

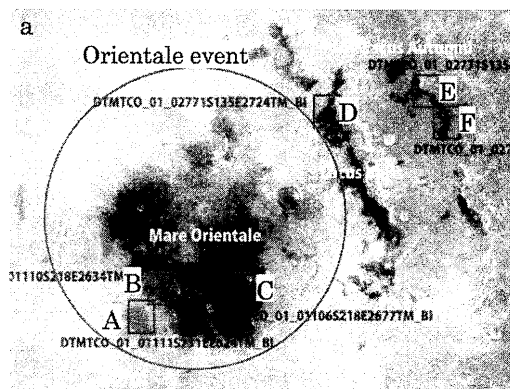


Fig.1 年代推定地域

CPS 衝突実験実習の取り組み

○荒川政彦¹、門野敏彦²、杉田精司³、中村昭子¹、鈴木絢子⁴、

関根康人³、山下靖幸⁵、長谷川直⁶、大野 宗祐⁷

1 神戸大学, 2 大阪大学, 3 東京大学, 4 惑星科学研究センター,

5 中部大学, 6 JAXA/ISAS, 7 千葉工業大学

要旨：日本惑星科学会/衝突研究会は、惑星科学研究センター(CPS)との共催で 2008 年度から衝突実験実習を開催している。この実習は、大学院修士・博士課程の学生が実験装置のユーザーレベルから脱却し、保守・管理、装置開発能力を獲得するための啓発と基礎訓練の場を提供する目的で行われている。実習は基礎実習と応用実習の2つに分かれており、基礎実習では講義と電気、真空、機械工作の実習が用意されている。応用実習では、実際の研究に触れることを目的として実験装置を利用した実習を行っている。

背景：惑星科学の分野では数カ所の大学で衝突実験を行っている。全国に散らばる衝突実験関連の研究グループは、トータルで見れば、低速(数 10m/s)から超高速(数 10km/s)までの非常に広い速度領域をカバーする実験設備を持ち、計測系についても高速撮像・分光技術から物質回収分析や質量分析技術まで様々な技術と装置を持っている。しかしながら、どこも教員 1~2 名で学生の指導を行うような小規模のグループである。学生に対する実験の指導は、実際に実験を行いながら装置の前で直接行うことが望ましいが、現在の大学の教育環境では基礎的な技術からすべてを一人の教員が教えることは難しい状況にある。また、このような小規模グループでは、各研究室において広い分野の高度実験技術・設備を維持し、発展させることは困難である。そのため、研究に利用できる程の高度な実験技術となると各研究室で学生が習得できる技術は、大変狭い分野に限られてしまっているのが現状である。しかしながら、今後若い研究者が、惑星探査等の技術開発を行っていく上では、学生の頃からできるだけ広い分野において一流の技術に触れておく必要がある。CPS 実験実習は、この 2 つの問題点を解消して将来の実験研究者を育成することを目的に立案され、実験の基礎教育を行う実験基礎実習と最先端の実験技術を習得する衝突実験実習(応用実習)の 2 つのプログラムから成る。このようなプログラムを実施することにより、全国に散らばる高度だが狭い分野に特化しつつある研究・教育資源を有機的に連携させ、最先端教育と広範囲教育という二律背反とも思える二つの教育を両立させることを狙っている。

実験基礎実習：本来なら各大学において教えるべき知識や技術であるが、各大学で時間をとることが難しい内容をピックアップしてカリキュラムに反映させている。特に一人一人が自分の手を動かして行う実習に重点を置いている。そのため、CPS からの援助により一通りの基礎物理実習装置を 1~2 人で使用できる環境を整えた。また、学生が所属する研究科によっては経験することが難しい工作実習も神戸大学工学研究科の工作技術センターの方々のご助力でカリキュラムに入れている。

衝突実験実習：日本全国の衝突実験施設を利用し、実際の研究に用いている装置で実習を行っている。国内には特徴的な実験設備を持つ研究室がいくつかあるが、その中で東大、宇宙研、名大(神戸大)がこの実習に協力している。東大では、レーザーアブレーションによる分光分析の実習、宇宙研では、二段式軽ガス銃を用いた岩石クレーターの形成実験とその超高速撮影、また、名古屋大学(神戸大)では、固体、気体中を伝播する衝撃波の観察実験を行っている。

22P/Kopff のダスト構造と非対称ジェット

○花山 秀和¹ 石黒 正晃² 猿楽 祐樹³ 渡部 潤一¹¹国立天文台 ²ソウル大学 ³宇宙航空研究開発機構

2009 年 5 月に回帰した短周期彗星 22P/Kopff 彗星について、近日点通過後の 8 月から 12 月まで、国立天文台/石垣島天文台の MITSuME3 色同時撮像カメラと東京大学木曽観測所の 2kCCD カメラによる観測を行った。

観測では淡く広がったコマが見られたほか、彗星核の南側にダストの非対称なジェット成分が見られた。また、軌道方向には細長く伸びたダストトレイルが見られた。その一方で、ネックラインが予想される方向には明確な構造は見られなかった。

22P/Kopff 彗星の南向きの非対称ジェット構造の複数回の観測データから、我々はまず彗星核の自転方向について解析を行った。ジェット構造の境界がなす角から自転軸の位置角を測り、位置角の時間変化から自転方向を推算した。その結果、自転軸の向きは $(\alpha_{pl}, \delta_{pl}) = (302^\circ, 62^\circ)$ または $(\alpha_{pl}, \delta_{pl}) = (122^\circ, -62^\circ)$ と推定されることが明らかになった。

また、我々は 22P/Kopff 彗星の非対称ジェット構造を説明するモデルとして、自転軸を中心軸とするコーン状のダスト放出を仮定した詳細な理論モデルの構築を行った。数値計算の結果、観測された非対称ジェット構造は太陽側の自転軸付近で放出されたダストによってよく説明されることが明らかになった。近日点通過前には彗星核の北側の自転軸付近からダストが放出され、近日点通過後は南側からダストが放出されているものと考えられる。

以上の結果から、22P/Kopff 彗星は、核表面の大部分が枯渇しており、極域の限られた領域にのみフレッシュな領域が分布しているものと推測される。

S11-02P

マイダナク天文台に於ける若い小惑星族の測光観測 2006-2010 Photometric Observation of Young Asteroid Families at Maidanak Observatory in 2006-2010

○吉田 二美¹, 伊藤 孝士¹, 野沢 由依², 高橋 茂¹, 沖田 喜一¹, 大谷 浩³, 柳沢 俊史⁴, 黒崎 裕久⁴, Mansur Ibrahimov⁵, Shuhrat Ehgamberdiev⁵, Anastasia Marshalkina⁵, Rivkat Karimov⁵, Otabek Burhonov⁵, Yusufjon Tillayev⁵, Bahadir Hafizov⁵, 浦川聖太郎⁶
¹NAOJ, ²日本女子大学, ³京都大学, ⁴JAXA, ⁵UBAI, ⁶JSGA

若い小惑星族はその形成年代が数百万年前であり、古い小惑星族と比べて非常に若い
ため、小惑星族を形成した衝突事象の痕跡を保っていることが期待される。また
宇宙風化の進んでいない新鮮な表面物質のスペクトルが観測できるかもしれない。

私達はウズベキスタン・ウルグベク天文研究所のマイダナク天文台を使い、若い
小惑星族の多色測光観測を継続している。今回の発表ではその観測データから 2006
年～2010 年に得られた結果をまとめると共に、マイダナク天文台の観測設備更新に
関して私達が実施している活動の報告を行う。

Some of asteroid families turned out be very young (several Myrs old). These
young family asteroids possibly preserve some signatures of the original
collisional event that formed the family. And also, comparing spectra of old
asteroid's surfaces (matured) with those of young asteroid's surfaces (fresh), we
may be able to estimate a time scale of space weathering. Driven by these
motivations, we have begun multi color photometry and lightcurve observation of
the young family asteroids. In this presentation, we would like to report the
result of the series of photometric observations of young family asteroids that we
have carried out in 2006-2010. We observed 43 asteroids from young families and
7 asteroids from old families. We determined rotation period and amplitude of 36
young family asteroids. Using a simple model, we defined the upper limit of
rubble pile structure. We measured colors of 19 young family asteroids and 7 old
family asteroids. The space weathering seems to vary asteroids surfaces of S-and
C-types with opposite sense.

Currently our particular attention is how we use and rejuvenate our main
observational instruments. We also report such activities at Maidanak
observatory.

ボルダーターゲットにおけるクレーター生成効率： 小惑星表面での装甲効果への実験 的アプローチ

○平田成¹, 中村昭子², 町井渚², Carsten GUETTLER²

¹会津大学, ²神戸大学

Asteroid 25143 Itokawa shows a paucity of small craters in comparison to an expected crater population from the standard crater formation model. The low depth/diameter ratios are also observed for craters on Itokawa. To explain these observations, following three processes and effects are proposed: 1) Regolith migration and degradation of craters by seismic shaking caused by meteoritic impacts, 2) Decrease of cratering efficiency on boulder-rich targets (so-called armoring effect), and 3) Concealing of existing craters on boulder-rich and undulated surfaces. We conduct cratering experiments on a coarse grained pumice target and glass beads targets with various grain sizes. The size of pumice grains is comparable to that of the projectile. The dimensions of formed craters are compared with those of craters formed on a fine-grained glass beads target.

小惑星イトカワ表面では、標準的なクレーター生成モデルから予想されるよりも小サイズクレーターの欠乏が観測された。また、クレーターの深さ-直径比も小さいことが知られている。これに対する説明として、1) (隕石衝突によって励起された) 地震動によるクレーターの崩壊、2) ボルダー層上でのクレーター生成効率の低下（装甲効果）、3) 起伏の激しいボルダー層上での小クレーターの隠蔽効果、などが提唱されている。ボルダー層上での装甲効果と小クレーターの隠蔽効果を検証するため、軽ガス銃を用いて弾丸サイズと匹敵するサイズ分布を持つ軽石層をターゲットとしたクレーター形成実験を行い、細粒のガラスビーズターゲットでの実験結果と比較を行った。また、より制御された条件を得るために、弾丸とターゲットの双方をガラスビーズとし、その粒径を変えた実験を企画している。本実験シリーズでは、弾丸にサボを装着することで銃の口径よりも小さい弾丸でのクレーター形成も試みる。本発表では実験結果の速報を行う。

小惑星表面の浮遊ダストの観測可能性について How to analyze levitating dust on asteroids.

○千秋博紀¹, 小林正規¹, 和田浩二¹, 並木則行¹, 平田直之², 宮本英昭²

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²東京大学総合研究博物館

Hiroki Senshu¹, Masanori Kobayashi¹, Koji Wada¹, Noriyuki Namiki¹,
Noayuki Hirata², and Hideaki Miyamoto²

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology,

²The University Museum, The University of Tokyo

大気を持たず非導電性の表面を持つ小惑星では、光電効果によって電子が弾き飛ばされるため、表層付近には上向きの電場が形成される。小惑星表面のダストもまた光電効果によって正に帯電するため、電場に従って上向きの力を受ける。この力がダストにかかる重力に打ち勝つと、ダストは小惑星表面を離れる。ダストのサイズが小さいほど、体積に対して表面積が大きくなるため帯電の影響が大きい。このため、ダストはそのサイズに応じて小惑星から失われたり、一時的に浮遊することで小惑星表面を移動したりする。このようなダストの浮遊は、月表面で観測されている光散乱や、小惑星エロスなどで見られる滑らかな地形の生成要因と考えられているが、まだ直接的観測が行われた例はない。

本講演ではまずダストが浮遊するメカニズムを再検討し、次いで浮遊しているダストはどのような手段で観測すれば良いのか、何を観測すれば浮遊メカニズムを理解できるのかについて検討する。

Surface of a resistive and airless body is positively charged on the dayside due to photoelectric effect to make an upward electric field. Since a dust grain on the surface is also positively charged, it would levitate from the surface if the electric field became strong enough. This process is called as photoelectric dust levitation and is expected to occur on asteroidal surfaces.

In this talk we will review previous model on the photoelectric dust levitation and discuss which parameter is to be observed to understand the mechanism of dust levitation.

スターダスト彗星粒子 T111・T112 の鉱物学的特徴:TEM と FE-SEM による観察:

A TEM and FE-SEM study of two Stardust Cometary Particles extracted from tracks T111 and T112.

○小松睦美¹, 三河内岳², 宮本正道², Timothy Fagan³, Michael Zolensky⁴, 大隅一政⁵

¹ 早稲田大学高等研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻,

³ 早稲田大学教育学部地球科学専修, ⁴ NASA Johnson Space Center, ⁵ 高輝度光科学研究センター

NASA スターダスト探査機の持ち帰ったヴィルト 2 彗星塵についてのこれまでの研究から、彗星粒子には高温起源の結晶が含まれており、始原的隕石物質と関連があることが明らかになっている[1, 2]。本研究では、Cell 2067(C2067)中のトラック T111 と T112 から取り出された粒子(C2067.1. 111, C2067.1. 112)について、TEM と FE-SEM による鉱物学的研究を行った。

ヴィルト 2 彗星の粒子は、捕獲時の衝撃で、トラック（通過痕）に沿って分散して存在している。同じトラックの別の粒子である TP1-4 は、組成的には近い値を示し、元々一つの複合体を構成していたと考えられる。

[T111]

TP2、TP4 とも、主にかんらん石と FeS から成る。TP2 の直径は 13 μ m、TP4 の直径は約 7 μ m である。粒子の端には Si-rich glass が存在し、その porous な形状から、彗星粒子が捕獲時の衝撃により溶融したことが分かる。本研究において FE-SEM 観察による EDS 分析を行った結果、一つの粒子内でもかんらん石の組成に Fo67-73 とばらつきがあり、他研究の彗星粒子に比べて Fe に富む傾向がある。この組成は、過去の放射光の測定値 [3] とも調和的である。

[T112]

T112 にはかんらん石とクロマイトが確認された。クロマイトの成因は以下の可能性がある。

- (i) 凝縮起源 (Cr-rich spinel; under dust enriched system [4, 5])。 (ii) Chondrule melt からの晶出。
- (iii) chondrule 中の Fe-rich かんらん石から変成作用による晶出 [6]。

彗星塵中のクロマイトは、限られた数しか報告されていない[7, 8]。Nakamura et al. (2008) [7] では、コンドリュール起源と考えられる T35(Trajiro)粒子中にクロマイトが確認されている。しかし、T35 に含まれるクロマイトは Al₂O₃ を 28.5 wt.%含んでいるのに対し、本研究でみつけたクロマイトには、Al は殆ど含まれておらず、T35 と T112 中のクロマイトは、異なる経緯を経て形成されたと考えられる。T112 は、その粒子中のかんらん石の酸素同位体組成結果[9]から、AOA や unique chondrule [10]との関連性が指摘されており、凝縮起源の可能性も考えられる。今後、T112 粒子の起源についてさらなる研究を進める予定である。

参考文献 [1] Brownlee D.E. et al. (2006) *Science* 314:1711-1716. [2] Zolensky M. et al. (2006) *Science* 314:1735-1739 [3] Ohsumi K. et al. (2008) *The 39th Lunar & Planet. Sci. Conf.* #1808. [4] Ebel and Grossman. 2000. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64: 339-366. [5] Boesenberg J. S. and Ebel D. S. (2009) *The 40th Lunar & Planet. Sci. Conf.* #2125. [6] Grossman J. N. and Brearley A. (2005) *Meteoritics. & Plant. Sci.* 40: 87-122. [7] Nakamura T. et al. 2008. *Science* 321:1664-1667. [8] Nakamura-Messenger K. (2011) *Meteoritics. & Plant. Sci.* 46: 1033-1051. [9] Messenger S. et al. (2008) *Meteoritics. & Plant. Sci. Supp.* 43: 5308. [10] Kobayashi S. et al. (2003) *Geochemical Journal.* 37: 663-669.

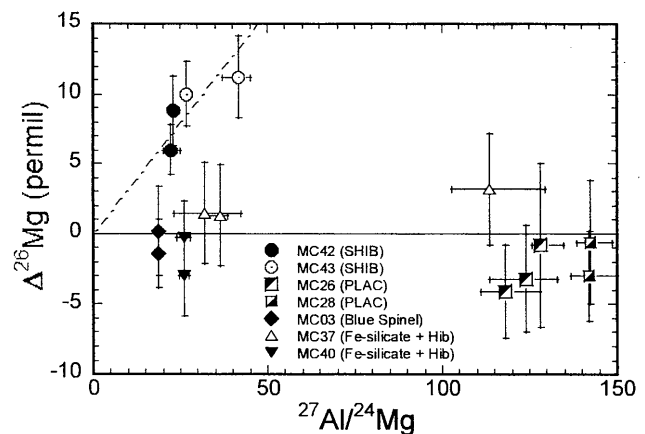
マーチソン(CM2)隕石から抽出したヒボナイト包有物の NanoSIMS による Al-Mg 同位体分析

○佐々木翔吾¹, 比屋根肇¹, 藤谷渉¹, 高畑直人², 佐野有司²

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 東京大学大気海洋研究所

CM コンドライト中に含まれるヒボナイト包有物は、形態学的に SHIBs (スピネル - ヒボナイト包有物; Spinel-HIBonite spherules)、PLACs (ヒボナイト板状結晶; PLATy-Crystals)、BAGs (ヒボナイト青色凝集物; Blue Aggregates) などに分類され(Ireland, 1988)、初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比について、SHIBs はカノニカルに近い値 ($\sim 4.5 \times 10^{-5}$)、PLACs と BAGs はほぼゼロであることが知られている (Liu et al., 2009)。PLACs には Ca, Ti に同位体異常が見られることから、原始太陽系における同位体組成均一化以前、むしろ ^{26}Al が原始太陽系星雲に持ち込まれる前に形成された可能性が指摘されている。本研究では、ヒボナイト粒子の起源と初期太陽系における ^{26}Al の分布、同位体均一化のプロセスについて調べるため、マーチソン隕石からヒボナイトを含む粒子を抽出 (凍結融解法による隕石の粉碎、磁性粒子の除去、重液分離、実体顕微鏡下でのハンドピック) し、東京大学大気海洋研究所の NanoSIMS を用いて詳細な Al-Mg 同位体分析をおこなった。

現時点での Preliminary な結果を図 1 に示す。先行研究と同じく、粒子の形態学的特徴と同位体的特徴には著しい相関があり、粒子は大きくふたつのグループに分かれる。ひとつは SHIBs (#42, #43) で、ほぼカノニカルな $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 初生比を示す (アイソクロンが原点を通ると仮定した場合 $(4.3 \pm 0.6) \times 10^{-5}$)。もう一つは、#26 と #28 (PLACs)、#37 と #40 (鉄に富むシリケート中にヒボナイト・スピネル粒子が埋まった組織を持つ)、および #3 (青いスピネル (blue spinel) と呼ばれるヒボナイトとスピネルが混在した粒子) である。これらは $\Delta^{26}\text{Mg}$ (=過剰 ^{26}Mg) がほとんどゼロか、わずかに負 (-3‰ ~ -4‰) の値を示す (PLACs)。また、#37 と #40 は $a50 \text{‰/apu}$ 、#3 は $a17 \text{‰/apu}$ と、非常に大きな質量依存同位体分別を示し、FUN 包有物との類似性も示唆される。本発表では、これらの分析データをもとに、ヒボナイト粒子の起源等について考察する。



【図 1】 マーチソン隕石から抽出したヒボナイト包有物の ^{26}Al - ^{26}Mg アイソクロン図 (preliminary results)。

月 South Pole-Aitken 盆地の地形・鉱物分布からみる地質構造

○上本季更 1, 6、大竹真紀子 1、春山純一 1、山本聡 2、松永恒雄 2、中村良介 3、横田康弘 2、諸田智克 4、小林進悟 5、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. 産業技術総合研究所、4. 国立天文台、5. 放射線医学総合研究所、6. 東京大学

背景

月裏側にある South Pole-Aitken 盆地 (SPA 盆地) は、巨大隕石衝突により形成され、その内側では月内部物質であるマントル物質が露出していると考えられており、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、マフィック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、最近の研究では、Pieters et al. (2001) [2] と Ohtake et al. (2009) [3] が、盆地の衝突の中心から比較的近い場所に地殻物質である斜長岩が存在すると報告している。更に Ishihara et al. (2009) [4] では、SPA 盆地の中心でも 20~30km の地殻が存在すると推測している。この盆地中心付近の斜長岩は、impact melt から再分化した可能性の他に、地殻が剥ぎ取られることなく残存したという可能性も考えられ、衝突の中心付近では地殻はすべて剥ぎ取られたとされていたこれまでの研究結果に対して検証が必要である。本研究では SPA 盆地内部の鉱物学的な分布を解析し、巨大隕石衝突によって地殻が剥ぎ取られた領域を推定し、盆地の地質構造を推測することを目的とした。

手法

本研究では、研究手段として月周回衛星「かぐや」搭載のマルチバンドイメージャ (MI) による可視近赤外分光観測データを用い、SPA 盆地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。解析した地域は、SPA 盆地ほぼ全域である。また、地形情報は先行研究の Hiesinger et al. (2004) [5] の結果を基に、鉱物データと同じく「かぐや」搭載の LALT データから標高図を作成した。

本研究で着目した地殻物質である斜長岩の同定方法は、波長 1250nm に特徴的なスペクトルの吸収をもつという斜長石の特徴を利用し、波長 1050nm 地点と 1550nm 地点の反射スペクトルを直線で結んだ時、波長 1250nm 地点でスペクトルがその直線よりも深く吸収がみられるものを斜長岩とした。

結果

盆地内 20 箇所で斜長岩がみられた。また、地形情報では、盆地内に 4 つのリング構造（以下、外側から 1, 2, 3, 4 とリング構造に名前をつける）が確認された。この結果と鉱物分布結果を照らし合わせたところ、みられた斜長岩のうち 16 箇所が外側のリング 1 と 2 の間に存在し、またリング 3 と 4 の間に 4 箇所の斜長岩が存在するという特徴がみられた。最も内側のリング 4 の内部には、斜長岩はみられなかった。また、SPA 盆地全域に対して反射スペクトル解析をし鉱物分布の推定した結果、リング 2 の外側は比較的斜長石に富む物質が存在し、リング 2 とリング 4 の間には様々な種類の鉱物に富む岩石が存在し、最も内側のリング 4 の内部は、マフィックな鉱物に富む岩石が一様に存在するという特徴がみられた。

考察

リング 2 の外側において斜長岩が多く分布し、鉱物分布が地形情報ともよく合致することから、このリング 2 の内側が隕石衝突により崩れた領域であると推測でき、このリングを excavation cavity と推定できる。また、リング 2 より内側においてみつかった 4 箇所の斜長岩については、その存在要因として、地殻物質が衝突の掘削により剥ぎ取られず残っている可能性や、盆地形成時における impact melt pool から分化した可能性が挙げられる。これまでの多重リング盆地のモデルでは、最も内側のリングの内部が impact melt pool であると推測されていることから、リング 4 の内側の領域が impact melt pool であるとする、これら 4 箇所の斜長岩はリング 4 の外側にあるので、impact melt pool 由来ではないと推測でき、これら 4 箇所の斜長岩は残存した地殻物質である可能性が高い。また、MI による SPA 内部全域の鉱物分布と地形情報から得られた 4 つのリング構造により対応関係がみつかった。本研究により SPA 盆地の鉱物学的特性と地形的特性を関連づけることができたといえる。

- [1] Spudis et al., (1994) Science, 266, 1848-1851
- [2] C. M. Pieters et al., (2001) JGR, vol. 106, No. E11D
- [3] Ohtake et al., (2009) Nature 461 (7261) :236-40
- [4] Ishihara et al., (2009) GRL, 36, L1920
- [5] Hiesinger et al., (2004) LPSC, 35th, #1164

月面観測のための放熱制御装置 (サーマルルーバー) の熱真空評価

○坂谷 尚哉¹, 小川 和律^{1,2}, 飯島 祐一¹, 星野 健², 大嶽 久志², 田中 智¹

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²JAXA 月・惑星探査プログラムグループ

SELENE-2 計画では月面での月震計、磁力計、熱流量計、VLBI 電波源を用いた長期間の科学観測を検討している。月面の温度は昼夜で $-200 \sim 120^{\circ}\text{C}$ と大きく変化し、それぞれが 2 週間続くため、観測機器の熱設計が重要課題である。このため、我々は熱制御機構サバイバルモジュールの開発を進めている。図 1 にサバイバルモジュールの簡略図を示す。レゴリス地下数十 cm の温度は昼夜で安定しており、観測機器を多層断熱膜 (MLI) で山型に覆うことにより、地下の温度ポテンシャルを地表まで持ち上げ、モジュール内部の温度を安定させる。サバイバルモジュール内ではエレキ・観測機器の発熱があり、温度を動作温度内に保つためには昼は効率よく放熱し、夜は極力断熱する必要がある。

将来的に更に安定した温度環境で観測するための 1 つの試みが放熱制御装置 (サーマルルーバー) の搭載である。月面でサーマルルーバーを有効に使用するためには、ルーバーの開閉動作を温度によらず能動的に行うこと、機構部へのダスト侵入を防ぐことなどが求められる。本研究ではこのためのサーマルルーバーを検討・試作し、評価モデルの熱真空試験を実施して性能評価を行った。

サーマルルーバー評価モデルは放熱制御用のブレード、側面の構体、トップ・ボトムプレート、ブレード駆動部から成る。熱放射率の低いブレードの開閉により、サーマルルーバーの実効放射率をコントロールする。ブレードの動力源には真空環境でも動作し、磁性を持たず、十分なトルクと高い保持力を有する超音波モーターを採用した。月面浮遊ダストの侵入を防ぎ、同時に太陽光の内部への直射を防ぐため、ルーバー上面はトッププレートで保護する形を採った。

ルーバー動作確認試験

真空低温環境でのブレード開閉の動作確認を行った。低温ではルーバーの開閉速度が変化した、これは超音波モーターの回転速度に温度依存性があるためである。

熱性能確認試験

ボトムプレートにヒータを取り付け、真空環境でブレードを開閉させてルーバー評価モデルの熱性能を評価した。評価モデル各部の温度変化の測定結果と、事前に作成した同コンフィグレーションの熱数学モデルの計算結果を比較することによって、ルーバー開閉時の実効放射率を推定した。その結果、ブレード開閉時のトップ・ボトムプレート間の実効放射率がそれぞれ 0.6, 0.2 程度であり、有効な熱制御が可能であることを実証できた。

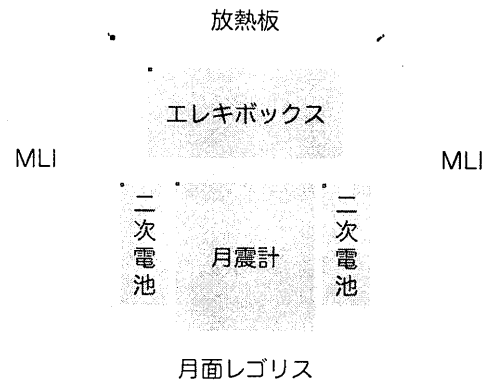


図 1: サバイバルモジュールの簡略図

レーダーサウンダと地形カメラの観測に基づく衝突クレーター周辺における月表層の誘電率分布の推定

○石山 謙¹ 熊本 篤志¹ 小野 高幸¹ 寺田 直樹¹ 加藤 雄人¹
山口 靖² 押上 祥子²

¹東北大学 ²名古屋大学

かぐや衛星に搭載された Lunar Radar Sounder (LRS) は、地下数 100m の深さにおいて誘電率が異なる境界面からの電磁波の反射を検出することに成功した [Ono et al., 2009]。LRS 観測データから得られる月表層における地層（海では溶岩流）の見かけの厚さは、月の火山活動の履歴を議論する上で重要な情報と成り得る。しかしながら、地下を伝搬する電磁波は媒質の誘電率に応じて光速より遅い速度で伝搬するため、LRS から地層の実際の厚さを同定するには、その誘電率を知る必要がある。月の岩石・レゴリスの比誘電率は、Olhoeft et al. [1975] によってまとめられたが、それらは月表面上のサンプルに基づくものであるため、その比誘電率がごく表面に留まるのか、表層のある程度の深さまで及ぶのかは必ずしも明らかではなく、無条件に表層の岩相全体を代表する誘電率として適切な値と見なすことはできない。

本研究では、かぐや衛星搭載の LRS および Terrain Camera (TC; Haruyama et al., 2006) の観測データを利用し、雨の海、危難の海および嵐の大洋における地下数 100m までの誘電率推定を目的とする。月表層には、柔らかい地層 (weak layer) と堅い地層 (strong layer) が存在し、底が平らなクレーターは地下に堅い地層があるために形成されたと考えられている [e. g. Melosh, 1989]。解析では、weak layer と strong layer の境界で電磁波の反射が起ると仮定し、最上層のレーダでの見かけの厚さ D とクレーターから同定される実際の厚さ T の比較から、比誘電率 ϵ_r の計算を試みた。結果として、本研究で解析された領域においては、比誘電率は 4 程度以下となった。また、各溶岩流 unit の比誘電率と表面組成 ($\text{FeO} + \text{TiO}_2$ [wt%]) の対比を行い、その結果がアポロサンプルから決定された経験式ともよく一致することを確認した。

講演では、上記の解析結果に加え、月震データからの解析手法の有効性、比誘電率と表面年代との関連性について検討結果を報告する。

ライナーガンマ領域の電波減衰特性：かぐや月レーダーサウンダーの例

○坂東雄一¹； 熊本篤志²； 中村教博¹； 長濱裕幸¹

1: 東北大学大学院 理学研究科 地学専攻

2: 東北大学大学院 理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター

月にはグローバルな磁場はないものの、局所的に磁場強度が著しく高い領域があることが知られている [Richmond and Hood, 2008]。この磁気異常の原因については、(1) 古代のコアダイナモに由来するとする説 [Garrick-Bethell et al., 2009; Wieczorek and Weiss, 2010; Hood, 2010]や、(2) 隕石が衝突した際に周囲の磁場を増幅させることによって過渡的な磁場が発生したとする説 [Hood and Vickery, 1984; Hood and Huang, 1991; Crawford and Schultz, 1999; Hood and Artemieva, 2008]、(3) 主要な衝突盆地の対蹠点に磁場が集中したとする説 [Lin et al., 1988; Hood et al., 2001; Richmond et al., 2005; Mitchell et al., 2008]、(4) 比較的最近になって彗星の核が月に衝突した際に、月の表面に残留磁気を押し付けたとする説 [Schultz and Srnka, 1980]など様々な説が提案されている。

この様な磁気異常領域は、月の表面にいくつか見られる渦状の高いアルベド値を持つ領域と関連があるとされており、渦状構造を持つ領域は例外なく磁場強度が高いことがわかっている [Blewett et al., 2011]。渦の形成仮説としては、(1) 彗星の核、断片、流星群の衝突によってレゴリスが擾乱されたとする説 [Schultz and Srnka, 1980; Pinet et al., 2000; Starukhina and Shkuratov, 2004]や、(2) 磁場があることによって特殊な宇宙風化が起こり、表層部を太陽風などから保護したとする説 [Hood and Schubert, 1980; Hood and Williams, 1989]、(3) 太陽風と磁気異常の相互関係によって生じた電場によって空中浮揚したダスト粒子に引力と斥力が働き、長石に富む細かいダストが選択的に堆積したとする説 [Garrick-Bethell et al., 2010]や、(4) 火砕流によって生じた熱雲堆積物 [McCauley, 1967]、月内部からの物質 [Whitaker, 1969; El-Baz, 1972; Schultz, 1976]が渦を形成したとする説もある。

今回我々は、かぐや搭載の月レーダーサウンダーのデータを用いて、磁気異常があることがわかっているライナーガンマ、モスクワの海、グラスモヴィッチ、賢者の海、デカルト、アーベルのそれぞれの地下構造を調べたところ、深さ 5km の範囲内において地下エコーは見いだされなかった。但し Pommerol et al. (2010)で指摘されているように、イルメナイト鉱物の存在によって電波が減衰されてしまうことによって、仮に地下反射層が存在していても地下エコーが検出されない可能性は考慮しなければならない。そこで各磁気異常領域の表層部の分光観測から求められた FeO と TiO₂ の量から、地下エコーの減衰量を見積もった。その結果、これらの領域において地下エコーの減衰量は十分に小さく、減衰のためではなく、実際に地下反射層がないために地下エコーが検出されなかったことが判明した。各磁気異常領域の地下には層状構造や火成活動の痕跡が見られないという観測事実は、熱雲堆積物や、月内部からの物質が渦を形成したとする説とは整合しない。

月表面地形・表層構造を考慮した 月の地震波伝播モデリング

○岡元太郎¹, 小林直樹², 竹中博士³, セレーネ 2 月広帯域地震計チーム

¹東京工業大学, ²ISAS/JAXA, ³九州大学

地震波を用いた探査は地球や惑星の内部構造を探るうえで基本的かつ重要な手法である。月においてはアポロ計画によって地震計による観測が 8 年間にわたって実施され、人工インパクト・隕石インパクト・浅発月震・深発月震からなる多くのイベントが観測された。これらの観測データから地震波の到着時刻 (travel time 走時) を読み取り、月の地震学的な構造が推定されている (Nakamura, *JGR* 1980)。

アポロ計画によって明らかになった月における地震波伝播の大きな特徴は、地球におけるよりもはるかに強く長い「コーダ」波形、すなわち紡錘形状のエンベロープを持ち、数十分近く続く後続波形が現れることである。これは、月表層付近の強い不均質性やクレーター等の不規則地形の効果によって地震波が強く散乱されるためであると考えられており、このコーダ波形の特徴から月表面付近の散乱特性が推定されている (例えば Dainty and Toksoz, *PEPI* 1981)。しかしこのような強いコーダ波形は、月内部の不連続面で変換あるいは反射されたフェーズをマスクしてしまうため、地球では強力な手法として用いられている変換波や反射波の波形を用いた内部構造探査が、アポロ月震データでは困難になっている。

アポロ計画では観測機器の特性のために比較的短周期側 (約 2 秒以下) の観測が中心であった。一方、一般に地震波探査では長周期側になるほど微細な不均質性の影響は小さくなり、大きな構造による影響が抽出できるようになる。そのため将来の月探査では、アポロ計画よりも長周期側を測定する広帯域地震計の搭載も提案されている。そこで本発表では、不規則地形や内部不均質性による散乱の効果がどの程度に広帯域 (あるいは長周期) 波形に影響を及ぼすかを、時間領域の差分法を用いた地震波伝播シミュレーションによって考察する。

まず不規則地形の影響を見るために、「かぐや」のレーザー高度計データ (出典: 宇宙航空研究開発機構) からティコ周辺の地形を抽出し、Nakamura (1980) の構造を参考にして表層構造やモホ面を設定して、深発月震からの地震波応答の計算を進めている。この計算には、時間領域の差分法計算を複数の GPU (Graphics Processing Unit) によって高速化するプログラム (Okamoto et al., *EPS* 2010) を用いる。計算には東工大の TSUBAME スーパーコンピュータを利用する。126 基の GPU を利用してクレーター地形への SV 波入射をシミュレートした予備的な計算結果によると、周期 10 秒程度の波形で、クレーター中央丘付近での「観測波形」に、地形による散乱波と思われる波形がある程度混入していることが観察された。発表ではこのような散乱性構造による波形への影響を系統的に考察し紹介する。

ヘブラス・バレスとヘファエスタス・フォッサの体積計算 Volume Estimates of Depressions Around Hebrus Valles and Hephaestus Fossae

○佐藤丈仁¹, 宮本英昭^{1,2}, Alexis Rodriguez²

¹ 東京大学総合研究博物館, ² Planetary Science Institute

火星の表層には水が関与して形成されたと考えられる地形が数多く観測されており、主にヘスperia代に形成されたと考えられるアウトフローチャネルと呼ばれる地形もその一つである。アウトフローチャネルの形成要因として多くの説が提唱されている。突発的な大洪水 (Baker and Milton, 1974; Baker, 1982) や氷河による浸食 (Lucchitta, 1982)、溶岩流による浸食 (Leverington, 2004)、土石流による物質移動 (Tanaka, 1999) などがその例であるが、中でも、局所的に永久凍土層が融解して、大量の水が地上に湧き出して形成されるという説が現在有力視されている。アウトフローチャネルには大量の物質が流れ地表を削ったはずであるが、現在のアウトフローチャネルの下流域にそれらの物質が堆積した証拠はほとんど観測されず (Carr, 2006)、未だにその行方は謎となっている。したがって、アウトフローチャネルの形成を考察する際にアウトフローチャネルの体積を厳密に見積もることが重要になってくる。

我々はアウトフローチャネルのように複雑な陥没地形の体積を見積もる手法を開発した。本研究では形成についてあまり知られていないヘブラス・バレスとヘファエスタス・フォッサ (図1) にその手法を適用した。まず THEMIS IR データ画像を用いてヘブラス・バレスとヘファエスタス・フォッサをマッピングした。次に MOLA topography データを用いて陥没地形の標高と陥没地形周辺の標高を求めその差を計算することにより陥没の深さを計算した。その深さをマッピングした領域の面積と掛けることで体積を求めた。このように機械的に体積を求めることにより主観的要素を排除した。

体積計算の結果から地形的特徴を検討したところ、ヘブラス・バレスとヘファエスタス・フォッサでは異なる地形的特徴を持つことを明らかにした。この特徴の違いからヘブラス・バレスとヘファエスタス・フォッサでは異なる形成過程を持つことが示唆される。

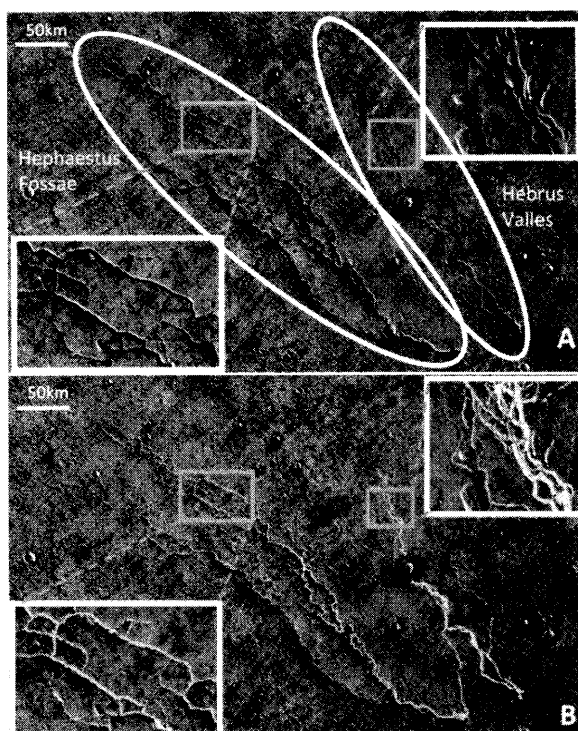


図1 (A) ヘブラス・バレスとヘファエスタス・フォッサ。複雑な陥没地形が見られる。(B) マッピング後の同地域。

電気通信大学における木星火球の観測

○亀井亮祐, 柳澤正久 電気通信大学大学院情報理工学研究科

1. 木星火球

月や木星に小天体が衝突した際に発光を生じることがある。大気が希薄である月において発光は一瞬の閃光として生じ、大気が十分に存在する木星においては地球上での流星現象と類似した発光が生じると考えられている。地上から観測できる程度の木星衝突の発光は、小天体の直径が数 m～数 km にも及び、それらが地球に衝突した際には火球と呼べる程の発光を生じることから、木星においても相当量の発光が生じているものと考えられる。

2. 観測

木星における天体の衝突現象は、1994 年のシューメーカー・レビー第 9 彗星の木星衝突を機にその理解が進み、近年日本を含む多くのアマチュア天文家によりその観測が報告され注目を集めている。今後、観測・撮影システムの確立によって多くの木星火球の観測データを得ることにより、巨大惑星領域における数 m～数十 m の小天体のサイズ分布の解明が期待されている。本研究においても、総合研究棟屋上のドーム内で望遠鏡（図 1）による木星の観測・録画を予定している。

3. リアルタイム発光検出プログラムの作製

2011 年、木星は 6 月から翌年 4 月まで夜中観測が可能である。また、9 月から 12 月下旬までは一晩中観測可能となり、実際に観測・録画をする場合そのデータ量は膨大なものとなる。そこで、そのデータをいかに扱うかが本研究のネックとなる。現在、木星火球の観測にむけ、

1. 木星面のような明るい面光源上の発光を正確に検出する

2. 観測と同時進行で発光を検出する

3. 発光を観測したときのみ、発光をトリガーに前後数秒のデータを保存する

という機能を有した発光検出プログラムの作製を行っている。これを使用すれば、観測と同時に発光検出のデータ処理を行うことができ、木星火球の観測システム確立に大いに役立つこととなる。

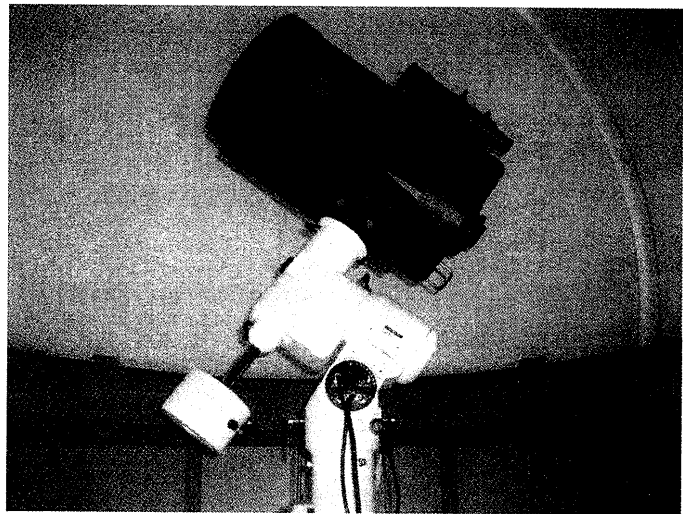


図 1. 本研究で木星観測に使用する予定の望遠鏡。セレストロン社製、C-11、口径 280mm、焦点距離 2800mm.

土星系中型質量衛星における多様性の起源： SPH 流体コードを用いたジャイアントインパクトのシミュレーション

○藤田 航¹、玄田 英典¹、関根 康人²、杉田 精司²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

土星の中型質量衛星は、密度や活動度などの点で多様性に富んでいる。例えば、Tethys は岩石の質量分率が約 6% と非常に低く純粋な氷に近い天体であるが、その両隣の Enceladus と Dione はそれぞれ約 57%、約 50% と高く岩石物質に富んでいる。さらにその両隣の Mimas と Rhea はそれぞれ約 26%、約 33% となっており、近い軌道・同程度のサイズにも関わらず密度にばらつきが見られる。このような多様性は、一般的な最小質量円盤モデルによる衛星系の形成ではうまく説明することが出来ず、長年の謎であった。

近年、Canup (2010) は、土星のロッシュ半径内に氷衛星が落ち込むことによってその表層の氷が剥がされて散らばり、Tethys が形成されたと主張している。しかしながら、Enceladus や Dione など岩石に富んだ衛星がどのようにして出来たかについては言及されていない。

また、Sekine & Genda (2011) は、Canup (2010) でも用いられた原始ガス惑星系円盤モデルである gas-starved モデル (Canup & Ward, 2006) に立脚し、衛星系形成の最終段階において起こりうる巨大氷衛星同士のジャイアントインパクトによって、この多様性を説明しようと試みた。gas-starved モデルによると、原始土星系円盤では衛星はタイタン程度の大きさまでは成長できるが、それ以上大きくなると円盤ガスのガス抵抗により土星に落下してしまう [3]。Sekine & Genda (2011) は、落下途中のタイタンサイズの氷衛星が、内側軌道を公転する衛星と衝突すると考えた。そして、SPH 流体コードを用いた数パターンのシミュレーションを行い、巨大氷衛星同士の衝突によって様々な密度を持つ破片が生じることを示し、それらが中型質量衛星の形成につながった可能性があるとの仮説を提唱した。しかしながら、彼らの計算は限られた衝突条件でしか行われておらず、上記のような仮説が確率的にどのくらい妥当であるかを系統的に調べた例はない。

本研究では、その妥当性を検証するために、軌道移動しているタイタンサイズの巨大氷衛星が内側の氷衛星に衝突するという想定のもと、SPH 流体コードを用いた巨大衝突のシミュレーションを行った。その際に、衝突速度や衝突角度、また Sekine & Genda (2011) では調べられていなかった 2 つの氷衛星の質量比といったパラメータをより広く変化させ、破片の飛散の様子やその密度分布を系統的に調べた。そして、その結果を用い、土星中型衛星の起源や活動度の違いに関して議論する。

参考文献：

- [1] R. M. Canup, Origin of Saturn's rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite. *Nat.* (2010). Doi: 10.1038/nature09661
- [2] Sekine, Y., Genda, H., Giant impacts in the Saturnian system: A possible origin of diversity in the inner mid-sized satellites. *Planet. Space Sci.* (2011), doi:10.1016/j.pss.2011.05.015
- [3] R. M. Canup, W. R. Ward, A common mass scaling for satellite systems of gaseous planets. *Nat.* (2006). Doi: 10.1038/nature04860

はやぶさ 2 近赤外分光計の開発現状

○ 北里宏平¹, 安部正真², 高木靖彦³, 松浦周二², 津村耕司², 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

はやぶさ 2 の探査対象天体である C 型小惑星は、主にメインベルト外域に分布しており、炭素質コンドライトの母天体と考えられている。炭素質コンドライトは含水鉱物を主とする鉱物組成や同位体組成の違いによって CI, CM, CR, CV などのサブグループに分けられ、また C 型小惑星も紫外—可視—近赤外の分光観測から物性の異なるサブグループに分けられることが知られている。太陽系の始原物質である炭素質コンドライトにみられる物質科学的な多様性の特徴は、太陽系形成初期に広域的かつ不均質な変成作用が起きたことを示しており、そのイベントがいつ・どこで・どのように起きたのかを明らかにすることが太陽系の物質進化及び物質輸送を理解する上で重要である。そのためには C 型小惑星と炭素質コンドライトのサブグループレベルの対応関係を明らかにすることが求められるが、C 型小惑星には、(1) 反射スペクトルに明瞭な吸収がみられにくい、(2) 水・含水鉱物の明瞭な吸収が存在する 3 ミクロン帯のデータが少ない、(3) 3 ミクロン帯のデータが点光源に限られる、などの難点があることから、両者間の対応関係は現時点で明らかでない。そこで、はやぶさ 2 では、探査機による近接観測から C 型小惑星の空間分解した 3 ミクロン帯の反射スペクトルデータを取得することを目的とした近赤外分光計の開発を進めている。本発表では、はやぶさ 2 近赤外分光計の開発現状、特に基本設計の検討や要素試験の結果について報告する。

はやぶさ 2 サンプルの微量揮発性元素分析に向けた キャッチャコンテナ内ガス回収システムの開発

○三浦弥生¹、岡崎隆司²、長尾敬介³、橘省吾⁴、澤田弘崇⁵、
はやぶさ 2 サンプリングチーム（¹東大・地震研、²九大・理、
³東大・理・地殻化学、⁴東大・理・地惑、⁵JAXA-ISAS）

はやぶさ 2 は C 型小惑星からのサンプルリターンを目標としたミッションである。はやぶさ で持ち帰られた S 型小惑星 (Itokawa) のサンプルに比べて、揮発性元素に富み、その化学組成・同位体組成は太陽系物質の起源と進化の解明に重要な情報を持つと期待される。小惑星上で採取されたサンプルはキャッチャコンテナ内に密閉され地球に帰還予定であるが、揮発性元素の一部は固体試料から遊離してガス相として存在する可能性が考えられる。そこで、コンテナ内のガスを地球大気に汚染されることなく回収し希ガスや軽元素分析を行えるシステムの開発を進めている。これが確立されれば、採取されたサンプル本来の揮発性物質組成や熱履歴の復元を可能とするとともに、はやぶさ 回収試料キュレーション時に行われたコンテナ内圧推定のための複雑な作業手順を簡略化できる。本講演では、ガス回収システムの概要と基礎実験の結果・考察について発表する。

【ガス回収システムの概要】

小惑星から回収されたサンプルはコンテナ内にあるキャッチャーに納められる（右図参照）。コンテナ底板中央部に板厚の薄い部分（直径 5 mm、板厚 1 mm 程度）を作成しておき、ガス回収時には直線導入機先端に取り付けた金属ニードルで薄板部分に穴をあける。直線導入機は、ガス採取タンク、真空ゲージ、真空ポンプ等を備える真空ラインと接続されており、真空フランジを介してコンテナ底部に取り付ける。また、コンテナ内の固体試料が真空ライン側に流出することを防止するため薄板部分には焼結 SUS 製フィルターを設置する。

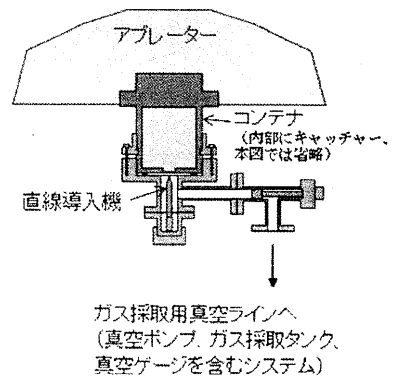


図. ガス回収システム概略図

【基礎実験の結果・考察】

基礎実験 1. タングステンカーバイドニードルで厚さ 1mm の純 Al 板および A6061 板に油圧プレスを用いて穴を開け、その時の力を測定した。純 Al 板では～60N、A6061 板では～80N であった。

基礎実験 2. 真空フランジを接続するための形状として 2 案（「錨型」および「花びら型」）を考えた。それぞれについて模擬品を作成し、真空下での穴開け実験を行った。その結果、どちらの形状でもコンテナの変形や真空リークすることなく穴開けを行うことが可能であった。

基礎実験 3. 市販フィルター（Swagelok 社製、公称ポア径 0.5-2 ミクロン）を用いて目詰まり試験を行った。粒径 #150（63-75 ミクロン）および #400（28-32 ミクロン）のカーボランダム 50mg 程度をフィルターに載せてフィルター越しに真空排気や大気圧解放を行ってみたが、フィルターの目詰まり等の問題は生じなかった。

考察. 実験結果と他からの制約をもとに、コンテナには「錨型」フランジを採用することを提案する。錨の形状や接続するフランジの詳細設計を現在進めている。真空シールにはメタル O リング（SUS 材に Al 被覆）を、フィルターには上述の SUS 製フィルターを使用する。

はやぶさ 2 サンプラーホーンを用いた小惑星表面 試料採取に向けた基礎実験

○橘 省吾¹・澤田 弘崇²・橋岡 秀彬¹・小池 みずほ¹・森 愛美¹・森里 文哉¹・
中村 海¹・高木 智章¹・岡崎 隆司³・久好 圭治^{4,5}・春日丘高校定時制科学部・
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 ²宇宙航空研究開発機構

³九州大学理学府地球惑星科学専攻 ⁴大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

⁵大阪府立春日丘高等学校

小惑星探査計画「はやぶさ 2」では、C 型小惑星 1999JU3 表面試料のサンプルリターンをおこない、回収試料の分析を通じ、初期太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにすることを目的としている。回収試料の分析により、分子雲（もしくはそれ以前の銀河系内）や初期太陽系円盤での揮発性元素 CHON の進化、ならびに微惑星内での水存在下での有機物進化を明らかにし、太陽系最初期からの地球・海・生命材料物質の進化を解明することをめざす。ミッションの科学目標の達成には、確実なサンプリングが必須となる。「はやぶさ 2」計画では、「はやぶさ」に搭載された弾丸撃ち込みによる試料採取が予定されているが、バックアップのサンプリング手法として、サンプラーホーン先端に折り返し部を設けておき、タッチダウン時に表面試料を折り返し部に引っかけてサンプリングすることも計画している。これにより、万一弾丸射出がおこなわれなくても、タッチダウンが達成されれば、試料回収が可能となる。折り返し部の形状の最適化をおこなうために、先端折り返し部の要素モデルを作成し、以下の基礎実験をおこなっている：

1. ポリタングステン酸ナトリウム重液中での珪砂粒子サンプリング実験
2. 二重カプセルを用いた室内微小重力実験による折り返し部貫入実験
3. 落下塔を用いた微小重力下サンプリング実験

実験 1 において、様々な折り返し部形状を試験した結果、「折り返し部がある程度埋まる」「粒子が折り返し部に入りやすい」かつ「粒子を保持する」必要があることから、折り返し部は地表面から浅めの角度をもつこと、折り返し部には隙間が存在すること、折り返し部の長さは必要粒子サイズの数倍程度が適当であることがわかった。また、現在実施中の実験 2,3 から、予察的に微小重力下では表面レゴリス層に折り返し部が充分深く貫入しうることが明らかとなった。講演では、各基礎実験の概要およびそれらから導かれる折り返し部の最適形状に関して、議論する。

「はやぶさ 2」搭載小型ランダー-MASCOT

Mobile Asteroid Surface Scout (MASCOT): A Mini Lander on Hayabusa-2

○岡田達明¹, 矢野創¹, 津田雄一¹, 久保田孝¹, 吉光徹雄¹, Tra-Mi Ho², Lars Witte²,
Stephan Ulamec², Hans-Joerg Dittus², Tilman Spohn², Jean-Pierre Bibring³,
Pierre Bousquet⁴, はやぶさ 2 着陸探査サブチーム¹

¹JAXA, ²DLR, ³IAS, ⁴CNES

次期小惑星探査「はやぶさ 2」に小型ランダー-MASCOT(=Mobile Asteroid Surface Scout)を搭載し、小惑星表面の直接その場観測を行う計画を進めている。表層の科学観測、サンプルリターンの表層記載やリモセンの Groundtruth として重要である。MASCOT はドイツ宇宙科学研究センタ (DLR) を中心にし、フランス宇宙機関 (CNES) と連携のもとに主に独仏の研究機関と日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が協力体制のもとで開発を進めている。

MASCOT は総重量 10kg で、内訳は着陸機が約 8kg、母船側に残る固定・分離機構や通信アンテナが約 2kg の小型着陸探査機である。高度約 100m で小惑星表面とほぼ静止 (相対速度 5cm/s 以内) した状態で母船から分離し、自由落下により小惑星表面に着陸する。着陸後は内部に回転機構があり、姿勢の起き上がりや、ホップによる最長数 10m の水平移動が可能である。電源は SAFT LSH-20 (リチウム電池) による 1 次電源であり、211Wh の供給が可能で、16 時間以上 (小惑星 1 自転は 7.6 時間) の運用を行う。

分離後の運用では、高度 10~20km にいる母船とは MINERVA-II と共用の UHF 通信機を用いて通信を行い、32Kbps のテレメトリ・レートでデータを取得できる。合計データ量として約 700Mbit は確保する見込みである。

搭載観測機器は開発実現性と科学成果を考慮して、以下のものが選抜される予定である。

- 1) 広角カメラ (CAM) : 周辺地形および地質構造の観察。ROSETTA 搭載カメラと同型で、視野角 75°, 画素 1024×1024。4 波長の LED 光源により夜間に多色撮像観測が可能である。
- 2) 分光顕微カメラ (MicroOmega) : 表面の鉱物組成、特に水質変成・水和物をミクロに観察する。AOTF による可変式連続分光光源で 0.9~3.1 μm をカバーする。解像度は 20 μm 程度、視野は 5mm 角程度を観察できる。Fobos-Grunt 搭載と同型を想定している。
- 3) 熱放射計 (MARA) : 小惑星表面からの熱放射を夜側含めて観測し、表層熱物性を得る小型熱放射計で、CAM と視野方向が重なる。母船搭載の TIR と共同観測を行うことができる。
- 4) 磁力計 (MAG) : 小惑星全体の磁化を計測する。MASCOT 分離後の降下時や、位置変更のためのホップ中に磁場観測を行う。

そのほか、運用に用いる温度計、加速度計、傾斜計、電位差計などの表層観測への利用も検討している。

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

○ 三谷 烈史¹、小林 進悟²、唐牛 譲¹、長谷部 信行³、GNS チーム

1: 宇宙航空研究開発機構 2: 放射線医学総合研究所 3: 早稲田大学

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

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

GNS は表面移動探査機 (ローバ) に搭載し常に測定モードを保つことを想定している。ローバで移動しながら着陸点周辺のレゴリスを数メートルの空間分解能で計測し、元素組成を決める。検出器には、ガンマ線センサとして LaBr₃ 結晶、熱・熱外中性子検出器として中性子コンバータと Si 半導体、を用いることを検討している。LaBr₃ 検出器は、*Kaguya*-GRS で使用した Ge 半導体検出器には及ばないものの、Apollo, Lunar Prospector, Chang'E-1 に搭載されたガンマ線分光計よりも優れたエネルギー分解能を有し、元素弁別能力や最小検出感度が高い。さらに LaBr₃ は、Ge 検出器よりも小型軽量・低消費電力で温度・放射線・振動環境に対する強い耐性という点で優れている。

我々は、月面の厳しい温度環境下において元素の定量精度を得られることを実証するために、できる限り衛星搭載に近い状態を模擬し、温度試験を進めている。本発表では、サイエンス目標、目標感度について整理し、こうした検出器の開発状況、技術的な実現性の見通しについて報告する。

SELENE-2 の着陸地点推薦

○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⁴、
小林直樹⁴、春山純一⁴、杉原孝充⁵、本田親寿⁶、佐藤広幸⁷

¹大阪大学、²千葉工業大学、³国立天文台、⁴宇宙航空研究開発機構、
⁵海洋研究開発機構、⁶会津大学、⁷アリゾナ州立大学

日本の次期月着陸探査計画 SELENE-2 が、2010 年台半ばの打ち上げを目指して宇宙航空研究開発機構において計画されている。目的は、(1) 着陸・移動・長期滞在技術の開発と実証、(2) 月の科学探査と月の利用可能性調査、(3) 国際貢献と国際的地位の確保、の三点である。月の表側、中・低緯度地域への着陸をめざしており、着陸機、ローバー、周回衛星から構成される予定である[1]。2010 年 3 月に月着陸地点検討会議が SELENE-2 プリプロジェクトのサブチームとして発足した。本検討会議の役割は、月惑星科学における第一級の課題解決のため、SELENE-2 探査が目指す科学目標を明確に設定し、目標達成のためにはどこに着陸し、どのような戦略で観測を行うべきかについて議論・提案することである。2010 年 6 月に日本惑星科学会をはじめ、広く月科学に関心のある地球惑星科学関連の研究者に呼びかけ、21 グループから、35 件の科学テーマと約 70 箇所の着陸地点の提案が寄せられた。提出された提案を検討会議から選出されたコアメンバー（本稿の著者）で検討し、月科学の課題として「太陽系初期における月・地球系の形成過程の解明」および、「集積後の月の水平垂直構造の進化過程の解明」の二大テーマを設定した。そして、二大テーマのいずれかに多角的なアプローチが可能な着陸地点をコアメンバーで抽出した。これらの過程を経て、今日もっとも優先すべきサイエンスを実行するための、それぞれに特色のある複数の着陸候補地と探査計画案が絞り込まれた。主な着陸候補地点は、Copernicus、Mare Humorum、Marius Hills、Hansteen Alpha、Zucchius、縦穴、Reiner Gamma、Tycho、Apollo14、Ina、の 10 箇所である。SELENE-2 には、広範な分野の学会から提案が集まっているために、異なる分野の科学提案の意義をお互いに理解し、比較検討することには困難が伴う。そこで、メーリングリストを立ち上げ、着陸地点レビュー原稿等、資料を閲覧できるサーバーも準備し、検討会のメンバーが各着陸地点についての情報を共有し、議論できる仕組みを整備した。また、科学成果の達成の可否を厳しく相互に検証できるように、評価項目を準備し、検討参加者が評価投票をすることを目標に、自分の専門分野外の科学提案の議論にも積極的に参加する雰囲気づくりも行った。講演では、各地点の探査計画案と評価内容を紹介する。

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

次期月探査計画SELENE-2の検討状況(2)

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

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

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

1、宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2、惑星科学研究センター/北海道大学

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

月周回衛星「かぐや」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。現段階の検討ではH-IIA204型ロケットでの打ち上げを前提として着陸機(1100kgドライ)、ローバー(130kg)、そして周回機(700kg)で構成される。2010年代半ばの打ち上げを目指すべく2007年にプリプロジェクト(フェーズA)がスタートした。本講演では2010年度秋季講演会以降の主な進捗状況について報告する。

本プリプロジェクトは2010年度内にシステム要求審査(SRR)を実施する意向で準備を進めていたが、システム検討や搭載機器の開発、検討を進めた結果、ミッション定義の一部に修正が必要であると判断し、SRRIに代わってミッション定義修正審査(△MDR)を2010年10月に実施した。特に科学観測においては地質探査に限らず地球物理学的手法なども含め、広範囲な観測手段を対象とするように変更した。現在その定義の基でシステム要求審査に向けた準備を進めている段階である。

現段階におけるシステム検討の重要課題は、ミッションとして確実に達成すべき事項や搭載候補機器などからの要求事項に対して探査機の仕様や構成、電力リソースや熱設計などが成立するかどうかについて詳細に検討し、実現性が高いシステム要求をまとめることである。現状としては、主たる目的である「月着陸技術の実証」を行うためのシステムを成立させるために候補機器すべてを搭載することは困難であり、半減もしくはそれ以上の削減が必要とされている。

これを受けて搭載機器側では月環境下での運用実現性の確立にむけた開発に加え、小型軽量化への検討を重要課題として進めてきた。重量削減は性能、精度、運用期間等を低下させることになり、ミッションの価値を失いかねない。この点に十分配慮しつつ仕様変更、製造方法変更、熱設計、搭載コンフィギュレーションの見直しなどを進めた結果、分光カメラなどいくつかの機器については当初予定重量の半減を達成した。また、地質探査を強化する必要性から化学分析機器の候補を公募した。その結果3件の応募があり、X線分光(AXS)とレーザー誘起ブレイクダウン分光(LIBS)について搭載検討を本格的に開始した。いずれも主要元素存在度を数%~10%の精度で決定できることを目指している。

科学的な検討での大きな進捗は着陸地点候補の議論が進められた点である。2011年8月に全体会議が開催され、現在まとめの段階にあるが、これについては本講演会中の佐伯らによる詳細な発表を参照されたい。今後、着陸地点候補検討結果を反映して科学的に必須かつ技術的に搭載可能性の高い搭載機器候補を絞り込み、全体システムの成立に目途をつけた上でシステム要求審査に臨む予定である。

ペネトレータを使った月内部構造探査

○村上英記¹, 田中 智², 小林直樹², 白石浩章², 早川雅彦², 山田竜平², 石原 靖³, 岡元太郎⁴,
竹内 希⁵, 早川 基², 月内部構造探査 WG

¹高知大学, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³海洋研究開発機構, ⁴東京工業大学, ⁵東京大学

月内部構造を調べるためのツールとして開発を進めてきた高速貫入型プローブ（ペネトレータ）の耐衝撃技術の完成が 2010 年 8 月の試験により確認された。本報告ではペネトレータを使った月内部構造探査に向けての現状でのさまざまな取り組みについて紹介する。

まずこれまでの経緯を紹介する。1990 年に宇宙科学研究所の第 17 号科学衛星 (LUNAR-A) として月内部構造を地震学的手法で調査する計画として選定された。しかし、開発期間の長期化等により計画自体は 2007 年 2 月に中止が決定した。しかし、ペネトレータの有用性は認められ開発を継続し 2010 年 8 月の実証試験により完成が確認された。LUNAR-A 計画においては、地震計・熱流量計を搭載したペネトレータを高度 25km から自由落下させ約 300m/s の速度で月面に貫入させるためにペネトレータおよび搭載機器は 8000G 以上の耐衝撃性が要求されたが、この要求を満たすペネトレータ技術が完成した。

LUNAR-A 計画の中止が決定される前の 2006 年 11 月にロシアから LUNA-GLOB にペネトレータ搭載の打診があり、着陸機 1 機とペネトレータ 4 機による LUNA-GLOB 計画の検討を進めていた。しかし、実証試験の遅れによりロシア側のスケジュールに合わなくなり 2011 年 3 月の会合において搭載を断念した。その際にロシア側から LUNA-GLOB 以降の月着陸探査シリーズにおいてペネトレータの搭載を提案するように助言をいただいた。

ペネトレータは貫入型プローブなので複雑な姿勢制御や熱制御機構を省略できるため、軟着陸機に比べて格段に小型・軽量である。そのため、一度のミッションで複数本のペネトレータを投下し月面上にネットワークを形成することができる。現在、国内外で着陸機による月震観測の提案があるが、ほとんどは着陸機 1 機という提案である。着陸機では複数機の同時設置は困難である。ペネトレータでは 3 機以上を同時設置することで、独自に月震の震源決定をすることが可能となり速度構造の精度を高めることが可能となる。また、月の裏側への同時設置により裏側の月震活動を明らかにすることが可能となり、コア通過波を観測することでマントル深部・コアの速度構造決定に重要なデータを取得が可能となる。

現在、ロシアの次々期の月探査機への搭載可能性、日本の小型科学衛星を利用した工学実証試験の実施可能性、月・惑星探査での利用だけでなく地球利用—地震・火山災害時の緊急配備装置—に向けての可能性についても検討を始めている。ペネトレータを用いたサイエンスや技術的な検討への、広く惑星科学会の方々の参加を希望する。

MELOS を用い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 using MELOS

○岩田隆浩¹, 石原吉明², 松本晃治², 菊池冬彦², 原田雄司³, 佐々木晶²¹)JAXA・宇宙研、²)国立天文台・RISE、³)上海天文台T. Iwata¹, Y. Harada², Y. Ishihara³, K. Matsumoto³, F. Kikuchi³, and S. Sasaki³¹)ISAS/JAXA, ²)RISE, NAOJ, ³)SHAO, CAS

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・自転速度変動がある。一般に固体天体の回転変動は、電波航法や VLBI (超長期線電波干渉計) などの宇宙測地学的手法により観測される。本研究では、火星の回転変動の計測から内部構造・表層環境の変化を推定して、過去から現在に至る進化やダイナミクスを解き明して地球と対比させることを目的とする。

MELOS (Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy : 火星複合探査) 計画における宇宙機構成の一案として、周回機 (オービター) と着陸機 (ランダー) によるシナジーが検討されている。ここで我々は、4 ウェイドブラ計測 (FWDP) と逆 VLBI (iVLBI) による、火星回転変動計測の高精度化を提案している。FWDP では、地上追跡局→オービター→ランダー→オービター→地上追跡局の経路でドブラ計測 (距離変化率計測) を実施し、同時にオービターとランダーの 2 ウェイ測距・距離変化率計測 (RARR) を行う。一方 iVLBI では、複数の宇宙機からの同期した信号の位相比較を行って各々の相対位置を測定する、逆 VLBI 法 (Kawano *et al.*, 1999, *J. Geod. Soc. Japan.*, **45**, 181) を用いる。ここでは、オービター→ランダー→オービター間の位相比較を実施しながら、地上追跡局でオービターとランダーの 1 ウェイ位相計測を同時またはスイッチング法により行う。なお、宇宙機上の質量・電力を低減させる手段として、ランダー→オービター間を 1 ウェイ位相計測とすることも、併せて検討している。

これまでの火星回転変動の計測では、潮汐 Love 数を用いて流体核の存在が示唆されている (Yoder, *et al.*, 2003, *Science*, **300**, 299)。一方、流体核を仮定した場合の、火星回転変動から得られる物理量の計測精度に関しては、NetLander に提案された NEIGE (未採択) の例が知られている (Yseboodt *et al.*, 2003, *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2003JE002045)。我々は、この解析手法を MELOS に適用することにより、約 1 火星年の観測によって、流体核が存在する場合のコア・マントル境界半径の推定精度が、Sohl and Spohn (1997, *J. Geophys. Res.*, **102**, 1613) のモデル A に対して、約 200km であることを示した。本講演では、この結果から期待される内部熱進化モデルに対する科学成果についても論じる。

惑星探査ローバカメラのオンボード分析にむけて

－ターゲット発見とデータ要約－

○鎌田慎也、本田理恵¹

¹高知大学理学部

Onboard Analysis for Planetary Exploration Rover Camera

－ Target Extraction and Data Summarization －

Development of robust autonomous onboard target analysis system is an essential issue for lunar and planetary rover exploration. The preliminary result of evaluation of rock targeting and data summarization system for stereoscopic and multi-band cameras onboard a rover for both the ground system and the onboard system.

近年、月惑星の探査においてローバによる着陸探査が重要な位置を占めるようになっていく。ローバ探査では、通信帯域・時間などの厳しい制約のため、科学的意義の高い対象について選択的に調査を行う必要がある。こうした選択には、対象領域の俯瞰データ（画像等）の取得、データ受信、地上での分析に基づくターゲット決定、コマンド送信といった複数の通信サイクルを要する。この過程をコンピュータビジョンや機械学習の手法を用いてオンボードで実施することができれば、限られた時間でより多くの重要な対象を調査して科学的ゲインを増すことができると考えられる。

こうしたシステムの研究例として、Mars Exploration Rover (MER) ミッションの Opportunity ローバにアップロードされ、火星において性能確認がなされた Autonomous Exploration for Gathering Increased Science (AEGIS, Estlin 他, 2010)がある。AEGISは、アルベドの高い岩石や丸みを帯びた岩石などの特定の探査対象を検出する機能を持つが、CPU・メモリなどの計算資源の制約を考慮して、グレイスケール画像からのエッジ検出、閉領域の特定、位置、サイズの要約といった計算コストの小さいプロセスを集成されている。しかしこのように単純な特徴抽出を積み重ねるシステムでは照明条件などによる誤認識が問題となる可能性があり、ステレオ画像による距離分布導出やマルチバンド画像によるクラスタリングを併用することでその精度を改善することができると考えられる。これらの手法は計算コストが大きい、地上での迅速で正確な分析に必要であるとともに、FPGAやGPGPUによる並列処理により将来的にはオンボード処理にも適用できる可能性があると考えられる。

本発表では、ローバに搭載されたステレオ／マルチバンドカメラの画像から、岩石などのターゲット抽出とデータ要約をオンボードで実施することを目標として、これらの2種のアプローチ(1)輪郭等の特徴抽出に基づく手法と(2)3次元情報やクラスタリングなど機械学習の手法を併用する手法-をそれぞれ検討し、その性能、問題点などについての評価の予備的な結果を報告する。

原始惑星系円盤の化学構造と ALMA による分子輝線観測： ガス温度構造と光蒸発過程

○野村 英子 (京大理宇宙物理)、Catherine Walsh (Queen's University Belfast)、
T.J. Millar (Queen's University Belfast)

原始惑星系円盤からはこれまでに様々な分子輝線がミリ波・サブミリ波や赤外線で観測されており、円盤ガスの物理構造を明らかにしてきた。9月に初期運用が開始する ALMA はさらに多様な分子輝線の観測を可能にし、モデル計算との比較により、円盤ガスのより詳細な構造を明らかにすると期待される。

そこで本研究では、中心星の照射が円盤ガスの物理・化学構造、および分子輝線強度に及ぼす影響をモデル計算に基づき調べた。具体的にはまず、中小質量の中心星に照射された円盤のガス・ダスト温度、密度構造を加熱と冷却の釣り合い、静水圧平衡の仮定を行い、導いた。さらにこの物理構造をもとに非平衡な化学反応の時間発展を計算し、円盤の化学構造を求めた。また、これらの計算結果を用いて分子輝線計算を行い、中心星からの照射の違いが円盤からの分子輝線に及ぼす影響を調べた。ここで中心星からの照射は、円盤のガス・ダスト温度、および円盤上層部の分子の光解離に大きな影響を及ぼす。原始惑星系円盤でよく観測されている分子種のうち、CN などのラジカルは中心星からの紫外線の影響の強い円盤上層部に多く存在し、HCN などの分子は赤道面に比べダスト温度が高いが紫外線からは遮蔽されている円盤中層部に多く存在すると考えられる。一方で CO は円盤外縁部の赤道面付近にも存在し、特に中質量星周囲の円盤では温度が高いため、円盤半径 300AU 付近でも分子が塵上に凍結しない。

我々の計算の結果、これらの円盤の物理構造及び分子の化学的性質は、CO, HCO⁺, CN, HCN などの高励起輝線と低励起輝線の輝線強度比によく現れることがわかった。すなわち、主に円盤表層・中層部で放射される CN や HCN などと比較的円盤の赤道面付近をトレースする CO の輝線強度比を求めると、高温領域をトレースする高励起輝線と低温領域をトレースする低励起輝線で、さらに小中質量星円盤で輝線強度比が異なることがわかった。一方で、分子種により主な放射領域の円盤高さ、即ち円盤温度が異なるため、輝線比の違いは円盤ガスの温度構造をトレースする。ここで円盤表層部のガス温度は、円盤ガスの主な散逸機構の 1 つであり円盤内惑星形成過程に大きな影響を及ぼすと考えられている、光蒸発過程を制御する。本ポスターではさらに、観測とモデルの比較により円盤温度構造を求め、円盤からの光蒸発率を導く方法について議論する予定である。

ASTE10mによるBeta Pic Moving Groupに属する 原始惑星系後期円盤天体のCO(3-2)輝線探查観測

○清兼 和紘¹、齋藤 正雄²、西合 一矢²、林 正彦¹、相川 祐理³、

川辺 良平²、塚越 崇¹、武藤 恭之⁴、安井 千香子²

¹東京大学、²国立天文台、³神戸大学、⁴東京工業大学

原始惑星系円盤は惑星形成の現場であり、その物理的性質が形成される惑星と密接に関係している。従って原始惑星系円盤が散逸する時期やそのメカニズムを理解することは非常に重要である。理論的なガスの散逸機構としては、光蒸発(Gorti & Hollenbach 2009)や恒星風(Lovelace et al 2008)、円盤風(Suzuki & Inutsuka 2009)、降着および粘性拡散(Lynden-Bell & Pringle 1974)などがある。いずれの散逸機構かによって、散逸タイムスケールの違いやガス・ダスト比の違いが期待される。観測的には、円盤の散逸はおよそ10 Myr程度であることが示唆されているものの(Wyatt 2008)、観測も少なく、ガスの散逸に関する理解は未だ乏しい状況である。後期円盤におけるガスの有無やガス・ダスト比の定量は、ガスの散逸機構の解明に繋がり、惑星形成の理解が進むことが期待される。

我々は、近年同定された近傍(~30 pc)でかつ若い(~10 Myr)Beta Pic Moving Group (BPMG、ex. Torres et al. 2008)に対して、チリ北部にある口径10mのAtacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE10m)を用いてCO(J=3-2)輝線の観測を実施し、円盤のガス成分の検出を試みた。BPMGの年齢は、原始惑星系円盤の散逸タイムスケール程度であり、また太陽系形成シナリオでは木星・土星の形成にとって重要な年齢である。BPMGの距離は、既存の若い星団と比べ2倍以上近いこと、これまでの後期円盤の観測と比較しより感度の高い観測が行えた。観測天体は、中間赤外超過(Rebull et al. 2008)があり、ダスト円盤が付随していることがわかっているもののうち連星を省き、HD203、HD172555、PZ Tel、HD181327、AU Micの5天体を選定した。

観測結果は、速度分解能1.0 km/sにおいて輝度温度換算(T_B)で17mK程度という極めて低いノイズレベルを達成したものの、 3σ 以上のCO輝線の検出には至らなかった。LTEのもとで、円盤の温度を30 K、COの水素分子に対する存在比を星間空間と同じ 10^{-4} と仮定すると、これらの天体においてCOがトレースするガス成分は地球質量程度あるいはそれ以下であることがわかった。また、円盤内のガス・ダスト比が星間空間と比べて小さいことが示唆される。実際、Rebull et al. 2008でSpectral Energy Density (SED) fittingから見積もられているダスト質量を用いると、AU MicやHD181327、HD203においてガス・ダスト比が30:1を下回るという結果が得られた。

シア乱流における永年重力不安定と微惑星形成

○道越秀吾¹、小久保英一郎¹、犬塚修一郎²

¹国立天文台、²名古屋大学

微惑星とは、惑星系形成の初期に存在していた微小天体である。微惑星が集積し、地球型惑星やガス惑星の固体核が形成されると考えられている。微惑星形成の説の1つに重力不安定説がある。原始惑星系円盤に存在した微小ダストが成長すると、中心星からの重力によって円盤の赤道面に徐々に沈殿する。赤道面でのダストの密度が十分に高まれば、重力不安定が発生し、ダスト層が分裂して、微惑星を形成するという説である。

しかし、この説には問題点が指摘されている。沈殿が進むことによって、速度シアが生じ、ケルビンヘルムホルツ不安定が発生する。従って、初期に層流であったとしても、沈殿が進むことによって乱流となる。また、電離度が高い領域は、磁気回転不安定性によって乱流状態になると考えられる。このように円盤が乱流状態になっている場合は、ダストが巻き上げられて重力不安定となるほど薄く沈殿できない可能性がある。

乱流中のダスト層は、古典的な重力不安定の意味では安定である。しかし、ガスとの摩擦による永年進化によって不安定化する可能性がある。そこで、乱流によって巻き上げられたダスト層の長期進化を議論する。ダストの大きさが十分に小さい場合は、乱流によるランダムな力が加わることによって、移流拡散方程式に従うことが分かる。したがって、ダストは、円盤の動径方向に拡散する。一方、自己重力を考慮した場合、ダスト層は収縮しようとする。これらの効果を考慮して線形安定性解析を行なうと、乱流の強さによらず永年的には不安定であることが示せる。シア乱流による乱流ダスト層を仮定して、時間スケールを見積もった。もし最小質量円盤モデルの3倍以上の質量があれば、円盤の全ての領域で、ダストの中心星への落下のタイムスケールよりも早くなることが分かった。

画架座ベータ星周囲のデブリ円盤構造に対する惑星の影響とその観測可能性

○武藤恭之¹ Hanno Rein² Alexis Brandeker³

¹東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

²Institute for Advanced Study, Princeton

³Department of Astronomy, Stockholm University

画架座ベータ星 (β Pic) は、太陽系から非常に近い (約 20 パーセク) デブリ円盤系として有名である。近年の直接撮像観測により、この星の周囲の約 8 天文単位の距離に 10 木星質量程度の惑星が存在することが示唆されている [1]。

β Pic 周囲のデブリ円盤は、数多くの観測がなされており、観測された円盤はほぼ edge-on (円盤を横から見ている状態) にあること、たがいに傾いた二種類の円盤 (primary disk と secondary disk) が存在していること、円盤の拡がり は 100 天文単位以上まで達していること、ダスト成分だけではなく、主に重元素からなるガス成分が存在していることなどが知られている [たとえば 2-4]。また、軌道傾斜角を持った惑星が存在している場合、 β Pic の円盤の傾きを良く説明できる可能性があり、円盤の形状と惑星による摂動の間に関係がつけられる可能性がある [5]。しかし、惑星の軌道は実際には傾いていないという観測結果もあり [6]、実際に惑星の軌道がどのようなになっているかということは決着がついていない。

近年の観測によって、円盤の北東側と南西側にガスの明るさの分布に非対称性があることが示唆されている。特に、中心星に近い部分 (約 20 天文単位) のナトリウムや鉄の分布に非対称性が存在していることが示唆されている [7]。そこで本研究では、 β Pic の円盤に離心率の比較的大きく、かつ質量の大きな (数木星質量程度) 惑星が存在している場合、円盤形状にどのような変化があり、それがどのように観測されるかを流体力学的数値計算および N 体計算を用いて議論した。その結果、離心率が大きければ、円盤の内側領域の北東側と南西側の明るさの分布の非対称性が現れることが示唆された。本発表では、惑星の離心率と非対称性の関係、視線方向と近点方向の依存性などについて議論を行い、将来の VLT/CRILES による観測に対する示唆についても考察する。

References: [1] Lagrange et al. (2009) A&A, 493, L21, [2] Mouillet et al. (1997) A&A, 324, 1083, [3] Golinowski et al. (2006) ApJ, 131, 3109, [4] Olofsson et al. (2001) ApJ, 563, L77 [5] Mouillet et al. (1997) MNRAS, 292, 896, [6] Currie et al. (2011) ApJ, 736, L33 [7] Brandeker et al. (2004) A&A, 413, 681

原始惑星系円盤における ダストとガスの抵抗による乱流の減衰

○石津尚喜、道越秀吾¹

¹国立天文台

微惑星の形成のメカニズムとして、ダストの連続成長、ストリーミング不安定性、ダスト層の重力不安定性などが提唱されている。本研究ではダスト層の重力不安定性について考える。重力不安定性が生じるためには、ダストが原始惑星系円盤の中心面に十分沈殿し、臨界密度に達する必要がある。MRI (磁気回転不安定性) やシアー不安定性などに起因する乱流があるとき、ダストの沈殿が困難であるため重力不安定性は生じないことが予想される。シアー不安定性はダスト、ガス面密度比が十分大きいときや動径方向の圧力に極値があるときには生じない場合がある。惑星形成領域付近では電離度が低いいため MRI が生じないデッドゾーンがあり、その領域では重力不安定性が生じる可能性があるとされていた。しかしながら、円盤表面付近の MRI 乱流が生じているアクティブゾーンからの音波によりデッドゾーンでも乱流状態にあることが最近のシミュレーション結果により示された。

本研究では、乱流状態にある円盤中でダストが沈殿する可能性を数値シミュレーションにより調べる。シミュレーションは円盤方位角方向と鉛直方向の2次元で行った。ダストは単一サイズで流体として取り扱った。ガスとダストはお互いに摩擦抵抗を及ぼしあう。乱流は、低波数のフーリエモードをランダムに選び、ある時間間隔でパルス的にエネルギーを与えることにより維持した。ガスの乱流が定常状態に達した後にダスト流体を置いた。シミュレーション結果は、ダストの摩擦時間とケプラー角速度の積 $t_f \Omega_K > 0.1$ 、Shakura-Sunyaev の α パラメータ $\alpha < 10^{-4}$ のときダストは沈殿しうることを示した。また、ダスト密度が高い領域では、ガスの乱流速度が減少していることが分かった。ダストとガスの摩擦相互作用がない場合、乱流の減衰がないためダストは巻き上げられてしまう。よって、上記の条件の場合、外部から乱流が与えられる場合には乱流状態であってもダスト層の重力不安定性が生じる可能性がある。

オールト雲起源新彗星の力学進化

Dynamical evolution of the new Oort Cloud comets

○伊藤孝士 (国立天文台)・樋口有理可 (東京工業大学)

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 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小惑星と惑星との衝突確率は精度良く計算されるようになったが、彗星についてはその力学の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。

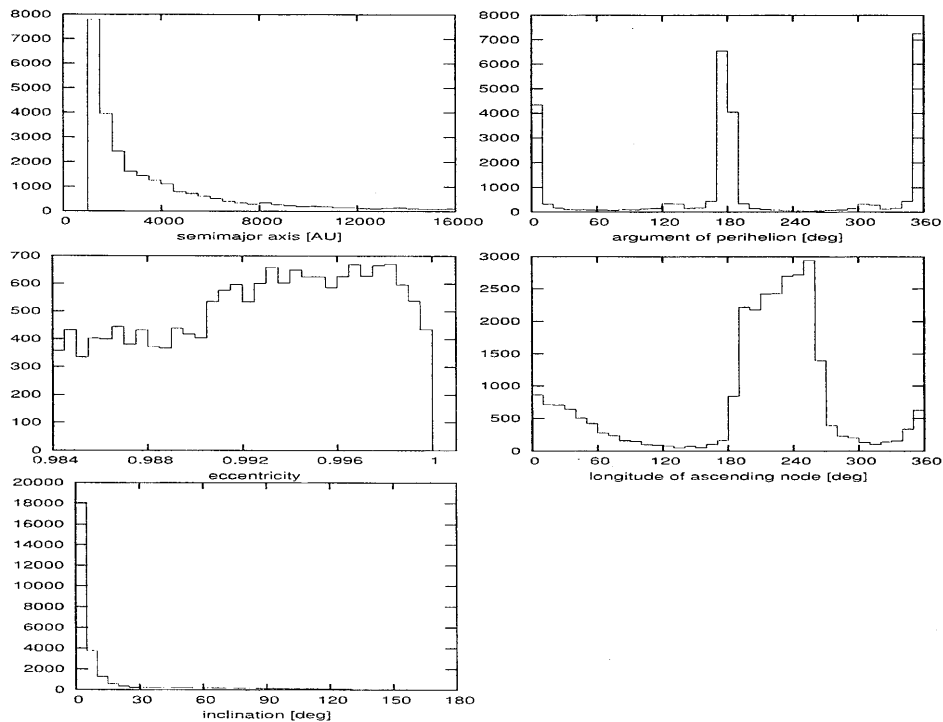


図 1: オールト雲から $r < 30\text{AU}$ に入った直後の新彗星の軌道要素分布。(左上) 軌道半長径、(左中) 離心率、(左下) 軌道傾斜角、(右上) 近日点引数、(右中) 昇交点経度。近日点引数と昇交点経度の分布が一樣でないのは銀河潮汐力の影響である。

化石形状を記憶する準流体惑星の真の極移動：

潮汐変形による歪みエネルギーの効果

True Polar Wander of a Quasi-Fluid Planet with a Fossil Shape:
Effect of Strain Energy Due to Tidal Deformation° 原田 雄司^{1,2}° Yuji Harada^{1,2}¹ 中国科学院 上海天文台 天文地球動力学研究中心² 東京大学 地震研究所 物質科学系研究部門¹ Center for Astro-Geodynamics Research, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences² Division of Earth and Planetary Materials Science, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

本研究では、歪みエネルギーに関する先行研究を踏まえて、真の極移動における極位置の時間発展を定式化・数値計算した。その結果、歪みエネルギーを考慮した場合は、考慮しない場合と比べて次のような違いを示した。一つは、たとえ表面質量荷重について同じパラメーターを与えても、定常状態に達した後の極位置が異なる事である。この結果は、先行研究が与えた最終的な極位置とも一致しない。もう一つは、やはり同じパラメーターを与えても、極位置が定常状態に達するまでの時間スケールが異なる事である。この結果は、リソスフェアの歪みエネルギーが実効的な荷重の影響を抑制する事を示している。定常状態に関してこのような効果が存在する事は、先行研究によって既に指摘されているが、それと類似の効果が真の極移動の特徴的な時間スケールにおいても見られる、という事を本結果は意味している。但しその厳密な時間スケールは、単に実効的な荷重の大きさを小さくするだけでは見積もる事が出来ない。と言うのも、真の極移動によって励起される歪みエネルギーは、真の極移動を駆動する荷重自体が完成した後でさえ、依然として変化し得るからである。この遅延の原因は、長期的極運動による遠心力形状の粘弾性的再調整である。以上の結果に基づく結論として、実際の惑星や衛星の永年の極移動の物理的解釈、特に定常状態に達するまでの時間スケールや定常状態に至るまでの進化を見積もる上で、歪みエネルギーは必ずしも無視出来ない、という事が示唆される。

In the present study, temporal variation of a paleo-pole position due to true polar wander (hereafter TPW) is formulated and calculated based on strain energy in a previous study. As a result, the case with the strain energy indicates different characteristics from that without the strain energy in the following points. First, the paleo-poles under steady states are different each other in the cases for same parameters on surface mass loading. These results are not consistent even with the previous results concerning just final conditions. Second, also in the cases for same parameters, time scales when the paleo-poles reach the static limits are different. These results demonstrate the fact that the strain energy within a lithosphere effectively weakens influence of a load on TPW. Although this kind of influence has already been pointed out by the previous results just in the cases of the steady states, the present results further reveals similar effect also on a characteristic time scale of TPW. Strictly speaking, however, it is impossible to estimate its exact time scale only by reducing an effective size of a load. This is because it is possible that secular variation in the strain energy induced by TPW still occurs even after growth of a load itself as driving force on TPW. This delay results from visco-elastic readjustment of centrifugal flattening in response to long-term polar motion. In conclusion, the present results imply that the strain energy is not necessarily negligible in terms of physical interpretation for actual TPW, especially characteristic time scales and time variations between the initial and final states of the spin axis.

同期回転惑星の海洋循環についての基礎的考察

○松尾花枝, 中島健介 (九大院理)

1. はじめに

同期回転する系外惑星において、日射分布は昼半球にのみ与えられるため、昼夜半球には極端な気候の違いが予想される。しかし、東西方向の熱輸送があれば、その違いはより穏やかなものになるだろう。大気熱輸送については神戸大の納多ら(2010)等によって研究が行われているので、本研究では海洋循環による熱輸送に着目し、その第一歩として線形浅水波方程式を用いた数値計算を行った。ここでは、蒸発・降水の分布2通りについて、その循環の特徴を調べた。

2. モデル

本研究では以下のような線形浅水波方程式を時間発展問題として解いている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 2\omega v \cos \theta - \frac{g}{a} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -2\omega u \cos \theta - \frac{g}{a \sin \theta} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (hu \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \phi} (hv) + \left(Q + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) a \sin \theta = 0$$

θ : 余緯度, ϕ : 経度, t : 時間

u : 南北流の速度(南向きを正)

v : 東西流の速度(東向きを正)

ζ : 自由表面からの変位

ω : 自転角速度

g : 重力加速度

a : 地球の半径

h : 地球の海洋の平均深度

Q : シンク関数

計算は、2次元の格子点モデルを作成し、格子点数は南北×東西方向に 120×120 個、計算領域は極に行くほど格子点間隔が狭くなるという問題から緯度 60 度以内とした。シンク関数(Q)は蒸発・降水の分布を表しており、1つは同じ南北構造において昼半球で蒸発・夜半球で

降水がある場合(図1-a)、もう1つは同じ南北構造において昼半球でのみ蒸発と降水がある場合を想定した(図1-b)。

3. 結果

昼半球で蒸発・夜半球で降水がある場合には、解は定常状態に達し、それは解析的に得られる定常解と等しかった(図2-a)。昼半球でのみ蒸発と降水がある場合、解は定常状態にはならなかったが、帯状流成分が卓越した(図2-b)。後者の場合について、昼半球にしか日射分布を与えていないにも関わらず夜半球にまで到達する循環が形成され、その上その強度は前者の場合よりはるかに強いものであった。今後は、循環を形成する過程における地衡流の振る舞い等詳細な解析を行っていく必要がある。

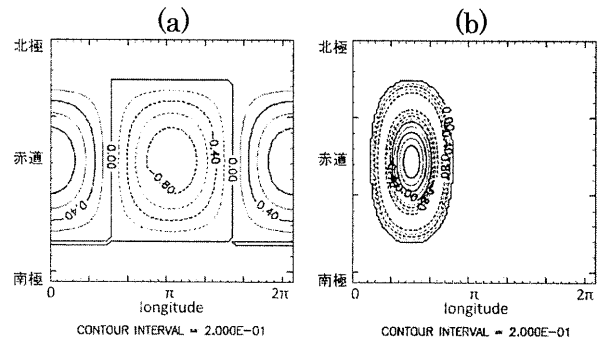


図1. シンク関数

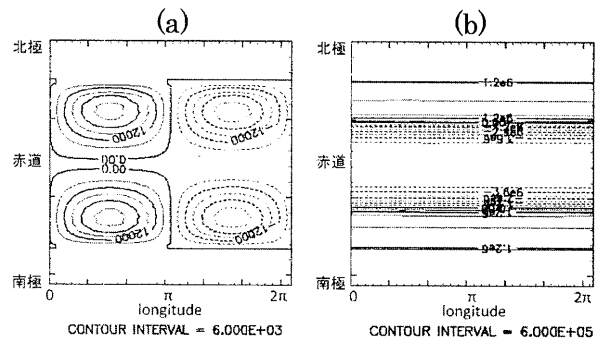


図2. 自由表面からの変位(ζ)の図。(a)は定常状態での時間平均図、(b)はある瞬間のスナップショット。

光化学大気モデルの構築と地球型系外惑星への応用

○洪 鵬¹、関根 康人¹、杉田 精司¹

¹東京大学 複雑理工学専攻

これまで地球型系外惑星の大気組成は、一般的に CO_2 に富む酸化的な大気になると考えられてきた[1]。これは(1) CH_4 などの還元的ガスは光化学的に不安定であり、 H_2 と CO_2 に分解されてしまうこと[2]、(2) H_2 は比較的短いタイムスケールで宇宙空間に散逸して、地表を不可逆的に酸化すること[3]、(3) 現在の地球上での火山ガスの主成分が CO_2 であり、継続的に大気に供給されていること、に基づいている。

しかし全球が深い海で覆われている海惑星の場合[4]、この状況が大きく変わる可能性がある。まず海惑星では低温高压条件下での岩石の水質変成を伴う海底熱水噴出孔からの脱ガスにより、現在の地球に比べ CH_4 や H_2 に富んだ還元的な気体が大気に定常的に供給されると考えられる(図1)[5, 6]。さらに CH_4 が大気に供給され大気組成が還元的になっていくと、タイタンと同様に有機物のエアロゾルが生成することが予想される。この時、エアロゾルの紫外線遮蔽効果により、還元的ガスの大気中での寿命が延び、さらに宇宙へ散逸していた水素の一部はエアロゾル中に留まることで、最終的に地表面に再供給されるため、地表環境の酸化のタイムスケールが遅くなることが予想される。

このように仮に同じ質量や内部組成を持っている地球型惑星でも、海洋質量の大きさにより大気組成や大気進化の過程が大きく異なる可能性がある。しかしながらその影響はこれまで定量的に調べられてこなかった。そこで我々は惑星大気中の化学反応を解き大気化学組成を計算する光化学モデルを構築し、タイタン大気[7]において計算の妥当性を確認した。本発表では、様々な温度圧力条件下での熱水噴出孔の脱ガス気体組成を化学平衡計算[8]によって求め、それらを光化学モデルの境界条件として系外地球型惑星の大気組成の多様性を調べる。

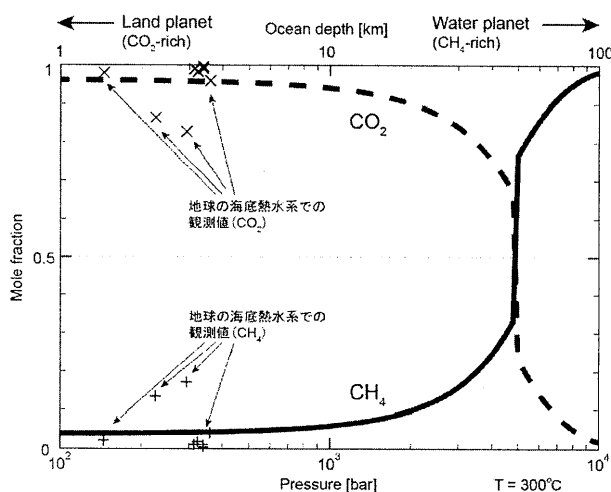


図 1. PPM(pyrite-pyrrhotite-magnetite)緩衝系における温度 300°C での CO_2 , CH_4 の平衡組成比。点は地球の海底熱水系での観測値[5]を示す。

参考文献:[1] Kasting, J.F., 1993. Science 259, 920-926. [2] Pavlov, A.A., Brown, L.L., Kasting, J.F., 2001. J. Geophys. Res. 106, 23267-23287. [3] Catling, D.C., Zahnle, K.J., McKay, C.P., 2001. Science 293, 839-843. [4] Leger, A. et al., 2004. Icarus 169, 499-504. [5] McCollom, T.M. & Seewald, J.S., 2007. Chem. Rev. 107, 382-401. [6] Kump, L.R. & Barley, M.E., 2007. Nature 448, 1033-1036. [7] Toubanc, D. et al., 1995. Icarus 113, 2-26. [8] Johnson, J.W., Oelkers, E.H., Helgeson, H.C., 1992. Comput. Geosci. 18, 899-947.

系外惑星大気による中心星光の屈折と色収差

山本哲生¹, ○中本泰史²¹北海道大学, ²東京工業大学

Refraction and Chromatic Aberration of Light in Atmospheres of Exoplanets

Tetsuo Yamamoto¹ & ○Taishi Nakamoto²¹Hokkaido University, ²Tokyo Institute of Technology

Many exoplanets have been observed using transits. Moreover, some of their atmospheres have been observed. In those studies, light from a central star was assumed to travel straight in the atmosphere. In general, however, the light in the atmosphere is subject to refraction and chromatic aberration. Here, we study the refraction of light from the central star in the atmosphere. We carry out numerical simulations of propagation of light in the atmosphere and discuss its observational feasibility.

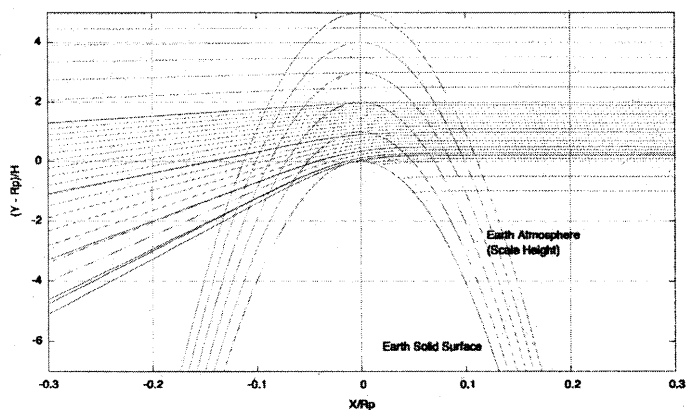
いくつかの系外惑星がトランジット法によって観測され、その大気の観測がなされている。大気中を通過する光に対する吸収から、大気の組成や温度、その空間分布などが推定されている。従来の解析では、大気中を通過する中心星からの光は直進するものと仮定されていたが、一般的には大気による屈折の影響を受ける。私たちは惑星大気による中心星からの光の屈折について調べた。

まず、中心星の光の屈折についての解析を進め、屈折角について、以前我々や他のグループが導出したものよりも高精度な解析的近似式を得ることができた。なおここでは、惑星大気は等温で、静水圧平衡にあると仮定している。

次に、実際のトランジット観測による光度変化と比較するため、波長による屈折角の変化 - 色収差 - を考慮して、予想される光度変化をシミュレーションした。この効果を使って得られる情報は、従来の吸収線の観測で得られるものとは異なる。この効果を実際に観測することができれば、惑星大気に関して従来とは質的に異なる新たな情報を得ることができると期待される。

光線 地球+等温大気の場合

図：惑星大気による光の屈折。大気組成は地球の空気、温度は一定を仮定。水色の線は、大気のスケールハイト毎に記した等密度面を表す。緑は波長 $0.5\mu\text{m}$ の光、赤は波長 $0.8\mu\text{m}$ の光の光線。波長によって屈折角が異なることがわかる。



**人工隕石落下としての「はやぶさ」リエントリー
：リエントリーに伴う衝撃波のインフラサウンド・地震波観測と解析結果**

○石原吉明¹・平松良浩²・山本真行³・古本宗充⁴・藤田和央⁵

1. 国立天文台, 2. 金沢大学, 3. 高知工科大学, 4. 名古屋大学, 5. ARD/JAXA

流星は最も一般に馴染みのある天文・惑星科学的な現象であるが、その実体は地球大気中に飛び込んで来た流星物質が、大気を断熱圧縮することによって発光あるいは衝撃波を励起し、アブレーションによって損耗してゆく現象である。流星のうち大規模なものを火球と呼び、そのごく一部の燃え尽きる事無く地表に達した物が『隕石』とよばれる。隕石落下を含む流星物理において、大気中を極超音速で飛行する流星物質（隕石）と大気の相互作用は、総合的な観測に限られるということもあり、未解明の部分を多く残している。この未解明部分に光を当てるには、隕石落下の総合的な観測を実施し、基礎情報となる光学・衝撃波観測データを同時に得ることが望まれるが、隕石の落下はきわめて希な現象であり、必要十分な観測網を展開維持して待つ事は困難である（近年、光学観測に関してはアマチュアによって高感度ビデオカメラによる観測網が整備されつつある）。

2010年6月13日、日本の小惑星探査機『はやぶさ』が、小惑星『イトカワ』から帰還し、『イトカワ』のサンプルが格納されたリエントリーカプセルを、オーストラリア・ウーメラ立ち入り制限地域（WPA）の砂漠に送り届け、探査機自身も WPA 上空でリエントリーし、大火球となって散った。一連のカプセル・探査機本体のリエントリーは、リエントリー速度が地球の脱出速度を超えていること、形状や組成が既知であること、時間・場所を事前に把握出来ることから、事前に観測網を展開することで、理想的な人工隕石落下実験として用いることが出来る。このような人工隕石落下現象は、米国の Genesis、Stardust カプセルリエントリーに続く3例目ときわめて希少な観測機会であり、また探査機本体のリエントリーは世界初である。ラジオビーコン不調時におけるカプセル落下位置推定の観点からも、リエントリーにともなう火球の観測が重要であり、JAXA のカプセル回収部隊の一部として公式な地上観測隊が編成される事となった。地上観測部隊では、カプセル落下位置推定を目的とした基本的なビデオ観測以外に、この貴重な機会を活かし可能な限りの流星科学データを取得する為、分光を含む光学観測とリエントリーに伴う衝撃波のインフラサウンドセンサー・地震計による観測を実施することとなった。本研究では、リエントリーに伴う衝撃波をターゲットとしたインフラサウンド・地震波観測の詳細と、取得したデータおよび解析結果について報告する。

リエントリーに先立ち、約1週間をかけ WPA 内に3点のインフラサウンドセンサー・地震計によるアレー観測点（主要観測点）と、3点の地震計のみの副観測点を設置した。主要観測点をアレー構成にした理由は、計測環境がノイジーであっても、シグナルを確実に検出すること、およびアレー解析によって衝撃波の到来方向を決定する為である。副観測点に関しては、落下経路に沿った方向に測線をのばす事で、減速による衝撃波振幅の変化をより明確に捉える事が目的である。全ての観測データは、各地点・センサー毎にオフラインロガーによって 100Hz もしくは 125Hz でデジタイズされ、連続波形記録として自動収録した。また、主要観測点うち1地点は光学観測点を兼ねており、リエントリー当夜に可聴音域での観測と衝撃波データとの共解析用の光学観測を実施した。全ての観測点・観測機材はリエントリー翌日に撤収し、ロガーからデータをダウンロードした。小規模なトラブルは発生したもの、インフラサウンドセンサー・地震計とも順調に作動しており、リエントリーカプセル・探査機本体の破片の超音速飛行に伴う衝撃波シグナルが明瞭に記録された。また、可聴音域で衝撃波を捉える事にも成功した。これまでの解析により以下の結果が得られた。

1. 衝撃波到着時は、軌道予報値と静止等温大気を仮定して求めた予想到着時と数秒以内で一致。
2. MUSIC法を用いたアレー解析および3成分地震計の波形記録を用いたパーティクルモーション解析により求められた衝撃波到来方位は、予想到来方位と誤差の範囲で一致。
3. 衝撃波の衝撃過剰圧は、3観測点とも理論値の 1/2 から 1/3 程度。⇒理論式の修正が必要！
4. 衝撃過剰圧と地動振幅の関係は、Ben-Menahem and Singh [1981] の理論式をほぼ満たす。
5. ビデオ記録と複数点での衝撃波波形の共解析により、上空 41-39 km を飛行する探査機破片と励起した衝撃波シグナルの 1 対 1 の対応付けに成功。
6. ビデオ記録の解析により、探査機本体の破片のアブレーション過程について、単純損耗・再分裂・爆発増光の3パターンに分類し追跡。

衝突閃光での黒体放射

○高橋悠太、柳澤正久

電気通信大学 情報通信工学専攻

流星体が月面に高速衝突する際に閃光が生じる(衝突閃光)。閃光には衝突の瞬間に発するものと、発生する衝突蒸気雲からのものがある。蒸気雲の発光が黒体放射ならば、そのスペクトルから蒸気雲の温度を推定することができる。蒸気雲の発光は黒体放射であると仮定されることがあるが、その真偽はまだわかっていない。本研究では、JAXAの2段式軽ガス銃を用いて高速度衝突実験を行い、衝突閃光を二種類のAPD(アバランシェ・フォトダイオード、最大感度波長 620 nm, 800 nm)と二種類の赤外フォトダイオード(最大感度波長 1.5 μ m, 1.9 μ m)を使用して測光を行い、衝突蒸気雲の発光が黒体放射であるか否かを調べる。その際、飛翔体とターゲットにはナイロン 66 を使用し、チャンバー内の大気圧を変えて実験を行い、大気圧の変化との関係性も考えていく。黒体放射かどうかを調べるにあたり、高速度衝突で生じる発光を黒体放射だと仮定し任意での出力電圧を計算式で求めそれを高速度衝突実験で測光した出力電圧と比較する。この計算式は4種類のフォトダイオードで別々に求めそれらの比を用いて比較する。以下に実験の模式図を示す。

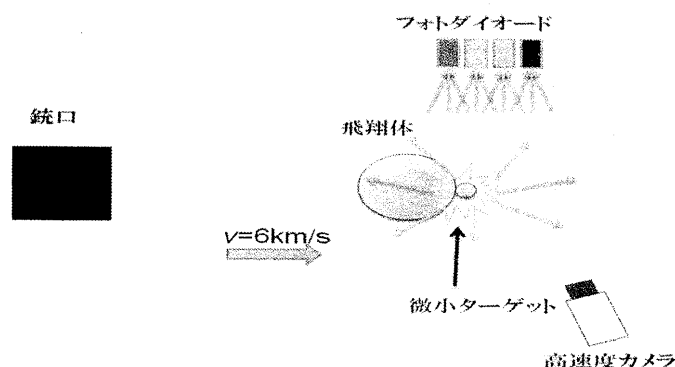


図 1、実験模式図。

衝突蒸気雲の膨張速度

○海老名良祐¹, 柳澤正久¹

¹電気通信大学

背景・目的

宇宙空間で起こる微惑星と原始惑星の衝突により生じる蒸気雲の特性を理解することは、恐竜の絶滅の原因や惑星の大気の起源など、宇宙の多くの問題の解明に繋がると考えられている。先行研究では、蒸気雲の膨張速度は衝突時の初期状態における音速に比例するとされている。これらの実験はすべて緻密な弾丸を使用している。しかし、実際の太陽系小天体は多孔質物質でできているといわれている。そこで、本研究では多孔質物質が弾丸である場合と等価な実験を行った。衝突で生じる蒸気雲を高速度カメラで観測し、膨張速度を測定し、飛翔体の空隙率が変化した場合の蒸気雲の膨張速度の変化を考察する。

実験方法

多孔質の弾丸を高速度で射出すると、急激な加速度に絶えられず、弾丸が壊れてしまう。そこで、多孔質を壊さずに衝突させるために、飛翔体とターゲットを入れ替え、緻密な飛翔体を多孔質の微小ターゲットに衝突させることで、多孔質の弾丸を緻密なターゲットに衝突させる場合と同等な結果を得ることができる。実験は二段式軽ガス銃を用いて、約 6[km/s]で射出した飛翔体を微小ターゲットに衝突させ、発生した蒸気雲を高速度カメラで撮影する。それにより、得られた画像から蒸気雲の膨張速度を測定する。

結果・考察

ユゴニオ曲線から各ショット毎の衝突時のターゲット内の音速を求めた。ここで、膨張速度を音速で割った“規格化膨張速度”を定義する。規格化膨張速度は衝突速度に依らず、一定となった。これは、膨張速度が音速に比例していることを意味している。このときの音速を求める際に、空隙率による影響を考慮しており、空隙率が大きくなるほど膨張速度は小さくなる。

結論

以上の結果より、衝突蒸気雲は衝突時の初期状態におけるターゲットの音速に比例し、音速の約 2 倍となる。音速は、微小ターゲットの空隙率が大きくなるほど小さくなる。よって蒸気雲の膨張速度もそれに伴い、小さくなる。

高速度衝突閃光：多孔質衝突体の場合Ⅲ

○柳澤正久（電気通信大学）

数 km/s という高速度で弾丸が衝突すると閃光を発する（衝突閃光）。弾丸が緻密な場合と多孔質な場合とで閃光強度に差があるだろうか。この差が大きければ月面衝突閃光[1]の明るさからメテオロイドの衝突エネルギー（衝突体の運動エネルギー）を推定する際に、実験室での衝突閃光の測定結果（弾丸は緻密）[2]をそのまま適用できないことになる。この問題を明らかにするために室内実験を行った。

多孔質弾丸を使った高速度衝突実験は難しい。発射時の大きな加速で、弾丸が破壊あるいは圧密されてしまうからである。そこで、十分小さな多孔質標的への弾丸の衝突は、多孔質弾丸の平面への衝突と等価であると考え[3]、実験を行った（図 1）。ISAS/JAXA の新二段式軽ガス銃で、直径 7 mm のナイロン 66 球を 6 km/s (±5%) で発射し、微小標的に衝突させる。微小多孔質標的は糸を解して得られたナイロン 66 繊維（太さ 15 μm ）をホルダーに詰め 250-260 $^{\circ}\text{C}$ で 5 分間加熱して製作した。空隙率は 5-76 % である。標的の形状は直径 0.6-1.1 mm、高さ 0.5-1.2 mm の円柱である。ほぼ同じ大きさ、形状の緻密な微小標的を用いた実験も行った。

衝突閃光の観測には、PIN Si フォトダイオードおよび Si アバランシェ・フォトダイオードを用いたフォトメータを用いた。閃光は最初のパルスと、それに次ぐ衝突蒸気雲からのものに分けることができる。パルス部分の継続時間は約 0.2 μs で、微小標的のサイズ 1 mm を 6 km/s の弾丸が通過する時間 0.18 μs にほぼ等しい。この期間の強度を時間積分し、閃光エネルギー[J]に換算した。衝突エネルギー $((1/2) \times (\text{微小標的質量}) \times (\text{衝突速度})^2)$ で規格化した閃光エネルギーと、標的の空隙率との関係を図 2 に示す。データのバラつきは大きいですが、空隙率の増加とともに閃光強度も増加している。一方、規格化した閃光エネルギーと入射角の関係も調べたが、はっきりした閃光強度の入射角依存性は見られなかった。

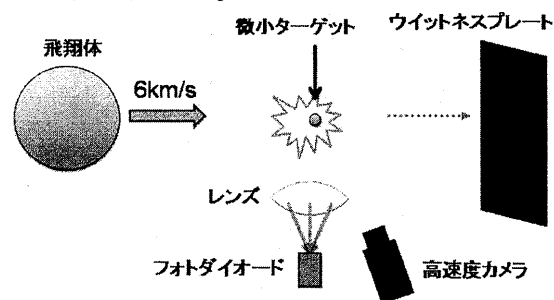


図 1. 実験方法. 左から飛んできた弾丸が静止している微小標的に衝突し閃光を発する。

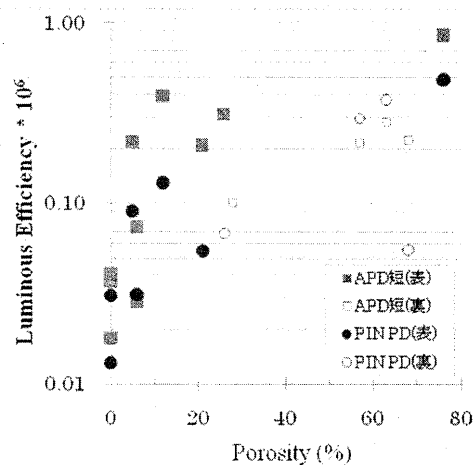


図 2. 規格化した発光強度（の 10^6 倍）と微小標的の空隙率との関係. 丸と四角のプロットは別々のフォトメータの結果、一方、幾何学的な位置関係が、フォトメータから衝突点が見える場合は塗潰し（表）、見えない場合は白抜き（裏）で示した。

参考文献：[1] Yanagisawa, M. and N. Kisaichi, Lightcurves of 1999 Leonid impact flashes on the moon. *Icarus*, 159, 31-38, 2002. [2] Eichhorn, G., Analysis of the hypervelocity impact process from impact flash measurements, *Planet. Space Sci.*, 24, 771-781, 1976. [3] 柳澤正久, 池上裕美, 多孔質衝突体による衝突閃光実験の提案, スペース・プラズマ研究会(平成 18 年度)、宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研究本部、68-71、2007. 謝辞: 本研究は科研費(19540443)および ISAS/JAXA スペースプラズマ共同研究設備の支援を得て行われた。

隕石への超高速衝突実験と塵回収

○中村昭子¹, 岡本尚也¹, 門野敏彦², 重森啓介², 弘中陽一郎², 佐野孝好²,
境家達弘³, 瀬戸雄介¹, 藤田幸浩⁴, 荒川政彦¹, 大野宗祐⁵, 黒澤耕介⁶, 竹内拓⁷

¹神戸大学大学院理学研究科, 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名古屋大学大学院環境学研究科, ⁵千葉工業大学惑星探査研究センター, ⁶宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁷東京工業大学地球惑星科学専攻

惑星間空間での固体微粒子の高速衝突は、固体天体の表面の構造進化と変性に寄与し、また、新たな塵の源となる。衝突によって生じる破片のサイズ分布は、べき乗則

$$n(a)da = n_0 a^{-\gamma}$$

で表され、数 100 ミクロン以上の岩石破片や、玄武岩への ~ 3.5 km/s の衝突で生じる微小破片（数ミクロン $\sim$ 数 100 ミクロン）では、 $\gamma \sim 3.5$ という値が得られている。我々は、より高速度の衝突においての破片サイズ分布を調べるために、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターにおいて、100 $\sim$ 300 ミクロンの金属弾丸をかんらん岩と玄武岩に 9 $\sim$ 60 km/s で衝突させてエアロジェルで塵を回収する実験を行った。エアロジェルに捕獲された破片のサイズ分布は、EPMA による元素マッピングにより調べた（高沢他, ApJ, 733, L39, 2011）。その結果、超速度衝突ではミクロンサイズの細かな塵が多く生成されることを示した。

ところで、隕石への衝突速度 ~ 5 km/s の衝突実験では、100 ミクロン以下の破片サイズ分布がべき乗からはずれて傾きがゆるくなることが報告されている (Flynn et al. Planet. Space Sci. 57, 119, 2009)。そこで、今回、我々は新たに空隙を含む小天体表面を模擬する 2 種類の隕石（普通コンドライト LL5 と炭素質コンドライト CM2）への衝突実験を行った結果について報告する。

低密度エアロジェルへの 衝突・貫入過程の高速カメラ撮影： 多様な構造を持つ粒子の場合

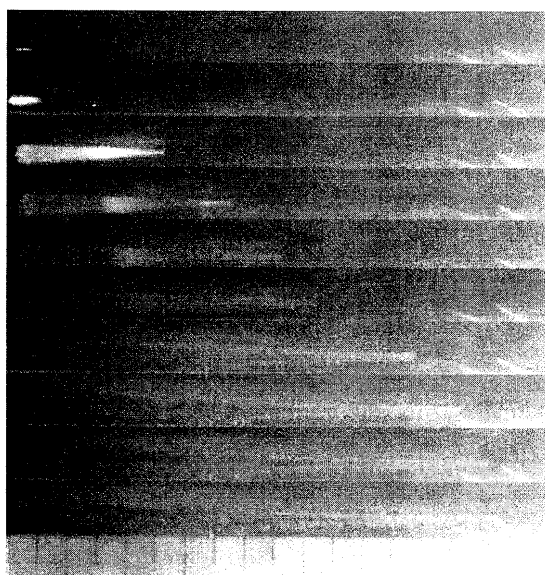
○門野敏彦¹，新居見励²，奥平恭子³，長谷川直⁴，田端誠^{4,5}，土山明²

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会津大学，⁴宇宙科学研究所，⁵千葉大学

NASA の Stardust 計画において，Wild2 彗星の塵が低密度物質（シリカエアロジェル： $5\text{--}50\text{ mg/cm}^3$ ）を用いて捕獲された．これらの彗星塵は相対速度 6.1 km/s という超高速度でシリカエアロジェルに突入したために，破碎・蒸発・シリカエアロジェルとの混合といった過程を経て原形を失っている．これらの元の姿を知るためには，彗星塵がエアロジェルに突入した時に形成された，衝突トラックが重要な手がかりとなる．これまでに低密度物質への衝突貫入実験は数多く行われているが，固い物質が超低密度物質に超高速度衝突するという物理現象は未だによく理解されておらず，定量的なモデルも確立されていない．

そこで本研究では，衝突貫入トラック形成モデル構築のため，宇宙科学研究所の2段式水素銃を用いて様々な物質（ガラス球，焼結体など）を $\sim 4\text{ km/s}$ の速度でシリカエアロジェル（密度： 60 mg/cm^3 ）に打ち込み，高速度カメラを用いて衝突トラックが形成される過程を撮影した（下図：ガラス球， $8\mu\text{s}$ 間隔）．これらの画像を用いて，シリカエアロジェル中での貫入トラックの深さ・直径について入射粒子の構造によるトラック拡大速度の違いなどを調べた．結果を基にトラックが横方向に拡大する機構について議論する．



発泡アルミへの衝突クレーター形成実験

Impact cratering experiments on aluminum foam targets

小野瀬直美 (ARD/JAXA)、東出真澄(ARD/JAXA)、長谷川直 (ISAS/JAXA)

多孔質ターゲットに対する衝突クレーター形成においては、ターゲット物質の圧密が非常に重要である。また、多孔質物質に稠密な飛翔体が衝突した場合には、飛翔体の運動エネルギーがターゲットに移動するのに貫入距離が必要となり、比較的深いクレーターになる傾向があると考えられる。本実験では、空隙率 82%の発泡アルミターゲットに対するアルミ飛翔体の 6 km/sec の衝突で、バルブ型のクレーターが見られた。空隙率 60%の石膏と 99%以上のエアロジェルとの中間の密度である発泡アルミに対する衝突実験を行うことで、圧密の効果を考えたい。

等質量氷ダスト球の衝突付着に関する実験的研究

○寫生 有理¹, 荒川 政彦²

¹名古屋大学 環境学研究科, ²神戸大学 理学研究科

原始惑星系円盤での微惑星形成はダストアグリゲイトの衝突付着合体によって起こったと考えられているが、その過程は未だ明らかになっていない。円盤内のダスト同士の衝突速度は数 10m/s にも達するが、氷ダストアグリゲイト同士の衝突シミュレーションによって成長できる最大衝突速度は 50m/s であることが示されている[1]。一方、氷ダストは太陽に近づくと焼結によって氷粒子間のネックが成長し、粒子自身も大きくなる[2]。これにより氷ダストは弾性的になり衝突エネルギーを散逸させにくくなるため、最大成長可能速度は小さくなると予想される。そこで本研究では、空隙率 70, 80%の焼結した 3cm 氷ダスト球同士の衝突実験を行い、反発、合体、破壊の衝突速度依存性と衝突によって圧密された領域の空隙率、衝突速度依存性を調べた。

実験は北大低温研の大型低温室（室温-15°C）で行った。微細水滴を液体窒素内に噴霧し、平均 20 μ m の氷微粒子を作成した。氷ダスト球は氷微粒子を球成形治具に入れ圧縮して作成し、密封袋で-15°Cのもとで焼結させた。氷ダスト球は直径 3cm、空隙率 70, 80%（質量 3.9, 2.7g）、焼結時間 1時間-4日間とした。標的と弾丸を区別するため、標的は赤インクを添加した氷微粒子を用いて作成した。弾丸の加速には縦型ガス銃と自由落下を用い、衝突速度 1-13m/s でほぼ正面衝突させた。ガス銃では、弾丸である雪試料がガス圧によって破碎するのを防ぐためスポンジサボを用いて加速を行った。その結果、20m/s までの加速に成功し、自由落下する標的に衝突させることができた。しかしながら、20m/s 以上では加速中に弾丸が粉碎した。破片の二次破壊を最小限に抑えるため、回収箱底面にはエアバッグを敷いた。自由落下衝突では、標的は地面に置いて衝突させた。衝突の様子は 2 台の高速度カメラで撮影し、衝突速度とインパクトパラメータを測定した。衝突後、破片の質量分布と衝突圧縮面の大きさを測定した。

衝突実験の結果、反発、合体、部分破壊、カタストロフィック破壊が観察された。合体は焼結時間によらず空隙率 70%, 80%で 1-3m/s の正面衝突でのみ起こった。空隙率 70%試料では、部分破壊は~6m/s から起こり始め、13m/s で最大破片が元の 1/5 となった。その結果、衝突破壊強度は空隙率 70%試料で 12J/kg 程度であり、弾丸/標的の質量比が 0.01 の衝突破壊で求めた結果の約 1/3 であった。

[1] Wada *et al.*, 2009, *Apj* 702, 1490.

[2] Maeno and Ebinuma, 1984, *J.Phys.Chem.*, 87, 4103.

模擬惑星間塵環境下でのアミノ酸関連分子の軟 X 線に対する安定性
 Stability of Amino Acid-Related Compounds against Soft X-rays
 in Simulated Interplanetary Dust Particles Environment

○ 川本幸徳¹、岡部拓人¹、大林由美子¹、金子竹男¹
 高橋淳一²、三田肇³、神田一浩⁴、小林憲正¹

(¹横浜国大院工、²日本電信電話株式会社、³福岡工大工、⁴兵庫県立大)

○ Y. Kawamoto¹, T. Okabe¹, Y. Obayashi¹, T. Kaneko¹, J. Takahashi², H. Mita³, K. Kanda⁴, K. Kobayashi¹

(¹Yokohama National University, ²NTT, ³Fukuoka Inst. Tech., ⁴University of Hyogo)

【緒言】地球に有機物を運び込んだ媒体として星間塵が注目されている。惑星間塵は隕石や彗星から生じたとされ、それらには星間で生成したアミノ酸前駆体を含む多様な有機物が含まれることが期待される。しかし惑星間塵は微小なため、太陽からの輻射に直接曝露される。本研究ではアミノ酸（イソバリンなど）、アミノ酸前駆体（ヒダントインなど）および陽子線照射により合成した複雑なアミノ酸前駆体（CAW）を固相でニュースバル BL-6 にて軟 X 線照射を行い、その安定性を比較した。

【実験】遊離のアミノ酸（イソバリン (Ival) など）とアミノ酸前駆体（ヒダントイン (Hyd)、エチルメチルヒダントイン (EMHyd)）、模擬星間物質に陽子線照射を行って合成した複雑なアミノ酸前駆体（CAW）をガラス板上に蒸着して作成した固相試料に、ニュースバル BL-6 にて、高真空状態（ $\approx 10^{-4}$ Pa）で赤外領域から軟 X 線領域の連続スペクトル光を照射した。照射後、超純水を用いて試料を回収し、陽イオン交換 HPLC によってアミノ酸試料の残存率を、逆相 HPLC によってヒダントイン試料の残存率をそれぞれ測定し、試料間の安定性を比較した。

【結果】Fig. 1 に Ival, Hyd, EMHyd, CAW の照射後の回収率を示す。回収率より、アミノ酸前駆体は遊離のアミノ酸よりも安定であることが確認された。よって、極端紫外光を含む軟 X 線による分解の影響が大きいような惑星環境（隕石表面、惑星間塵中）では、アミノ酸前駆体は遊離のアミノ酸よりも安定であるといえる。

また、照射による各試料の疎水的な生成物が確認された。疎水的有機物は彗星中での存在が確認されており、原始太陽系星雲における彗星や微惑星に取り込まれる前の惑星間塵中に含まれる有機物の、原始太陽からの強い紫外線を浴びることによって変性し、疎水的が増した可能性が考えられる。今後 XANES により、これら照射生成物の組成の評価を行う予定である。

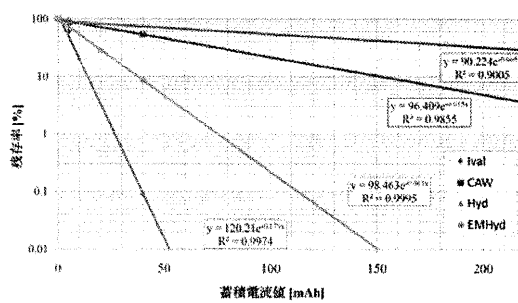


Fig. 1 Recovery ratio of each organic matter against soft X-ray.

蛇紋石による多環式芳香族炭化水素の吸着関係について

○橋爪秀夫¹¹ 物質・材料研究機構

化学進化の過程で、生体有機分子がどこで、どのようにして合成されたかについては様々な仮説がある。隕石や星間塵等にアミノ酸などが含まれることから、宇宙空間で生体有機分子が合成され、地球にもたらされたという仮説がある。宇宙空間での生体有機分子合成は非生体有機分子等の反応によると考えられる。隕石や星間塵に存在する非生体有機分子の多環式芳香族炭化水素(PAHs)等からの生体有機分子合成の可能性を調べている。隕石や小惑星中の芳香族炭化水素やPAHsが^{1, 2)}、光や熱等をエネルギー源とし、周りの鉱物や粘土鉱物等の触媒作用により生体有機分子になったと考えている。鉱物や粘土鉱物が有機物に対して触媒作用を示すかは、芳香族炭化水素やPAHsが鉱物や粘土鉱物に良く吸着するならば、その吸着剤は触媒になる可能性がある。今回は粘土鉱物にPAHsの吸着を行なったので報告する。

粘土鉱物はオマーン産の蛇紋石を用いた。また、PAHsは試薬のナフタレン(Nap)とアントラセン(Ant)、ピレン(Pyr)を用いた。これらのPAHsは僅かに溶解するため(表1)、適量を水に加え、超音波洗浄機で数時間攪拌し、その後一晩放置した。この上澄み液6cm³と蛇紋石25mgを密閉容器に入れ、2時間攪拌した後、遠心分離により固相と液相を分離し、初期の溶液と吸着後の液相を高速液体クロマトグラフ(HPLC)により分析した。

Napの吸着について、クロマトグラムのピークの高さ比では初期溶液に比べて、吸着後のピークの高さはほぼ半分になっていた。Antについては溶解度が表1に示すように非常に小さいため、初期溶液のAntのピークがノイズよりも僅かに大きい程度であった。吸着後の液相ではノイズのためにAntのピークの存在が確認できなかった。Pyrについては初期溶液に比べて、吸着後の上澄み液にPyrのピークと判断できるピークはなかった。このように、蛇紋石にこれらのPAHsは良く吸着することが分かった。今後、HPLCによりPAHsの検量線を作成し、吸着等温線を作り、さらに蛇紋石と共存するPAHsの熱による変化を調べる予定である。

参考文献 1) A. Shimoyama & K. Harada (1990) 物質の進化特別プロジェクト4 23.

2) 藪田ひかる (2008) Viva Origino, 36, 20.

表1 ナフタレンとアントラセン、ピレンの溶解度(mg/dm³)

PAHs	ナフタレン	アントラセン	ピレン
溶解度	31	0.043	0.14

氷衛星エンセラダスの熱水環境に対する実験的制約

○関根康人¹、渋谷岳造²、桑谷立¹、鈴木勝彦²

¹東大・新領域、²海洋研究開発機構・プレカンブリアンエコシステムラボラトリー

カッシーニ探査による最大の成果の1つは、土星の氷衛星エンセラダスの南極付近の割れ目から噴出する水プリュームの発見であろう[1]。一連のカッシーニ探査結果から、エンセラダスの内部にはエウロパと同じような液体の水でできた内部海が存在し、それが現在もしくは過去において岩石成分と触れ合っていたことはほぼ間違いない。エンセラダスには地球に存在するような海底熱水噴出孔はあったのだろうか？その温度条件は？生命の存続に必要な代謝エネルギーは生成されていたのだろうか？これまで空想の域を出なかった氷衛星内部海でのハビタビリティを、探査機や望遠鏡などにより直接観測できる、手の届く実証科学にしたエンセラダスプリュームの発見は衝撃的であり、上記のような疑問に答えるためには、従来の惑星科学のみならず地球化学や極限環境生物学の知見を総動員する必要がある。

本研究では、エンセラダス内部海における海底熱水活動の有無とハビタビリティを調べる目的のもと、内部海環境を模擬した熱水実験を行い、その結果とプリュームの観測結果との比較を行った。これまでの研究では、エンセラダス熱水環境での温度の指標として窒素分子の存否が議論されてきた[2]。土星系を形成した氷微衛星には窒素分子が含まれておらず、窒素は主にアンモニアの形で含まれていたことが分かっている。熱力学平衡計算によると、エンセラダス内部が高温（230℃以上）になるとアンモニアが熱的に分解し窒素分子を生成する。したがって、窒素分子がプリューム中に見つかれば、それは内部が高温になったことを示唆すると考えられてきた[2]。一方、近年のカッシーニの観測によると、プリューム中に窒素分子は見つからず[3]、上記の議論を踏まえると、このことは内部がずっと低温のまま保たれてきたことを示唆している[3]。しかしアンモニアが実際に分解されるかは、反応速度や鉱物の影響を考えなくてはならない。

本研究の実験の結果、エンセラダス内部では高温（300–400℃）でも、鉱物（オリビン）の蛇紋岩化がアンモニア分解よりも活発に起き、それによって大量に生成された水素分子（数10 mmol/L）により、アンモニアの分解が熱力学的に妨げられることがわかった。本実験結果が示す水素分子濃度は、カッシーニによる最新観測結果[4]とも調和的であり、また地球におけるレインボーやロストシティなどの超塩基性岩を宿主とする熱水噴出孔での水素濃度とも同程度である。このような熱水噴出孔では、供給される水素分子を代謝エネルギー源としてメタン生成菌を中心とした微生物群が育まれている[5]。本発表では、実験結果に基づき、エンセラダスが温度の高い熱水環境を持っていた可能性を示し、そこでのハビタビリティを議論する。

[1] Porco et al., *Science* **311**, 1393 (2006). [2] Matson et al., *Icarus* **187**, 569 (2007). [3] Hansen et al., *Geophys. Res. Lett.* **38**, L11202 (2011). [4] Waite et al. *LPSC abstract* **42**, 2818 (2011). [5] Kelly et al., *Science* **307**, 1428 (2005).

非晶質ケイ酸塩の水質変成実験による コンドライト変成過程における無機有機相互作用の研究

○野口 遼¹, 土山 明¹, 薮田 ひかる¹, 市川 聡²

¹大阪大学大学院理学研究科, ²大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター

炭素質コンドライトは太陽系初期の情報を記録している最も始原的な隕石である。中でもCIコンドライトは化学的に最も始原的である一方でその母天体で強い水質変成作用を受けていることが知られており、太陽系始原物質の進化を考える上でCIコンドライトの変成過程を理解することは重要である。我々は過去に太陽系始原物質の模擬物質としてCIコンドライト類似組成の非晶質ケイ酸塩の水質変成実験を行い水質変成過程で水/岩石比などが鉱物生成に影響を明らかにした[1]。本研究では炭素質コンドライト中に豊富に含まれる(～2wt%) [2]有機炭素が炭酸塩などの鉱物生成に影響を与えた可能性に注目し、コンドライト隕石の水質変成過程における無機有機相互作用の影響を明らかにする目的で、非晶質ケイ酸塩と有機物の水質変成実験を行った。

非晶質ケイ酸塩試料として鉄を含まないCIコンドライト類似組成を持つガラス($\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-Na}_2\text{O}$)をタングステン乳鉢を用いて砕いた粉末試料を用いた。有機物試料としてはコンドライト中に存在するアミノ酸のうち、含有濃度の高いグリシンとアラニンを変成度の低いGRA95229隕石中のアミノ酸存在比(1.00 : 2.56) [3]に基月混合したものを用いた。これらの出発物質をステンレスの耐圧ジャケットを外装したテフロン容器中に超純水(Milli-Q)と共に大気圧下で封入し150度で1～8週間加熱した。水/岩石の質量比は1.0及び5.0とした。加熱して得られた実験生成物を溶液と固体物質に分離し固体物質を真空中で乾燥した。固体物質の一部を24時間熱水抽出し、その溶液を高速液体クロマトグラフィーで分析した。残った固体物質は粉末X線回折(XRD)と電界放出型走査型電子顕微鏡(FE-SEM/EDX)を用いて分析した。

XRD及びFE-SEM/EDXによる分析結果より全ての実験条件で水質変成を受けたコンドライトに広く存在する saponite 及び serpentine が生成した事が分かった。加えてカルシウムの炭酸塩である aragonite が全ての条件下で生成した。過去に行った有機物を含まない実験では、水/岩石比が低い条件では aragonite が生成し、高い条件では calcite が生成したが、今回の実験では calcite は生成しなかった。Aragonite は隕石の水質変成過程の初期段階で生成し、より変成度の高い隕石中では calcite が広く存在することが知られている。本実験の結果は変成の初期段階で aragonite が生成する事と調和的である。高速液体クロマトグラフィーを用いた熱水抽出液の分析より、加熱時間の増加に伴ってアミノ酸の総量が減少する傾向が見られた。この結果は水質変成が進行したコンドライトほどアミノ酸濃度は低いことと調和的である。一方で、アラニン/グリシンの比は水質変成が進行するに従って減少した。これは水質変成が進行したコンドライトではアラニン/グリシン比が増加する事と逆の傾向である。

[1] Noguchi et al. (2011) 42th LPSC, abstract #1789

[2] Pizzarello et al. (2006) Meteorites and the Early Solar System II. 625-651

[3] Martians et al. (2007) Meteoritics and Planetary Science 42, 2125-2136

レーザー誘起絶縁破壊分光法 (LIBS) による鉱物の分類と定量： 月鉱物のその場測定に向けて

○石橋高¹, 荒井朋子¹, 和田浩二¹, 小林正規¹, 大野宗祐¹, 千秋博紀¹, 並木則行¹,
松井孝典¹, 亀田真吾², 長勇一郎³, 杉田精司⁴

¹千葉工大・惑星探査研, ²立教大・理, ³東大・理, ⁴東大・新領域

月・惑星の固体系探査は、一般に周回衛星によるリモートセンシング、着陸機とローバーによるその場観察、サンプルリターン、有人探査の段階を経て進められる。月に関してはリモートセンシングでの観測の段階はほぼ終了し、各国ともその場観察とサンプルリターンの計画段階へ移行している。現在我々は、将来の着陸機・ローバーへの搭載が期待される次世代の元素分析装置である、レーザー誘起絶縁破壊分光装置 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy 装置=LIBS 装置) の開発を進めている。レーザー照射によりプラズマ化した試料の発光を分光器で測定し、得られたスペクトルを解析することで対象物の元素濃度の定量が可能である。LIBS には、メートルスケールの遠隔分析が可能、測定時間が短い(数十秒～数分)、空間分解能が高い(数十～数百 μm)、試料の前処理が不要、試料表面のダストや被膜の除去が可能といった、数々の利点がある。しかし一方で、従来の元素分析装置に比べて定量精度がやや劣ると言われており、いかにして定量精度を上げるかが LIBS 開発における最大の焦点となっている。本発表では、LIBS により、月の鉱物の分類および含まれる元素の定量が可能であることを示す。

我々は現在、月の主要鉱物であるカンラン石と斜長石について、元素濃度の推定精度を調べる基礎実験を行っている。LIBS による元素濃度の推定手順は以下のとおりである。(i) 元素組成既知の鉱物(参照試料)のスペクトルを取得する。(ii) partial least squares (PLS) 回帰法を用いて元素濃度推定のための回帰モデルを作成する。(iii) 元素濃度未知の鉱物(未知試料)のスペクトルを取得する。(iv) PLS 回帰モデルを用いて未知試料の元素濃度を推定する。LIBS 測定では、試料の元素構成や物理状態が大きく異なると輝線強度が影響を受け(マトリックス効果)、元素濃度推定精度に影響を与える。したがって、未知試料に対して適切な参照試料を揃えることが、推定精度向上への大きな鍵となる。まだ数は少ないものの、これまでに準備した参照試料を適切に用いると、カンラン石と斜長石の組成(Mg#, An#)共に、相対誤差 5%以下での推定が可能である。今後、各鉱物の参照試料を充実させることで、元素組成推定精度のさらなる向上が期待される。

また、今回取得したカンラン石試料と斜長石試料の LIBS スペクトルを主成分解析(PCA)法で解析し、LIBS スペクトルの情報のみから鉱物の分類が可能であることを確かめた。カンラン石と斜長石はスコアプロット上で明確に分離され、さらには同じ鉱物でも物理状態の違いによる分類ができるということもわかった。したがって、LIBS による鉱物分析は、まず PCA 法により鉱物試料の組成範囲や物理状態の分類を行い、その領域の試料に適した参照試料セットを用いた PLS 回帰分析により元素濃度の推定を行う、という手順で進めることができる。

今回の結果は、LIBS 装置が月鉱物元素組成のその場分析装置として非常に有用であることを示している。

Olivine 組成メルト凝固における 結晶成長と Mg-Fe 分配の数値計算

○三浦均¹, 塚本勝男¹

¹東北大・理

隕石に見られるコンドリュールは、約 45.6 億年昔の初期太陽系において、mm サイズの珪酸塩ダストアグリゲイトが加熱・溶融したのち、急冷凝固して形成したと考えられている。その中に見られる olivine など珪酸塩結晶の形態や化学組成分布 (chemical zoning) は、コンドリュールの形成環境を推測する手がかりとなる。Chemical zoning の形成には、珪酸塩メルトの凝固において、結晶の成長とともに incompatible elements がメルト相に濃集する効果 (偏析) の重要性が指摘されている^[1,2]。一方で、固・液界面近傍に incompatible elements が濃集することで局所的に結晶成長速度が変化するが、それが結晶の形態や chemical zoning に及ぼす影響については良く調べられていない。本講演では、メルト相における incompatible elements の濃集と結晶成長ダイナミクスをフェーズフィールド法^[3]に基づいて自己無矛盾に数値計算することで、結晶成長条件と、形態・chemical zoning との関係を明らかにする試みについて報告する。

今回は、forsterite (Mg_2SiO_4) – fayalite (Fe_2SiO_4)系を想定した一方向凝固の数値計算を行なった。 x 方向に一樣な温度勾配 G を与え、低温側 ($x > x_i$) に結晶を、高温側 ($x < x_i$) にメルト相を配置した。結晶とメルトは界面 ($x = x_i$) で接しており、各相の初期組成として界面温度 T_i における平衡組成を与えた。その後、温度勾配を固定したまま全体の温度を一定の率 R_c で下げることで、等温線が一定速度 $V_T = R_c / G$ でメルト相側へと移動し、それに伴って結晶が成長する。数値計算は、 x 方向に対して垂直な y 方向も考慮した空間二次元で行なった。また、簡単のため、結晶化潜熱の影響は無視した。このとき、結晶中の組成分布と、界面不安定に伴って発生する樹枝状結晶 (セル構造) の間隔について調べた。

凝固の初期段階では、固・液界面は平らなまま凝固が進行した。このとき、結晶に取り込まれにくい Fe がメルト相に濃集し、固・液界面近傍に Fe-rich な層が形成された。Fe-rich 層の形成に伴って液相のリキダス温度が下がることにより、固・液界面の前進速度 V_i は等温線移動速度 V_T に対して著しく遅れを取った。結晶中の組成分布は、Fe-rich 層の形成と固・液界面前進速度の遅れを考慮した理論モデルと良く一致した。続いて、凝固がさらに進行すると、平らな固・液界面が不安定化し、多数の突起状構造が表れ、さらにセル状パターンへと変化した。セルの平均間隔 λ_{cell} は、冷却が遅いほど広くなり、 $\lambda_{\text{cell}} \propto V_T^{-0.5}$ の関係が得られた。また、セルの化学組成は非一様であり、中心から端に向かって Fe-rich となった。以上の計算結果は、barred-olivine (BO) コンドリュールの再現実験^[4,5]と定性的には調和的である。以上の結果は、BO コンドリュールに見られる olivine bars が、高速結晶成長に伴う界面不安定によって生じたことを示唆している。

参考文献: [1] Tsuchiyama, *Am. Miner.* **70**, 474 (1985). [2] Jones, *GCA* **54**, 1785 (1990). [3] Bi & Sekerka, *physica A* **261**, 95 (1998). [4] Lofgren & Lanier, *GCA* **54**, 3537 (1990). [5] Tsuchiyama et al., *GCA* **68**, 653 (2004).

著者索引：第一著者名（発表番号）

あ行		北里 宏平	S22-01P
安部 正真	S22-03	北島 富美雄	S12-09
荒川 政彦	S34-03, SP2-08P	木村 淳	SP2-03P
有本 龍三	S13-04	清兼 和紘	S23-02P
池崎 克俊	S34-02	栗山 祐太朗	S13-09
石黒 正晃	S11-05	黒崎 健二	S33-01
石津 尚喜	S23-05P	黒澤 耕介	S34-09
石橋 高	S35-05P	黒田 剛史	S21-02
石原 吉明	S13-07, S34-01P	洪 鵬	S33-03P
石山 謙	SP2-02P, S13-03P	小玉 貴則	S32-01
伊藤 孝士	S31-01P	小林 憲正	S35-04
岩田 隆浩	S22-09P	小松 睦美	S11-05P
上梶 真之	S22-07		
上本 季更	S13-01P	さ行	
臼井 文彦	S11-07	佐伯 和人	S22-08, S22-06P
梅本 隆史	S32-07	斎藤 正也	S31-05
浦川 聖太郎	S11-04	坂谷 尚哉	S35-01, S13-02P
海老名 良祐	S34-03P	佐々木 晶	S13-08
海老原 充	S12-04	佐々木 翔吾	S11-06P
大隈 裕一郎	S13-10	笹森 務仁	S32-08
大竹 真紀子	S13-05, SP2-01P	佐藤 丈仁	S21-01P
岡田 達明	S22-05, S22-04P	佐藤 毅彦	S22-11
岡田 英誉	S32-09	猿楽 祐樹	S11-02
岡本 尚也	S34-06	鳶生 有理	SP2-05P, S34-08P
岡元 太郎	S13-05P	末次 竜	S31-01, SP2-06P
岡本 千里	S34-01	杉原 孝充	S13-11
小川 和律	S22-10	鈴木 絢子	S34-04, SP2-04P
荻原 正博	S31-06	鈴木 貴之	S31-07
奥住 聡	S23-02	関口 朋彦	S11-06
押野 翔一	S33-03	関根 康人	S35-03P
小野瀬 直美	S34-07P	千秋 博紀	S11-04P
尾花 勝太	S31-03		
か行		た行	
門野 敏彦	S34-06P	高尾 雄也	S32-04
門屋 辰太郎	S32-02	高木 靖彦	S22-06
鎌田 俊一	SP1-01, SP1-01P	高橋 康人	S21-04
鎌田 慎也	S22-10P	高橋 悠太	S34-02P
亀井 亮祐	S21-02P	高橋 芳幸	S32-06
亀田 真吾	S21-01	瀧 哲朗	S23-08
河村 恵里	S23-10	瀧川 晶	S35-05
川村 太一	S13-12	竹内 拓	S23-09
川本 幸徳	S35-01P	武田 弘	S13-03
		橋 省吾	S12-11, S22-03P

田中 今日子 S23-07
 田中 智 S22-07P
 田中 秀和 S23-11
 谷川 享行 S23-01
 田村 隆哉 SP1-02, SP1-02P
 長 勇一郎 SP2-07P
 土山 明 S12-06
 寺居 剛 S21-05

な行
 長尾 敬介 S12-07
 永木 恵太 S34-08
 永野 宗 S11-08
 中村 昭子 S34-05P
 中村 智樹 S12-02
 奈良岡 浩 S12-10
 成田 憲保 S33-04
 野口 高明 S12-05, S12-08
 野口 遼 S35-04P
 納多 哲史 S32-05
 野村 英子 S23-01P

は行
 橋爪 秀夫 S35-02P
 長谷川 直 S11-01
 花山 秀和 S11-03, S11-01P
 羽山 遼 S34-07
 原田 雄司 S32-01P
 春山 純一 S13-06
 坂東 雄一 S13-04P
 樋口 有理可 S31-04
 平田 成 S22-04, S11-03P
 廣瀬 重信 S23-03
 藤田 航 S21-03P
 藤林 ゆかり S13-01
 藤谷 渉 SP1-03, SP1-03P

堀 安範 S33-02
 ま行
 町井 渚 S34-05
 松尾 花枝 S32-02P
 松野 淳也 S35-03
 松本 侑士 SP1-04, SP1-04P
 三浦 均 S35-06P
 三浦 保範 S13-02
 三浦 弥生 S22-02P
 三谷 烈史 S22-05P
 道越 秀吾 S23-03P
 武藤 恭之 S23-04P
 村上 英記 S22-08P
 森島 龍司 S23-04

や行
 保井 みなみ S35-02
 安井 佑貴 S31-02
 矢田 達 S12-01
 柳澤 正久 S34-04P
 山岸 明彦 S22-12
 山崎 布美香 S23-06
 山田 耕 S23-05
 山田 竜平 S22-09
 山本 聡 S34-10
 山本 哲生 S33-04P
 込本 尚義 S12-03
 吉川 真 S22-02
 吉田 二美 S11-02P

わ行
 渡部 潤一 S21-03
 渡邊 誠一郎 S22-01
 渡邊 吉康 S32-03

日本惑星科学会 賛助会員 一覧

アメテック株式会社カメカ事業部

シャープ株式会社

有限会社テラパブ

株式会社ニュートンプレス

(財)リモート・センシング技術センター

日本惑星科学会 2011 年秋季講演会実行委員会

実行委員長 加藤 學

実行委員 田中 智, 岩田隆浩, 安部正真, 岡田達明, 早川雅彦,
春山純一, 小林直樹, 矢野 創, 大竹真紀子, 飯島祐一,
白石浩章, 三谷烈史, 小川和律

印刷所 株式会社 芳文社

〒194-0033 東京都町田市木曽町 2320

TEL : (042) 792-3100

URL : <http://www.hobun-sha.com>

Email : hobun@pure.ocn.ne.jp