

# 日本惑星科学会 2016年秋季講演会 予稿集

2016年 9月12日(月)～14日(水)

ノートルダム清心女子大学 カリタスホール



## ●口頭発表プログラム

口頭発表の講演時間は特別セッション15分(3分間の質疑時間含む), 一般セッション9分(1分間の質疑時間含む)です。下記では講演開始時刻, 講演番号, 第一著者名, 和文表題を掲載しています。

### 9月12日

08:30-08:55 受付(8時30分より開場)

08:55-09:00 開催挨拶, 連絡事項

#### 特別セッション: 最優秀発表賞選考

(座長: 大竹 真紀子)

09:00 S01 系外惑星の大気透過スペクトルの多様性の解明:ヘイズ粒子の生成・成長・沈降の効果 川島 由依(東大)

09:15 S02 多様な巨大惑星リングの形成過程について 兵頭 龍樹(神戸大)

09:30 S03 原始太陽系円盤における非晶質フォルステライトからの含水鉱物ダスト形成:内惑星領域への水供給プロセス 山本 大貴(北大)

09:45 S04 エジェクタ速度分布スケール則の構築とはやぶさ2インパクター衝突による地形変化領域の考察 松榮 一真(神戸大)

10:00 S05 火星集積期における大気形成と水分配 齊藤 大晶(北大)

10:15 S06 高純度石英ガラスの磁気異方性 荻野理史(阪大)

10:30 S07 層状ケイ酸塩における太陽風プロトンの影響 仲内 悠祐(JAXA)

10:45-10:55 休憩

10:55-11:10 学生・PDポスターフラッシュ1

11:10-12:10 ポスターセッション1コアタイム

12:10-13:30 昼食

#### 口頭発表セッション1: 系外惑星

(座長: 中本 泰史)

13:30 O1-01 紫外線望遠鏡による低温度星周りの系外惑星酸素大気検出の検討 堀越 寛己(立教大)

13:39 O1-02 ホットジュピターの高層大気構造と質量放出率の時間変動性 田中 佑希(国立天文台)

13:48 O1-03 1次元放射流体計算による集積期巨大ガス惑星からの水素輝線強度の推定~巨大ガス惑星形成への観測からの示唆 青山雄彦(東大)

13:57 O1-04 リチウムに富んだ赤色巨星の検出と惑星飲み込み説の検証 國友 正信(名大)

14:06-14:10 座長交代

#### 口頭発表セッション2:

##### 原始惑星系円盤・ダスト進化

(座長: 城野 信一)

14:10 O2-01 54Cr 同位体比異常の成因:不均質な分子雲コア 中本 泰史(東工大)

14:19 O2-02 原始惑星系円盤における非平衡電離度を考慮したMHDシミュレーション 藤井悠里(コペンハーゲン大)

14:28 O2-03 電子加熱による原始惑星系円盤の磁気乱流の抑制 森 昇志(東工大)

14:37 O2-04 磁場駆動円盤風を考慮した原始惑星系円盤の進化 鈴木 建(東大)

14:46 O2-05 巨大惑星による原始惑星系円盤のギャップ構造の理論モデルの構築 金川和弘(シュチュェチン大)

14:55 O2-06 遷移円盤LkHa330に付随するスパイラル構造内での不均一なダスト成長 秋山永治(国立天文台)

15:04 O2-07 焼結ダストアグリゲイトにおける脆性塑性転移 城野 信一(名大)

- 15:13 O2-08 原始惑星系円盤における鉛直方向  
拡散によるダストアグリゲイトの焼結 児玉  
季里子 (名大)
- 15:22 O2-09 原始惑星系円盤形成段階の高空隙  
率ダストアグリゲイトの合体成長 本間 謙  
二 (東工大)
- 15:31 O2-10 原始惑星系円盤中の圧力バンプに  
おける岩石ダストの合体成長 瀧 哲朗 (国  
立天文台)
- 15:40 O2-11 低密度ダストの重力不安定による微  
惑星形成 道越 秀吾 (筑波大)

15:49-16:00 休憩

### 口頭発表セッション 3 : 惑星形成 I

(座長 : 小林 浩)

- 16:00 O3-01 大規模 N 体計算が切り拓く惑星形成  
I: PENTACLE (1,000 万粒子シミュレーションに  
向けて) 堀 安範 (アストロバイオロジー  
センター)
- 16:09 O3-02 大規模 N 体計算が切り拓く惑星形成  
II: 100 万粒子を用いた微惑星集積 押野 翔  
一 (国立天文台)
- 16:18 O3-03 惑星形成 N 体計算の大粒子数化に  
向けて: FDPS を用いた P3T 法の並列計算  
山川 暁久 (東工大)
- 16:27 O3-04 高次化メッシュフリー法の導入と変  
形への対応 山本 智子 (東工大)
- 16:36 O3-05 DISPH を用いた月形成巨大衝突のパ  
ラメーターサーベイ 細野 七月 (京大)
- 16:45 O3-06 小惑星形状の衝突進化: 弾性体  
SPH 法を用いた微惑星の衝突計算 杉浦  
圭祐 (名大)
- 16:54 O3-07 微惑星の衝突・破壊を考慮した地球  
型惑星形成 佐藤 雄太郎 (名大)
- 17:03 O3-08 衝突による惑星や衛星のコア・マン  
トル比の進化 小林 浩 (名大)
- 17:12-17:22 休憩

### 17:22-18:22 最優秀研究者 受賞講演 1

(司会 : 中本 泰史)

隕石有機物の起源と進化 : 太陽系初期進化  
への物質化学的アプローチ 癸生川 陽子  
(横浜国大)

### 9月13日

08:30 開場・受付

### 口頭発表セッション 4 : 惑星形成 II

(座長 : 荻原 正博)

- 09:00 O4-01 詳細な原始惑星系円盤進化を考慮  
した固体惑星集積シミュレーション 荻原  
正博 (国立天文台)
- 09:09 O4-02 巨大衝突によって形成される惑星系  
の構造 小久保 英一郎 (国立天文台)
- 09:18 O4-03 タンデム惑星形成論による原始地球  
物質モデル 二村 徳宏 (日本スペースガ  
ード協会)
- 09:27 O4-04 小惑星とカイパーベルト天体のサイ  
ズ分布から推察される初期微惑星サイズ  
森島 龍司 (カリフォルニア大)
- 09:36 O4-05 コンドリユールとマトリックス粒子の同  
時集積による岩石微惑星形成モデル 荒川  
創太 (東工大)
- 09:45 O4-06 進化するガス円盤中のペブル集積  
による地球型各惑星への水供給 山村 武  
(東工大)
- 09:54 O4-07 巨大衝突により生じるデブリ円盤か  
らの天王星の衛星形成 石澤 祐弥 (京大)
- 10:03 O4-08 周惑星円盤内での微衛星形成の困  
難 芝池 諭人 (東工大)
- 10:12 O4-09 捕獲された固体物質の周惑星円盤  
内での分布 末次 竜 (産業医科大)
- 10:21-10:30 休憩
- 10:30-10:45 学生・PD ポスターフラッシュ 2

10:45-11:45 **ポスターセッション2 コアタイム**

11:45-13:00 昼食

**口頭発表セッション5:**

**アストロバイオロジー・火星・金星**

(座長: 黒川 宏之)

13:00 O5-01 「あかつき」金星周回軌道における  
初期科学成果の概要 佐藤 毅彦 (JAXA)

13:09 O5-02 水溶液中におけるメタンディオール  
の分解反応: ONIOM(QM:MM)法による解明  
稲葉 知士 (早稲田大)

13:18 O5-03 氷衛星内部海でのクラスレートハイド  
レート形成に伴うアンモニウムイオンの取り  
込み 西谷 隆介 (阪大)

13:27 O5-04 火星大気中の元素・同位体組成による  
天体衝突と大気散逸史への制約 黒川 宏  
之 (東工大)

13:36 O5-05 火星地表水 pH の進化と安定性—  
Fe<sup>2+</sup>光酸化反応の理論的考察と室内実験  
田畑 陽久 (東大)

13:45 O5-06 球殻状鉄コンクリーションの形成数  
値シミュレーションと形成環境の制約 柴田  
拓真 (名大)

13:54 O5-07 南極産 CRコンドライト隕石の水質変  
成度と始原性の評価について 小松 睦美  
(総研大)

14:03 O5-08 室温付近での蒸発乾固の繰り返しに  
よるアデニンとリボースからのアデノシンの  
合成 橋爪 秀夫 (物質・材料研究機構)

14:12-14:15 座長交代

**口頭発表セッション6: 衛星・小天体**

(座長: 玄田 英典, 樋口 有理可)

14:15 O6-01 太陽系小天体における自転周期が  
表面重力場に与える影響 金丸 仁明 (阪  
大)

14:24 O6-02 火星衛星フォボス・ディモスの巨大衝

突説における形成可能性 兵頭 龍樹 (神  
戸大)

14:33 O6-03 楕円軌道惑星による小惑星の一時  
捕獲 -火星衛星系の起源解明にむけて-  
樋口 有理可 (東工大)

14:42 O6-04 火星衛星ダイモスのクレーター空間  
分布 平田 直之 (神戸大)

14:51 O6-05 火星の影響を受けた火星衛星表面  
の重力場と表層進化の関係 菊地 紘 (東  
大)

15:00 O6-06 セレスのクレーター形状と表層物性  
の推定 岡本 千里 (神戸大)

15:09 O6-07 セレスの内部海環境とその形成位置  
関根 康人 (東大)

15:18 O6-08 冥王星の暗い赤道領域はカロン形  
成巨大衝突で作れるか? 玄田 英典 (東  
大)

15:27 O6-09 西はりま天文台 NIC による地球近傍  
小天体(1566)Icarus の近赤外測光観測 櫻  
井 友里 (岡山大)

15:36 O6-10 1998年うしかい座流星群突発出現と  
1972年ジャコビニ流星群不発の謎の完全解  
明 佐藤 勲 (日大)

15:45 O6-11 あかり 3 $\mu$ m分光観測小惑星の YJHK  
分光観測 長谷川 直 (JAXA)

15:54 O6-12 天体表面温度による表層物理状態  
の推定手法の検討 坂谷 尚哉 (JAXA)

16:03-16:10 休憩

16:10-17:10 **総会**

17:10-18:10 **最優秀研究者 受賞講演2**

(司会: 中本 泰史)

衝撃蒸発実験から探る冥王代地球表層進化  
黒澤 耕介 (千葉工大)

18:10-18:30 移動

18:30-20:30 **懇親会** (ヨゼフホール)

21:00 完全退出

## 9月14日

08:30 開場・受付

### 口頭発表セッション7: 衝突・クレーター

(座長: 石橋 高)

- 09:00 O7-01 模擬低重力下における低速度クレーター形成実験: 微小重力下クレーターサイズに対するレゴリス粒子固着力の影響の推定 木内 真人 (神戸大)
- 09:09 O7-02 模擬氷天体地殻を用いた強度支配域のクレータースケール則に関する実験的研究 高野 翔太 (神戸大)
- 09:18 O7-03 ペネトレータを用いた天体表層の物性探査 岡崎 昌志 (神戸大)
- 09:27 O7-04 石英ガラス球の衝突破壊実験における斜め衝突の効果 吉田 優作 (神戸大)
- 09:36 O7-05 鉄質天体のクレーター深さ直径比の温度依存性: 軌道進化制約の可能性 小川 諒 (神戸大)
- 09:45 O7-06 室内実験によるレゴリス最表層密度進化の研究 大村 知美 (神戸大)
- 09:54 O7-07 小惑星イトカワのレゴリス粒子に存在するナノクレーターの観察 松本 徹 (JAXA)
- 10:03 O7-08 微小の室内衝突実験破片における3次元形状分布: ターゲット組織による影響 門川 隆進 (京大)
- 10:12 O7-09 「低速」高速度天体衝突による還元炭素化合物の生成 石橋 高 (千葉工大)
- 10:21 O7-10 衝突点極近傍から放出される高速放出物: 衝突実験と SPH シミュレーションの結果の比較 岡本 尚也 (千葉工大)

10:30-10:40 休憩

### 口頭発表セッション8: 月

(座長: 山本 聡)

- 10:40 O8-01 観測衛星によるハイパースペクトルリモートセンシングに基づく月地殻-マントルの構造の解明 山本 聡 (国立環境研)
- 10:49 O8-02 リモートセンシングデータを用いた月面に分布するカンラン石の起源推定 大竹 真紀子 (JAXA)
- 10:58 O8-03 月面クレータの地形緩和のタイムスケール 武藤 史樹 (名大)
- 11:07 O8-04 月のマグマ噴出量からみた火成活動の不均質性 田口 雅子 (名大)
- 11:16 O8-05 月のスコリア丘の形状からマグマの揮発成分の量を推測する試み 佐伯 和人 (阪大)
- 11:25 O8-06 月内部進化の初期温度依存性 小河 正基 (東大)
- 11:34 O8-07 赤外吸収分光法により検出される月隕石の水 鹿山 雅裕 (東北大)
- 11:43 O8-08 深海洋底とプレートテクトニクスの起源, 駆動力の解明, マルチインパクト仮説による月と地球深海洋底の起源 種子 彰 (SEED SCIENCE Lab.)

11:52-13:20 昼食

### 口頭発表セッション9: 探査 I

(座長: 千秋 博紀, 宮本 英昭)

- 13:20 O9-01 はやぶさ2の科学観測 渡邊 誠一郎 (名大)
- 13:29 O9-02 はやぶさおよびはやぶさ2試料キュレーションと地球外物質研究グループ 安部 正真 (JAXA)
- 13:38 O9-03 はやぶさ2搭載レーザー高度計によるアルベド観測のための炭素質隕石反射率測定 山田 竜平 (国立天文台)
- 13:47 O9-04 模擬画像作成のためのラフ地形モデル 千秋 博紀 (千葉工大)

- 13:56 09-05 含水鉱物による 700nm 吸収帯の分光撮像 高松 知広 (立教大)
- 14:05 09-06 JUICE/GALA-J (1) : JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) - 概要および日本チームの役割 塩谷 圭吾 (JAXA)
- 14:14 09-07 地球低周回軌道におけるアストロバイオロジー実験:たんぽぽ計画現況報告を中心に 小林 憲正 (横浜国大)
- 14:23-14:33 休憩
- 14:33 09-08 火星衛星探査ミッションとそのサイエンス 倉本 圭 (北大)
- 14:42 09-09 着陸機による火星環境探査の意義・戦略 白井 寛裕 (東工大)
- 14:51 09-10 火星着陸探査計画のための生命探査装置 山岸 明彦 (東京薬大)
- 15:00 09-11 MMXリモートセンシングによるフォボス分光観測と物質分布推定 中村 智樹 (東北大)
- 15:09 09-12 フォボスのレゴリスはどのような進化過程を経ているのか? 宮本 英昭 (東大)
- 15:18 09-13 フォボス表面の元素分析を行うためのLIBSを用いた隕石判別実験 堀内 美沙 (立教大)
- 15:27-15:37 休憩

## 口頭発表セッション 10 : 探査 II

- (座長: 道上 達広)
- 15:37 O10-01 月火星の地下空洞直接探査 UZUME 計画 春山 純一 (JAXA)
- 15:48 O10-02 UZUME 計画に向けて室内衝突実験からの考察~楕円クレーターと縦孔形成の実験的研究 道上 達広 (近畿大)
- 15:57 O10-03 スペクトルプロファイラデータ可視化 Web-GIS「月光」の機能拡張: 月面鉱物マッピングのための統計解析処理 飯村 彰太 (会津大)
- 16:06 O10-04 かぐや搭載スペクトラルプロファイラの観測点位置の高精度化 石原 吉明 (JAXA)
- 16:15 O10-05 宇宙科学研究所/月惑星探査データ解析グループの取り組みについて 大嶽 久志 (JAXA)
- 16:24 O10-06 着陸探査用その場元素分析・年代測定装置の開発 亀田 真吾 (立教大)
- 16:33 O10-07 Chang'e 3 ローバ搭載月地下レーダおよび SELENE 月レーダサウンダによって雨の海で観測された地下構造の比較 熊本 篤志 (東北大)
- 16:42 O10-08 月面探査機に向けた土質調査を行なう超小型ローバ 吉光 徹雄 (JAXA)
- 16:51 閉会

プログラムに関するお問い合わせは, 学会 LOC 宛 (下記メールアドレス) までお願い致します.

[aloc@wakusei.jp](mailto:aloc@wakusei.jp)

## ●ポスター発表プログラム

ポスターは 1 日目午前から 3 日目午前までの 2.5 日間掲示できます。下記では発表番号、第一著者名、和文表題をコアタイム毎に掲載しています。ポスターは最終日の午前中に撤収して下さい。

ポスター講演者のうち、学生・PD のご身分の方は、ポスターセッションコアタイム直前の「学生・PD フラッシュ」で 1 分間のフラッシュトークを行うことができます。該当者は、事前にフラッシュトークで使用する資料を送付して下さい（締め切り・送付メールアドレス等、送付要領は後日アナウンスします）。

### ポスターセッション 1

コアタイム 1 日目 (9/12) 11:10~12:10

- S01 系外惑星の大気透過スペクトルの多様性の解明：ヘイズ粒子の生成・成長・沈降の効果  
川島 由依（東大）
- S02 多様な巨大惑星リングの形成過程について  
兵頭 龍樹（神戸大）
- S03 原始太陽系円盤における非晶質フォルステライトからの含水鉱物ダスト形成：内惑星領域への水供給プロセス  
山本 大貴（北大）
- S04 エジェクタ速度分布スケール則の構築とはやぶさ 2 インパクター衝突による地形変化領域の考察  
松榮 一真（神戸大）
- S05 火星集積期における大気形成と水分配  
齊藤 大晶（北大）
- S06 高純度石英ガラスの磁気異方性  
荻野 理史（阪大）
- S07 層状ケイ酸塩における太陽風プロトンの影響  
仲内 悠祐（総研大）
- P1-01 ガス惑星における重力ポテンシャルによる二層分離の影響  
黒崎 健二（東大）
- P1-02 原始惑星系円盤内縁領域の温度構造の解析  
植田 高啓（東工大）
- P1-03 系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発  
山敷 庸亮（京大）
- P1-04 周火星円盤状大気による火星衛星前駆天体の抗力捕獲  
松岡 亮（北大）
- P1-05 高解像度ラージエディシミュレーションで得られた火星大気最下層における対流の微細構造  
村橋 究理基（北大）
- P1-06 2 極化した海惑星の表層環境：高圧氷形成による炭素循環への影響  
中山 陽史（東大）
- P1-07 MC-ICPMS を用いたコンドライト隕石の高精度 Mg 同位体分析  
早川 瑛庸（東大）
- P1-08 始原的炭素質コンドライト Acfer 094 のマトリクスの微細構造  
中藤 亜衣子（京大）
- P1-09 原始太陽系星雲における親鉄性元素の分別過程—コンドライト中の金属粒子の SIMS 分析  
比屋根 肇（東大）
- P1-10 マーチソン隕石およびアエンデ隕石に産する有機物のその場観察  
二村 徳宏（日本スペースガード協会）
- P1-11 室内実験による重複クレーター形状の研究  
横山 康喜（神戸大）
- P1-12 石膏球面にできる衝突クレーターからのエジェクタ破片放出過程に関する実験的研究  
鈴木 絢子（JAXA）
- P1-13 連続スペクトルデータを用いた月の海の鉱物量比推定手法の開発と適用  
加藤 伸祐（名大）
- P1-14 かぐや分光データの自動分類に基づく月全球分光特徴量マップで見えてきた大規模地質の特徴  
石原 吉明（JAXA）
- P1-15 月画像解析によるクレーター光条線長さの計測：Z モデルとの比較  
木下 敏輝（神戸大）
- P1-16 月スワール探索のための、月面模擬画像作成と月探査画像との一致度評価  
加藤 裕明（会津大）
- P1-17 地球近傍小天体 Icarus とその同一起源候補天体 2007 MK6 の観測  
浦川 聖太郎（日本スペースガード協会）

- P1-18 日本で発見された2重小惑星 佐藤 勲 (日大)
- P1-19 地球が宇宙の中心に位置していないのに、赤方偏移が何故 地球を中心として観測されるのか? 量子赤方偏移の仮説では、観測中心と云う理由でその謎が解明出来た。 種子 彰 (SEED SCIENCE Lab.)
- P1-20 地球と月のミッシングリンクを統一的に解明する、非常にユニークなアイデアによるマルチインパクト仮説 種子 彰 (SEED SCIENCE Lab.)
- P1-21 ティティウス・ボーデの法則の新証明と確認 (マルチインパクト仮説の根拠 種子 彰 (SEED SCIENCE Lab.))
- P2-09 「はやぶさ2」中間赤外カメラ TIR による巡航中の観測 岡田 達明 (JAXA)
- P2-10 火星探査の着陸候補地点の検討:火星環境進化の理解に向けて 関根 康人 (東大)
- P2-11 SLIM 搭載をめざしたマルチバンドカメラの開発現場と科学目的 佐伯 和人 (阪大)
- P2-12 BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション: MMO プロジェクト最新状況報告 早川 基 (JAXA)
- P2-13 JUICE-JAPAN 木星氷衛星探査計画:日本の狙うサイエンス 関根 康人 (東大)
- P2-14 JUICE/GALA-J (2): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA)が拓くサイエンス 木村 淳 (東工大)
- P2-15 JUICE/GALA-J (3): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における回線設計・性能モデルシミュレーション 石橋 高 (千葉工大)

## ポスターセッション 2

コアタイム 2 日目 (9/13) 10:45~11:45

- P2-01 将来の地下空洞直接探査に向けた月面及び縦穴内での放射線線量評価 長岡 央 (早稲田大)
- P2-02 月の溶岩流研究と縦穴探査の意義 諸田 智克 (名大)
- P2-03 月表面掘削探査用のオンサイト質量分析システム 豊田 岐聡 (阪大)
- P2-04 将来測地観測によるフォボス内部構造の制約 松本 晃治 (国立天文台)
- P2-05 はやぶさ NIRS データを用いた小惑星イトカワの近赤外スペクトルマップ作成 稲澤 朋生 (会津大)
- P2-06 はやぶさ2小型着陸機 MASCOT の投下運用シミュレーション 那須 翔太郎 (会津大)
- P2-07 小惑星 Ryugu のポテンシャル高分布と地形の予測 平田 成 (会津大)
- P2-08 会津大学宇宙情報科学クラスターの取り組み 出村 裕英 (会津大)
- P2-16 JUICE/GALA-J (4): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) におけるエレクトロニクス・検出器関連開発 小林 正規 (千葉工大)
- P2-17 JUICE/GALA-J (5): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) の逆モンテカル口法による放射線損傷評価 小林 進悟 (量子科学技術研究開発機構)
- P2-18 JUICE/GALA-J (6): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における受光部の光学/構造/熱設計 塩谷 圭吾 (JAXA)
- P2-19 超小型ロケット飛翔型探査ロボット Shooting Scouter 加藤 裕基 (JAXA)
- P2-20 重力天体着陸探査に向けた元素分析装置「能動型蛍光 X 線分光計」の開発 長岡 央 (早稲田大)
- P2-21 ソーラー電力セイルによるトロヤ群小惑星の探査計画 岡田 達明 (JAXA)
- P2-22 月・火星の縦孔・地下空洞探査(UZUME 計画)のアストロバイオロジ的意義 小林 憲正 (横浜国大)

# 系外惑星の大気透過スペクトルの多様性の解明： ヘイズ粒子の生成・成長・沈降の効果

○川島由依<sup>1</sup>、生駒大洋<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター

惑星の大気組成を知ることは、その惑星の熱進化や形成過程などを解明する上でも重要である。近年、系外惑星の大気組成の制約を目的として、多波長トランジット観測が盛んに行われている。これは、惑星のトランジット時に起きる恒星光度の見かけの減光率が波長によって異なることを利用したものである。この減光率の波長依存性（大気透過スペクトルという）から、惑星大気組成を制約できる。

ところが、最近の多波長トランジット観測により、大気分子による吸収の特徴のない平坦なスペクトルが複数の系外惑星について検出されている。これは、ヘイズのような粒子が大気中に存在することを示唆する。また、観測された大気透過スペクトルには多様性が見られる。近赤外域は平坦であるが、可視域にレイリー散乱の特徴を示すスペクトルや、近赤外域に分子や原子の吸収特徴を示すスペクトルも見られる。

ヘイズの存在を考慮した大気透過スペクトルモデルに関する先行研究はいくつかある。しかし、そのどれも、ヘイズ粒子の前駆物質からヘイズ粒子への成長を解いておらず、ヘイズ粒子の粒径と数密度、ヘイズ層の高度と厚さをパラメータとして扱っており、その値には必ずしも物理的な根拠があるとは言えない。

そこで本研究では、トランジット観測がなされるような中心星近くに存在する惑星を想定し、ヘイズ粒子の空間分布と典型的なサイズを求めるため、大気中のヘイズ粒子の生成と成長、沈降を考慮した理論モデルを新たに独自に開発した。具体的には、光化学計算と粒子成長計算を行うことにより、光化学反応によるヘイズ粒子の前駆物質（高次の炭化水素化合物）の生成と、前駆物質の合体成長・沈降によるヘイズ粒子の生成を考慮した。そして、独自に開発したスペクトル計算コードを用いて、得られたヘイズの特性を基に、大気透過スペクトルをモデル化した。ヘイズ粒子の生成・成長・沈降過程を自己整合的に考慮した大気透過スペクトルモデルは世界初である。

結果として、ヘイズ粒子は先行研究が仮定していたよりも広い範囲で分布すること、また、様々なサイズのヘイズ粒子が大気中で生成されることを発見した。さらに、上述の大気透過スペクトルの多様性を、中心星から受ける紫外線照射量と関係するヘイズ粒子の前駆物質の生成率の違いにより、再現することに成功した。ヘイズの存在は、気体分子の吸収の特徴を隠し、大気組成の制約を妨げる場合がある。そのようなヘイズの生成・成長・沈降過程を自己整合的に考慮し、惑星の大気組成や紫外線照射量と、ヘイズを持つ大気の透過スペクトルを関連付けたことで、本研究は系外惑星大気研究に新たな進展をもたらしたと言える。

## 多様な巨大惑星リングの形成過程について

○兵頭龍樹<sup>1,2</sup>, Sébastien Charnoz<sup>2</sup>, 大槻圭史<sup>1</sup>, 玄田英典<sup>3</sup>

<sup>1</sup>神戸大学理学研究科, <sup>2</sup>Institut de Physique du Globe/Université Paris Diderot,  
東京工業大学・地球生命研究所

巨大惑星周りのリングには非常に豊かな多様性が存在する。例えば、土星リングは99%が水氷からなっており、他の巨大惑星リングに比べて非常に大きな質量を持っている。一方、天王星や海王星のリングは暗く、水氷のみでなく岩石も多く含まれていると考えられている。

さらに、近年の巨大惑星周りの規則衛星形成論によると、過去にリングは現在よりも多くの質量を保持しており、それらが拡散進化することで衛星に集積したと考えられている (Crida&Charnoz 2012, Hyodo et al. 2015, Hyodo&Ohtsuki 2015)。現在のところ、リング形成メカニズムがいくつか提案されたものの、上述の事項を説明するには至っていない。

一方、ニースモデルによると後期重爆撃期 (Late Heavy Bombardment) において巨大惑星は、複数の巨大カイパーベルト天体 ( $\sim 10^{22}$  kg) と近接遭遇を経験する。本研究では、SPH 計算を用いて初期に周太陽軌道である分化したカイパーベルト天体 ( $10^{21-23}$  kg) が巨大惑星への近接遭遇時に潮汐破壊され、巨大惑星周りに多量の破片が捕獲されることを明らかにした。さらに、N 体計算を用いて捕獲後の長期的な進化を調べることで、最終的に多様なリングが形成されうることを示した (Hyodo et al. 2016)。

## 原始太陽系円盤における非晶質フォルステライトからの 含水鉱物ダスト形成：内惑星領域への水供給プロセス

○山本大貴<sup>1</sup>、橘省吾<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>北海道大学大学院理学院

原始太陽系円盤において、水蒸気とケイ酸塩ダストとの反応で形成される含水鉱物は、スノーラインより内側領域での水のキャリアとなり、内惑星領域への水の供給候補物質となる。しかし、結晶質 Mg ケイ酸塩と水蒸気との反応は遅く、原始太陽系円盤ガス存在の時間スケールで含水鉱物は形成されないと考えられてきた (e.g. [1])。しかし、赤外分光観測や始原的地球外物質研究から、原始太陽系円盤に非晶質ケイ酸塩ダストが存在していたことが予測される。熱力学に不安定な非晶質ケイ酸塩は、結晶質ケイ酸塩より高温で準安定相として含水鉱物を形成する可能性に加え [2]、水蒸気との反応を効率的に起こすことで、原始太陽系円盤で含水鉱物ダストを形成する可能性がある。

本研究では、原始太陽系円盤での非晶質ケイ酸塩と水蒸気と反応による含水鉱物形成の可能性を検証するための実験をおこなった。出発物質に熱プラズマ法より合成された非晶質フォルステライトナノ粒子を用い、温度 50–100°C、水蒸気圧 0.1–1 bar の条件でおこなった。加熱後試料の粉末 X 線回折と透過型電子顕微鏡観察の結果から、含水相として serpentine ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) と brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) の形成を確認した。赤外吸収スペクトルからは、Si-O 伸縮振動に対応した 10  $\mu\text{m}$  吸収帯及び OH 伸縮振動に対応した 2.7  $\mu\text{m}$  吸収帯の時間変化が観察された。10  $\mu\text{m}$  吸収帯のスペクトルフィッティング及び 2.7  $\mu\text{m}$  吸収帯面積を用いた反応進行度の定量化から、非晶質フォルステライトと反応層との界面での含水鉱物形成反応が律速段階であることが明らかになった。また、反応の活性化エネルギー $\sim 20 \text{ kJ mol}^{-1}$  及び頻度因子 $\sim 3.9 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ を得た。

異なる水蒸気圧での実験結果から、低圧の原始太陽系円盤では、含水鉱物形成速度がダスト表面の水分子被覆率に依存すると予測される。実験条件での界面における含水鉱物形成フラックスと原始太陽系円盤での表面への水分子衝突フラックスの比較から、原始太陽系円盤でダスト表面は吸着平衡に達していると考えられる。Serpentine 表面の水分子吸着等温線から [3]、水分子吸着に伴う Gibbs 自由エネルギー変化を見積もり、Langmuir 吸着平衡定数を用いて、各温度、水蒸気圧での表面被覆率を予測した。得られた表面被覆率に実験で求めた界面反応速度を組み合わせ、原始太陽系円盤での非晶質フォルステライトダストからの含水鉱物形成モデルを構築し、原始太陽系円盤条件での非晶質フォルステライトダストからの含水鉱物形成反応の時間スケールを温度、圧力の関数として求めた。含水鉱物の脱水及び非晶質フォルステライト結晶化の時間スケール、ならびに円盤寿命との比較から、原始太陽系円盤で非晶質フォルステライトダストから含水鉱物形成が起こりうることを示され、スノーラインより内側領域で水を含む固体ダストが存在しうることが明らかになった。この結果はさらに、非晶質ケイ酸塩ダストを豊富に含む炭素質コンドライト隕石の母天体は、含水鉱物を形成しないスノーライン外側領域で集積した可能性も示唆する。

[1] B. Fegley & R. G. Prinn (1989) in *The Formation and Evolution of Planetary Systems*, 171-211.

[2] D. Yamamoto et al. (2015) *LPSC abstract*, 1930. [3] M. N. Mautner (1999) *Icarus*, 137, 178-195.

## エジェクタ速度分布スケール則の構築とはやぶさ2 インパクト衝突による地形変化領域の考察

○松榮 一真<sup>1</sup>, 荒川 政彦<sup>1</sup>, 保井 みなみ<sup>1</sup>, 辻堂 さやか<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>

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

**はじめに:** はやぶさ2搭載の小型搭載型衝突装置(SCI)により形成される人工クレーターは、サンプル採取や小惑星 Ryugu 内部の観測に利用される予定である。一方、形成されるクレーターのサイズ、エジェクタ速度分布、さらには衝突振動による周囲の地形変化は Ryugu の表層構造に依存するため、観測結果から Ryugu の表層構造を同定するためには、様々な物性を持つ表層に対する衝突実験が必要である。そこで、我々はこれまでレゴリス層を想定した Ryugu 表面に対して、砂標的を用いた室内実験を行い、低速度域(〜200m/s)でのエジェクタ速度分布を調べた[1]。しかし、SCI の衝突速度は〜2km/s であるため、高速度域での衝突実験が必要となる。従って本研究では、衝突速度( $v_i$ )0.2〜6.9km/s の高速度域で石英砂標的に対して衝突実験を行い、クレーターサイズとエジェクタ速度分布のスケール則を調べた。さらに、このエジェクタ速度分布と以前行った衝突励起振動の実験結果[2, 3]を踏まえて、SCI 衝突の際に生じる地形変化領域について考察した。

**実験方法:** 衝突実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には、直径4.7mmのポリカーボネイト球と7種類の密度が異なる(2.6-14.9g/cm<sup>3</sup>)直径2mmの球を用いた。標的試料には直径約500 $\mu$ m(空隙率:40%)の石英砂を用いた。衝突により形成されるクレーターの様子は、高速ビデオカメラを用いて毎秒2,000コマで撮影した。この動画の解析から、放出される個々の石英砂粒子の軌跡を決定することで、次のような放出位置(衝突点と放出点の距離: $x$ )と放出速度( $v_e$ )の関係性を求めた: $\frac{v_e}{\sqrt{gR}} = a \left(\frac{x}{R}\right)^{-1/\mu}$  (1)。また、衝突実験後にレーザー変位計を用いてクレーターサイズ( $R$ )やそのプロファイルを調べた。なお、チャンバー内は〜10Paで真空引きしている。

**実験結果:** エジェクタ速度分布(1)の傾きを決める $\mu$ は、弾丸密度が大きくなると徐々に大きくなった。これは低速度衝突の結果と同様である[1]。ただし、 $\mu$ は高速衝突の方が低速衝突より系統的に小さくなった。一方、 $a$ は弾丸密度に係わらず0.7とほぼ一定であった。ここで、SCI衝突が及ぼすRyugu上での地形変化について考察するため、銅球弾丸の実験結果を用いて、クレーター周りのエジェクタ堆積物の厚さ分布を見積もった。小惑星 Ryugu の表面が石英砂に似た物性のレゴリス層で覆われていると仮定し、2kgの銅球を速度2km/sで衝突した時の堆積物の厚みを調べた。この実験のクレータースケール則から、クレーター半径は約5.8mとなり、Zモデルから計算したエジェクタ堆積物の厚みはクレーター半径の2倍の距離(〜12m)で約16mmとなった。すなわち、この領域では1cm以下のラフネスは消失する可能性が高い。一方、衝突励起振動を計測した実験結果より[3]、衝突時に発生する加速度がRyuguの地表面加速度を超える領域が半径430mとなり、そのうち1cmを超えて粒子が巻き上がる領域は半径約29mとなることがわかった。この結果、SCI実験では、1cm程度のラフネスはクレーター半径の約5倍の領域では平滑化されることが予想される。

[1] Tsujido et al., 2015, Icarus 262, 79-92 [2] Yasui et al., 2015, Icarus 260, 320-331

[3] 松榮 他, 惑星科学会, 2015, Matsue et al., in prep

## 火星集積期における大気形成と水分配

○齊藤大晶, 倉本圭

北大理

最新の火星隕石の分析結果によると、現在の全岩火星の平均水濃度はおよそ 137 ppm と推定され (McCubbin et al., 2016), これを質量に換算するとおよそ  $5 \times 10^{19}$  kg になる. 火星ではプレートテクトニクスなどによる表層物質のマントルへの還流はほとんど働かなかったと考えられるため、火星内部の水は集積中にもたらされた可能性が高い. 集積中に大量の水を内部に取り込む機構の一つとして、集積エネルギーの解放によって形成される高温の原始大気からマグマオーシャンへの水の溶解が挙げられる. しかしながら集積中にそのような原始大気やマグマオーシャンがいつどのように形成され得るのかについてはよくわかっていない.

近年の隕石年代学によると、火星は太陽系最古のCAIの形成から 1.8 ( $\pm 1.0$ ) Myr 以内に現在の質量の約50%に成長し、同時にコア形成が進んでいたと推定されている (Dauphas and Pourmand, 2011). このことは原始太陽系星雲中で火星の集積が進行したことを示唆している. このような状況下で原始火星の質量が月質量以上に達すると、星雲ガスを原始大気として纏うようになる. 同時に、微惑星の衝突速度が  $\sim 1$  km/s を超えるようになり、微惑星から  $H_2O$  をはじめとする揮発性成分が脱ガスを開始し、原始大気に取り込まれると考えられる. つまり、星雲ガスおよび脱ガス成分の双方からなる混成型原始大気の形成が予想される.

そこで我々は1次元放射対流平衡モデルを構築し、混成型原始大気の熱的構造について調べた. 集積時間は隕石年代学と調和的な数値を与えた. 火星材料物質は、二成分モデル (Wänke and Dreibus, 1988) を適用した. 脱ガス成分の組成は衝突加熱により生じる珪酸塩マグマ、金属鉄、ガス間での熱化学平衡組成を与える. 脱ガス成分は平均分子量が大きく高密度なことから大気下層を占め、その上空に Hill 半径において原始太陽系星雲に接続する星雲ガス ( $H_2$ -He) 大気が存在するものとする. また、地表面温度が 1500 K を超えると、マグマオーシャンが形成すると仮定した. 大気中の水蒸気圧に応じてマグマに水が溶解し、一度マグマオーシャンに分配された水は、集積中には再脱ガスしないものとした.

原始大気の進化を数値的に求めた結果、集積最終段階では地表面気圧  $\sim 2000$  bar, 地表面温度  $\sim 2500$  K もの高温高压な大気が形成する. 惑星質量が現在の  $\sim 0.2$  倍に達した時点でマグマオーシャンが形成し、集積完了時までこの状態が持続する. 最終的に火星内部には約  $4 \times 10^{21}$  kg の水が分配される. この振る舞いは集積時間にほとんど依存しない. また、材料物質中の脱ガス成分の混合比を数分の1に減少させたとしても、およそ  $10^{21}$  kg 以上の水が分配される. 火星隕石が示唆する含水量は、高温高压の原始大気に覆われたマグマオーシャンの形成により説明することができる. 今回は水のみを考慮したが、実際には他の分子種も一定量マグマに溶解するはずである. 集積完了時の厚い大気は、星雲が晴れた後に強力な太陽極端紫外線によってそのほとんどが宇宙空間へ散逸し、温暖湿潤であったとされるノアキス期に推定されている数 bar の初期火星大気は、集積中にマグマへ溶解した揮発性物質の再脱ガスによりもたらされた可能性がある.

## 高純度石英ガラスの磁気異方性

○荻野理史<sup>1</sup>, 植田千秋<sup>2</sup>, 久好圭治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大阪大学大学院理学研究科

分子雲コアや星形成領域に存在する星間磁場は、ダストから惑星に至る進化を支配する主要な要素の一つであると考えられている。その星間磁場の観測方法の一つに偏光観測がある。これは、磁場により整列した星間ダストがスリットの役目をはたして偏光する、というものである。しかし、磁場によるダスト整列機構の完全な解明には未だ至っておらず、偏光観測による磁場の定量的観測はできていない。そこで本研究では、磁気異方性によるダストの磁場整列機構の検証にあたる。この機構は、ダストのもつ磁気異方性 $\Delta\chi$ により磁氣的トルクが生じ整列するというものである。しかしダストのほとんどは等方的とみなされる非晶質シリケートであるため、この機構は適さないと考えられてきた。ところが、不純物として含まれる磁性イオンによって非晶質シリケートにも磁気異方性 $\Delta\chi$ をもちうるということが先行研究[1]により明らかになった。また磁性イオン以外にも、固化直前のシリケートメルトの伸長などによっても磁気異方性 $\Delta\chi$ をもちうるということがわかった。

そこで本研究では固化直前の変形による磁気異方性を研究すべく、磁性イオンのなるべく少ない高純度の石英ガラス (Fe 濃度 0.2ppm) を原材料とし、伸長、膨張させながら急冷したものを試料として $\Delta\chi$ 測定、磁化測定を行った。このとき、試料が引き伸ばされる方向と測定磁場の方向が平行か垂直で違いを見たところ、明らかに平行方向の方が大きい磁化になることがわかった。つまり、試料の引き伸ばされる方向が磁化容易軸であり、それに垂直な方向が磁化困難軸である。さらに磁化測定から得られる磁化曲線が常磁性に特徴的な曲線を描いた。通常ガラスは反磁性であり、何もドーピングしていないガラスが常磁性を示す報告は前例がない。また、原子レベルでの磁性解明のために ESR 測定も行った。結果、E' 中心という種類の欠陥が生じていることがわかった。この欠陥によるラジカルに起因して磁気異方性が生じた可能性が考えられる。これらの実験を基に、星形成領域における非晶質ダストが整列に必要な磁気異方性をもちうる条件を考察する。

[1] Yokoi et al: Planet. Space Sci. (2014)

## 層状ケイ酸塩における太陽風プロトンの影響

○仲内 悠祐<sup>1</sup>, 松本 徹<sup>2</sup>, 安部 正真<sup>1,2</sup>, 土山 明<sup>3</sup>, 北里 宏平<sup>4</sup>, 鈴木耕拓<sup>5</sup>, 中田 吉則<sup>5</sup>

<sup>1</sup>総合研究大学院大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup>京都大学,

<sup>4</sup>会津大学, <sup>5</sup>若狭湾エネルギー研究センター

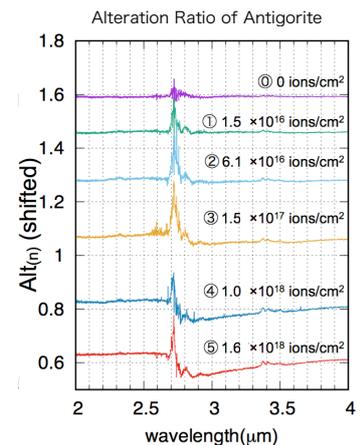
炭素質コンドライトの母天体と考えられている小惑星の表層物質決定には、それらの反射スペクトルの比較が有用である。炭素質コンドライトの反射スペクトルは  $3\ \mu\text{m}$  帯にそれぞれ特徴的な吸収形状を持つため、反射スペクトルを用いて隕石タイプの分離が可能であると考えられる。しかし、近年の月探査データの解析結果から、太陽風プロトンが小天体表層の反射スペクトル(特に  $3\ \mu\text{m}$  帯)の吸収形状を変化させる可能性が示されている(e.g. Pieters et al., 2009, Ichimura et al., 2012)。この相互作用は小惑星表層においても観測される可能性が十分にあり、 $3\ \mu\text{m}$  帯を用いた表層物質の決定に影響を及ぼす可能性がある。そこで、炭素質コンドライトに含まれる鉱物を用いて太陽風プロトンの影響を調べた。

本研究では、若狭湾エネルギー研究センターのマイクロ波イオン源イオン注入装置を用いて  $\text{H}_2^+(10\text{keV})$ イオンビームを  $10^{16} - 10^{18}\ \text{ions/cm}^2$ の間で段階的に照射した。さらに、FTIRを用いてそれぞれの照射量に対して反射スペクトルを取得した。試料にはペレット状にした antigorite の単鉱物試料と antigorite と olivine の混合試料を用いた。

antigorite に対する照射実験の結果から、反射スペクトルの段階的な変化を測定した。反射スペクトルの幾つかの波長の特徴的な変化から、antigorite に照射されたプロトンは下記のような段階を踏んで結晶中に取り込まれることがわかった。

1. antigorite 結晶中にもともと存在する OH 基の減少
2. 上記の OH 基の減少に加え、新たに  $\text{H}_2\text{O}$  の生成
3.  $\text{H}_2\text{O}$  の生成は継続 (上記の OH 基の減少は見られない)

さらに、olivine へ対する照射実験では約  $10^{17}\ \text{ions/cm}^2$ 程度で反射スペクトルの変化は止まってしまうことが示唆されている(Schaible and Baragiola, 2014)のに対し、antigorite では約  $10^{18}\ \text{ions/cm}^2$ で飽和することがわかった。また、混合試料においても約  $10^{18}\ \text{ions/cm}^2$ で反射スペクトルの変化は飽和することが確認された。このことから含水鉱物が存在する小惑星表層では、太陽風プロトンによる宇宙風化作用の影響をより強く受け、月面の反射スペクトルで見られた変化に比べ反射スペクトルの変化量が大きくなると予想できる。



図：それぞれの照射量における、反射スペクトルの変化量。解析には Ichimura et al. (2012) の手法を用いた。

## 紫外線望遠鏡による低温度星周りの系外惑星酸素 大気検出の検討

○堀越寛己<sup>1</sup>、亀田真吾<sup>1</sup>、村上豪<sup>2</sup>、生駒大洋<sup>3</sup>、成田憲保<sup>4</sup>

<sup>1</sup>立教大学理学部、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、<sup>3</sup>東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、<sup>4</sup>国立天文台

1995年に系外惑星が発見されてから数多くの観測が行われ、検出された惑星の数は現時点で3000を超えている。今後は地球近傍の低温度星(3000~4000K)周りに数多くの惑星が検出される見込みである。また、一部の惑星では地球から見て主星の手前を惑星が横切る際に、主星の光を遮蔽するトランジット現象を利用して、大気組成に関する情報が得られている。大気を持たない惑星のトランジット時の主星光の減光率は波長に依存しないが、大気を持つ惑星の場合、大気中に含まれる原子・分子が特定の波長の光を吸収・散乱するため、分光観測によって大気組成に関する情報が得られる。

我々は低温度星のハビタブルゾーンに地球、金星、火星が存在すると仮定し、各惑星大気中の酸素原子の検出可能性を検討した。恒星の紫外線は惑星大気中の分子を解離・電離させ、特に極端紫外線(EUV)は大気加熱源となる。しかし、波長40~91.2nmのEUV放射は星間空間中に存在する水素によって吸収・散乱されてしまうので観測できない。我々はLinsky et al. (2014)で示されている水素ライマン $\alpha$ 線(波長122nm)強度とEUV強度の関係式を用いて、低温度星のハビタブルゾーンにおけるEUV強度を推定し、Kulikov et al. (2007)とTian et al. (2008)で示されている太陽のEUV放射強度を変化させた場合の地球、金星、火星の酸素原子密度分布を用いて、各惑星の酸素原子柱密度を計算した。結果として、低温度星のハビタブルゾーンに地球が存在した場合、高高度まで高密度な酸素原子が広がるため、OI輝線(波長130nm)でトランジット観測すると金星や火星がトランジットした場合に比べてトランジット深さが非常に大きくなることが示された。従って、小型の紫外線宇宙望遠鏡(~20cm)による観測でも、地球と金星、火星は区別することが可能であり、数回トランジット観測すれば低温度星のハビタブルゾーンに存在する地球の酸素原子大気を検出することが可能であることが示された。

NASAやESAで提案されている将来計画における観測波長域は可視~赤外のみである。そこで我々は系外惑星観測に特化した紫外線宇宙望遠鏡の開発を進めている。

# ホットジュピターの高層大気構造と質量放出率の 時間変動性

○田中佑希<sup>1</sup>, Christiane Helling<sup>2</sup>, 鈴木建<sup>3</sup>, 犬塚修一郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>国立天文台, <sup>2</sup> University of St Andrews, <sup>3</sup> 東京大学, <sup>4</sup> 名古屋大学

太陽系外惑星の中には、中心星に極めて近い軌道を公転するガス惑星が存在し、その質量や半径に応じてホットジュピターやホットネプチューンなどと呼ばれている。短周期でサイズが大きいホットジュピターは比較的観測しやすい対象であり、特に様々な波長帯でのトランジット観測からはホットジュピターの大気組成や大気構造の様子を探ることが出来る。

中心星に近い高温の惑星からは、大量の質量放出が発生している事が分かってきており、また高温の水素ガスからなる希薄な超高層大気を持つことも分かっている。これらの特徴は、ホットジュピターなどの紫外線領域、特にライマンアルファ線でのトランジット観測によって明らかにされている。これらの観測によると、ホットジュピターの高層大気からは大気が超音速で流出しており、これまでに HD 209458b や HD 189733b など4つのホットジュピターと1つのホットネプチューンからの質量放出が検出されている。

このような質量放出を駆動する機構としては、中心星からの強いX線と極端紫外線(XUV)放射による高層大気の加熱モデルが提案されている。しかし、観測から示唆されている高層大気構造や質量放出率の大きな時間変動性の起源の説明など、既存のモデルでは依然として理解が不十分な部分も存在する。

ここでは、惑星大気中での磁気流体波動の散逸が駆動する、高温のガス惑星からの質量放出現象に注目する。惑星が磁場を持ち、大気に一定の擾乱が存在した場合は、惑星表面で磁気流体波動が駆動される。磁気流体波動が上空へ伝播して散逸することで高層大気を加熱し、ガスの流出を駆動することが出来る。我々はこの過程を、数値計算を用いて検証した。ホットジュピターに典型的と考えられるパラメータを与えて数値計算を行ったところ、磁気流体波動が惑星の高層大気中で散逸することによって、高層大気構造や質量放出率には大きな時間変動が発生することが判明した。従って、我々が提案しているメカニズムは、ホットジュピター等の系外惑星における質量放出現象において重要な役割を果たしていると考えられる。

# 1次元放射流体計算による 集積期巨大ガス惑星からの水素輝線強度の推定 ～巨大ガス惑星形成への観測からの示唆

○青山雄彦<sup>1</sup> 谷川享行<sup>2</sup> 生駒大洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>2</sup>一関工業高等専門学校

惑星の形成過程や形成環境を制約するためには、形成途中の惑星を観測することが重要である。最近、原始巨大ガス惑星 LkCa 15b から強力な H $\alpha$  輝線が検出された (Sallum et al. 2015)。この輝線は惑星へ集積するガスに由来すると考えられるが、その発生機構および発生量については理解されていない。このような水素の輝線が放射されるためには、数万 K を超える高温ガスが必要である。しかし理論的に推定される惑星や周惑星円盤の黒体温度は、観測可能な強度の輝線を放射する温度に達しない。最新の 3 次元流体計算(e.g. Tanigawa et al. 2012)では、周惑星円盤に鉛直に集積するガスが非常に強い衝撃波を形成することが示された。このようなガスは加熱後速やかに冷却されるため黒体温度には影響しないが、強い水素輝線を放射すると考えられる。

そこで本研究では、集積するガス流の衝撃波後面の温度構造と輝線放射を数値計算し、H $\alpha$  の発生量を定量した。この領域の主な冷却過程は輝線放射であるため、温度構造と輝線の放射を同時に計算する必要がある。これを実現するため、化学反応・水素の電子準位遷移・輝線の放射吸収を含む 1 次元流体計算を行った。

結果としてライマン系列の水素輝線は強く吸収され、多くのパラメータで H $\alpha$  輝線が強く放射されることがわかった。この H $\alpha$  輝線は観測可能な強度である。また、観測された輝線強度から、形成途中の惑星質量とガス集積率を制約する式を得た。

# リチウムに富んだ赤色巨星の検出と惑星飲み込み説の検証

○ 國友正信<sup>1</sup>, Elisa Delgado Mena<sup>2</sup>, Vardan Adibekyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup> ポルト大学

近年の高分散分光観測により、リチウムが過剰に存在する赤色巨星はこれまで数十個検出されている。この原因として、これまで Cameron-Fowler 機構による星内部でのリチウム生成、惑星の落下（惑星飲み込み）によるリチウム注入、伴星からの質量輸送などいくつかの説が提唱されているが、どれが主要な機構であるかははっきりしていない。もし仮に惑星飲み込みがリチウム過剰を引き起こしている場合、その系での惑星系の形成・進化過程の痕跡が赤色巨星の表面組成に残されていることを意味するため、この起源を理解することは重要である。そこで我々は観測・理論双方から惑星飲み込み説の検証を行った。まず、これまで惑星探索が行われた 12 の星団に属する 67 の赤色巨星に対し、高分散分光観測を行い組成を決定した。その結果、リチウム過剰な赤色巨星を新たに 3 天体発見した。興味深いことに、そのうち 2 つ（NGC 4349 No. 127, NGC 2423 No. 3）は惑星を保持するクランプ巨星であることが知られている。従って、これらの系では惑星形成が行われたことを示しており、形成された短周期惑星が飲み込まれた可能性がある。さらに、恒星進化計算と惑星の軌道進化計算を組み合わせ、これらの系で惑星飲み込みが起こった可能性について理論的検討を行った。赤色巨星周りの惑星の軌道は、主に中心星変形潮汐と中心星の質量損失により変化する。恒星進化コード MESA (e.g., Paxton et al., 2011) を用いて上記の 2 天体と同じ質量、金属量を持った星の進化を計算し、その周りでの惑星の軌道進化を計算した。その結果、どちらの天体でも過去数千万年の間に惑星が飲み込まれた可能性は非常に低いことがわかった。我々は今後すばる望遠鏡を用いて 2 天体の高分散分光観測を行い、Be にも過剰が見られるかを調査することで、リチウム過剰の原因に迫る予定である。

## $^{54}\text{Cr}$ 同位体比異常の成因：不均質な分子雲コア

○中本泰史<sup>1</sup>，竹石陽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学

隕石中の  $^{54}\text{Cr}$  には同位体比異常があることが知られている。また、それには隕石母天体の形成年代と相関があるという報告がある (Sugiura and Fujiya 2014)。一方で、CAI 中の  $^{54}\text{Cr}$  には大きな同位体比異常があることも報告されている (Trinquier *et al.* 2009)。こうした同位体比異常や年代との相関は、原始太陽系星雲の形成と進化、固体微粒子の運動や経験した熱的過程、微惑星の形成過程などと関係があるはずであり、その成因を明らかにすることは、太陽系の形成初期段階を解明する上で、重要な意味を持つと思われる。そこで本研究では、この同位体比変動および隕石母天体形成時間との相関を作り出すメカニズムを検討した。

本研究では、太陽系を作った分子雲コアの内部で、固体微粒子に含まれる  $^{54}\text{Cr}$  同位体比の空間的不均質である場合を仮定する。分子雲コアの重力収縮に伴い円盤が形成され、さらに円盤は独自に力学的進化をする。このとき、ガス中に含まれる固体微粒子はガスの流れに乗って移動すると同時に、ガス中の乱流によって拡散もする。ただし、固体状態を維持したままでは初期の同位体比から変わることはない。一方で、固体微粒子は高温領域に達すると完全に蒸発する。その後、温度が下がると蒸気は凝縮し固体微粒子になるが、このとき、同位体比は均質化する。こうした固体微粒子の運動や蒸発・再凝縮などを計算することにより、円盤内の場所と時刻の関数として、その場に存在する固体微粒子群の  $^{54}\text{Cr}$  同位体比の変動を調べた。モデルのパラメータは、分子雲コアの初期回転角速度（角運動量）と円盤内の乱流粘性の強さを表す無次元パラメータ  $\alpha$  の2つである。

計算の結果、初期分子雲コア内の同位体不均質を仮定するこのモデルで、 $^{54}\text{Cr}$  の同位体比異常および隕石母天体の形成年代との相関が説明できるパラメータの組があることがわかった。すなわち、 $^{54}\text{Cr}$  の同位体比異常は、初期分子雲コア中の不均質に起因している可能性がある。今後は、他の元素の同位体比異常との関係、ダストの成長との関係なども考慮して検討する必要があるだろう。

Sugiura, N. and Fujiya, W. 2014, MAPS 49, 772

Trinquier, A. *et al.* 2009, Science 324, 374

## 原始惑星系円盤における非平衡電離度を考慮した MHDシミュレーション

○藤井悠里<sup>1</sup>、Oliver Gressel<sup>1</sup>、奥住聡<sup>2</sup>、富田賢吾<sup>3</sup>、鈴木建<sup>4</sup>、犬塚修一郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ニールス・ボア研究所、<sup>2</sup>東京工業大学、<sup>3</sup>大阪大学、<sup>4</sup>東京大学、<sup>5</sup>名古屋大学

原始惑星系円盤は銀河宇宙線、中心星からの紫外線やX線、放射性核種の崩壊による $\gamma$ 線等により弱く電離されていることが知られている。ガスが十分に電離していると、磁気回転不安定性(magnetorotational instability; MRI)によって円盤が乱流状態になり角運動量が輸送される。このため、円盤の乱流状態は円盤進化において非常に重要である。また、MRIによって円盤表面からの質量損失である円盤風が駆動されることも明らかにされている。このようなMRIによる円盤の力学的進化を理解するためには、円盤の各領域での電離状態を正しく把握することが重要である。

電離度の計算は計算コストが高いため、流体計算とは別になされることが一般的である。磁気流体力学(magnetohydrodynamic; MHD)シミュレーションをする際には、電離度の平衡解が広く用いられている。しかし、円盤表面付近の密度が低い領域や、ダストが大きく成長した際には化学反応が平衡に達するタイムスケールよりも流体が進化する力学的タイムスケールの方が小さくなるため、平衡解が必ずしも成り立つとは限らない。よって、本研究では電離度を同時に解きながらMHDシミュレーションを行った。進化後期のガスが少なくなった円盤において局所シミュレーションを行った結果、円盤風によって円盤内部の電離度が低いガスが表面付近に持ち上げられることが分かった。しかし、持ち上げられたガスが遠紫外線によって直ちに電離される場合には、電離度の非平衡性が顕著でないことも分かった。円盤の全体像をつかむためには大規模計算が不可欠であるため、非平衡電離度計算を組み込んだグローバルシミュレーションの開発も行なっている。講演ではその進捗状況についても報告する。

## 電子加熱による原始惑星系円盤の磁気乱流の抑制

○ 森 昇志<sup>1</sup>、村主 崇行<sup>2</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>、犬塚 修一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学、<sup>2</sup> 理化学研究所、<sup>3</sup> 名古屋大学

原始惑星系円盤の乱流は、惑星形成論において不定性の大きい要因である。乱流はダストから微惑星にいたるまでの固体物質の運動に影響を及ぼす。円盤内の乱流は、磁気回転不安定が成長したことで生成される磁気乱流であると考えられている。しかし、低電離度では磁気回転不安定が安定化される。そのため磁気回転不安定によって乱流が発生されるかどうかは、電離度に大きく依存する。

本研究では、電子加熱による電離度変化に着目する。電子加熱は、磁気乱流中の電場によって電子が加熱される効果であり、ダストへの吸着を促進し電離度を下げる働きを持つ。電子加熱によって十分電離度が減少すれば、円盤中の磁気乱流は抑制されると期待される。電子加熱はこれまで見落とされていた効果であり、円盤の乱流構造を大きく変える可能性がある。しかし、電子加熱が起きたときの乱流状態やどれほど乱流を抑えるかは明らかでない。

我々は電子加熱の乱流抑制効果を定量的に調べるために、電子加熱によって電気抵抗が増幅する効果を単純な解析的なモデルで模擬し、磁気流体シミュレーションを行った。その結果、電子加熱によって電流密度が低い値に抑制されればされるほど、降着応力が減少することを確認した。また、電子加熱の効果がよく効く時、磁気乱流は全く起きず、定常的な層流状態になることを発見した。そのときの降着応力は整列した磁場によるマクスウェル応力が支配的である。そして最終的に、このシミュレーション結果と、マクスウェル応力と電流密度間のスケール則の両方から、電子加熱時の降着応力の予言公式を得た。つまり、電子加熱領域において、飽和状態の電流密度から、降着応力を与えることができる。これによって、電子加熱領域における降着応力を解析的に計算できるようになった。

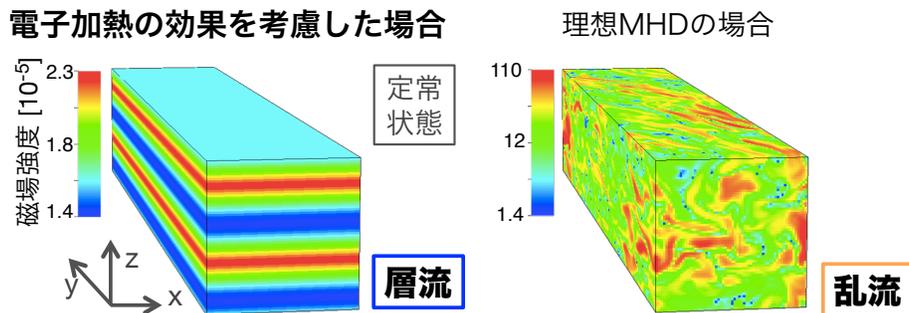


図 1: 電子加熱を考慮した時と考慮しなかった時の定常状態における磁気流体計算結果の比較。色は磁場の大きさを表している。

# 磁場駆動円盤風を考慮した原始惑星系円盤の進化

## Evolution of Protoplanetary Discs with Magnetically Driven Disc Winds

鈴木 建<sup>1,2</sup>, 荻原 正博<sup>3,4</sup>, Alessandro Morbidelli<sup>4</sup>, Aurélien Crida<sup>4,5</sup>, Tristan Guillot<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 名古屋大学, <sup>3</sup> 国立天文台, <sup>4</sup> Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS,

<sup>5</sup> Institut Universitaire de France

原始惑星系円盤は弱電離プラズマであり、磁場がその動力学や進化に影響を与えている。本発表では、磁気乱流等に起因して駆動される円盤風が、原始惑星系円盤の進化に与える影響を調査した研究結果を紹介する。

粘性加熱を考慮した標準的な降着円盤モデルに、磁場駆動円盤風による質量損失と角運動量損失を取り入れ、原始惑星系円盤の時間進化を追う。モデル計算では、乱流による実効的粘性強度、円盤風の質量流束、円盤風による角運動量損失が3つのパラメーターとなっており、これらには我々や他グループによりこれまで行われた磁気流体数値シミュレーションの結果を用いる。但しここで、円盤風の質量流束が降着円盤の大局的なエネルギー保存を矛盾なく満足するようモデルを構築しており、これが本研究の特色の1つである。

上記の乱流および円盤風パラメーターは、円盤を貫く縦磁場強度や電離度という、各円盤の物理環境に依存している。このことを踏まえ、広いパラメーター範囲での計算を行い、その結果、原始惑星系円盤の面密度進化は非常に多様なものとなった。特に、円盤風による角運動量抜き取りが効果的に効く場合、円盤面密度進化は通常粘性降着の場合と大きく異なるものになった。具体的には、内側のガス円盤が円盤風および降着により非常に効果的に消失し、面密度が中心星から離れるに従い大きくなるという、通常とは逆の傾向が得られた。このような進化を経る原始惑星系円盤では、コア降着機構による惑星形成機構で問題となる、岩石サイズの固体成分の中心星への落下や原始惑星の内側への移動が、大きく抑制、もしくは、全く発現せず、惑星の形成や進化にも大きく影響を与えることとなる。このような進化を経る原始惑星系円盤で、コア降着機構による惑星形成がどのように進むかについても論じる予定である。

## 巨大惑星による原始惑星系円盤のギャップ構造の理論モデルの構築

○金川和弘<sup>1</sup>, 田中秀和<sup>2</sup>, 武藤恭之<sup>3</sup>, 谷川享行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>シェチュエン大学, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>工学院大学, <sup>4</sup>一関高等専門学校

原始惑星系円盤内で十分に成長した惑星は周囲の円盤ガスとの重力相互作用によってガスを吹き飛ばし、惑星軌道に沿ったリング状にガス密度が減少した領域(ギャップ)を作る。このような巨大惑星によって形成されたギャップ構造は、ALMA や Subaru 望遠鏡と言った大型望遠鏡によって多数発見されているリング状の隙間を持つ「前遷移円盤」の形成を説明する有力な説の一つであり、原始惑星系円盤のギャップ構造は惑星の存在を示すものとして着目されている。

原始惑星系円盤の惑星形成領域の直接撮像観測が盛んに行われている現状において、観測された原始惑星系円盤ギャップの深さや幅といった構造からギャップ内に存在する惑星についての程度制限を与えられるのかを検討することは極めて重要である。

本研究では、2次元流体シミュレーションを様々な惑星質量、円盤温度や粘性について系統的に行い、その結果を基に惑星によるギャップ形成にとって重要な物理過程である密度波の伝播・減衰過程をモデル化し、2次元シミュレーションの結果を良く再現する動径1次元の惑星ギャップのガス密度分布の理論モデルを構築した。

本講演では、このモデルを紹介すると共に、ギャップの深さ・幅関係や面密度分布の勾配から惑星質量を見積もる方法を議論する。

また、現在発見されているギャップ構造はダスト連続光の観測で見つかったものが主である。ダスト粒子は円盤ガスから受ける摩擦力のため、サイズの大きなダストほどガスの分布と異なる分布になる。

そのため、惑星によって作られるギャップの深さ・幅も異なる。

本研究では、ガス・ダストの2流体での流体シミュレーションを行い、ダストギャップの幅と深さがガスギャップのものとどれほど異なるのかを調べた。

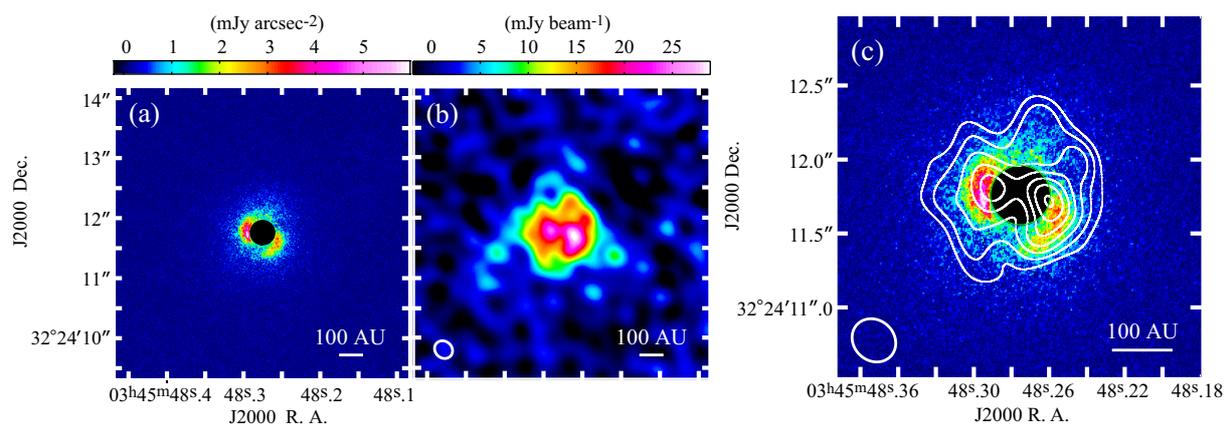
本講演ではこの結果についても紹介したい。

## 遷移円盤 LkHa330 に付随するスパイラル構造内での不均一なダスト成長

○秋山永治<sup>1</sup>、橋本淳<sup>2</sup>、Liu, Haoyu Baobabu<sup>3,5</sup>、Li, Jennifer I-Hsiu<sup>4,5</sup>、Bonnefoy, Michael<sup>6,7</sup>、  
田村元秀<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台、<sup>2</sup> アストロバイオロジーセンター、<sup>3</sup> ヨーロッパ南天天文台、<sup>4</sup> イリノイ大学、  
<sup>5</sup> 台湾中央研究院、<sup>6</sup> マックスプランク研究所、<sup>7</sup> グルノーブル大学

ダスト成長は惑星形成の第一歩である。我々は、原始惑星系円盤内のダスト分布を調査するため、0.1-1 ミクロンサイズのダストの散乱光を捉える H バンド高解像度偏光観測とミリメートルサイズのダスト放射を捉える 0.88mm 連続波高解像度観測を中質量星 LkHa330 に付随する原始惑星系円盤に対して行った。その結果、H バンドの観測では一対の非対称な渦状腕構造が検出され、連続波観測でも空間的に分解していないものの渦状腕と同じ位置に南北に伸びた構造と東西に非対称な構造を検出した。観測された非対称構造において、べき乗分布で表した質量吸収係数のべき数( $\beta$ )を調査した結果、円盤の東側では星間空間の典型値である  $\beta = 2.0 \pm 0.5$  が算出されたが、西側では  $\beta = 0.7^{+0.5}_{-0.4}$  が得られ東側より優位に小さいことが分かった。このことから、渦状腕で進行速度の異なるダスト成長もしくは西側でダスト捕獲が起きていることが推測される。今後、センチ波の観測及び最新の AO を用いた Y から K バンドでの偏光観測で円盤の様々なサイズのダスト分布を明らかにしていく予定である。



(a)は Subaru 望遠鏡で観測した H バンドの画像、(b)は SMA で観測した 0.88mm の連続波画像、(c)は(a)と(b)のイメージを重ねた拡大画像を示す。2 $\sigma$ 間隔で 8 から 20 $\sigma$  をコンターで表している。(b)と(c)のパネル左下に合成ビームを示す。

## 焼結ダストアグリゲイトにおける脆性塑性転移

○城野信一<sup>1</sup>, 上野春太<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup> 日立ソリューションズ

惑星系の形成は、サブミクロンサイズのダスト微粒子の付着成長から始まる。中心星から比較的離れた領域では温度が低いので、ダスト微粒子の体積のかなりの部分はH<sub>2</sub>Oを始めとする氷が占める。氷の揮発性は高いので、周囲のガスへの昇華とガスからの再凝縮を繰り返す。昇華と再凝縮により氷分子はダスト微粒子間の結合部に移動する。このプロセスは焼結と呼ばれる。ダスト微粒子間に分子が移動すると、微粒子間の力学的相互作用の様子が変化し、ダスト微粒子集合体（アグリゲイト）の力学物性が変化する。焼結が進んでいないアグリゲイトでは微粒子間の転がりによってアグリゲイト全体として塑性変形することができ、衝突の際の運動エネルギーを効率的に散逸され合体が促進される。それに対して焼結が進行すると、アグリゲイトは固くなり、衝突してもはね返ったり破壊したりする。そこで本研究では焼結の度合いを系統的に変化させ、衝突の結果に対する影響を調べた。その結果、微粒子間結合部の半径÷微粒子の半径 で表される焼結度合いが0.4-0.5で衝突の結果が合体から破壊に変化することが分かった。この焼結度合いを実現するためには、微粒子全体の約1%に相当する体積が結合部に移動する必要がある。H<sub>2</sub>O、もしくはH<sub>2</sub>O以外に含まれている氷の存在度はこれ以上である場合が十分あり得るので、焼結がアグリゲイトの合体成長に大きな影響を与えることが予想される。

# 原始惑星系円盤における鉛直方向拡散による ダストアグリゲイトの焼結

○児玉季里子<sup>1</sup>, 城野信一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院環境学研究科

ダスト微粒子の付着成長が惑星形成の第一ステップであるので、ダスト微粒子が付着成長できるか否かを知ることは惑星形成論において非常に重要である。ダスト微粒子には氷ダストと岩石ダストがあるが、本研究では氷ダスト微粒子に注目する。氷ダストアグリゲイトは加熱されると焼結と呼ばれるプロセスが進行する。焼結とは表面積が小さくなる方向に物質が移動する現象である。焼結により、ダスト粒子間の結合部であるネックが成長する。焼結したダストアグリゲイトは衝突の際に跳ね返りもしくは破壊を起こすので、焼結の進行が惑星形成に影響することが指摘されている(Sirono (2011), ApJ, 735, 131).

原始惑星系円盤での熱源は中心星の可視光照射である。赤道面付近のダスト粒子によって照射は遮られるため、円盤表面のダスト粒子の温度は高くなる。そのため、乱流によって氷ダストアグリゲイトが高温の円盤表面付近に輸送されると、焼結が進む可能性がある。Sirono (2011)では、赤道面の温度分布から焼結に必要なタイムスケールが示されている。しかし、氷ダストアグリゲイトが鉛直方向に運動している場合での焼結タイムスケールは明らかにされていない。そこで本研究では、数値シミュレーションによりダストアグリゲイトの鉛直方向の運動を算出し、焼結に必要なタイムスケールを求めた。

その結果、焼結タイムスケールは高温領域までの距離が増加するにつれ長くなることがわかった。また、焼結タイムスケールのダストアグリゲイトのサイズへの依存性は小さく、乱流の強さに強く依存することがわかった。一方で、円盤表面の高温領域までの距離はダストアグリゲイトのサイズに依存している。成長によりダストアグリゲイトが沈殿すると、高温領域までの距離は短くなる。そのため、ダストアグリゲイトがあるサイズまで成長すると、鉛直方向拡散による焼結によってダストアグリゲイトの成長は阻害されることが予想される。そこでWatanabe & Lin (2008), ApJ, 672, 1183の式を用いて高温領域までの距離を算出し、本研究の焼結タイムスケールから焼結領域を求めた。その結果、乱流の効果が強い時、Sirono (2011)で求められた焼結領域の外側に新たな焼結領域が、出現することがわかった。

# 原始惑星系円盤形成段階の 高空隙率ダストアグリゲイトの合体成長

○ 本間謙二<sup>1</sup>、中本泰史<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学理学院

微惑星は惑星のビルディング・ブロックとなる天体であり、微惑星がいつ、どのように形成されるのかを明らかにすることは、太陽系や系外惑星系の理解に非常に重要である。微惑星は原始惑星系円盤（以後、“円盤”と呼ぶ）中の $\mu\text{m}$ サイズの固体微粒子（ダスト）が合体成長し、形成されると考えられているが、その形成過程は未だ明らかにはなっていない。例えば、メートルサイズのダストがガス円盤中でガスによる抵抗力を受け、角運動量を失って中心星へ落下してしまう中心星落下問題は重要な問題である。一方、空隙率の大きいダストアグリゲイトは中心星への落下を回避し、微惑星へと合体成長しうることが示唆されている (Okuzumi et al. 2012)。しかしながら Okuzumi et al. 2012 では、ガス円盤の時間進化は考えられていない。実際にはダストの合体成長は円盤形成時から起きていると考えられるため、分子雲コアの崩壊からの円盤形成とダストの合体成長を同時に考える必要がある。またそのような時期では、ガス円盤の進化のタイムスケールはダストの成長のタイムスケールと比較できるくらいに短くなるので、ガス円盤の進化がダストに与える影響を調べることは非常に重要である。

本研究では、分子雲コアの崩壊から円盤の粘性進化を含めた円盤モデルを用いて、高空隙率ダストアグリゲイトの合体成長計算を行いサイズ分布の進化を調べた。その結果、分子雲コアから直接質量降着がある軌道半径（遠心力半径）より内側では、ダストは合体成長により微惑星サイズへと成長することが分かった。このことは、微惑星は分子雲コアの崩壊から数10万年で形成され得ることを示唆する。また微惑星へと成長するダストには一度ガスとともに軌道の外側に運ばれた後、成長し中心星へのドリフトを経験し遠心力半径まで戻ったところで微惑星へと成長するものがあることがわかった。これはガス円盤進化のないモデルでは見られなかった結果であり、このようなダストの動径方向へのダイナミックな運動からの微惑星形成過程は、ダストの物質的進化にも影響を与えることが期待される。

# 原始惑星系円盤中の圧力バンプにおける 岩石ダストの合体成長

○ 瀧 哲朗<sup>1</sup>, 奥住 聡<sup>2</sup>, 藤本正樹<sup>3,4</sup>, 井田 茂<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> 東工大, <sup>3</sup> ISAS/JAXA, <sup>4</sup> 東工大 ELSI

岩石微惑星は地球型惑星の材料と考えられているため、その形成過程を理解することは惑星系形成論において重要である。現在のところ微惑星形成の理論には2つの代表的な困難が存在する。ひとつは、成長したダストに対する原始惑星系円盤からのガス抵抗が、ダストを中心星方向に急速に移動させてしまうという「中心星落下問題」である (Adachi et al., 1976)。もうひとつは、円盤内で駆動されるダストの相対速度が、ダストが合体成長可能な速度を上回ってしまうというもので「衝突破壊問題」と呼ばれている (Blum & Munch, 1993)。岩石微惑星の場合、その形成を決定的に困難にしているのは衝突破壊問題である。典型的な原始惑星系円盤のモデルにおいて、円盤内で駆動されるダスト間の相対速度は合体成長可能な速度に比べて1桁程度も大きい。

本研究では圧力バンプ (Whipple, 1972; Haghhighipour & Boss, 2003) と呼ばれる原始惑星系円盤内の局所構造におけるダストの相対速度の変化と合体成長に注目した。圧力バンプにはダストを捕獲・濃集させる能力があり、その捕獲・濃集過程において円盤ガスの圧力勾配が非常に小さい領域を形成する (Taki et al., 2016)。そのような領域ではダストの中心星落下は遅くなり、またガスの乱流強度も弱まる (Takeuchi et al., 2012)。ダストの相対速度の主な起源としては、ダストの中心星落下と円盤内の乱流を考えれば良いが、圧力バンプはこれらを起源とする相対速度を同時に下げることができる。

今回、我々は圧力バンプにおけるダスト-ガス系のダイナミクスとダストサイズの自己無到着な進化を調べるために、円盤動径方向の1次元モデルを用いた数値実験を行った。その際、圧力勾配の進化を考慮した乱流強度を用いることで、圧力バンプ内部ではサイズ進化の過程を通じて岩石が合体成長可能な相対速度を維持できることを調べた。さらに圧力バンプではダストの空間密度が高いためにダストの成長が促進される。この効果によって、圧力バンプを通過するダストは「衝突破壊」と「中心星落下」の両方の問題を回避し、合体成長が卓越するサイズ領域まで成長できる可能性が示唆された。

## 低密度ダストの重力不安定による微惑星形成

○道越秀吾<sup>1</sup>, 小久保英一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>筑波大学 <sup>2</sup>国立天文台

ダストの合体成長の結果、多孔質で低密度なダストが形成される可能性が指摘されている。平均密度はおおよそ  $10^{-5} \text{ g cm}^{-3}$  まで低下する。一方で、微惑星の密度は典型的には  $1 \text{ g cm}^{-3}$  であるため、ダスト成長により微惑星が形成された場合は、ダストは圧縮される必要がある。自己重力による静的な圧縮過程を考慮すると、成長しながら圧縮し十分に密度が高まることが報告されている。本研究では、自己重力により静的圧縮をしながらダストが成長していく段階において、理論モデルを用いてダストの運動を詳細に調べ、微惑星へと成長するとき重力不安定が発生するかどうか検討した。自己重力不安定が発生すれば、動的タイムスケールで重力で束縛されたダスト集合体が形成されるため、付着成長だけの場合と比べて微惑星が著しく早く形成される可能性がある。

原始惑星系円盤の赤道面付近にダストが集まっている状況を仮定した。また、研究の第一歩として簡単のため、全てのダストが同じ質量と密度を持っているとした。ダスト系のランダム速度は、ガスとの摩擦、乱流との相互作用、重力散乱、粒子間衝突などにより変化する。これらの効果を考慮して、平衡ランダム速度を求めた。ダスト系の自己重力不安定に対する安定性を調べるため、平衡ランダム速度から Toomre の  $Q$  を求め、様々なパラメータに対する安定条件を調べた。

まずは、中心星からの距離が 5 AU で、ダストやガスの面密度が最小円盤質量モデルで与えられる場合を考えた。乱流の強さを表す  $\alpha$  は  $10^{-3}$  とした。そして、様々なダスト質量や密度の場合で  $Q$  を計算して、円盤が自己重力不安定となるパラメータ領域を計算した。これまで報告されてきた自己重力による静的圧縮で得られる質量・密度の進化トラックを考えた場合、微惑星になる前に自己重力不安定条件が満たされることがわかった。

次に乱流が強い場合 ( $\alpha = 10^{-2}$ ) を考えた。すると、この場合は、自己重力不安定条件が満たされることなく、付着成長だけで微惑星まで成長することがわかった。よって、乱流が十分に強い場合は、重力不安定が発生しない。つまり、重力不安定が発生するためには、乱流強度の上限  $\alpha_{\text{cr}}$  が存在する。

もし、最小円盤質量よりも円盤の質量が大きい場合は、乱流強度の上限  $\alpha_{\text{cr}}$  も大きくなることがわかった。つまり、乱流強度の上限  $\alpha_{\text{cr}}$  は円盤のパラメータに依存する。そこで、オーダー見積もりから、乱流強度の上限を見積もった

$$\alpha_{\text{cr}} \simeq 10^{-2} f_{\text{g}} \left( \frac{f_{\text{d}}}{0.018} \right)^3 \left( \frac{T_1}{120 \text{ K}} \right)^{-1} \left( \frac{a}{5 \text{ AU}} \right)^{-1/14}$$

ここで  $f_{\text{g}}$  は最小質量円盤モデルに対する質量の割合、 $f_{\text{d}}$  はダスト・ガス比、 $T_1$  は 1 AU における温度、 $a$  は中心星からの距離である。この見積もりは、数値計算と幅広いパラメータにおいて一致する。標準的な円盤モデルで、乱流強度が強すぎなければ ( $\alpha \lesssim 10^{-2}$ )、重力不安定条件が満たされることがわかった。

## 大規模N体計算が切り拓く惑星形成 I : PENTACLE (1,000万粒子シミュレーションに向けて)

堀 安範<sup>1,2</sup>, 押野翔一<sup>3</sup>, 岩澤全規<sup>4</sup>, 藤井通子<sup>5</sup>

1 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター

2 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室

3 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト

4 理化学研究所 計算科学研究機構

5 東京大学 天文学専攻

---

衝突系の力学進化では、近接遭遇を経験する粒子間の重力相互作用がN体計算のボトルネックとなり、惑星形成の直接N体計算では1-10万粒子が粒子シミュレーションの壁となっている。1,000万粒子そして1億粒子の高解像度N体シミュレーションの実現に向けて、我々は新たにハイブリッド並列N体コード (PENTACLE) を開発した。粒子計算の並列化にはFDPSライブラリを導入し、数値積分コストの軽減には4次エルミート積分とツリー法を組み合わせたハイブリッドスキームを採用した。本講演では最初にPENTACLEコードを紹介する。そして、100万粒子を用いた地球型惑星の形成シミュレーションをもとに、PENTACLEコードのパフォーマンス (精度、計算速度、並列化効率、先行研究との比較) について議論する。

## High-resolution N-body Simulations for Planet Formation: To 10 Million Particles, and Beyond

Yasunori Hori<sup>1,2</sup>, Shoichi Oshino<sup>3</sup>, Masaki Iwasawa<sup>4</sup>, Michiko Fujii<sup>5</sup>

1 Astrobiology Center, National Institutes of Natural Sciences

2 Exoplanet Detection Project, National Astronomical Observatory of Japan

3 Center for Computational Astrophysics, National Astronomical Observatory of Japan

4 Advanced Institutes for Computational Science, RIKEN

5 Department of Astronomy, The University of Tokyo

---

In a collisional system, close encounters play an important role in dynamical evolution. Gravitational interactions between particles undergoing a close encounter are big bottlenecks in N-body simulations because of high computational costs. In fact, a direct N-body simulation in the context of planet formation faces a wall of ten thousand particles. Toward high-resolution N-body simulations with 10 million particles and beyond, we have developed two tips to overcome this sort of big wall, implementing them into our N-body code (PENTACLE) for planet formation: (i) a tree-based hybrid N-body scheme which reduces numerical integrations of gravitational interactions among particles, P<sup>3</sup>T method (Oshino et al. 2011) and (ii) parallelization and optimization for accelerating numerical integrations, specifically, a multi-purpose platform for a parallelized particle-particle simulation, the so-called “Framework for Developing Particle Simulator” (FDPS: Iwasawa et al. 2015). In this talk, we introduce PENTACLE and discuss its performance and capability (precision, speed, and parallelization efficiency) based on results of N-body simulations of terrestrial planet formation, using ~ 0.1 million planetesimals.

# 大規模N体計算が切り拓く惑星形成 II： 100万粒子を用いた微惑星集積

○ 押野翔一<sup>1</sup>, 堀安範<sup>2,3</sup>, 岩澤全規<sup>4</sup>, 藤井通子<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト

<sup>2</sup> 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター

<sup>3</sup> 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室

<sup>4</sup> 理化学研究所 計算科学研究機構

<sup>5</sup> 東京大学 天文学専攻

これまでN体計算を用いることにより、微惑星から惑星へと集積合体していく段階で暴走的成長過程や寡占的成長過程 (Kokubo & Ida 1998) が発見されてきた。この段階においては微惑星間の重力相互作用が系の進化に重要な役割をはたす (Wetherill & Stewart 1989, Ida & Makino 1993) ため、N体計算が重要な手段となっている。しかし、惑星形成においては微惑星の近接相互作用を精度よく計算する必要があり、これまで、並列化を用いた大規模計算が困難なため使われる粒子数は数十万体が限界であった。最近我々が開発した PENTACLE コードはこの問題を解決し、100万体を超える大規模計算が可能な並列N体計算コードである。微惑星集積段階において、微惑星は円盤ガスからの抵抗を受けることが知られているが、この効果は小さい微惑星ほど高い。より小さい微惑星を取り扱うことにより重力相互作用によるエネルギー等分配がくずれ、系の進化が変わることが示唆されているが、これまで粒子数を増やすことが困難だったため確認されていなかった。今回、PENTACLE コードを使用して粒子数を変えた計算を行い粒子数が異なる計算結果の比較を行う。

# 惑星形成 $N$ 体計算の大粒子数化に向けて：FDPS を用いた P<sup>3</sup>T 法の並列計算

○ 山川暁久<sup>1</sup>, 牧野淳一郎<sup>2,3</sup>, 齊藤貴之<sup>3</sup>, 小南淳子<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 <sup>2</sup> 神戸大学 <sup>3</sup> 東京工業大学地球生命研究所

現在得られている惑星形成理論では、微惑星同士が衝突・合体することによって原始惑星に進化したと考えられている。この過程の解明には  $N$  体計算が広く用いられてきており、暴走成長 (Kokubo & Ida 1996) や寡占成長 (Kokubo & Ida 1998) といった形成過程が存在することが明らかとなっている。

直接法による通常の  $N$  体計算の計算コストは、粒子数を  $N$  とすると、 $\mathcal{O}(N^2)$  で計算量が増加する。また、惑星形成  $N$  体計算は原始惑星の形成時間が微惑星の公転周期に比べてはるかに長いため、長時間積分を行う必要がある。このため、従来の惑星形成  $N$  体計算では扱える粒子数や積分時間に制限があった。この困難を本質的に解決するには、非常に大きな計算量を効率よく処理する必要がある。それには、計算アルゴリズムを改良し計算量を低減させる方法と、並列計算によって計算処理能力を向上させる方法の二つのアプローチが必要である。本研究では、この二つのアプローチを同時に行い、非常に多くの粒子数を扱えるようなコード開発を行ったので報告する。

本研究では、計算量が  $\mathcal{O}(N \log N)$  でスケールする惑星形成向けのアルゴリズムである P<sup>3</sup>T 法 (Oshino et al. 2011) を用いる。P<sup>3</sup>T 法では、2 粒子間の重力を滑らかなカットオフ関数によって近距離力と遠距離力とに分割する。近距離力は粒子間相互作用をエルミート法と独立時間刻みによって高精度に積分する。遠距離力はツリー法とリープフロッグ法によって効率良く積分する。P<sup>3</sup>T 法を用いることにより、低い計算コストで高精度に時間積分することができる。P<sup>3</sup>T 法の並列処理にあたって、ツリー法の領域分割を高速に処理するライブラリである FDPS (Iwasawa et al. 2016) を用いる。本研究では、FDPS を用いた P<sup>3</sup>T 法の並列計算性能を評価し、大粒子数による  $N$  体計算が可能であることを示す。今後は衝突・破壊の効果を取り入れていく予定である。

## 高次化メッシュフリー法の導入と変形への対応

○山本智子<sup>1,2,3</sup>, 牧野淳一郎<sup>3,2,4</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学理工学研究科, <sup>2</sup>理化学研究所計算科学研究機構, <sup>3</sup>神戸大学理学研究科, <sup>4</sup>東京工業大学理学院

メッシュフリー法とは数値流体手法の一つであり、表面の追跡が可能などという特長から、惑星科学の分野において広く使われている。

従来の代表的なメッシュフリー法として、標準 SPH 法(e.g., Lucy 1977, Gingold & Monaghan 1977)がある。しかしながら、標準 SPH 法は、不連続面を扱うことができないという問題がある。この原因は二つある。一つ目は密度を連続の式を用いずに直接導出する際に、密度の連続性を仮定してしまっている点である。二つ目は、流体方程式を近似する際に、現実的な範囲では、空間 0 次の近似になってしまっている点である。

これらの問題の原因に対し、様々なアプローチがされてきた。その中で、我々は、一つ目の原因に対しては、密度を導出する際に、連続の式を用いることにした。また、二つ目の原因に対しては、空間高次の離散化を用いることにした。空間高次の離散化には様々(e.g., Dilts 1999)あるが、我々は、特に、計算コストが少ない、Tamai et al.(2014)の手法を基に、離散化を行った。ただし、Tamai et al (2014)の手法は非圧縮性流体用の手法のため、これを圧縮性流体に応用した。

ところが、高次化されたメッシュフリー法では、流体が変形する際に、多次元において、流体内部で、数密度の大きな偏りが生じてしまい、一方向の情報の欠落が生じてしまう。そこで我々は、代表点を再配置することにより、この問題を解決した。この手法を用いて、いくつかのテスト計算を行ったところ、標準 SPH 法に比べ、良い結果が得られた。図 1

は、Kelvin-Helmholtz 不安定を本手法と標準 SPH 法で行ったものである。こちらをみると、標準 SPH 法に比べて、我々の手法では、第二の Kelvin-Helmholtz 不安定まで捉えることができ、よく計算ができていることがわかる。しかしながら、自由表面が新たに発生したり、自由表面同士が接着する時は、再配置を行う際に、これらの感知を行う必要があるため、今後は、これらの現象に対応させていく予定である。

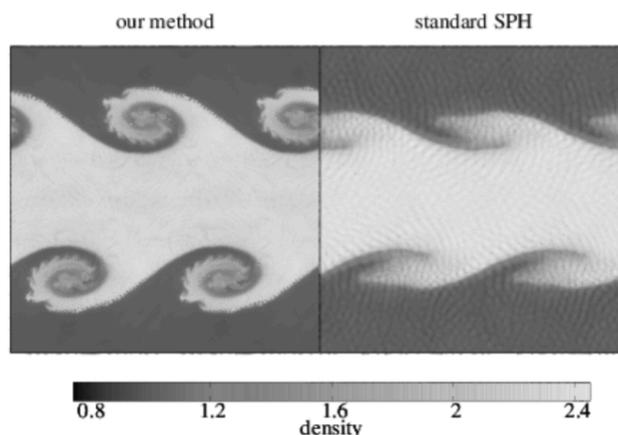


図 1:本手法と標準 SPH 法での Kelvin-Helmholtz 不安定。時間は不安定のタイムスケールの 2 倍の時間である。

# DISPH を用いた月形成巨大衝突のパラメーター サーベイ

○細野 七月<sup>1,2</sup>, 斎藤 貴之<sup>3</sup>, 牧野 淳一郎<sup>4,5,2</sup>, 玄田 英典<sup>3</sup>, 井田 茂<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 思修館, <sup>2</sup> 理化学研究所, <sup>3</sup> 東京工業大学 ELSI, <sup>4</sup> 神戸大 惑星, <sup>5</sup> 東京工業大学  
地惑

惑星科学と地球科学における重要な現象の一つに、巨大衝突と呼ばれる現象が存在する。巨大衝突とは二つの原始惑星どうしの衝突の事であり、この説によると、原始地球に火星サイズの原始惑星が衝突し、周惑星円盤が形成される。この周惑星円盤が集積し、現在の地球の月になる。この仮説が実際に起こりうるかを検証するため、これまで主に、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) と呼ばれる手法を用いて、様々な衝突パラメーターでの数値計算が行われてきた。その結果、月は原始地球に衝突したインパクト側の物質から形成される事が示唆された。

ところが、近年月の石の高精度同位体比測定から、地球と月の岩石に含まれる幾つかの元素の同位体比が、極めて高い精度で一致する事が確かめられた。これは、月は巨大衝突の時に飛び出した原始地球から形成された事を示唆しており、数値計算の結果とは矛盾する。

この矛盾を解決するため、幾つかの新たなシナリオが提案されるなどしてきたが、一方で近年これまで主に使われてきた標準 SPH 法と呼ばれる手法に、幾つかの問題点がある事が報告された。その中でも大きなものが、標準 SPH は接触不連続面が正しく取り扱えていないという問題である。巨大衝突においては、コア・マントル境界は接触不連続面になっている。そのため、接触不連続面が正しく取り扱えないのは、巨大衝突にとっては大きな弱点たりうる。

そこで我々は、この接触不連続面の問題を解決した、Density Independent SPH (DISPH) と呼ばれる SPH を開発し、これを実際に用いて巨大衝突の数値計算を行った。その結果、これまで“successful moon forming impact” だと思われていた衝突パラメーター領域が、別の場所に移動する事が示唆された。本公演では、DISPH を用いて行った巨大衝突のパラメーターサーベイの結果に関して、報告する。

## 小惑星形状の衝突進化： 弾性体 SPH 法を用いた微惑星の衝突計算

○杉浦圭祐<sup>1</sup>、小林浩<sup>1</sup>、犬塚修一郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学 理論宇宙物理学研究室

現在の太陽系に存在する小惑星の多くは、小惑星イトカワやチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星のような球形状から離れた不規則な形状をしている。このいびつな形状は微惑星の衝突破壊・合体によって形成されたと考えられており、そのような形状を作るための微惑星衝突の条件を明らかにすることで太陽系の過去の姿に迫ることができると期待される。

我々は衝突による小惑星形状の形成条件を明らかにするために、弾性体力学に拡張された Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法による数値計算コードを開発した。さらに、岩石が破壊される効果を表すひびモデル (Benz and Asphaug 1995)、岩石が粉々になってできた粉粒体間に働く摩擦の効果を表す摩擦モデル (Jutzi 2015) などを導入した。こうすることにより、衝突破壊による形状形成だけではなく、衝突で粉々になった岩石が自己重力で集積してできたラブルパイル天体の形状形成も再現することができる。

この数値計算コードを用いて、半径 50km 程度の微惑星の衝突破壊とその後の集積を再現した。衝突させる微惑星の形状は球を仮定し、初期に空隙もひび割れもない玄武岩でできた一枚岩天体を仮定した。半径 50km の球同士を 2 体脱出速度の 5 倍の速度 (約 300m/s)、衝突角度  $20^\circ$  で衝突させた場合の衝突後  $8.0 \times 10^4$  秒における最大天体の形状を表したものを図 1 に示す。ただし、衝突角度  $0^\circ$  を正面衝突とする。図からわかるように、摩擦の効果で球ではない構造を保っていることが分かる。同様の計算を衝突速度を保ったまま角度のみを変えて行い、衝突から  $4.0 \times 10^4$  秒後での最大天体の軸比を測定した。軸比の測定は Fujiwara (1978) に倣い、平板で挟んだ時最も短い軸を c 軸とし、それに垂直で最も長い軸を a 軸、2 つの軸に垂直な軸を b 軸とした。この結果を図 2 に示す。計算の結果、衝突角度が小さいほど細長い形状をしていること、また角度が  $30^\circ$  以下では細長く、 $40^\circ$  から  $60^\circ$  では扁平な形状になることが分かった。

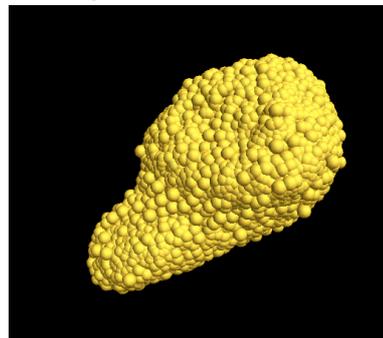


図 1：衝突により形成された最大天体の形状。

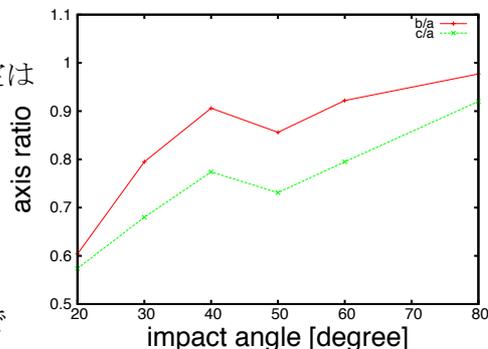


図 2：最大天体の軸比の衝突角度依存性。

# 微惑星の衝突・破壊を考慮した地球型惑星形成

○佐藤雄太郎<sup>1</sup>、小林浩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻

太陽系に属する地球型惑星は「巨大衝突ステージ」を経験して形成される。このステージの存在は理論的な研究からだけでなく、地質学的な証拠からも支持されている。したがって、このステージにおける原始惑星の軌道進化を理解することは、太陽系に属する地球型惑星の軌道分布や形成年代、形成メカニズムを理解する上で非常に重要である。

地球型惑星は数十個の原始惑星同士が長時間かけて軌道不安定を引き起こし、その結果巨大衝突を繰り返すことで形成された。このとき、微惑星から形成された原始惑星の軌道間隔は10Hill半径程度である。軌道不安定が引き起こされる時間は軌道間隔に非常に敏感で、この軌道間隔が原始惑星の衝突・合体が繰り返されるたびに広がっていくと軌道不安定が引き起こされるまでの時間が長くなる。最終的に地球型惑星が形成される頃には軌道間隔は13Hill半径程度まで広がる。このとき、軌道不安定を引き起こす時間は宇宙年齢よりも長くなり、地球型惑星形成は不可能である(Chambers et al. 1996)。実際には、原始惑星の離心率が上昇するため、数千万年以内に無事に地球型惑星は形成されるが、形成される地球型惑星の離心率は非常に大きい(Kokubo et al. 2006)。しかし、現在観測されている地球型惑星の離心率は非常に小さく、この離心率の減衰を説明することは困難である。

現在、力学的摩擦がこの問題を解決しようと言われている。巨大衝突ステージにおいても原始惑星を形成した微惑星は残っており、この残存微惑星と原始惑星の力学的摩擦により、原始惑星の離心率は下げられる(O'Brien et al. 2006)。実際、微惑星から原始惑星の形成、そして巨大衝突ステージを一連のN体シミュレーションで調べた結果、原始惑星の離心率は下げられうることが分かった(Morishima et al. 2010)。ところが、力学的摩擦により原始惑星の離心率が下げられると、微惑星の離心率は上がる。この様な離心率の高い微惑星同士が衝突すると破壊が起こる。その結果、微惑星円盤の密度が下がる(Kobayashi & Tanaka 2010)。そのため、力学的摩擦はそれほど効果的でないことが予想されるが、これまでのN体シミュレーションではこの効果は調べられていない。

そこで本研究で、巨大衝突ステージにおいて、微惑星の衝突・破壊を考慮した場合と考慮していない場合について、力学的摩擦による地球型惑星の離心率減衰過程をシミュレーションした。図1は地球型惑星の離心率と微惑星円盤の面密度の時間変化を表す。微惑星の衝突・破壊を考慮した場合と考慮していない場合についてシミュレーションした。図1から分かるように、破壊を考慮したことにより地球型惑星の離心率の減衰が抑制された。したがって、力学的摩擦の議論をする際には、微惑星同士の衝突・破壊は無視できない重要な物理であると言える。

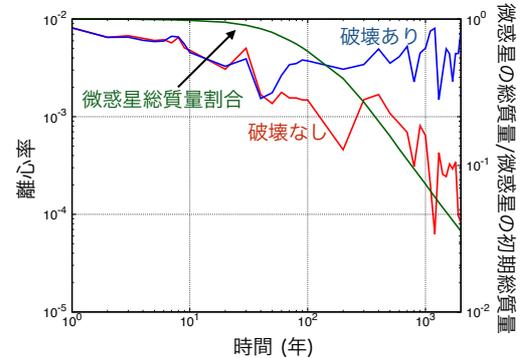


図1: 破壊を考慮した場合としない場合の地球型惑星の離心率と初期微惑星総質量に対する微惑星総質量の割合の時間進化である。破壊を考慮したことにより地球型惑星の離心率の減衰が抑制された。数値計算には地球と半径10kmを仮定した微惑星を用いている。

## 衝突による惑星や衛星のコア-マントル比の進化

○ 小林 浩<sup>1</sup>, Nicolas Dauphas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup> シカゴ大学

太陽系地球型惑星は岩石マントルと金属コアでできており、マントル-コア比はそれぞれの惑星で異なる。一方、木星周りのガリレオ衛星も氷マントルの比率がそれぞれの衛星で異なる。これらの惑星や衛星は中心星(惑星)周りの円盤の中で、小天体が衝突合体してできたと考えられている。衝突成長にともない衝突破壊が起こるが、衝突天体全体を壊すような大規模破壊ではなく、クレータを作るような小規模な破壊の方が高頻度で起こるため惑星や衛星の形成には重要である (Kobayashi & Tanaka 2010; Kobayashi et al. 2010)。小規模破壊を引き起こす衝突では、マントルをはぎ取り、コアを残すので天体の組成を変える。中心星に近い方が衝突速度も大きくなるため、はぎ取りの効果が大きくなる。しかし、はぎ取られた部分は破片となり放出され、円盤ガスによる抵抗力で角運動量を失い中心星に向かい落下する。この落下している破片の再集積はマントル成分の比率を大きくする。そのため、マントル成分の比率はこれらを矛盾なく取り入れて計算する必要がある。また、破片の落下が変化するのでガス円盤の消失による進化も影響を及ぼす。本研究では衝突・破壊を考慮して、破片も含めたサイズ分布進化、天体の中心星への落下、ガスの散逸を取り扱い、惑星や衛星形成のシミュレーションを行った。その結果、衝突により天体がどのように組成進化が得られるようになった。

この計算の結果は微惑星のサイズに依存する。小さい微惑星の方が(自己重力に守られていないため)壊れやすい。そのため、衝突の効果は強く出る。しかし、上述のように微惑星の衝突により放出された破片は惑星に再集積されるため、金属コアの比率は大きくなるが、0.1程度の変化しか起こらなかった。しかし、再集積にはガス抵抗が関与しているため、ガスの散逸時間とも関係している。近年の研究では、円盤での時期乱流不安定により円盤風が駆動され、内側の円盤から短い時間で散逸していくことがわかってきた (Suzuki et al. 2010)。この結果は、近年の穴の空いた遷移円盤の観測結果と矛盾しない。そのため、ガスの散逸時間とコアとマントルの比の関係についても議論を行いたい。

## 詳細な原始惑星系円盤進化を考慮した 固体惑星集積シミュレーション

○荻原 正博<sup>1,2</sup> 鈴木 建<sup>3</sup> 小久保 英一郎<sup>1</sup> Alessandro Morbidelli<sup>2</sup>  
Tristan Guillot<sup>2</sup> Aurélien Crida<sup>2</sup>

1) 国立天文台 2) コートダジュール天文台 3) 東京大学

従来の惑星集積N体シミュレーションでは、原始惑星系円盤ガスのモデルとして簡単なべき分布が用いられてきた。ところが最新の円盤進化計算によると、円盤ガスの面密度や温度をべき分布で表すことは正確ではないと考えられる。具体的には、面密度分布は磁気乱流駆動の円盤風によって、単純なべき分布とは異なる分布をとり得る (Suzuki et al. 2010)。また、温度分布は粘性加熱と中心星輻射によって決定されるため単純ではなく、更に円盤中のオパシティにも依存して進化する (Bitsch et al. 2015)。

採用するガス円盤モデルを変えることによって、その中で進行する惑星集積過程も従来の描像から変化すると考えられる。特に、およそ0.1地球質量以上の惑星の軌道移動 (タイプ移動) は、円盤の面密度・温度構造に依存することが知られている。例えば円盤風の効果を考慮した際、ガス面密度分布が動径方向に対して正のべきをとる (中心星から離れるに従い増加する) 傾向にあることがわかっているが、このときにタイプ移動は外向き (中心星から離れる向き) になる可能性もある。また、スノーライン等のオパシティが変化する場所においても、温度バンプが形成されることで、タイプ移動の向きが変わり得る。本研究では、最新の円盤進化計算に基づいた詳細な円盤ガス進化モデルを採用し、この円盤中での固体惑星の集積過程をN体シミュレーションによって調べる。

具体的な研究対象の例としては、短周期スーパーアース系の形成が挙げられる。短周期スーパーアースはこれまでに2000個以上の観測例があり、従って軌道分布等の傾向を議論することが可能となっている。最近の研究では、べき分布を仮定したガス円盤中での短周期スーパーアースのその場形成を調べたN体計算が行われているが、この結果では観測された軌道分布を再現することに成功していない (Ogihara et al. 2015)。そこで本研究では、詳細な円盤構造を考慮することで、短周期スーパーアース系の軌道分布を再現する可能性を探ることを一つの目的とする。

# 巨大衝突によって形成される惑星系の構造

## Orbital Architecture of Planetary Systems Formed by Giant Impacts

○ 小久保英一郎 Eiichiro Kokubo

国立天文台 National Astronomical Observatory of Japan

惑星系形成の標準シナリオでは、地球型惑星形成の最終段階は原始惑星どうしの衝突 (巨大衝突) と考えられている。この段階では、系が力学的に安定になるまで、原始惑星は重力散乱で軌道を乱し合い、衝突合体して成長する。また、近年、視線速度法やトランジット法によって中心星近傍に多数の大型地球型惑星 (スーパーアース) が発見されているが、このような近接大型地球型惑星の形成の最終段階としても、原始惑星どうしの巨大衝突が提案されている。巨大衝突によって形成される惑星系の最終的な軌道構造 (軌道間隔、軌道離心率、軌道傾斜角の分布) がどのように決定されるかを明らかにするために、巨大衝突段階の進化の素過程を多体シミュレーションによって調べている。この過程で重要なのは、惑星の物理半径/ヒル半径の比である。ヒル半径は軌道長半径に比例するので、この比は軌道長半径に反比例する。すなわち、中心星近傍領域ほど、相対的に衝突が重力散乱よりも支配的になってくる (衝突断面積/重力散乱断面積の比が大きくなっている)。このため重力散乱による原始惑星の軌道離心率と軌道長半径の変化は小さく、巨大衝突による集積は局所的に進行する。結果、力学的に冷たくコンパクトで等質的な複数惑星系が形成される。このとき形成される惑星系の角運動量欠損 (同一平面円軌道の惑星系の角運動量との差で、系の乱れ具合の指標) には最小値が存在し、その値は物理半径/ヒル半径が小さいほど大きくなる。また、ヒル半径で規格化した隣接惑星軌道間隔は、角運動量欠損が大きいかほど大きくなる。つまり、巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造 (軌道間隔と角運動量欠損) は物理半径/ヒル半径で決められる。

In the standard scenario, the final stage of terrestrial planet formation is giant impacts among protoplanets. On this stage protoplanets scatter each other and collide until the system reaches a stable orbital configuration. We investigate the final orbital architecture of planetary systems realized by this process by  $N$ -body simulation. We find that the ratio between the physical and Hill radii of protoplanets determines the system architecture and it becomes compact and dynamically cold as the ratio increases.

# タンデム惑星形成論による原始地球物質モデル

Model of proto-Earth's material by the Tandem planetesimal formation

○二村徳宏<sup>1</sup>、今枝 佑輔<sup>2</sup>、戎崎俊一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本スペースガード協会、<sup>2</sup>理化学研究所

タンデム惑星形成モデル(Ebisuzaki and Imaeda, 2016、Imaeda and Ebisuzaki, 2015 (日本惑星科学会2015年秋季講演会))から、岩石惑星形成領域の温度、圧力、およびダスト/ガス比などを求め、平衡凝縮計算(e.g., Ebel and Grossman, 1999; Yoneda and Grossman)より鉱物組成・元素組成を求めた。そして、バルクシリケートアースおよびエンスタタイトコンドライトと比較を行い原始地球物質のモデルを考察した。

タンデム惑星形成論(Ebisuzaki and Imaeda, 2016、Imaeda and Ebisuzaki, 2015 (日本惑星科学会2015年秋季講演会))とは、惑星形成の京都モデルの枠組みに磁気回転不安定(MRI: Magneto-Rotational Instability) (Balbus and Hawly 2000)、および多孔性粒子成長理論(Okuzumi et al., 2012; Kataoka et al., 2013)などを導入した惑星形成モデルである。これらの新物理およびShakura and Sunyaev (1973)をもとにした中心星の輻射とガス円盤の粘性加熱による原始惑星系降着円盤の定常解を求めた。定常原始惑星系円盤は、内部乱流領域、MRI抑制領域(静穏領域)、外部乱流領域の3つの領域に分かれることを明らかにした。そして、乱流領域とMRI抑制領域の二つの境界には固体粒子が集積し、内側の境界では岩石、外側の境界では氷が主成分の惑星が形成される。動径方向の2つの領域で惑星が形成されることからタンデム惑星形成という。本講演では、MRI抑制領域の内側における岩石惑星形成領域の物質形成について発表を行う。

岩石惑星形成領域は、微惑星が急速に成長し、重力崩壊後、約 $10^6$ 年に地球質量程度に達する。その時の1000–1050K、4.5–7.5 Paおよび300–1000と導かれる。この条件のもとで平衡凝縮計算(e.g., Ebel and Grossman, 1999; Yoneda and Grossman, 1995)を行い、鉱物組成および元素組成比を導いた。その結果 (Fe–Ni 18.0 wt.%, O 38.0 wt%, Si 20.0 wt%, Mg 19.0 wt%, Ca 2.0 wt%, Al 2.0 wt%, Na 1.0 wt%)と、地球固体成分(バルクシリケートアース)の化学組成と比較を行った。これは、タンデム惑星形成理論における岩石惑星形成シナリオを強く支持している。一方、もう少し時間がたって、重力崩壊後約 $10^7$ 年まで経過すると、温度 圧力、およびダスト/ガスはそれぞれ、1100–1150K、10.0–20.0 Paおよび3000–12000に変化する。この条件下での平衡凝縮計算が与える鉱物組成比とエンスタタイトコンドライト隕石の鉱物組成との比較を行った。そしてエンスタタイトコンドライトは、岩石惑星形成後に少量残った固体成分からできていることを示唆した。これらは、酸素同位体比(e.g., Kort et al., 2005; Clayton 2005)および鉄の酸化・還元(U–Cダイアグラム)のデータも説明する。

## 小惑星とカイパーベルト天体のサイズ分布から 推察される初期微惑星サイズ

○森島龍司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア大学

小惑星とカイパーベルト天体のサイズ分布関数はそれぞれ傾斜が緩い小さいサイズ側と傾斜がより急な大きいサイズ側の2つの冪関数でおおまかに表される。その境界となるサイズはどちらの領域でもおよそ100 kmである。微分質量分布関数で表すと大きいサイズ側の分布の冪数は、小惑星が-2 (Jedicke et al. 2002)、カイパーベルト天体が-2.7 (Fraser et al. 2014, Adams et al. 2014) 程度である。微惑星形成モデル(Cuzzi et al. 2010, Okuzumi et al., 2012, Kataoka et al., 2013, Johansen et al. 2015) から推測される微惑星サイズがケレスや冥王星などのサイズよりは優位に小さいこと、またサイズ分布の冪数も一致しないことから、少なくとも大きい側のサイズ分布は微惑星形成後の惑星集積過程により決まったと考えられる。

本研究では、惑星集積のシミュレーションを様々な初期微惑星質量の場合で行った。シミュレーションでは Morishima (2015)が開発した粒子法ベースのハイブリッドコードを用いた。衝突破壊は考慮にいれず、高速衝突の場合跳ね返りが起こる(Genda et al. 2012)と仮定した。結果は初期微惑星が大きい場合と小さい場合でおおまかに二通りに分類される事が分かった。どちらの場合も最初は暴走成長が起こり、このときの質量分布関数の冪は-2.7から-2.5程度である。初期微惑星が小さい場合は、最大天体のヒル速度で規格化した微惑星速度が1程度まで小さくなり、成長速度がサイズに依存しない中立成長が起こる。その結果大きい天体の質量分布の冪数は-2程度になる。初期微惑星質量が大きい場合は、暴走成長の後、中立成長は起こらず寡占的成長に直接移行する。寡占的成長では原始惑星同士は効率よく合体するので、結果として残った微惑星の最大質量は寡占的成長開始時の惑星質量程度となる。中立成長が起こるかどうかの境界となる初期微惑星質量と寡占的成長開始時の惑星質量を解析的に求める事もできた。

これらの結果から、初期微惑星サイズはカイパーベルトでは100 km、小惑星帯では1 km以下だと観測される大きい天体の質量分布の冪がうまく説明できることが分かった。また、小惑星帯で100 km付近での質量分布の冪の変化を説明するには、質量的にわずかな10 kmサイズの小惑星の種をまぜると良い事も分かった。さらにケレスや冥王星などの準惑星の質量が林モデルにおける寡占的成長開始時の惑星質量とほぼ同程度であることも分かった。本研究の結果は Morishima (2016, Icarus in press)にまとめられている。

# コンドリュールとマトリックス粒子の同時集積による岩石微惑星形成モデル

○ 荒川 創太<sup>1</sup>, 中本 泰史<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院 理工学研究科, <sup>2</sup> 東京工業大学 理学院

地球型惑星は、km サイズの岩石微惑星が衝突合体を繰り返すことで形成されたと考えられている。この岩石微惑星は、コンドリュール (mm サイズの球形粒子) およびマトリックス粒子 ( $\mu\text{m}$ – $\text{nm}$  サイズの微粒子) の集積によって形成されたと考えられているが、これらの固体微粒子がどのように集積し微惑星を形成したのかという問題は未だ解明されていない。特に岩石微惑星の形成においては、氷粒子の集合体と異なり、原始惑星系円盤中での  $10 \text{ m s}^{-1}$  を超える高速衝突によってダスト粒子集合体が破壊されやすく、合体成長によって km サイズまで成長することができないことが大きな問題とされている (衝突破壊問題, [1])。

しかし、コンドリュールおよびマトリックス粒子がいつ、どこで、どのようにして形成されたのかはわかっておらず、つまり、微惑星形成時のマトリックス粒子のサイズ分布は、太陽系形成以前に存在したダスト粒子 (星間ダスト) のサイズ分布 [2] とは異なっている可能性がある。実際、アエンデ隕石中のマトリックス粒子のサイズ分布 [3] は  $5 \text{ nm}$  にピークをもち、しかもこれらの粒子は原始惑星系円盤内で直接凝縮し形成されたと考えられている。そして、ダスト粒子の蒸発、再凝縮の理論 [4] から、もし太陽系初期の加熱イベントによってマトリックス粒子が形成されたときにどのようなサイズの粒子が形成されるのかを見積もると、マトリックス中に観察されるようなナノ粒子は、コンドリュール形成イベント候補でもある、離心率を持つ微惑星による衝撃波 [e.g., 5] やダスト粒子の帯電による雷 [e.g., 6] といった短時間 (数時間以内) の加熱現象において形成されることがわかる。

本研究において我々は、コンドリュール形成と同時に  $\text{nm}$  サイズのマトリックス粒子が形成され、その後コンドリュールとともに集積した場合、これらの粒子からなるアグリゲイトは、km サイズの微惑星サイズまで成長することができるのかどうかを計算した。その結果、 $\text{nm}$  サイズのマトリックス粒子の存在によって臨界破壊速度が上がり、衝突破壊問題は回避されることがわかった。さらに、コンドリュールとマトリックス粒子の集積によって形成される天体は高空隙率のダスト粒子集合体として進化することも明らかになり、コンドリュールとマトリックス粒子の同時集積モデルは、氷微惑星形成における高空隙率進化モデル [7] の場合と同様に、中心星落下問題 [8] も回避することを示した。

## Reference

[1] Blum & Wurm, 2008, ARA&A 49, 281 [2] Mathis et al., 1977, ApJ 217, 425 [3] Toriumi, 1989, EPSL 92, 265 [4] Yamamoto & Hasegawa, 1977, Prog. Theor. Phys. 58, 816 [5] Miura et al., 2010, ApJ 719, 642 [6] Horanyi et al., 1995, Icarus 114, 174 [7] Kataoka et al., 2013, A&A 557, L4 [8] Weidenschilling, 1977, MNRAS 180, 57

# ペブル集積による地球型惑星への水供給

東京工業大学理学院地球惑星科学系井田研究室  
山村武○, 井田茂

地球はその内部と表面に 0.023-1wt%の水を含んでいると考えられている。また、かつての火星と金星も水を有していたことが観測的に示唆されている。特にかつての火星の含水率は現在の地球のそれと非常に近い値を取っていたかもしれない。この情報を元に我々は、氷ペブルの成長と中心星方向への移流を数値計算することで、ペブル集積により地球、火星、金星に運ばれる水の量を調査した。

snow line はかつて ~ 0.7AU まで移動してきたことが示唆されている。snow line がこの位置まで移動することで、地球型惑星は原始惑星系円盤の外側領域から移流してくる氷ペブルを捕獲し水を獲得することができる。円盤外側領域のガスは凝結と移流により氷成分は減らされてしまうので、原始地球周りのガスは 'dry' だった可能性が考えられる。

Sato et al. (2016) はこのモデルを元に原始地球が氷ペブル集積により獲得する水の量を計算した。その結果、現在の地球の水の量を再現するには、小さい円盤、強い乱流、snow line が 1AU を通過する時刻が遅いことが必要であることが示された。そこで我々はこのシミュレーションを複数の惑星がある場合に応用した (地球、火星、金星)。円盤中の氷ダストの成長及び移流は Sato et al. (2016) と同じモデルで計算した。一方各惑星がペブルを捕獲することで円盤中の氷ダストの面密度が減少する効果を新たに追加した。これらの計算を行うことで、snow line が各惑星を通過するタイミングと最終的な各惑星の含水率の因果関係について調べた。

# 巨大衝突により生じるデブリ円盤からの 天王星の衛星形成

○石澤祐弥<sup>1</sup>, 佐々木貴教<sup>1</sup>, 細野七月<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室

<sup>2</sup> 京都大学 大学院 総合生存学館

<sup>3</sup> 理化学研究所 計算科学研究機構

天王星は他の太陽系内惑星と異なり、公転面に対して赤道面が約90度と大きく傾いている。さらに、天王星の主な衛星はおよそ天王星赤道面上に分布しており、惑星形成期に衛星が形成される周惑星円盤がすでに公転面に対して傾いていたと考えられる。これらを説明するシナリオとして、巨大衝突(ジャイアントインパクト, GI)モデルが考えられる(Slattery et al., 1992)。比較的大きな原始惑星同士の衝突により周囲に破片が散らばってデブリ円盤が形成され、円盤中でデブリが重力によって集められ衛星になるという説である。GIモデルならば赤道傾斜角の大きさを説明できる可能性がある。それを論じるためには、まず天王星の衛星形成を説明できる必要がある。しかし、GIモデルによる天王星衛星形成の詳細な検証は未だ成されていない。そこで、本研究ではその検証を進める。

第一段階として、微衛星形成終了時から衛星形成までを、重力N体計算を用いて考える。地球の月形成はGIモデルによる説明が有力とされており、先行研究も多い。特にデブリ(微衛星)集積による月形成については多くのN体計算が行われている(e.g., Ida et al., 1997)。その手法を参考に、天王星周りでの微衛星集積によって衛星が形成される過程をN体計算で検証する。

重力N体計算では衝突と合体を含め、円盤の様々な初期条件に対して4次のエルミート法を用いて時間発展を計算した。また計算を行うにあたって、大規模並列粒子計算のためのフレームワーク、FDPS(Framework for Developing Particle Simulator)を実装した計算コードを用いた。この計算から得られた結果をもとに、周惑星円盤の初期条件や合体成長過程について議論する。また、より大規模な数値計算を目的とした計算コード開発についても可能であれば触れる予定である。

# 周惑星円盤内での微衛星形成の困難

## Difficulty of Satellitesimal Formation in a Circumplanetary Disk

○芝池諭人<sup>1</sup>, 奥住聡<sup>1</sup>, 佐々木貴教<sup>2</sup>, 井田茂<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学 理学院 <sup>2</sup>京都大学大学院 理学研究科 <sup>3</sup>東京工業大学 地球生命研究所

木星の四つの巨大氷衛星は、周惑星円盤内で形成されたと考えられている。特に、惑星形成過程と同様、周惑星円盤内でダストが成長して衛星が形成されたとする説が一般的である。しかし、これまで微衛星から衛星への成長過程は研究されてきたが、ダストから微衛星への成長過程は研究されてこなかった。そこで、本研究では周惑星円盤内での微衛星形成過程を研究した。

周惑星円盤にガスと共に進入したダストは、互いに衝突して合体成長すると考えられる。しかし、同時に周囲のガスによる抵抗を受けて角運動量を失い、木星へと落下する。ガス中のダストの運動は、ダストのストークス数(ダストの運動が周囲のガスの運動に馴染むまでの制動時間をケプラー時間により規格化した無次元数)によって決まる。このストークス数は、ダストが成長するにつれて大きくなる。ダストの落下速度はストークス数が1の時に最大となるため、ストークス数が1を超えるまで成長した場合は、ダストはその後落下せずに微衛星まで成長できると考えられる。

Tanigawa et al. (2012)において数値計算された周惑星円盤へのガス流入量を基に推定される周惑星円盤内では、ダストは周惑星円盤内では微衛星まで成長することなく木星へと落下してしまうとわかった。また、空隙率の高いダストによる微衛星形成や、ストリーミング不安定による衛星形成も容易ではないと推測された。一方で、Canup and Ward (2006)などが主張する“Gas-starved disk”モデルの周惑星円盤内では、ダストの合体成長によって微衛星が形成される可能性がある。

## 捕獲された固体物質の周惑星円盤内での分布

○末次竜<sup>1,2</sup>、大槻圭史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学医学部、<sup>2</sup>神戸大学大学院理学研究科

木星や土星などの巨大惑星の周りには、衛星が公転している。こうした衛星はほぼ円軌道で惑星の赤道面を公転している。そのため巨大惑星の形成過程において惑星周りに形成された周惑星円盤内で衛星は誕生したと考えられている。現在の衛星形成モデルでは、周惑星円盤に降着するガス流とともに流入してくるダストサイズの固体物質が衛星の主な材料物質と考えられている。ところが、最近の軌道計算を用いた固体物質の周惑星円盤への供給過程を調べた研究から、衛星の材料となった固体物質は従来のダストサイズのものだけでなく、比較的大きな固体物質(10m-1km)も、周惑星円盤に供給されることが明らかになった。しかしながら、周惑星円盤に供給された固体物質の円盤内での空間分布は、衛星の形成や軌道進化に大きな影響を与えるにも関わらず、ほとんど解明されていない。

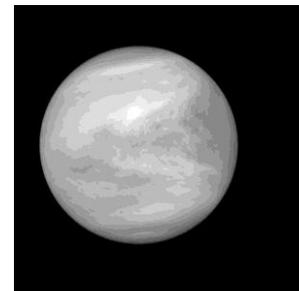
そこで本研究では周惑星円盤からのガス抵抗によって捕獲された固体物質の周惑星円盤内での空間分布を軌道計算を用いて調べた。計算の結果、周惑星円盤内にある固体物質は、ガス抵抗によって捕獲され順行方向に公転するもの、逆行方向に公転するもの、そして捕獲されず円盤を通過していくものの三種類に分類できることが明らかとなった。それらの面数密度を求めた結果、現在の木星のガリレオ衛星が公転している領域において捕獲された固体物質が分布することがわかった。また惑星軌道近傍の固体物質のギャップによる非一様分布を考慮した場合、周惑星円盤内の面数密度はギャップの拡大とともに減少していくことが明らかとなった。得られた数値計算結果をもとに、周惑星円盤内におけるダストと捕獲された固体物質の面密度を簡単に見積もり、それらを比較する。

## 「あかつき」金星周回軌道における初期科学成果の概要

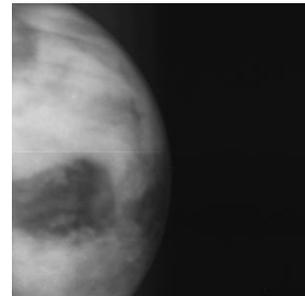
○佐藤 毅彦<sup>1</sup>・中村 正人<sup>1</sup>・今村 剛<sup>2</sup>・山崎 敦<sup>1</sup>・鈴木 睦<sup>1</sup>・上野 宗孝<sup>3</sup>・山田 学<sup>4</sup>  
 福原 哲哉<sup>5</sup>・小郷原 一智<sup>6</sup>・大月 祥子<sup>7</sup>・村上 真也<sup>1</sup>・佐藤 隆雄<sup>1</sup>・渡部 重十<sup>8</sup>  
 岩上 直幹<sup>2</sup>・田口 真<sup>5</sup>・高橋 幸弘<sup>9</sup>・はしもと じょーじ<sup>10</sup>・山本 幸生<sup>1</sup>  
 堀之内 武<sup>9</sup>・高木 征弘<sup>11</sup>・神山 徹<sup>12</sup>  
<sup>1</sup>宇宙科学研究所・<sup>2</sup>東京大学・<sup>3</sup>神戸大学・<sup>4</sup>千葉工業大学・<sup>5</sup>立教大学  
<sup>6</sup>滋賀県立大学・<sup>7</sup>専修大学・<sup>8</sup>北海道情報大学・<sup>9</sup>北海道大学・<sup>10</sup>岡山大学  
<sup>11</sup>京都産業大学・<sup>12</sup>産業総合技術研究所

「あかつき」は2015年12月7日に金星周回軌道に入り、その日にまずUVI, IR1, LIRの3台のカメラが金星のファーストライト撮像に成功した。4日遅れて12月11日、IR2の検出器温度が撮像可能温度に達し、IR2も金星画像を取得した。その後、周回軌道の調整(12月20日)、バス機器の動作確認、熱環境の確認などが約一カ月続き、2016年1月中旬から再びカメラを金星へ向けての試験観測が開始された。

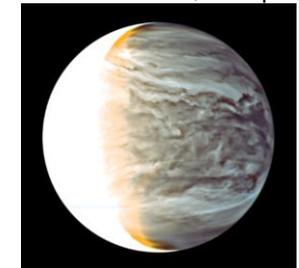
UVI, IR1, IR2, LIRの4台は、画像の解像度や感度などの性能確認を経て、2016年4月から定常観測に入った。高電圧(ノミナル300V)を要するLACは日陰毎に立ち上げ手順を続けており、本稿執筆までに270Vでの試験までを完了している。特に異常は発生しておらず、11月からの日陰シーズン再開時には本格的観測を行える見通しである。4台のカメラによる撮像、USOを用いた電波掩蔽観測のデータが蓄積されており、その一部をパブリックリリースしてミッションの順調な進行をアピールしている。本講演では、あかつきデータおよびそれらにもとづく研究の一部を紹介する。



UVI(2016/5/6, 365nm)



IR1 (2016/1/21, 0.90 $\mu$ m)



IR2 (2016/3/25, 1.735+2.26 $\mu$ m)



LIR(2015/12/7, 8-10 $\mu$ m)

# 水溶液中におけるメタンジオールの分解反応： ONIOM(QM:MM)法による解明

○稲葉知士、W. M. C. Sameera

早稲田大学国際教養学部、京都大学福井謙一記念研究センター

海底熱水噴出孔は生命が誕生した場所として有力視されている。そのため、我々は量子化学計算を用いて、海底熱水噴出孔付近における化学反応ネットワークを明らかにすることを目標としている。生命を構成するタンパク質や核酸は、小さい分子の合成によって形成されたと考えられるため、まずは炭素1原子を含む分子が関係する化学反応ネットワークについて理解しようと試みている。炭素1原子を含む分子は、2酸化炭素、1酸化炭素、ギ酸、ホルムアルデヒド、メタンジオール、メタノール、メタンなどの分子がある。本研究では、メタンジオールからホルムアルデヒドへの脱水反応について詳細に調べた。

水溶液中での化学反応では溶媒である水分子が触媒となって、反応の活性化エネルギーを大きく下げることがある。水素の輸送が重要となる反応では、溶媒である水分子が水素の輸送を手伝い、反応の活性化エネルギーを下げる。また、水分子が反応中の溶質の形状変化を水素結合で抑え、反応の活性化エネルギーを下げる効果もある。そのため、水溶液中における溶質の分解反応では、溶質周囲に存在する水分子の効果が大きく、ある程度水分子と溶質を量子力学的に解き、数多くの水分子を分子力学的に解く手法が重要となる。

最初に、我々は分子動力学計算を行いメタンジオールの第一水和圏内に12個の水分子が存在することを明らかにした。次に、分子動力学計算で得られた構造を用いて、量子化学計算を行い反応の活性化エネルギーを求めた。メタンジオールとその周囲に存在する水分子を量子力学的に解き、それ以外の大多数の水分子を分子力学的に解くために、量子力学と分子力学を組み合わせたONIOM(QM:MM)法を用いた。

量子力学的に解く水分子の数を増やすと反応の活性化エネルギーが減少し、メタンジオールの第一水和圏内の水分子の12個を加えた際に、最小の活性化エネルギーが得られることが分かった。さらに、計算で得られた反応の活性化エネルギーを用いて計算した反応率は、実験で得られた反応率とよく一致することが示された。本研究の成果は、水溶液中における様々な化学反応に量子化学計算が適用可能であることを示している。今後は、同様の方法を用いて海底熱水噴出孔における化学反応ネットワークを明らかにしていきたい。

# 氷衛星内部海でのクラスレートハイドレート形成に伴うアンモニウムイオンの取り込み

○西谷隆介<sup>1</sup>、谷篤史<sup>1</sup>、佐々木晶<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

エウロパ、エンセラダスなど一部の氷衛星は、その内部に内部海が存在していると考えられている。内部海は低温・高圧力という条件であるため、クラスレートハイドレートが生成しやすい環境となっている。クラスレートハイドレート（以下、ハイドレートと呼ぶ）とは、水分子の籠（ケージ）の中に、ゲスト分子（一般にガス分子が多い）が包接された氷状の結晶で、包接化合物の一種である。

近年、ハイドレートの籠の一部である水分子とフッ化アンモニウムが置換できることがわかった (K. Shin et al. 2014)。その一方、アンモニア-テトラヒドロフラン（以下、THF と呼ぶ）-水の相図を調べた研究では、アンモニア濃度の上昇に伴い融点が下がるのみで、アンモニアを取り込んだハイドレートの相は見られなかった (T. H. Vu et al. 2014)。これらを踏まえ、我々は低濃度のアンモニウムイオンが結晶としてではなく不純物としてハイドレートの一部に取り込まれる可能性を考えた。このような現象は内部海でのハイドレート生成時に、内部海にアンモニウム塩が溶存していた場合等に対応し、氷衛星の物質進化において重要な示唆を与えると考えている。そこで本研究では、ハイドレートは不純物としてアンモニウムイオンを取り込むのか、取り込むのであればそれがどれほどであるかを知るために、アンモニウムイオンの溶けた水溶液中でハイドレートを生成し、どの程度アンモニウムイオンを取り込んだかを調べた。

ハイドレートのゲスト分子には、THF を使用した。THF は大気圧下において 0 °C 以上の温和な条件で水とともにハイドレートを生成し、メタンなどのアナログとしてよく用いられる。水溶液とするアンモニウム塩には、フッ化アンモニウムと同じアンモニウムハライドである塩化アンモニウムを使用した。実験は全て大気圧下で行った。試料は、-20°C の冷凍庫内に静置し、結晶化を行った。その後、融点付近で結晶を溶かしたのち融点より 0.5 °C 下で静置し、再結晶化を行った。最後に試料の固体部と液体部を取り分け、それぞれに対しインドフェノール法と呼ばれる比色定量法によってアンモニウムイオン濃度を決定した。

実験の結果、氷もハイドレートもアンモニウムイオンを含むことがわかった。これは、結晶間の残液にアンモニウムイオンが取り残されたためと考えられる。また、ハイドレートは氷に比べ、より多くのアンモニウムイオンを取り込むことがわかった。これは、ハイドレートの場合には、結晶間に加えて別の機構でアンモニウムイオンが取り込まれたためと考えられる。どう取り込まれているかを決定するためにはさらなる実験が必要となる。

## 火星大気の元素・同位体組成による 天体衝突と大気散逸史への制約

○黒川宏之<sup>1</sup>,黒澤耕介<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東工大 ELSI, <sup>2</sup>千葉工大 PERC

太陽系内地球型惑星の大気組成は、地球型惑星形成領域以遠を起源とする小惑星・彗星による揮発性元素の供給、太陽風・太陽放射による大気散逸の歴史を反映している。この揮発性元素供給・散逸の歴史を解明することは、惑星表層環境進化の理解、そしてそれらを材料物質とする生命の起源の理解のために極めて重要である。

近年、着陸探査によるその場分析や火星隕石中の揮発性元素の分析により、火星大気の種類組成・同位体組成について、地球大気との比較研究が可能となってきた。火星大気の種類組成は地球大気と類似しており、この二天体の大気の起源の類似性を示唆している([1]など)。一方、火星大気の種類組成は地球と比較して重い同位体に富んでおり、同位体分別を伴う大気散逸による濃集を反映している([2]など)。

本研究では、火星大気の実測データをもとに、火星への天体衝突史・大気散逸史を制約することを目的とした。これまでに開発してきた火星大気の種類組成・同位体組成進化の理論モデルを用いた[3]。このモデルでは、天体衝突・大気散逸・火山性脱ガス・惑星間塵の流入が考慮されている。衝突天体における彗星/小惑星比や彗星の揮発性元素含有量モデル[4]を変えた多数の計算を行ない、現在の火星大気組成を再現する条件を探した。

結果として、火星大気中の希ガス存在量を再現するためには、後期重爆撃における彗星/小惑星比が1%程度以下に制約されることが明らかとなった。すなわち、後期重爆撃における彗星の寄与は限定的である。本研究で得られた彗星/小惑星比に対する制約は、同じ彗星モデルを用いて地球大気の種類組成を論じた過去の研究[5]とおおよそ整合的である。また、火星大気中の重い同位体の濃集を再現するために必要な大気散逸過程は、同時に質量数の小さい希ガス Ne の枯渇を引き起こすことがわかった。この大気散逸の効果を補うために、過去数億年以内の Ne 供給源が必要とされる。

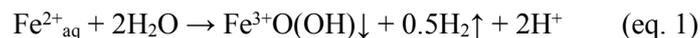
[1] Zahnle, K. J. (1993) *J. Geophys. Res.*, 98, 10899-10913. [2] Slipski, M. & Jakosky, B. M. (2016) *Icarus*, 272, 212-227. [3] Kurokawa, H. et al. *submitted*. [4] Dauphas, N. (2003) *Icarus*, 165, 326-339. [5] Marty, B. & Meibom, A. (2007) *eEarth*, 2, 43-49.

# 火星地表水 pH の進化と安定性 —Fe<sup>2+</sup>光酸化反応の理論的考察と室内実験

○田畑陽久<sup>1</sup>、関根康人<sup>1</sup>、菅崎良貴<sup>2</sup>、杉田精司<sup>1</sup>、村上隆<sup>1</sup>、

<sup>1</sup>東京大学 地球惑星科学専攻 <sup>2</sup>Department of Geosciences, The Pennsylvania State University

火星の詳細な分光観測から、古火星の表層進化が、地表水が中性から強酸性へ変わる全球的酸性化イベントで大きく2つの時代に分けられることが提案されている(Bibring et al., 2006)。しかし、この全球酸性化イベントの原因は未だに解明されていない。一つの仮説は、地表水中の溶存二価鉄の光酸化である(Hurowitz et al., 2010)。二価鉄の光酸化反応とは、水溶液中の溶存二価鉄が、太陽紫外光の照射によって酸化鉄を形成すると同時に H<sup>+</sup>を放出する反応(eq. 1)である。火星の地表水は地下水の湧出で供給されていたと考えられているため、岩石から地下水へ溶出した二価鉄が、地表に湧出後に光酸化されて酸性化した可能性がある。



この二価鉄の光酸化反応のうち、強酸性条件下(pH < 3)での反応機構を調べた先行研究から、Fe<sup>2+</sup>光酸化反応の反応速度には pH 依存性(pH が低いほど酸性化反応が速く進行)があることが示唆されている(Jortner et al., 1962)。もしこの pH 依存性が強い場合には、加速度的な光酸性化が起きる可能性がある(Tabata & Sekine, Goldschmidt, 2016)。しかし、これらの反応について、pH 3 以上での実験結果は存在しない。また、中性-アルカリ条件下において主要な溶存二価鉄イオンとなる FeOH<sup>+</sup>は、紫外光のみならず可視光でも光酸化することが報告されているが(Braterman et al., 1984)、その反応速度やその pH 依存性は明らかになっていない。火星地殻を構成する玄武岩鉱物組成と化学平衡にあたる地下水 pH は中性-アルカリ性であると予想されるため(Zolotov & Mironenko, 2016)、火星における光酸化の影響を定量的に見積もるためには、広い pH 条件下での二価鉄の光酸化反応の反応速度を求める必要がある。

そこで、本研究では、酸性-アルカリ性という広い pH 条件下で二価鉄溶液に光照射実験を行い、Fe<sup>2+</sup>光酸化反応率を測定する。先行研究から、pH が高くなると溶存酸素による Fe<sup>2+</sup>酸化速度が指数的に上昇することが知られている(Stumm & Morgan, 1996)。そのため、本研究では大気を Ar 置換した低酸素グローブボックス内で実験を行う。実験は閉鎖系で行い、光照射による二価鉄濃度の減少は高速液体クロマトグラフおよび化学発光検出器で測定し、生成する H<sub>2</sub> ガスをガスクロマトグラフによって測定する。光源はハロゲンランプを用い、これに複数のフィルタを通すことで任意の波長の光を照射する。実験パラメータは、溶液の pH および照射する光の波長であり、これらに対する光酸化反応率を求める。

本発表では、酸性-アルカリ性 pH 条件下での光酸化反応率測定実験結果と、大気進化を考慮した理論的考察に基づいて、火星地表水 pH の進化と安定性について議論する。

## 球殻状鉄コンクリーションの 形成数値シミュレーションと形成環境の制約

○柴田 拓真、城野信一

名古屋大学大学院 環境学研究科

### 1.はじめに

アメリカ合衆国ユタ州のナバホ砂漠には、酸化鉄で形成されている球殻状の鉄コンクリーション（モキマーブル）が存在する。この鉄コンクリーションの類似物（ブルーベリー）が近年火星の表面で発見された。モキマーブルの成因を明らかにすることは砂漠の古環境、ひいては火星の古環境を明らかにすることにつながると期待される。昨年夏に行った現地調査によって、以下のような従来とは違う新しい形成シナリオが示唆された。鉄イオンを含んだ酸性の地下水が地層中のカルサイト球と反応し、カルサイト球の周辺のみpHが上昇する。その結果、周囲に水酸化鉄が沈殿し、さらに水酸化鉄が脱水反応により酸化鉄に変わることによって鉄コンクリーションが形成されるというものである。

この形成シナリオによると鉄コンクリーションの成長速度は形成時の地下水のpH、鉄イオン濃度に依存する。本研究では、この形成シナリオを検証するために鉄コンクリーション形成の数値シミュレーションを行う。また、数値シミュレーションの結果から形成時の地下水のpH、鉄イオン濃度に制約を与える。

### 2.手法

鉄イオンは酸性の溶媒に溶解した状態で存在するので、地下水の条件としてpH 3,4,5の初期条件を設定する。また地下水中の鉄イオン濃度については現在の地下水中に妥当な値として $10^{-2}$ ~ $10^{-4}$  (mol/L)と設定する。以上の初期条件のもとで、地下水中の各イオンの移動を、拡散方程式を解くことによって再現する。さらに水酸化鉄の沈殿・溶解と炭酸カルシウムの溶解を計算することで鉄コンクリーションの成長を再現し、その形成可能な初期条件を制約する。

### 3.結果と考察

現在の鉄コンクリーションの形状から、鉄コンクリーションが形成できる厚さの基準値として1mmの厚さを設定する。図1に鉄コンクリーション形成と地下水のpH、鉄イオン濃度の関係を示す。沈殿した水酸化鉄の充填率が1に達し、

鉄コンクリーションが形成された初期条件については厚さが1mmに達するまでの形成時間を記している。

数値シミュレーションの結果、pH 3の地下水について多少の水酸化鉄は沈殿したものの、どの条件においても鉄コンクリーションは形成されなかった（図1）。pH 4の地下水では $10^{-3}$  (mol/L)以上で鉄コンクリーションが形成され、pH 5の地下水では $10^{-4}$  (mol/L)でも形成されるという結果になった（図1）。地下水のpHが低くなると、カルサイト球の溶解速度が上昇し、空隙を水酸化鉄が埋めきる前にカルサイト球表面が内側へと移動してしまう。その結果、pH 3とpH 4の鉄イオンの濃度が低い地下水では鉄コンクリーションが形成されていない。

一般的な地下水の鉄イオン濃度は $10^{-4}$ (mol/L)程度である。したがって、鉄コンクリーション形成時の地下水が現在の地下水に似た鉄イオン濃度を持っているとすると、そのpHは4から5以上であると推定される。また鉄コンクリーションの形成のタイムスケールは数百~数万年程度であると考えられる。

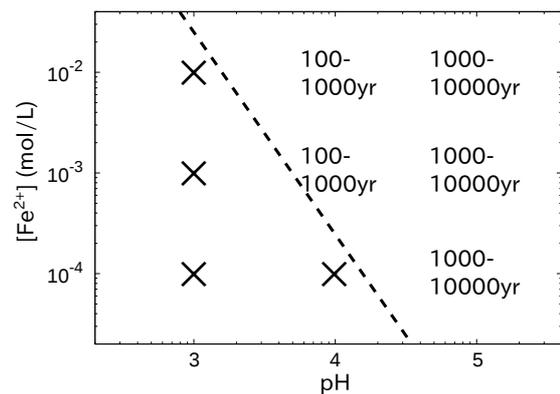


図1：鉄コンクリーション形成と地下水のpH、鉄イオン濃度の相図  
鉄コンクリーションが形成できない条件についてはxを、形成できる条件については厚さ1mmの鉄コンクリーションが形成するためにかかる時間を記している

# 南極産 CR コンドライト隕石の水質変成度と始源性の評価について

○小松睦美<sup>1,2</sup>, T. Fagan<sup>2</sup>, 山口亮<sup>3</sup>, 三河内岳<sup>4</sup>, M. E. Zolensky<sup>5</sup>, 安武正展<sup>1,3</sup>  
<sup>1</sup>総研大, <sup>2</sup>早稲田大, <sup>3</sup>極地研, <sup>4</sup>東大理, <sup>5</sup>NASA/JSC

## 【Introduction】

CR コンドライト隕石は、熱変成の影響を殆ど受けておらず、微惑星集積時の状態を保存する始原的な隕石種として知られている(e.g., Weisberg et al., 1995; Krot et al., 2002)。しかしながらその数の少なさから、隕石種内での水質変成の経緯については不明な点が多い。そこで本研究では、南極産 CR コンドライト隕石 9 個について、岩石学的特徴に基づいた水質変成度の評価を行った。

## 【Results and Discussion】

本研究では、コンドリュール中のガラスの存在度、層状珪酸塩の存在度、金属相/マグネタイトの割合等に着目し(e.g., Harju et al., 2014)、暫定的に以下 3 グループに分類した。今後、地上風化の影響を考慮したより詳細な分析を行い、岩石学サブタイプを決定していく。

- (1) 始源的 CR (Early-Stage Aqueous Alteration): Y 982405; Y-8449
- (2) 中程度の水質変成を受けた CR (Intermediate-Stage Aqueous Alteration): Y-793495; Y-791498; Y-790112; Y-793261; A-881828.
- (3) 顕著な水質変成を受けた CR (Final-Stage Aqueous Alteration): A-881595; Y-792518

顕著な水質変成を受けたグループでは、Fe,Ni 金属相はマグネタイトに変化しており、マトリックス中には多くの層状珪酸塩が見られた。始源的 CR のグループでは、コンドリュール中にガラスが存在し、SEM 観察スケールではマトリックス中にも層状珪酸塩の成長が無いか、または少量しか確認できない。始源的なグループでは、コンドリュール中のガラスは水質変成の影響が見られないが、コンドリュールとマトリックスの境界には Fe を含む鉱物から成るリムが不連続に成長しており、水質変成の影響が確認された。他種の始源的隕石である Acfer 094 (ungrouped, CM-CO related 3.0), Y-81020 (CO 3.0)においても少量ながら水質変成鉱物の存在が確認されており(e.g., Greshake, 1997; Kojima et al., 1995)、始源的炭素質隕石母天体での水質変成は、天体集積後の早い段階で生じていた可能性が高い。

References: [1] Weisberg M. K. et al. (1993) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 1567-1586. [2] Krot A.N. et al. (2002) *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 1451-1490. [3] Harju E. (2014) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103, 267-292. [4] Greshake A (1997) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 437-52. [5] Kojima et al.(1995) *Proc. NIPR Symp. Antarctic Meteorites*, 8, 79-96.

## 室温付近での蒸発乾固の繰り返しによりアデニンとリボースからのアデノシンの合成

○橋爪秀夫<sup>1)</sup>、藤井和子<sup>1)</sup>、S. van der Gaast<sup>2)</sup>、B. K. G. Theng<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (国研) 物質・材料研究機構、<sup>2)</sup> The Netherlands、<sup>3)</sup> Landcare Research, New Zealand

生命の起原において、RNA が生命の誕生に重要な役割を果たしたと言われている。RNA は核酸塩基やリボース、リン酸より構成されている。タンパク質は 20 種類のアミノ酸を用い、各々のアミノ酸がペプチド結合で高分子になっている。一方、RNA は 4 つの核酸塩基とリボースとリン酸より構成されている。核酸塩基とリボースの 1' 位の水酸基が反応したものをヌクレオシドと呼び、ヌクレオシドのリボースの 3'、5' 位の水酸基とリン酸が反応したものをヌクレオチドと呼ぶ。ヌクレオチドの高分子が RNA であり、RNA はタンパク質よりも複雑である。核酸塩基とリボースからヌクレオシドや、ヌクレオシドとリン酸からヌクレオチドを合成するのは難しいと言われている。我々は室温程度の温度で大気中、窒素ガス中や粘土鉱物を用いて、ヌクレオシドの合成を試みた。さらにリボースの D と L 体によるヌクレオシドの合成に違いがあることが分かったので報告する。

実験では核酸塩基の一種のアデニンをを用いた。5mmol/dm<sup>3</sup> のアデニンと D-あるいは L-リボースの水溶液を用意し、ビーカー等に 5cm<sup>3</sup> 加え、オープンに入れ、35 から 50°C の条件で水分の蒸発を行った。乾燥した後に試料に約 0.5cm<sup>3</sup> の水を加え、また、乾燥させる操作を約 20 回行った。比較のため、溶液を密閉容器に入れ、オープンに同じ温度で 5 から 7 日放置した。大気中と酸素が少ない条件（窒素ガス中）での反応生成物の比較を行った。粘土鉱物は触媒として働いた可能性があるので、モンモリロナイトや層間イオンを Mg にしたモンモリロナイト、あるいはカオリナイトなどを用い、同様の条件下で実験を行い、反応や生成物の比較を行った。実験後の試料は LC-MS により分析した。試薬のアデノシン（アデニンとリボースが反応したヌクレオシド）と同じ保持時間で分子量が 268 の成分が試料中に存在した場合にアデノシンが合成されたとした。

アデノシンは 35、40°C で合成され、45、50°C では徐々に合成されなくなる。粘土鉱物の有無ではアデノシンの合成にほとんど差がなかった。またモンモリロナイトよりもカオリナイトが存在する場合にアデノシンの生成量が多くなった。大気中と窒素ガス中での違いはほとんどなく、酸素による酸化などの影響はほとんどなかった。さらに水溶液ではほとんどアデノシンは合成されなかった。リボースの D と L 体を用いた場合のアデノシン合成は D 体を用いた場合にアデノシンは多く合成される傾向である。これはリボースの D 体は生物で用いられていることから、ヌクレオシド合成の際に D-リボースを用いた場合に L 体よりも容易にアデノシンが合成されるのかもしれない。

# 太陽系小天体における 自転周期が表面重力場に与える影響

## The Effect of Rotation Period on the Surface Gravity for Small Solar System Bodies

○金丸仁明<sup>1</sup>、佐々木晶<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

小惑星イトカワのような不規則な形状をもつ小天体では、自転による遠心力は表面重力場に大きな影響を与えている。太陽光圧による小惑星の自転周期の変化はYORP効果として知られており、小惑星の集積過程や表面地形の形成を数十万年の期間で考える際には重要な要因と考えられる。

本研究では、Werner and Scheeres (1997) で提案された密度一定の多面体の重力場を計算する手法を使って、イトカワ表面における重力ポテンシャル、重力加速度、傾斜などを計算した。計算コードは Mitsuta et al. (2012) を利用した。傾斜は、表面の方線ベクトルとその地点での重力加速度ベクトルとのなす角で定義でき、重力場と地形の相関を考える際の指標となる。今回は、はやぶさミッションにより得られたイトカワの3次元形状モデル (Gaskell et al. 2006)、バルク密度として  $1.95 \text{ g/cm}^3$  (Abe et al. 2006) などの値を用いた。自転周期を4時間、5時間、6.5時間、9時間、12.1324時間 (現在の自転周期。Fujiwara et al. 2006)、18時間、24時間と変えて計算し、それぞれで傾斜度のヒストグラムを作成した。

自転周期が短い場合ほど、傾斜の大きな領域が減少する傾向が見られた。自転周期が5時間のときに傾斜の大きな領域が最も少なくなったが、自転周期を4時間まで縮めると、逆に急傾斜な地域は増える結果となった。地域別に見ると、イトカワのくびれ地域に急傾斜な領域が集中していた。イトカワ全体を見ると、10度前後の傾斜をもつ領域が最も多いが、くびれ地域では、20度から30度になだらかなピークを持ち、それ以上の急傾斜もより多く見られた。

くびれ地域に見られる急傾斜な領域は、重力的に不安定であるとも考えられる。傾斜をローカルな重力場と地形との mismatches の指標とするならば、自転周期を早めることである程度緩和できることがわかった。イトカワの自転周期が今よりも短かった時代に当時の重力場を反映した地形が形成され、YORP効果によって自転周期が長くなった現在でも保存されていると解釈することができる。ただし、4時間という自転周期は小惑星が形状を保つ限界であり、遠心力が重力加速度を上回る地域が出てくるものと考えられる。

# 火星衛星フォボス・ディモスの巨大衝突説における形成可能性

○兵頭龍樹<sup>1,2</sup>, 玄田英典<sup>3</sup>, Pascal Rosenblatt<sup>4</sup>, Sébastien Charnoz<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>神戸大学理学研究科, <sup>2</sup>Institut de Physique du Globe/Université Paris Diderot,

<sup>3</sup>東京工業大学・地球生命研究所, Royal Observatory of Belgium<sup>4</sup>

本研究では、火星衛星フォボスとディモスが巨大衝突によって形成された粒子円盤内で集積しうる物理モデルについて議論する(Rosenblatt et al. 2016, Nature Geoscience)。

# 楕円軌道惑星による小惑星の一時捕獲 -火星衛星系の起源解明にむけて-

○樋口有理可<sup>1</sup> 井田茂<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学理学院 <sup>2</sup> 東京工業大学地球生命研究所

巨大惑星の周囲に多数発見されている不規則衛星はその半数以上が逆行軌道を持つ。これらの不規則衛星は、惑星周囲にやってきた小天体が捕獲された結果だと考えられている。火星にはフォボス・ディモスという2個の衛星があり、その起源は捕獲された小天体か、火星の巨大衝突でまき散らされた火星マントルが再集積したものか、まだ決着はついていない。我々はこれまでに、円軌道惑星による小天体の一時捕獲条件と、元の小天体軌道(周太陽軌道)と、捕獲後の軌道(周惑星軌道)との関係を解析的手法で調べた。本研究は、火星系を念頭に置きこれまでの研究を楕円惑星に拡張したものである。

これまでの研究と同様に、小天体は周太陽軌道から惑星のラグランジュ点  $L_1, L_2$  を通り、周惑星軌道に移行すると仮定した。ここでいうラグランジュ点とは、惑星と太陽を通る直線上にあり惑星からの距離が惑星の日心距離に無次元ヒル半径をかけたものとなる2点としている。また円軌道惑星の場合と同様に、軌道の移行は小天体と惑星の速度ベクトルが平行で、相対速度が衛星速度としてふさわしい、すなわち相対速度が十分小さいときに起こると仮定した。これらの仮定をおくことにより、元の小天体軌道と捕獲後の軌道を明快に関連付けることに成功した。惑星軌道を楕円とすることで軌道パラメタは3個増えるが、それらへの依存も含め、円軌道惑星の場合と同様に一時捕獲されることが可能となる軌道要素の範囲を解析解で示すことができた。結果で特に注目すべきは、一時捕獲効率の惑星の離心率への依存である。惑星がある値以上の離心率を持つと、一時捕獲効率が急激に落ちることがわかった。木星などの巨大惑星は離心率は十分小さいが、現在の火星の離心率は比較的大きく、一時捕獲効率が低いと言える。ただし過去の火星の離心率は十分小さく、衛星の起源が捕獲天体であるとすればそのような時期に捕獲したものである可能性が高い。

## 火星衛星ダイモスのクレーター—空間分布

○平田直之<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学理学研究科

フォボスとダイモスは、1970年代以降火星探査の折に多くのデータが得られている。それゆえ、この種の小天体としてはデータがよく蓄積されている。特にヴァイキング探査機が撮影した画像は、ダイモスのほぼ全領域を約 50m/pixel の解像度で網羅し、一部の地域(全表面積の 1.2%)を 1m/pixel の高解像度で撮影している。このころのダイモスのクレーター研究(Thomas and Veverka 1980)について要約すれば、(1)フォボスとダイモスのクレーター数密度はほぼ同じで月の高地のクレーター数密度にも近い、(2)クレーターサイズ分布の関数は $-1.9$ の傾きを持っている、(3)これら二つの事実から表面はクレーターで飽和しきっていると考えて良い、となる。ヴァイキング以後もデータは取られているが、現時点でもこれが最新の知見のままである。

本研究の目的は2点ある。一つはダイモスのクレーター研究を最新にアップグレードすることである。ヴァイキング以後にとられた画像(2枚のHiRISE画像)をデータに含めてクレーターカウントを行った(図1)。二つ目は、クレーターの飽和がダイモスで起きているかどうかを別のアプローチから検証することである。クレーター分布のランダム性が良い方法であることが知られており(Squyres et al. 1997)、その手法を適応した。発表では、これらの概要と結果について述べる。また、MMX等で出来るサイエンスについても言及する。

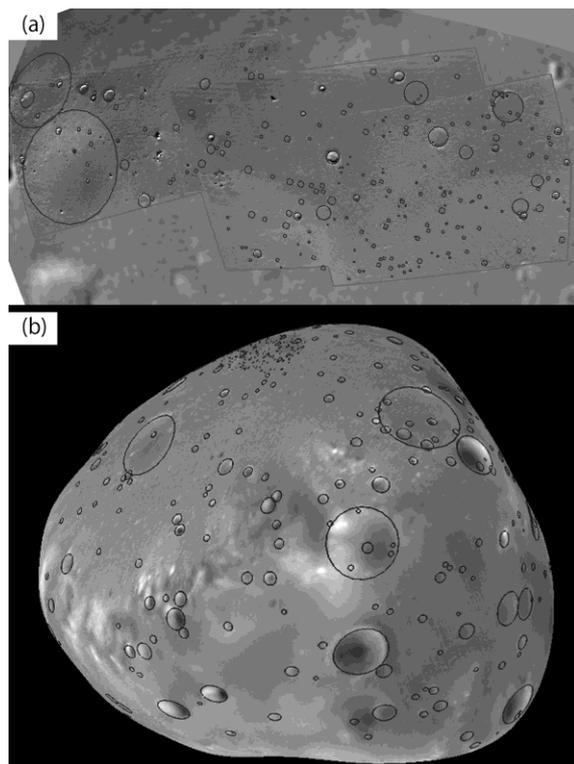


図1 クレーターカウントの例

引用

Thomas, P. C. & J. Veverka (1980a) Crater densities on the satellites of Mars. *Icarus*, 41, 365-380.

Squyres, S. W., C. Howell, M. C. Liu & J. J. Lissauer (1997) Investigation of Crater "Saturation" Using Spatial Statistics. *Icarus*, 125, 67-82.

## 火星の影響を受けた火星衛星表面の重力場と表層進化の関係

○菊地紘<sup>1</sup> 宮本英昭<sup>1</sup> <sup>1</sup>東京大学総合研究博物館

火星の衛星フォボスとディモスは似た環境にあるため、両方の衛星を比較することはそれぞれの起源、進化、そして火星環境を理解する上で重要である。それぞれの表面において、高解像度画像によってクレーターの内側などでアルベドの高いストリークが確認され、また画像解析によって全域的には大きく青と赤のユニットに分けられている[1]。特に青いユニットは、衛星の始原的な物質であることが示唆されているため、両方の衛星が同じか違うかの指標になりえると考えられている。近年、分光観測によって、衛星表面のスペクトル分析が可能になってきたことで、表面の物質に関する情報が得られてきたが、高解像度画像で確認できるアルベドストリークを分光分析することは難しく、広範囲のユニットごとの検証においても、特にディモスでの空間解像度が低いため比較ができていない[2]。

これまでの私たちの研究では、フォボス最大のクレーターであるスティックニーから放出される粒子を数値計算で追跡することで、スティックニークレーターの東側に分布する青いユニットは、スティックニーのイジェクタが低速度で再衝突する領域と調和的であることが示唆されたが、今回は主にスティックニークレーターの南側に分布する青いユニットにも注目した(図)。

衛星表面と重力場の関係を詳細に調査するために、衛星の数値形状モデルを密度の等しい、様々な大きさの四面体に分割し、自転速度と火星重力を加味することで衛星に働く重力場を求めた。火星との距離を変化させて、衛星が受ける重力場の変化も調査した。また、それぞれの衛星で、すべての高解像度画像をもちいてアルベドストリークと青いユニットをマッピングし、重力場と比較した。その結果、どちらの衛星においても、現在の軌道で最も傾斜の大きい領域でアルベドストリークが確認できた。また、アルベドストリークが現在の軌道における傾斜の方向に沿って分布していることが確認できた。さらに、フォボスのスティックニーの南側に分布する青いユニットと、ディモスの青いユニットが分布している領域の重力場には類似した特徴がみられた。

フォボスとディモスのレゴリスは現在の軌道上の重力場に影響を受けていることから、現在でもレゴリスは流動している可能性が示唆される。さらにどちらの衛星でも始原的な物質と重力場との関係が類似していることから、どちらも同じ物質で形成していることも示唆されるため、フォボスとディモスは同じ起源なのかもしれない。



図：フォボスのスティックニークレーターの南側の画像。青いユニットが分布している。 Part of HRSC image h8974\_0000.

[1] Murchie S. et al. (1991) *JGR*, 96, 5925-5945.

[2] Fraeman A. A. et al. (2014) *Icarus*, 229, 196-205.

## セレスのクレーター形状と表層物性の推定

○岡本千里<sup>1</sup>, 平田直之<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科

小惑星セレスの構成物質は、そのバルク密度 ( $2.05\text{g/cm}^3$ ) から主に岩石と氷だと言われている。特に、表層や内部における氷の含有率は、セレスの熱進化やテクトニクスに重要な影響を与えるため興味を持たれている。最近行われた DAWN 探査機の観測により、セレス表面のオッカトルクレーター (直径 $\sim 90\text{ km}$ ) の底には、塩を含んだ氷と考えられるブライトスポットが確認された。また、ここでは水蒸気大気の実在も示唆されており、表層または比較的表層に近い深さに氷が存在する可能性が考えられる。しかしクレーター底を除き、表層に氷は未だ観測されていない。これまでセレス表面は Volatile-rich な CI, CM コンドライトに類似していると言われており、可視・赤外分光観測から主に含水鉱物の Brucite やアンモニアを結晶中に取り込んだ粘土鉱物などが検出されている。

セレスは小惑星帯では数少ない氷を大量に含むと予測される天体であり、その成因として、①小惑星帯で形成されたセレスに彗星など氷を含む物質が外惑星領域から供給された、②外惑星領域で形成されたセレスが惑星大移動に伴い、小惑星帯へと移動した、などの可能性がある。従って、セレス表層の氷の含有率を明らかにすることは、セレスの成因に大きな制約を与えることが期待される。そこで、本研究では、セレス表層の氷の含有率に関する情報を取得するため、クレーターサイズとその形態の関係に着目した。なぜならクレーターの形態は、地殻構成物質の力学物性を反映すると考えられるからである。我々は、セレス上で観測されるクレーター形状の多様性が、表層に含まれる氷によるのかどうかを確認するため、岩石天体や氷天体に見られるクレーターとの比較を行った。

セレス表面には、おわん型、平底、中央丘、中央ピット型クレーターが存在する。平底クレーターでは、クレーター外形が非常にいびつになり、表層地殻が十分大きな力学強度を持つことがわかる。一方、これまでの研究から、クレーターの深さ直径比は、氷衛星では $\sim 0.1$ 、岩石天体では $\sim 0.2$ であることが分かっているが、セレス表層がコンドライト類似物質のレゴリス層だと仮定すると、おわん型から平底型クレーターへと移行する直径から、そのレゴリス層の厚みは数百 m 以下と予想できる。また、単純クレーターから複雑クレーターへと移行するクレーターサイズ ( $D_{cr}$ ) は、天体重力 ( $g$ ) や地殻強度と相関があると言われており、レゴリス層下部の地殻の強度の情報を得るためには、この移行サイズが重要である。そこで、複雑クレーターが現れるクレーター直径を全球に渡り調べたところ、おわん型などの単純クレーターが中央丘型のような複雑クレーターへと移行するのは、直径 $\sim 10\text{ km}$ であることが分かった。 $D_{cr}$  と  $g$  の関係は、岩石天体及び氷衛星に関してそれぞれ知られており、その関係は構成物質により大きく異なっている。セレスの場合は、氷衛星の  $D_{cr}$  と  $g$  の関係と一致することが明らかとなった。このことから、セレスの表面はコンドライト類似物質からなるレゴリス層かもしれないが、その下部には氷からなる地殻が存在する可能性がある。

## セレスの内部海環境とその形成位置

○関根康人<sup>1</sup>、渋谷岳造<sup>2</sup>、相川祐理<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

<sup>2</sup> 深海・地殻内生物圏研究分野 海洋開発研究機構

<sup>3</sup> 筑波大学 計算科学研究センター

小惑星帯の最大の天体である準惑星セレスは、その平均密度から質量の約 20%が氷成分、約 80%が岩石成分からなると推定され、表面に広く分布する二次鉱物の存在から、かつて水-岩石反応が広範囲で起きたと考えられている。セレスはその大きさから（直径約 950 km）、原始惑星の生き残りではないかと考えられており、表面物質からセレスの形成進化史を明らかにすることは、太陽系形成過程の理解に対して極めて重要な制約となりうる。

NASA の探査機ドーンは 2015 年からセレスの探査を行い、表面反射スペクトルを取得している [De Sanctis et al., 2015]。本研究では、その反射スペクトル中でも特徴的な波長 3.1  $\mu\text{m}$  付近の吸収に着目する。この 3.1  $\mu\text{m}$  の吸収は、アンモニウムイオンを含む含水鉱物の存在によって生じており [De Sanctis et al., 2015]、このような含水鉱物はアンモニアが溶存した水溶液と岩石成分の水-岩石反応によって形成すると考えられる。しかしながら、含水鉱物中にアンモニウムイオンが取り込まれる水溶液の化学状態（pH、酸化還元状態、アンモニア濃度）などはよくわかっていない。

本研究では、上記のような含水鉱物中にアンモニウムイオンが含まれるための水溶液の化学条件を明らかにすることを目的とし、イオン交換反応実験および熱水実験を行った。その結果、水溶液の pH がアルカリ性（ $\text{pH} > 9$ ）の場合、アンモニウムイオンが不安定となり、含水鉱物中にアンモニウムイオンが含まれないことがわかった。セレス表面には炭酸塩も見つかっていることとも合わせると [Rivkin et al., 2006]、本研究の結果は、セレスに存在していた液体の水の pH が中性付近であることを示唆する。また、本研究の結果から、3.1  $\mu\text{m}$  に顕著な吸収を持つためには、水溶液中の総アンモニア濃度が 1% 以上必要なこともわかった。このように高いアンモニア濃度は、セレスは原始太陽系円盤のアンモニアの雪線以遠（ $< 80 \text{ K}$ ）の材料物質を使って形成していたことを示唆する。

過去の研究では、炭素質コンドライトと化学平衡にある水溶液の pH はアルカリ性になることが示唆されている [Zolotov, 2012]。したがって、セレスに存在していた液体の水の pH が中性付近になるためには、炭素質コンドライトに対して、水溶液中に陰イオンが多く含まれている必要がある。本研究では、水溶液を中性付近にする陰イオンの候補として、硫酸イオンを考える。特に、原始太陽系円盤の  $\text{H}_2\text{O}$  雪線付近（約 50~100 K）で、 $\text{H}_2\text{S}$  が酸化して  $\text{SO}_2$  となり、セレス材料物質に含まれることで水溶液が中性付近となった可能性を議論する。

## 冥王星の暗い赤道領域は カロン形成巨大衝突で作れるか？

○玄田英典<sup>1</sup>、関根康人<sup>2</sup>、鎌田俊一<sup>3</sup>、舟津太郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京工業大学・地球生命研究所

<sup>2</sup>東京大学・地球惑星科学専攻

<sup>3</sup>北海道大学・創成研究機構

New Horizons 探査機によって、冥王星の赤道領域が暗く赤みがかった物質で覆われていることがわかった。我々は、冥王星の衛星カロンを作った巨大天体衝突によって、冥王星の赤道領域が加熱され、単純な有機物が複雑な有機分子に重合することによって、暗く赤みがかった物質が作られ、現在もその痕跡として表面に残っているのではないかと考えた。そこで、我々は、彗星組成を模擬した水溶液の加熱実験と、カロン形成のシミュレーションを系統的に行い、上記仮説がどのような条件で成り立つのかを詳しく調べた。

加熱実験の結果、彗星組成を模擬した水溶液を 50°C 以上で 100 時間以上加熱すると、有機分子の重合によって水溶液が茶褐色に変化することがわかった。水溶液のスペクトルを測定したところ、可視光で赤化がみられ、近赤外ではフラットな特徴を持つことがわかった。これらの特徴は、New Horizons 探査機が測定した冥王星の赤道領域のスペクトルの特徴とよく似ている (Grundy et al. 2016)。

また、我々は、冥王星への巨大天体衝突のシミュレーションを、SPH 法を用いて 180 通り行い、冥王星の赤道領域がどれくらい加熱されるのかを調べた。その結果、51 通りのシミュレーションで、カロンサイズの衛星が形成され、そのほとんどのケースで、冥王星の赤道付近が選択的に加熱されることがわかった。50°C 以上の領域が十分広く形成される条件を調べたところ、冥王星が岩石に富んだ未分化の天体であること、そして、衝突時の冥王星のポテンシャル温度が 150K 以上である必要があることがわかった。冥王星の観測されたバルク密度から質量比で岩石の割合が多いことがわかっており、また、分化した天体からは、密度の高い衛星カロンが作ることが難しいことから、我々が導き出した条件とは矛盾していない。さらに、冥王星の平衡温度が 50K 程度であることから、衝突時のポテンシャル温度が 150K 以上になるためには、冥王星が初期に短時間で形成されたことを示唆している。このことは、現在のカイパーベルト天体の形成モデルと調和的に見える (Pires et al. 2015)。

## 西はりま天文台 NIC による地球近傍小天体 (1566) Icarus の近赤外測光観測

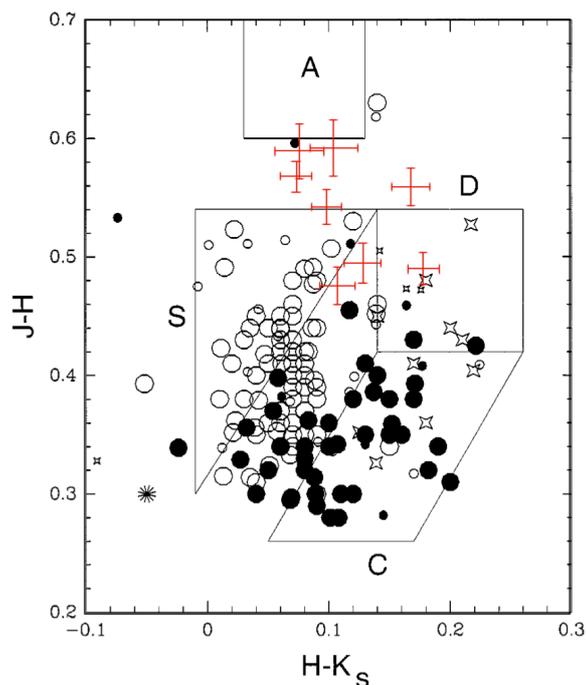
○櫻井友里<sup>1</sup>, 浦川聖太郎<sup>2</sup>, 高橋準<sup>3</sup>, 谷川智康<sup>4</sup>, はしもとじょーじ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>岡山大学自然科学研究科, <sup>2</sup>日本スペースガード協会, <sup>3</sup>兵庫県立大学, <sup>4</sup>三田祥雲館高校

地球近傍小天体(1566)Icarusの自転周期はラブルパイル構造の天体が分裂すると言われている自転周期2.2時間より少しだけ長い2.2726時間と推定されている(Warner, 2015). また, 地球近傍小天体2007 MK<sub>6</sub>は, 軌道計算の結果からIcarusを起源とする天体であることが示唆されている(Ohtsuka et al., 2007). 以上の2点と, 直径が1km程度のIcarusにはYORP効果が働いて自転が速くなる可能性のあることを関連づけると, 「YORP効果によってIcarusの自転が速くなり, Icarusと2007 MK<sub>6</sub>が分裂した. 分裂の過程でIcarusは2007 MK<sub>6</sub>に角運動量を渡し, 現在のIcarusの自転周期は2.2時間よりも少し長い2.2726時間になった」という仮説を立てることができる. もし近い過去に分裂が起こったのであれば, Icarusの表面には分裂によって新たに露出した宇宙風化の影響をほとんど受けていない面が存在している可能性がある. 本研究では, 西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡と近赤外線撮像装置NICを用いて, J, H, K<sub>s</sub>の3バンドでIcarusの3色同時測光観測をおこない, 反射スペクトルからIcarusの表面に不均一があるかどうかを調べるとともに, ライトカーブを使った自転周期の導出をおこなった.

観測は, 西はりま天文台で 2015年6月18日~6月21日の期間おこなった. 天候不良のため, データを取得できたのは2015年6月21日の1夜のみであった. NICの視野内にIcarusと標準星を同時に入れることができなかつたため, Icarusと標準星を交互に撮像した. 標準星はIcarusの近傍にあるG2V型星を使い, 標準星の各バンドの明るさは2MASSのカatalog値を使用した. 右の図は6月21日の観測結果の2色図である. Icarusの反射スペクトルは, おおよそS型と判断することができた. 一方で, 観測された反射スペクトルは観測の不確定の範囲を超えてばらついており, Icarusの表面は不均一である可能性も示唆される結果となった.

図1: 2015年6月21日に時間をおいて観測された測光結果(赤)を, Sykes et al. (2000)の Fig. 15 に重ねて描いたものである. 図中の S, C, D, A は小惑星のスペクトルタイプを示しており, 白丸は S, 黒丸は C, 星型は D タイプの小惑星に対応している.



O6-10

## あかり 3 $\mu\text{m}$ 分光観測小惑星の YJHK 分光観測

○長谷川直<sup>1</sup>, 黒田大介<sup>2</sup>, 柳澤顕史<sup>2</sup>, 臼井文彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ISAS/JAXA, <sup>2</sup> OAO/NAOJ, <sup>3</sup> 神戸大学

小惑星帯に存在している小惑星は大別して S, C, X, V, D 型に分類されるが、質量・個数密度ともに C 型小惑星が大部分を占めている [1]。C 型小惑星に対応する隕石としては炭素質コンドライト隕石が考えられている [2] が、炭素質コンドライト隕石は水や有機物を多く含み、隕石の中でも始原的であるとされている。同様に始原的な特徴を持ち、小惑星帯の代表的な存在である C 型小惑星を幅広く調べることは太陽系進化を考える上で重要である。

炭素質コンドライト隕石の一部は、室内実験のスペクトル測定から波長 3  $\mu\text{m}$  付近に含水鉱物による非常に強い吸収を持つことが知られている [3]。小惑星についても波長 3  $\mu\text{m}$  付近の分光観測を行うことによって、天体表層にある含水鉱物の有無を調べることができると考えられている。しかしながら、波長 2.5–2.85  $\mu\text{m}$  にかけては地球大気による吸収があり、含水鉱物の吸収ピークのあるこの波長帯のデータ取得は地上望遠鏡ではきわめて困難である。

一方、2006 年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」は 2.5–5.0  $\mu\text{m}$  の分光機能があり、地球大気の影響を受けない精度のよい観測を行っている。「あかり」によって小惑星 66 天体の分光観測が行われ、そのうち 20 個弱の C 型小惑星について 2.7–2.8  $\mu\text{m}$  にかけて含水鉱物による吸収のフィーチャーが初めて明確に捉えられた [4]。この波長帯の分光機能を有する宇宙望遠鏡は現時点では存在しておらず、現時点では「あかり」による分光観測のみが、小惑星の 3  $\mu\text{m}$  帯の含水鉱物をとらえた系統的な分光観測サーベイである。

そこで我々は、「あかり」で得られた貴重な 3  $\mu\text{m}$  帯のデータに様々な情報を組み合わせることにより、C 型小惑星の詳細分類を進めている。その重要な情報の 1 つに Bus-DeMeo の分類法 [5] がある。一般に C 型小惑星は可視光のスペクトルには顕著なフィーチャーを持たないと言われているが、0.7  $\mu\text{m}$  および 1  $\mu\text{m}$  付近の非常に弱い吸収帯と、可視光から近赤外線にわたるスペクトルのわずかな傾きがあり、これらが分類を行うための数少ない特徴点となっている。すなわち、Bus-DeMeo の分類法を行うには可視光の波長帯から 1.0–2.5  $\mu\text{m}$  (YJHK バンド) までの連続したスペクトルデータが必要である。

「あかり」で分光観測した小惑星については、可視光のスペクトル情報は全て揃っていたが、94 Aurora, 127 Johanna, 185 Eunike, 423 Diotima の 4 天体については、Bus-DeMeo の分類法を実施するための近赤外線の分光データが十分な精度で取得されていなかった。そこで、この 4 天体について YJHK バンドの精度の良いデータを取得するために、国立天文台岡山天体物理観測所の 188cm 反射望遠鏡に搭載されている近赤外撮像・分光装置 ISLE [6] を用いた分光観測を実施した。ISLE には HK バンドを取得するためのフィルターは用意されていたが、YJ バンドをカバーするフィルターは存在していなかった。そこで、我々は YJ フィルターを新規に導入し、YJHK バンドにかけて連続的なスペクトルの取得に成功した。

新たに得られた 4 天体のスペクトルを Bus-DeMeo の分類に適用させると、94 Aurora は Cb 型、127 Johanna は Cgh 型、185 Eunike C 型、423 Diotima は Cg 型であることがわかった。Cb 型は B 型小惑星に近い性質を持ち、Cgh, Cg 型は炭素質コンドライト隕石の一種のグループである CM 隕石と類似した存在が示唆されると考えられる。

[1] e.g., DeMeo & Carry 2014; [2] e.g., Burbine et al. 2008; [3] e.g., Salisbury et al. 1991; [4] Usui et al. in prep.; [5] DeMeo et al. 2009; [6] Yanagisawa et al. 2006

## 天体表面温度による表層物理状態の推定手法の検討

Estimation of regolith physical condition by surface temperature profile

○坂谷 尚哉<sup>1</sup>、小川 和律<sup>2</sup>、田中 智<sup>1</sup><sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、<sup>2</sup>神戸大学

天体表面温度は表層物質の熱特性によって変化する。表層物質の熱特性は堆積レゴリスの粒子サイズや空隙率などの物理状態に依存する。そのため、天体の熱赤外リモートセンシングデータは表層物質の状態を把握するのに有用である。惑星表面の温度変化を記述する際に従来用いられてきたパラメータは熱慣性（熱伝導率、密度、比熱の積の平方根）であり、近年小惑星に対しても地上観測データからの推定がなされ、その結果から表層物質の状態を制約する手法は Gundlach and Blum (2013) などが提案している。しかし、レゴリスの物理パラメータと熱伝導率を関連付けるモデルに誤差が大きく、熱慣性から表層状態を一意に決定することは困難であった。また熱慣性は、熱物性が温度によらず一定であること、深さ方向に均質であることなどの仮定のもとで導出されるパラメータであり、そもそも実際のレゴリスの状態を正確に反映しない。

我々はこれまでに行った多くの室内実験の結果に基づいて、真空下での粉体物質に適用可能な熱伝導率モデルを構築した。本モデルを用いることにより、粒子サイズや空隙率などをパラメータとして任意の温度・深さの熱伝導率を推定でき、天体表面温度プロファイルを精度よく見積もることが可能である。本研究の目的は、この熱伝導率モデルを用いて、大気を持たない天体の表面温度データから表層物質状態を制約するための新たな手法を検討することである。本発表では、小惑星探査機はやぶさ2が目指す小惑星 Ryugu をターゲットとしてはやぶさ2ミッション期間中の表層温度の数値計算を行い、小惑星上のレゴリスの状態が表面温度プロファイルに与える影響を調査した。特に熱伝導率に対して感度が高いパラメータである粒子サイズと空隙率の変化に応じた表面温度プロファイルの変化に着目し、はやぶさ2中間赤外カメラ TIR の観測からそれらを制約できる可能性・有効性について議論する。また、詳細熱伝導率モデルを用いた表面温度推定と従来の熱慣性を利用した推定との違いについても議論する。

# 模擬低重力下における低速度クレーター形成実験： 微小重力下クレーターサイズに対する レゴリス粒子固着力の影響の推定

○木内真人<sup>1</sup>，中村昭子<sup>1</sup>，和田浩二<sup>2</sup>

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

小天体表面における重力加速度は微小である。クレーターの観測から、小天体表面の進化の過程や表面の物性を推定するためには、クレーター直径の重力依存性を理解することが重要となる。しかし、重力がクレーター形成に与える影響はこれまで詳細には確かめられていない。過去には、模擬重力下での実験例がある[1, 2, 3]。しかし、重力依存性がある結果とない結果が得られており、重力加速度の影響の問題について解決していない。また微小重力環境では、レゴリス層の固着力の影響が重力の影響を卓越し、クレーター直径に対する重力依存性が見られなくなる条件が存在すると予想される。固着力と重力の影響が逆転する境界は粉体層の固着力・重力加速度・クレーターサイズで決定されるが、明確な境界はこれまでわかっていない。

我々は、標的を定荷重ばねで吊るして落下させることで標的にかかる重力加速度を模擬的に小さくする装置を開発し、低速度での衝突実験を行った。標的にはシリカサンド（粒径 $\sim 150 \mu\text{m}$ ）とガラスビーズ（粒径 $\sim 500 \mu\text{m}$ ）を用い、弾丸には直径 8 mm のステンレス球弾丸（密度  $7.9 \text{ gcm}^{-3}$ ）とガラス弾丸（密度  $2.5 \text{ gcm}^{-3}$ ）を用いた。速度  $1\text{--}5 \text{ ms}^{-1}$  の範囲で衝突させた結果、 $0.01\text{--}1 \text{ G}$  の範囲でクレーター直径は重力加速度の約 $0.2$ 乗に比例した。これらの重力依存性は先行研究の結果[1, 2]と調和的である[4]。また、固着力を粉体層の引張り強度として Rumpf 式により見積もったところ、上記の実験条件では固着力の影響が卓越する領域ではないことがわかった。固着力の影響が卓越する境界を観察するため、より固着力の大きい標的物質に対して同様の実験を行った。アルミナ粒子（粒径 $\sim 5 \mu\text{m}$ ）を容器に充填し、上方向から圧縮したものを標的として用いた（空隙率 0.45）。Rumpf 式より見積もられる強度から  $1 \text{ G}$  下では重力支配域であると予想されたが、クレーター形成実験の結果、 $1 \text{ G}$  下でも固着力の影響が見られた。このことから、圧縮された粒子層の固着力は、Rumpf 式より見積もられる強度よりも大きくなることが示唆される。発表では、固着力と重力の影響が逆転する境界条件についても議論する。

[1] Schmidt and Housen (1987) *Int. J. Impact Eng.* 5, 543–560.

[2] Gault and Wedekind (1977) Pergamon Press, New York, 1231–1244.

[3] 高木靖彦 (2012) 日本マイクログラビティ応用学会誌 29, 163–168.

[4] 木内真人，中村昭子 (2016) 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会

# 模擬氷天体地殻を用いた強度支配域のクレータースケール則に関する実験的研究

高野翔太<sup>1</sup>、○荒川政彦<sup>1</sup>、保井みなみ<sup>1</sup>、長谷川直<sup>2</sup>、千秋博紀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科、<sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構、<sup>3</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター

外惑星領域では、固体天体の多くは氷地殻で覆われており、その氷地殻は氷・岩石粒子混合物から構成されている。この氷地殻で観測される衝突クレーターのサイズから衝突天体のサイズを推測したり、クレーター形成時の衝突放出物（イジェクタ）が堆積してできるレゴリス層の厚さを定量的に見積もるには、クレーターのスケール則が必要である。特に 1000 km 以下の氷天体では、1 km 未満のクレーターは氷地殻の強度により、その形成過程が支配されている可能性が高く、これらのクレーターについて研究を進めるには、物質強度が支配する領域でのクレータースケール則が必要である。しかしながら、物質強度を連続的に変化させてこのスケール則を検証した例は非常に少なく、特に、イジェクタの速度分布に関する例は皆無と言える。そこで、本研究では、強度を連続的に変化させた試料への高速度クレーター形成実験を実施し、クレーターサイズ及びイジェクタの速度分布に対する物質強度依存性を明らかにする研究を行った。

実験では氷地殻を模擬するために水分量を調節した凍結石英砂を標的として用いた。この凍結砂試料は、粒径 100  $\mu\text{m}$  の石英砂に水を 2.5 wt.% から 20wt.% まで加えて -20°C で凍結させて作成した。この試料の引っ張り強度 ( $Y$ ) を測定した所、含水量 ( $C$ ) との間に  $Y(\text{MPa})=0.145C(\text{wt.}\%)$  の関係にあることがわかった。この標的に対して、直径 2mm のアルミ弾丸を 2、4、6 km/s で標的面に垂直に衝突させてクレーター形成実験を行い、その結果を  $\pi$  スケール則を用いて整理した。その結果、実験データを、規格化クレーターサイズ  $\pi_R=R(\rho/m)^{1/3}$  と規格化強度  $\pi_Y=Y/\rho v_i^2$  を用いて整理した所、このスケール則では速度依存性を十分にスケールリングできないことが分かった。そこで、 $\pi_Y$  に  $(v_i/C_0)^{0.7}$  という補正項を加えることで実験データをスケールリングできた (図 1)。なお、 $C_0$  はバルク音速、 $\rho$  は標的のバルク密度、 $m$  は弾丸質量、 $v_i$  は衝突速度である。また、イジェクタの速度分布を調べたところ、放出粒子の飛び出し角度は、放出位置が衝突点から遠くなるに従って増加し、クレーターリム近くでは 90° に近い急角度になることがわかった。そして、この放出角度の連続的な変化は、ピラーと呼ばれる垂直に近い角度で成長するエジェクタカーテンを形成する原因となっていることを明らかにした。

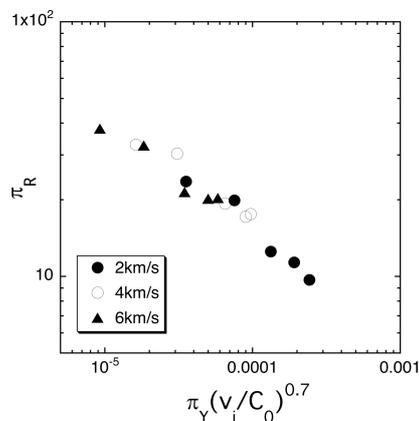


図1 規格化クレーターサイズと修正規格化強度関係

## ペネトレータを用いた天体表層の物性探査

○岡崎昌志<sup>1</sup>、荒川政彦<sup>1</sup>、保井みなみ<sup>1</sup>、松榮一真<sup>1</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科

大気をもたない天体の表面を覆うレゴリスの表層物性（空隙率・粒径・強度）は、衝突や地質活動による天体進化の重要な手がかりである。しかし、リモート観測では、特に機械的性質（力学的性質）に関する情報を得ることは難しい。そこで我々は天体表層探査の一つであるペネトレータ探査に着目した。これは加速度計・熱量計・地震計などの観測機器を内部に搭載した槍状のペネトレータを固体天体表面に貫入させるといった探査である。探査機や地上からのリモート観測とは異なり、ペネトレータを天体表層へ潜り込ませることで直接測定を可能とする。

この探査では、ペネトレータ貫入時に天体表層物質によって生じる抵抗力を加速度として計測する。得られる加速度は、表層物質の力学的性質に関する情報をもつと考えられる。そのため、ペネトレータ探査によって表層物質の力学的性質を特定するためには、表層物質と貫入時の加速度の関係を明らかにしておく必要がある。そこで、本研究ではペネトレータ探査の基礎研究として、天体表層のレゴリスを模擬した粉粒体物質に弾丸を貫入させた。そして、その時に生じる加速度と粉粒体の物性の関係を明らかにすることを目標にした。

本実験では、直径 2.6cm、高さ 4.35cm、密度 7.8g/cm<sup>3</sup> のステンレス円柱を貫入弾丸として用いた。この弾丸上部に応答周波数 10kHz の加速度計を設置して衝突速度 1.5 - 3.8 m/s で様々な粉粒体表面へ自由落下させた。粉粒体標的には粒子直径・粒子形状・空隙率がそれぞれ異なる粉粒体を十種類用いた。それらは、ガラスビーズ (0.5 μm, 100 μm, 200 μm, 500 μm, 1 mm, 1 cm)、石英砂 (100 μm, 500 μm)、赤玉 (2 - 4 mm)、パーライト (2 - 3 mm) である。実験では、貫入時の加速度変化をデジタルオシロスコープで記録し、この加速度履歴を表す波形の衝突速度・粒子直径・粒子形状・空隙率による依存性を調べた。

加速度波形を「衝突直後の加速度」、「静止直前の加速度」、「継続時間」に注目して解析した結果、波形を三種類に分類することができた（図 1）。衝突直後の加速度が静止直前の加速度よりも大きいものが I と II であり、小さいものが III となる。I は加速度一定の状態をとるが、II は一定にならない。一方、衝突直後の加速度は、すべての粉粒体試料に関してほぼ衝突速度 ( $v_i$ ) と比例していることがわかった。また、その比例定数は、粉体粒体のバルク密度 ( $\rho_0$ ) と及びバルク音速 ( $c_0$ ) の両方に比例して大きさが決まっていることがわかった。これは、衝突直後に粉粒体から受ける抵抗応力が、 $\sigma = \rho_0 c_0 v_i$  で近似できることを意味しており、粉粒体が弾性的な振る舞いをしていることを意味する。

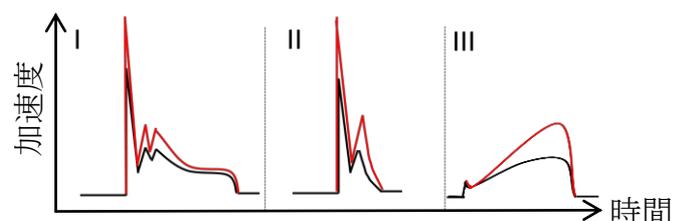


図 1 加速度波形の分類（黒：低速、赤：高速）

## 石英ガラス球の衝突破壊実験における斜め衝突の効果

吉田 優作<sup>1</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>、保井 みなみ<sup>1</sup>、○小川 和律<sup>1</sup>、岡本 千里<sup>1</sup><sup>1</sup>神戸大学 理学研究科 惑星学専攻

天体同士の衝突現象は、特に太陽系星雲内での惑星形成において最も重要な物理プロセスの一つである。とりわけ小惑星など小天体の起源を明らかにするなどの目的のため、これまで衝突破壊に関する多くの実験的研究が行われ、岩石天体の破壊に必要な衝突エネルギー密度 ( $Q$ ) が見積もられてきた。これらの実験のほとんどは正面衝突のものであったが、しかし実際の天体同士の衝突では標的天体の表面に対して垂直でない角度の衝突、いわゆる斜め衝突が頻発し、その中でも角度 45 度が最も頻度が高いことが知られている。従って、衝突破壊現象における斜め衝突の効果を明らかにすることが、現実の衝突現象への適用のための重要な課題である。

上記課題に対して、本研究では球形試料を用いて 90 度 (正面衝突) から 15 度 (斜め衝突) の範囲の様々な衝突角度で衝突破壊実験を行い、破壊の度合いとイジェクタ速度の衝突角度依存性を調査した。ターゲットは直径 5 cm と 8 cm の二種類の石英ガラス球とし、プロジェクタイルとして直径 4.75 mm のポリカーボネートの球形弾丸を速度 2–6 km/s で打ち込んだ。使用した装置は神戸大学の二段式軽ガス銃で、衝突時の気圧はおよそ 20 Pa である。衝突後は全てのイジェクタ破片を収集してサイズと重量を計測し、これらのサイズ分布を求めた。

実験の結果、ターゲットの最大破片質量は衝突角度 90–60 度の間でほぼ一定であり、45–15 度の範囲では衝突角度が小さくなるにつれ増加した。これらの結果に対して衝突エネルギー密度 ( $Q$ ) との関係性を調査したところ、衝突速度のターゲット表面垂直成分から求めたエネルギー密度 (有効エネルギー密度  $Q_c$ ) により衝突角度の効果をよくスケールリングできることがわかった。 $Q_c$  を用いて衝突破壊強度を再評価したところ、斜め衝突を含む全角度における石英ガラスの衝突破壊強度は 989 J/kg と求まった。また石英ガラス球への衝突の特徴として、衝突点と同規模の破壊が衝突反対点で生じ、高速のイジェクタが放出される現象が見られた。これは恐らく、衝突点で生じた衝撃波があまり散乱されずに球形ターゲットの自由表面で反射して反対点に効率よく集中したものと考えられる。ただしこの現象の正確な理解は今後の課題である。

## 鉄質天体のクレーター深さ直径比の温度依存性：

## 軌道進化制約の可能性

○小川諒<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup><sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>宇宙科学研究所,

小天体の多くは、岩石質や氷質であるが、鉄質の存在も指摘されており、小惑星 16Psyche に代表される M 型小惑星がその有力候補だとされている(e.g. Shepard et al., 2010)。さらに、鉄ニッケル合金からなる鉄隕石の供給源は、メインベルトに存在する鉄質天体だと考えられているが、それらは地球型惑星形成領域で形成されメインベルトへ移動したとされている(Bottke et al., 2006)。そうだとすれば鉄質天体表面は、軌道進化に伴って、様々な温度を経験していると考えられる。鉄隕石は冷却することで脆性的振る舞いをするのがこれまでの衝突実験で示されている(e.g. Matsui and Schultz, 1984)。このことなどから、鉄質天体上のクレーター形成に温度の影響があることが考えられ、そこに表面温度、そして軌道進化の記録が残されている可能性がある。我々は、鉄質天体を模擬した標的に対し、298K と 150K 以下でのクレーター形成実験を行った。

標的はギベオン鉄隕石(ニッケル含有率 7.7 wt%)、鉄ニッケル合金(ニッケル含有率 31.5, 42 wt%)、SS400 とした。SS400 は一般的に流通している炭素鋼で、脆性-延性の変化がギベオン鉄隕石と同様な温度域で起きる(Shimizu et al., 2009)。それぞれの標的は室温のものと、液体窒素で 150K 以下まで冷却したものをを用いた。弾丸には高さ直径が 15 mm のステンレス円柱と、直径 3.2 mm, 1.0 mm のステンレス球、直径 3.2 mm の銅球を用いた。弾丸加速には神戸大学の縦型火薬銃と宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用い、衝突速度約 800 m/s から 6500 m/s の範囲で実験を行った。

クレーター深さ直径について、 $\pi$ スケーリングを用い整理した結果、低温の方が直径深さともに小さくなった。炭素鋼と鉄隕石(ニッケル含有率 7.5 wt%)は冷却することで強度が増加する(Pennnet and Sinclair, 1966 ; Furnish et al., 1994 )が、このことが原因と考えられる。さらに、深さは直径よりも強度に大きく影響される、つまり、冷却によって深さのほうに顕著に小さくなることがわかった。同じ速度で比較すると、深さ直径比は室温よりも低温のほうに小さくなり、この傾向は 2000 m/s 以下の低速域で顕著に見られた。

以上の結果を用いると、メインベルトでの小惑星の衝突速度分布に従って、鉄質天体上にクレーターが形成される時、表面温度が 298 K の場合は深さ直径比分布は深さ/直径=0.55 でピーク、150 K 以下では 0.45 でピークとなる。一方、太陽から 0.5-1.0 AU で典型的な衝突速度とされる 12 km/s(Bottke et al., 2006)では、表面温度が 298 K の場合、深さ直径比は約 0.7 となる。地球近傍と小惑星帯では、鉄質衝突体の正面衝突で形成されるクレーターの典型的な深さ直径比が 0.25 異なることがわかった。

## 室内実験によるレゴリス最表層密度進化の研究

○大村知美、中村昭子

神戸大学大学院理学研究科

レゴリス層の密度、または空隙率は天体表面の圧縮や衝突に対する強度、また熱的性質に影響する重要な要素である。レゴリス層の空隙率は、レーダーによる観測結果から求めた密度とスペクトルより仮定した粒子密度から求める手法 (Magri et al., 2001; Ostro et al. 2004; Busch et al., 2007)、レゴリス層構成粒子にかかる重力と付着力の比から求める手法 (Kiuchi and Nakamura, 2014) などから 0.4-0.9 程度と見積もられている。レゴリス層の空隙率は一定に保たれるのではなく、衝突圧力や衝突励起振動を受けて変化すると考えられる。

衝突圧力による空隙率変化を決めるのは粉体層の圧縮特性である。我々はこれまでに、様々な組成、粒子径、粒子径分布幅を持った試料で構成された空隙率 0.5-0.8 の粉体層サンプルを用いたピストン圧縮実験を行ってきた。特に高空隙・低圧力領域に注目すると、試料の空隙率はある圧力までは保たれるが、それ以上の圧力を受けると空隙率は減少する。この圧力の下限値は粒子の転がりに必要な力と空隙率、粒子径で与えられることがわかった (Omura & Nakamura, Cosmic Dust 2016)。

次に衝突励起振動による空隙率減少を考える。粉体層に振動を加えると空隙率は減少し、平衡空隙率に達する。タッピング充填による平衡空隙率  $\varepsilon_f$  は粒子の持つ付着力 ( $H$ ) と粉体層にかかる最大加速度 ( $\alpha$ ) によって質量  $m$  の粒子にかかる力の比より  $\varepsilon_f = 0.072\{H/(m\alpha)\}^{0.36} + 0.26$  と与えられる (檀上他, 1980)。我々は、直径 18  $\mu\text{m}$  の球形ガラスビーズと直径 23  $\mu\text{m}$  の不規則形状アルミナ粒子を用いて作成した粉体層に振幅  $\sim 1 \text{ m/s}^2$  の振動を加える実験を行い、この経験式がおおむね成り立つことを確かめた。この式を用いて例えば、Eros に対し直径数 km のクレーターができる衝突で生じる衝突励起加速度 (Richardson et al., 2004) によって達すると考えられる平衡空隙率を求める場合、レゴリス層構成粒子として実験に用いたガラスビーズを考えると 0.5 程度となる。

発表ではさらに、振動によって空隙率が平衡に達した後のレゴリス層強度の推測を行う。

# 小惑星イトカワのレゴリス粒子に存在する ナノクレーターの解析

○松本徹<sup>1</sup>, 矢田達<sup>1</sup>, 吉武美和<sup>1</sup>, 坂本佳奈子<sup>1</sup>, 熊谷和也<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所

探査機「はやぶさ」は、S型小惑星イトカワ表面のレゴリス(細かな砂の層)から、数十から百マイクロメートル程度の大きさの微粒子を回収した[1]。イトカワの表面には、クレーターが存在し、これまで小天体の衝突に曝されてきたことを示している[2]。小天体の衝突は、レゴリスの流動を引き起こすことで、地滑り地形を形成する駆動力となり[3]、小惑星表面のスペクトルが変化する宇宙風化にも寄与したと推測される[4]。このように、イトカワの地形や表面物質の時間発展において、小天体の衝突は本質的な役割を果たしてきたと考えられる。

回収した微粒子の表面には、衝突現象に起因するサブマイクロサイズのクレーター構造が見つかっている[5-7]。このクレーターは、限られた数の微粒子表面に集中して存在する。このことやクレーターの形態・面密度から、これらのクレーターは、イトカワ表面への小天体衝突によって生じた微小な破片が、微粒子表面に衝突して形成した二次的なクレーターであると推測されている[6, 7]。[7]は、このような二次的な衝突が、イトカワの宇宙風化に対して重要な役割を果たしたと提案している。しかし、これまで報告された微粒子表面のクレーターの個数はわずか24個であり、報告されたクレーターの形態や分布がイトカワ微粒子全体の特徴を代表しているかどうか判断できない。そこで本研究では、走査型電子顕微鏡を用いて、複数のイトカワ微粒子表面の詳細な観察を行い、多数のクレーターの形態・分布の記載を行い、その起源を明らかにすることを試みた。

観察を行った微粒子は30個である。微粒子の観察は、宇宙科学研究所キュレーション施設に設置された走査型電子顕微鏡(日立SU6600)を用いて行った。2kVに加速された電子線を使って、微粒子表面の高真空下での二次電子像観察を行った。微粒子表面の鉱物相の同定は、走査型電子顕微鏡に付随するエネルギー分散型X線分光分析装置(X-Max20)を用いて行った。

観察の結果、7つの微粒子の表面に、数十nmから500nm程度の大きさのクレーターが多数存在することが分かった。それぞれの微粒子表面に50個-100個程度のクレーターを確認した。多くのクレーターはリムや内部に熔融物を伴っていた。いずれの微粒子表面にも、太陽風が鉱物表面に蓄積した痕跡であるブリストー構造が表面全体または部分的に分布していることから、表面は一定期間宇宙環境に暴露されていたことを示している。

本発表では、イトカワ微粒子のクレーターのサイズ分布を、サブマイクロのクレーターを形成する可能性のある $\beta$ メテオロイドのフラックスモデルや、アポロ計画により回収された月レゴリス粒子表面のクレーターの分布データと比較し、観察されたクレーターの起源について議論する。

- [1] Nakamura et al. (2011) *Science* 333: 1113. [2] Michel et al. (2009) *Icarus*, 200(2), 503-513. [3] Miyamoto, (2014) *Planetary and Space Science* 95: 94-102. [4] Hiroi et al. (2006) *Nature* 443(7107): 56-58. [5] Nakamura et al. (2012) *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(11) E624-E629. [6] Matsumoto et al. (2016) *Geochimica et Cosmochimica Acta* 187: 195-217. [7] Harries et al. (2016) *Earth and Planetary Science Letters* 450: 337-345.

## 微小の室内衝突実験破片における3次元形状分布:ターゲット組織による影響

○門川隆進<sup>1</sup> 土山明<sup>1</sup> 道上達広<sup>2</sup> 長谷川直<sup>3</sup> 中野司<sup>4</sup> 上杉健太郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 理学研究科、<sup>2</sup>近畿大学 工学部、<sup>3</sup>JAXA、<sup>4</sup>産業総合研究所、<sup>5</sup>JASRI/SPRing-8

はやぶさ計画やアポロ計画・ルナ計画によって持ち帰られた小惑星イトカワや月のレゴリス粒子の3次元形状(3軸比)の分布[1,2]は、レゴリス粒子の生成条件を反映していると考えられる。イトカワや月がどのような衝突過程を経てきたのかを推測するためには、室内高速衝突実験で生成する破片粒子との比較が重要である。

室内衝突実験において、レゴリス粒子と同程度のサイズ(30-200  $\mu\text{m}$ )をもつ室内衝突実験破片の3次元形状分布は、クレータリングからカタストロフィック破壊までの幅広い衝突エネルギー密度 $Q$ に関係なく、破片の長軸 $S$ :中間軸 $I$ :短軸 $L$ の比が、分布に広がりはあるものの平均として $2:\sqrt{2}:1$ となるという、特徴的な分布をもつことが明らかになった[3]。この結果はMichikami et al.[4]で調べられている破片サイズ(>4 mm)とは異なる傾向にあるため、粒子のサイズが3次元形状分布に影響を与えることが分かった[3]。加えてこのサイズ(30-200  $\mu\text{m}$ )は、粒子を構成する鉱物の結晶サイズと同程度であるため、岩石組織によって3次元形状が影響を受ける可能性がある。今回は、衝突ターゲットの組織が破片の3次元形状にどう影響するかについて調べた。

本研究では、門川ら[3]によりX線CTを用いて測定されたサイズ(約30  $\mu\text{m}$ -200  $\mu\text{m}$ )をもつ玄武岩の衝突破片について、そのCT像をもとに岩石組織を3種類に分類した。すなわち、75%以上をolivineやpyroxeneの班晶が占めている衝突破片をtype-P、75%以上を石基で占めている破片をtype-G、その中間に分類される破片をtype-P/Gとした。それぞれの3次元形状分布をZingg diagramにプロットし、それらの分布についてK-S(Kolmogorov-Smirnov test)検定を用いて比較を行った。

これにより、衝突エネルギー $Q$ に関わらず、type-Pとtype-Gの破片の3次元形状分布が異なり、type-Pの方がわずかに等方的である(平均的な $I/L$ 比や $S/I$ 比が1に近い)ことがわかった。これは、ターゲットの岩石組織が破片の3次元形状に影響を与えることを示している。破片と同程度のサイズ(約30  $\mu\text{m}$ -200  $\mu\text{m}$ )をもつ石基、斑晶のクラックの空間分布が異なり、これが衝突破片の3次元形状に反映されたと推測される。しかしながら、type-Pと、type-G、type-P/Gの差はさほど大きくはなく、全体の平均3軸比は $Q$ にかかわらずほぼ $2:\sqrt{2}:1$ を示している。一方、Michikami [4]により測定された大きな破片(>4 mm)は石基および斑晶で構成されているので、この違いが3次元形状分布のサイズ効果として表れているのではないかと考えられる。

### 参考文献

- [1] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333,1125-1128. [2] 櫻間ら(2015) 日本地球惑星科学連合大会予稿集 PPS23-P10. [3] 門川ら(2015) 日本惑星科学秋季講演会予稿集 04-05. [4] Michikami et al. (2016) Icarus, 264, 316-330.

# 「低速」高速度天体衝突による還元的炭素化合物の生成

Generation of reductive carbon compounds by "low" hypervelocity impacts

○石橋高<sup>1</sup>, 黒澤耕介<sup>1</sup>, 岡本尚也<sup>1</sup>, 松井孝典<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学

天体衝突は太陽系の歴史において普遍的な現象であり、太陽系の進化に大きな影響を及ぼしてきたと考えられている。太陽系初期に遡るほど天体衝突の頻度は高く [e.g., 1], 38-41 億年前には後期隕石重爆撃期と呼ばれる特に衝突頻度の高い時期があったとされている [e.g., 2]。この時期には、惑星表面への天体衝突が惑星の環境（惑星の大気組成や生命の起源）に大きな影響を与えたと考えられる。

惑星表層への高速度天体衝突が起こると衝突天体が蒸発し、衝突蒸気雲と呼ばれるプリュームが生成され、その冷却過程において様々な化学種が生成される。隕石には少なからず炭素が含まれており、特に炭素質隕石には数 wt%もの炭素が含まれている。惑星への天体衝突が起きたときに、衝突天体に含まれる炭素がどのような形で惑星表面に放出されるか、すなわち酸化的な化学種 (CO<sub>2</sub>, CO) なのか還元的な化学種 (CH<sub>4</sub>をはじめとする有機物) なのかは、初期地球や初期火星において重要な意味を持つ。例えば、還元的な環境では酸化的な環境に比べて生命前駆物質の生成や保存が容易であると考えられる。また、CH<sub>4</sub>はCO<sub>2</sub>よりも強力な温室効果を持つため、初期地球や初期火星の温暖な気候の維持に寄与していたかもしれない。

しかし、これまでに行われたレーザ照射を用いた天体衝突による隕石蒸発の模擬実験によると、シリケートが完全蒸発するような超高速度衝突 (数十~100 km/s) で生成されるガスは蒸発したシリケート由来の酸素の影響により、酸化的なものになることが示されている [e.g., 3]。

本研究では、やや「低速」 (<10 km/s) の高速度天体衝突に着目した。そのような低速衝突では、以下の二つの理由により、還元的な組成の炭素化合物が生成される可能性が高いと考えられる。一つ目は、酸素供給源であるシリケートが蒸発しないためである。一般的に、シリケートが蒸発し始める衝突速度はおよそ 10 km/s であり数十 km/s で完全蒸発に達すると言われている [4]。シリケートが蒸発しないまたは部分的にしか蒸発しないような低速の天体衝突では、酸素供給量が減少するため還元的な化学種生成される可能性がある。二つ目は、低速衝突条件下で蒸気雲が経験する温度圧力経路は、高速衝突の場合に比べて、低温・高圧寄りになるためである。CH<sub>4</sub>などの炭化水素は、CO や CO<sub>2</sub> に比べて熱力学的に低温・高圧で安定であり、低速衝突では CH<sub>4</sub>などの還元的な炭素化合物が生成されやすいと考えられる。

我々は、二段式水素ガス銃を用いて模擬隕石物質への開放系での衝突実験を行い、衝突生成ガスの組成を調べた。試料は石英 (SiO<sub>2</sub>) とポリエチレン (PE) の混合物で、衝突速度は 5-6 km/s とした。SiO<sub>2</sub> と PE の混合比を変えた試料に対して弾丸を衝突させ、発生するガスを四重極質量分析計で測定した。CO<sub>2</sub> はほとんど生成されず、生成ガスの炭化水素/CO 比は 2.3-4.3 であった。C に対して O が過剰な試料であっても、炭化水素の生成量は CO の生成量よりも多かった。これらの結果は、「低速」高速度天体衝突では、還元的な組成の炭素化合物の生成が支配的であることを示唆する。

参考文献： [1] Chyba, C. F., *Nature* **343**, 129-133 (1990). [2] Morbidelli, A. *et al.*, *Earth Planet. Sci. Lett.* **355-356**, 144-151 (2012). [3] Ishibashi, K. *et al.*, *Earth Planets Space* **65**, 811-822 (2013). [4] Ahrens, T. J. and O'Keefe, J. D., *The Moon* **4**, 214-249 (1972).

# 衝突点極近傍から放出される高速放出物： 衝突実験と SPH シミュレーションの結果の比較

○岡本 尚也<sup>1</sup>, 黒澤 耕介<sup>1</sup>, 玄田 英典<sup>2</sup>, 松井 孝典<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup>東京工業大学地球生命研究所

衝突点近傍から非常に高速で放出されたイジェクタ（放出物）は極めて遠方まで輸送される。天然ガラスであるテクタイトはクレーターから数 100km 離れたところから見つかり、衝突に起源があると考えられている(e.g. Vickerly 1993; Wasson 2015)。また衝突によって火星から放出された物質が、フォボス表面に含まれていることが議論されており(Ramsley and Head 2013)、天体衝突による物質放出は天体間の物質輸送の有力な要因と考えられている。このような輸送可能質量を評価するには衝突点極近傍で発生する放出物の速度やその量を知る必要がある。

過去に弾丸半径以遠から放出されるイジェクタの速度分布を調べた研究はあるが(e.g. Hermalyn and Schultz 2011, Tsujido et al., 2015)、衝突点直下から放出される非常に高速なイジェクタは十分に観察されていない。数値コードを用いて高速のイジェクタの振る舞いを調べた研究があるが(Johnson et al., 2014)、正面衝突のみを調べたものであり、斜め衝突については調べられていない。また実験との比較を通じたシミュレーションの結果の妥当性は検証されてはいない。そこで我々は千葉工業大学の二段式軽ガス銃を用いた高速度衝突実験を行い、衝突点近傍から放出される非常に速いイジェクタを観察しその速度を調べた。弾丸と標的にはポリカーボネイトを用いた。衝突速度は 3.56–6.54 km s<sup>-1</sup> で、衝突角度は 90 度（正面衝突）と 45 度で実験を行った。衝突現象の観察には高速度ビデオカメラを使用し、弾丸貫入特徴時間（弾丸直径/衝突速度）以下の時間分解能でイジェクタを観察した。さらに 3 次元 SPH コード(e.g. Genda 2012)を用いて実験と同様の条件で衝突シミュレーションを行った。弾丸には 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>, 10<sup>6</sup>, 3\*10<sup>6</sup> 個の SPH 粒子を用いてシミュレーションの空間解像度依存性を調べた。

正面衝突の場合、イジェクタカーテンの形状は軸対称である一方、斜め衝突の場合は非対称であり、別々の方向に放出する二成分のイジェクタが実験から観察された。一つは標的表面に沿って弾丸軌道の下流方向に移動するものである(Component 1)。これは弾丸貫入時に起こる jetting 過程によって生成されたものだと考えられる(Kurosawa et al., 2015)。もう一つの成分は標的表面から斜め上方へ放出される成分である(Component 2)。この二成分の境界には折れ曲がりの構造が観察された。高解像度のシミュレーション結果(弾丸の粒子数が 10<sup>6</sup> 個以上)は実験で得られたイジェクタカーテンの形状を良く再現しており、衝突点から遠方に飛んでいるイジェクタ及び斜め衝突における二成分のイジェクタ、折れ曲がりの構造が再現できた。正面衝突におけるイジェクタカーテンの端はほぼ標的物質が占めているのに対し、斜め衝突における Component 1 の先端は弾丸物質が占めていることが分かった。また垂直衝突に比べ斜め 45 度衝突の方が衝突速度より速いイジェクタが 10 倍程度多く放出される結果を得た。

## 観測衛星によるハイパースペクトルリモートセンシングに基づく月地殻-マンツルの構造の解明

○山本 聡<sup>1</sup>, 中村 良介<sup>2</sup>, 松永 恒雄<sup>1</sup>, 石原 吉明<sup>3</sup>, 廣井 孝弘<sup>4</sup>, 大竹 真紀子<sup>3</sup>, 諸田 智克<sup>5</sup>, 平田 成<sup>6</sup>,  
春山 純一<sup>3</sup>

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

月探査衛星かぐや搭載の連続反射分光計であるスペクトルプロファイラ (SP)により、月全球約7,000万地点において連続波長反射分光データ (ハイパースペクトルデータ) が取得された[1]。これらの全SPデータに対するデータマイニング手法を使った特定鉱物スペクトルサーベイ研究により、月の主要鉱物の端成分に富む領域 (露頭) の全球分布が明らかにされてきた[e.g.2-6]。本研究では、極めて純度の高い斜長岩(Purest AnorthositeまたはPAN)に富む領域[1-4]、超塩基性の低Ca輝石(Low Ca pyroxeneまたはLCP)に富む領域[5]、カンラン石に富む領域[6]の全球分布の特徴と、検知地点の層状を総合的に解釈することで、月の内部構造の推定を行った。まず、PANとカンラン石はいずれの検知地点も巨大衝突構造に付随することから、これらの鉱物に富む物質は表層からある程度深いところから掘削されたものであることが推測される。一方検知地点と地殻厚さに相関があり、PANは主に月の裏側高地の地殻が厚い領域を中心に広く分布するのに対して、カンラン石に富む領域は地殻厚の薄い場所に限られることが分かった。これより、月の内部においてカンラン石に富む物質はPAN層の下部に位置すると考えられる。次に超塩基性のLCPに富む領域の全球分布についてSPデータマイニング解析を行ったところ、モスクワの海と危難の海では、PANとカンラン石に富む領域が多数存在するにも関わらず、LCPに富む領域が全く見つからない事がわかった (図1)。この2つの衝突盆地は地殻厚がほぼ0mであり、衝突盆地形成時にマンツル物質を掘削したと考えられている[7]が、今回LCPが見つからないことから、上部マンツルはLCPに乏しいと考えられる。一方、雨の海や南極エイトケン盆地のような非常に大きな巨大衝突盆地では、大量の超塩基性のLCPに富む領域が見つかることから、これらのLCPに富む層はカンラン石に富む層よりさらに深部に存在したものが、衝突により掘削されたと考えられる。本発表では、これらの結果を基にして月地殻-マンツル構造と月マグマオーシャンの関係について議論を行う。

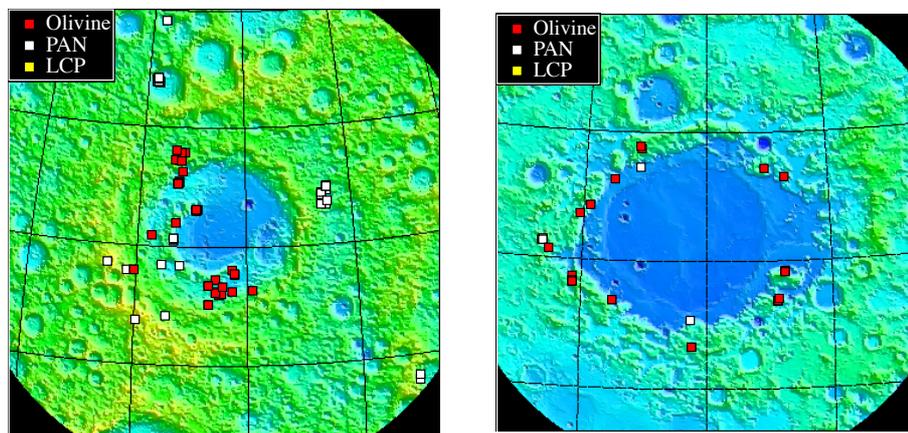


図1: (左)モスクワの海及び(右)危難の海における、カンラン石、PANに富む領域。超塩基性のLCPの富む領域はこの2つの衝突盆地では見つからない。背景は月の高度データマップ[8]。

[1] Matsunaga, T. et al. 2008, GRL, 35, L23201. [2] Ohtake, M. et al. 2009, Nature, 461, 236. [3] Yamamoto, S. et al. 2012, GRL, 39, L13201. [4] Yamamoto, S. et al. 2015, JGR, 120, 2190. [5] Nakamura, R. et al. 2012, NGE0, 28, NGE01614. [6] Yamamoto, S. et al. 2010, NGE0, 3, 533. [7] Wicczorek, M.A., et al. 2013, Science, 339, 671. [8] Ishihara et al. 2009, GRL, 36, L19202.

## リモートセンシングデータを用いた 月面に分布するカンラン石の起源推定

○大竹真紀子<sup>1</sup>, 山本聡<sup>2</sup>, 石原吉明<sup>1</sup>, 中村良介<sup>3</sup>, 松永恒雄<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup> 国立環境研究所, <sup>3</sup> 産業総合研究所

**研究の背景と目的：**地球・月系は巨大衝突により形成したとする説が最も有力であるが、巨大衝突によりどのような物質分配が起こったのか、よくわかっていない。巨大衝突にともなう地球・月系での物質分配を知る上で、月の全球組成は重要な情報であるが、これまでに月の体積の90%以上を占めるマントル物質が得られていないため、月全球の化学組成もほとんどわかっていない。一方、最近の月探査のリモートセンシング観測から、大型盆地のリム周辺に、月のマントル起源である可能性があるカンラン石が露出することが報告されている (Yamamoto et al. 2010)。ただし、起源は他にもカンラン石を含む地殻への貫入岩との説もあり、検証が必要である。本研究ではカンラン石露出地点の詳細な地質・組成解析によって、それぞれのカンラン石の起源を推定する。

**解析手法：**「かぐや」データから見つかった約40領域（近傍にある露出地点は1領域と見なす）全てのカンラン石分布領域について、「かぐや」マルチバンドイメージャ画像や Lunar Reconnaissance Orbiter の高空間分解能カメラの画像などを用い、カンラン石および周辺の鉱物組成、鉱物量比、産状、化学組成（鉄量）、地形・傾斜・表面組織などからカンラン石の起源を推定した。

**結果と考察：**カンラン石露出領域の半数以上において、産状や周辺の岩石種・地形から、観測されたカンラン石はマントル起源である可能性が高いと考えられる。一方、中にはカンラン石を多く含む溶岩流や、インパクトメルトであると考えられる領域もあり、カンラン石には複数の起源が推定される。また、産状などからマントル起源の可能性のある地点の中には、全岩としての鉄量 (FeO wt %) が12-18%と高く地殻への貫入岩とは考えづらく、また吸収形状など他の情報からも、マントル起源である可能性が非常に高いと考えられる領域が存在した。これら結果は、「かぐや」データから見つかったカンラン石には月マントルの組成を知る上で重要なマントル起源物質が確かに含まれることを示す。

## 月面クレータの地形緩和のタイムスケール

武藤 史樹<sup>1</sup>, ○諸田 智克<sup>1</sup>, 春山純一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学環境学研究所, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

月面の地形は形成以後、微小天体の衝突とレゴリスの攪乱によって崩壊し、緩和していくとされる。地形緩和のタイムスケールを知ることは、表層レゴリスの移動の素過程の理解や天体衝突頻度の推定、クレータの緩和状態を用いた年代決定法の構築のために重要である。Fassett and Thomson [JGR, 119, 2255-2271, 2014] は地形拡散モデルと実際の地形の平均プロファイルとの比較によって、直径 800m~5km のクレータの緩和度を評価した。さらに、表面年代とその領域に存在するクレータの緩和度の中央値の比較から月面地形の拡散速度を評価している。しかし、先行研究では表面年代と複数のクレータの緩和度の中央値との関係を見ているため、個々のクレータの形成年代と緩和度の関係は明らかになっておらず、拡散速度の見積もりも正確ではない。また、クレータの初期形状をすべてのクレータで同一と仮定しているが月面では層構造が卓越しており、形成されるクレータの形状はその層構造に強く影響されるため、個々のクレータの崩壊度を正しく評価できていない可能性がある。それらの問題をふまえ、本研究ではクレータ初期形状の多様性を評価し、個々のクレータの緩和度と年代の関係を明らかにすることを目的とし、クレータの緩和状態とクレータ放出物上の小クレータの数密度を指標としたクレータ形成年代との関係を調査した。

本研究では、「かぐや」で得られた地形モデルを使用し、各クレータの平均地形プロファイルを算出した。クレータ緩和度を評価するために拡散プロセスに従う緩和モデルを用いて、緩和時間とクレータ形状の関係を調べ、実際の地形とのプロファイルの比較によって各クレータの緩和度を評価する。

まずクレータ初期形状を評価するために、極めて新鮮なクレータの抽出を行った。その際に、クレータ放出物の宇宙風化指標である OMAT [Lucey et al. 2000] を用いた。OMAT 値が 0.25 を超える直径 1.5 km~5 km のクレータを月の 3 つの海から選び出し、平均地形プロファイルを比較した。その結果、フロア深さはクレータ間で多様性があることがわかった。一方で、内壁の傾斜についてはほぼ一定であることがわかった。このことから、クレータ緩和度の指標として、クレータの深さ/直径比よりも内壁傾斜が適していることがわかった。

次に、クレータ形成年代と緩和度の関係を調べるために、Mare Serenitatis の直径 1 km~2 km の 25 個のクレータに対して、内壁傾斜からクレータ緩和度を、クレータ放出物上の小クレータの数密度からクレータ形成年代をそれぞれ評価し、両者を比較した。両者には明瞭な正の相関があり、形成年代が大きくなるほど、緩和の程度が大きいことがわかった。発表では両者の関係から見積もった、月面地形拡散係数について議論する。

月のマグマ噴出量からみた火成活動の不均質性

○田口雅子<sup>1</sup>, 諸田智克<sup>1</sup>, 加藤伸祐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院環境学研究科

月では衝突盆地の形成によってつくられた低地を, マントルの部分溶融によって生成したマグマが埋めるように表面に噴出し, 海が形成された. 月の火成活動は裏側に比べて表側で活発であったことが知られており, 海のマグマ噴出量の違いから, 表側に比べて裏側ではマグマ生成量が少なく, 1/3~1/10 程度であったという議論がなされている[Wieczorek+, 2001; Morota+, 2009]. しかし, マグマ噴出量はマグマ生成量だけでなく, 地下構造, 特に地殻厚に大きく影響を受ける. 一方で, これまでそれぞれの盆地内のマグマ噴出量と地殻厚の関係について, 全球的な定量的調査は行われてこなかった.

そこで, 本研究ではマグマ噴出量と地下構造との関係を定量的に明らかにし, 噴出するための地下構造の条件を制約することを目的とする. そのために, 本研究では月の主要な衝突盆地において, マグマ噴出量と地殻厚の関係を調査し, 噴出条件に制約を与える. マグマ噴出量については, 過去に表側では精力的に調査されてきたものの, 裏側では十分でないため, かぐやの地形カメラ, マルチバンドイメージャのデータを用いて本研究で新たに決定した. また, 地殻厚の調査については Wieczorek+ (2013) による GRAIL 重力場データから推定した地殻厚モデルを用いた.

個々の盆地で地殻構造と海の分布を比較すると, 主なマグマ噴出は最も地殻が薄くなっている盆地中心部で起こっている. また, 海のある盆地では海のない盆地に比べて地殻が薄くなっており, これらの結果からマグマが噴出できるか否かは, それぞれの領域での地殻厚の最小値 ( $H_{min}$ ) が決めていることがわかった. また, 同程度の  $H_{min}$  をもつ盆地であっても, 表側に比べて裏側では海の溶岩流の厚みが~1 桁程度小さく, 先行研究と総合的な結果となった. 一方で, 裏側の中では, SPA と FHT で海の溶岩流の厚みに明確な差は見られなかった.

本発表では以上の研究結果について報告し, それぞれの盆地の地下構造とマグマ噴出量の間を考慮したうえで, 月におけるマグマ生成量の地域性について議論する.

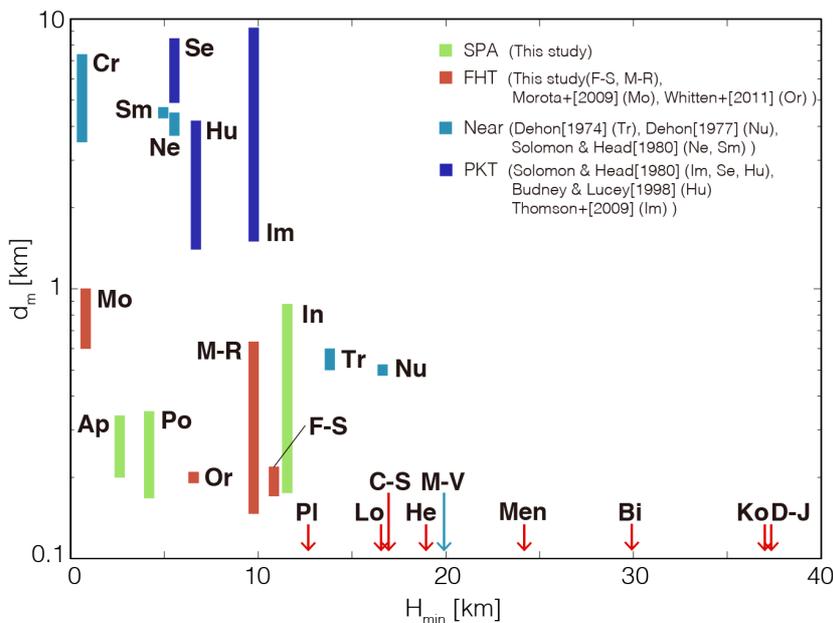


図 1. 各盆地における地殻厚最小値  $H_{min}$  と海の溶岩流の厚み  $d_m$  の関係.

矢印は海のない盆地の地殻厚を示す.

# 月のスコリア丘の形状からマグマの揮発成分の量を推測する試み

○佐伯和人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学・理学研究科

移流拡散モデルを元にした降下火山灰シミュレーションコードである Tephra2(文献 1)は、火山噴火ハザードマップ作成に国際的に活用されている。特に、近年の日本では、原発の再稼働条件の判定にも使われるなど、大きな注目を集めている。テフラとは火口から空中に放出され推積した火山砕屑物の総称であるが、Tephra2 では、火砕物の大気中での移流+拡散モデルによって堆積層の厚さ(実際は単位面積重量)の分布をシミュレーションするソフトウェアである。地球の大気中での噴火と、月の真空中での噴火では、そのメカニズムが大きく異なることが予想されるが、それでも、月での噴火を考える上で、Tephra2 で使われている拡散モデルは、さまざまな示唆をあたえてくれる。特に、今後、月の火山地帯を着陸探査する時に、どのような観察を行うべきかを考える上で、役に立ちそうである。地球の噴煙柱のモデリングさえ発展途上である現状で、噴火の様子が観察できていない月に拡散モデルを適用することはいささか乱暴ではある。それを承知で、類似の拡散モデルを月面の噴火に適用することで、月面の火砕丘の形状からマグマの揮発成分の量を推測できないかを検討し、重力天体着陸探査において観察して確定すべきパラメータについて提案する。

Tephra2 は火口周辺の高度別風向・風速データを用いて、テフラの分布中心をまず計算し、さらに降下時間の間に拡散によってどのように分布が広がるかを計算している。テフラのふるまいは粒径によって大きく異なるので、粒径ごと、さらに噴煙柱から放出される高度ごとにテフラを細かくグループ分けして計算を行う。月面の場合は、環境風の影響は考えなくても良いであろう。また、大気のある地球とは拡散のメカニズムが大きく異なる可能性はあるが、月の噴煙柱の中にもマグマを噴出させているガス成分が存在し、テフラの分布拡大には、拡散モデルがよい近似となりそうに思える。さらに、マグマに含まれる揮発成分の量は、テフラの粒径分布や拡散係数に影響を与えるだろう。

月の火砕丘は地球のものよりも、高さ/幅の比が小さいことが知られている(文献 2)が、その原因は、低重力の他にも、噴煙柱が高い、拡散係数が大きい、噴煙中からテフラが放出される高度分布が高い方に偏っている、テフラの粒径が小さめ、などさまざまな要素が考えられる。どの要素が効くと、着陸地点のテフラ粒径分布がどのようになるのかを示し、それらと揮発成分量との関係を考察する。

## 参考文献

- (1) Bonadonna, C et al. (2005) JGR, 110, B03203. (2) Stopar J.D. et al. (2015) LPSC #1474.

## 月内部進化の初期温度依存性

○小河正基<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大・大学院総合文化研究科

月の内部進化が 4.5Ga の形成直後のマンツルの温度や組成分布にどのように依存するかを調べるため、二次元火成活動・マンツル対流結合系の数値シミュレーションを行った。近年の巨大衝突モデルによると、月は形成時にかなりの高温となり深いマグマオーシャンが出来たと推定されている。しかし、このような高温の初期条件から出発してマンツル進化モデルを計算してみると、初期の活発な火成活動によりマンツルの放射性元素は大部分地殻に濃集し、火成活動は月の歴史の最初の 10-20 億年で終わってしまった。この結果は、4.2Ga 頃から始まり 1.2Ga 頃まで長期間持続した海の火成活動と矛盾する。さらに、このようなモデルから計算されるマンツルの熱史は単調で温度変化 400K にもなる冷却によって特徴付けられ、初期の熱膨張とその後のわずかな熱収縮（半径にして 1km 程度）という観測事実から示唆される実際の月の熱史とは整合的ではなかった。この問題を解消するため、4.5Ga にマンツル深部は 1100-1500K 程度と温度が比較的良かったとした場合のマンツル進化モデルを計算した。それによると、もしマグマオーシャン消失直後のマンツルが組成的に均質であったとすると、最初の数億年から 15 億年程度の期間マンツルの平均温度は上昇し、その後の冷却量も限定的となり観測と整合的な熱史モデルを得た。またこのモデルでは、実際の月と同様、火成活動は月形成後数億年してから始まり 30-40 億年程度継続した。さらに初期条件として、局所的に放射性元素に富む領域をマンツル最上部に仮定すると、火成活動がマンツル進化の歴史を通じてその場所に局在化する事もわかった。しかし、マグマオーシャンモデルから期待されるように形成直後のマンツルが化学成層していたとすると、火成活動は局在化しないという結果を得た。このように、形成直後のマンツル深部が低温で組成的に均質だったというモデルは、観測から推定される月の熱史や火成活動史とは整合的であるが、月の形成やマグマオーシャンの理解とは矛盾する。さらに、月の内部の温度が最初の数億年の間上昇したとすると、月の地殻の残留磁化が示唆する磁場の歴史の説明も困難となる。このように、月の観測事実や月形成過程の理解と整合的な月の内部進化モデルを構成する事は現時点では困難である。この困難の解消のためには、マンツル進化だけではなく形成過程・磁場の成因などもっと広い範囲にわたる総合的な研究が必要である。

## 赤外吸収分光法により検出される月隕石の水

○鹿山 雅裕<sup>1</sup>, 中嶋 悟<sup>2</sup>, 富岡 尚敬<sup>3</sup>, 大谷 栄治<sup>1</sup>, 瀬戸 雄介<sup>4</sup>, 長岡 央<sup>5</sup>, 三宅 亮<sup>6</sup>,  
小澤 信<sup>1</sup>, 関根 利守<sup>7</sup>, 宮原 正明<sup>7</sup>, 留岡 和重<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 大阪大学, <sup>3</sup> JAMSTEC, <sup>4</sup> 神戸大学, <sup>5</sup> 早稲田大学, <sup>6</sup> 京都大学, <sup>7</sup> 広島大学,

月隕石やアポロ試料の微小部分分析、さらには観測衛星による月面探査により、月から様々な水の化学種（水酸基、分子水、氷）が発見されている。しかし、月面から内部に至る水の起源や分布、含水量については未だ不明な点が多い。本研究では、赤外吸収分光法を用いて岩相を異にする月隕石の水の化学種を同定し、各種露出岩体の含水量と水の供給源を物質科学的な側面から検討した。

本研究ではレゴリス、斜長岩、玄武岩およびハンレイ岩質月隕石に対して高温透過赤外吸収その場加熱実験、走査・透過型電子顕微鏡、放射光 X 線回折およびラマン分析を試みた。

赤外吸収分析の結果、ハンレイ岩質月隕石の主要構成鉱物であるカンラン石と輝石から顕著な水の吸収帯が検出された。微弱ながら玄武岩質月隕石の輝石斑晶においても同様に水の吸収帯が認められた。段階加熱実験の結果、これらの水は鉱物の構造に結合する水酸基と分子水と考えられる。Beer-Lambert 法から、ハンレイ岩質月隕石におけるカンラン石および輝石の含水量はそれぞれ少なくとも 238–268 および 198–210 ppm、玄武岩質月隕石の単斜輝石斑晶の含水量は 35 ppm と推定される。ハンレイ岩質月隕石の主要構成鉱物に対する電子顕微鏡、X 線回折およびラマン分析では、地球風化作用による影響は認められず、これらの月隕石に存在する水は月由来と考えられる。

月の露出岩体における全岩含水量は、ここで得られた主要構成鉱物の含水量と岩相のモード組成から推定できる。ハンレイ岩および玄武岩質月隕石の全岩含水量は深部岩体（マントル物質やマントル溶融物由来の貫入岩）と海の玄武岩のそれらに対応し、それぞれ 210–231 および 8 ppm となる。海の玄武岩では単斜輝石斑晶にしか水は存在しておらず、その全岩含水量は低い。その原因としてマグマ噴出時の脱ガス作用が考えられる。深部岩体は、先行研究で予想されている斜長岩地殻（23 ppm）や最も湿潤とされていた月土壌（70 ppm）の全岩含水量よりも高い値を示すことから、月で最大級の水源地と考えられる。

月面観測から検出される水酸基は、深部岩体と太陽風の水素が打ち込まれた月土壌中に存在すると考えられる。鉱物に結合する分子水については、深部岩体の水にのみ起因すると示唆される。氷は彗星・小惑星衝突により供給され、月面の不均一な熱分布に従って存在する。よって、地表温度の低い高緯度の地域ほど全岩含水量は高いと予想される。そこで、将来の月探査において、水を豊富に含むと予想される南極エイトケン盆地やプロセルラム盆地の深部岩体が重要な探査の候補地と期待される。

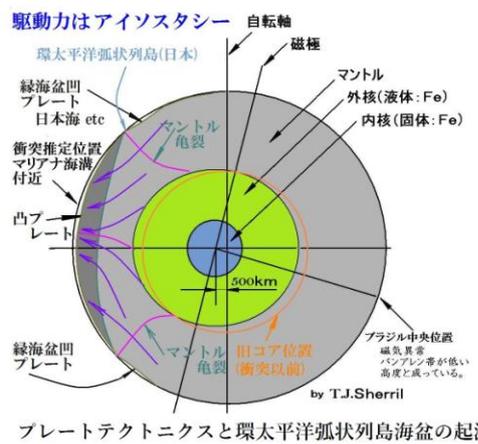
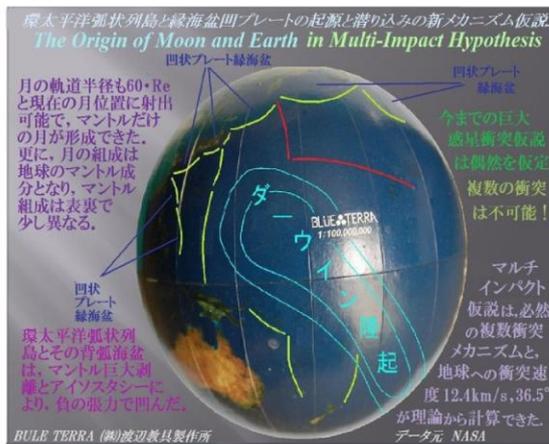
深海洋底とプレートテクトニクスの起源と駆動力の解明

マルチインパクト仮説による月と地球深海底の起源<sup>[1]</sup>

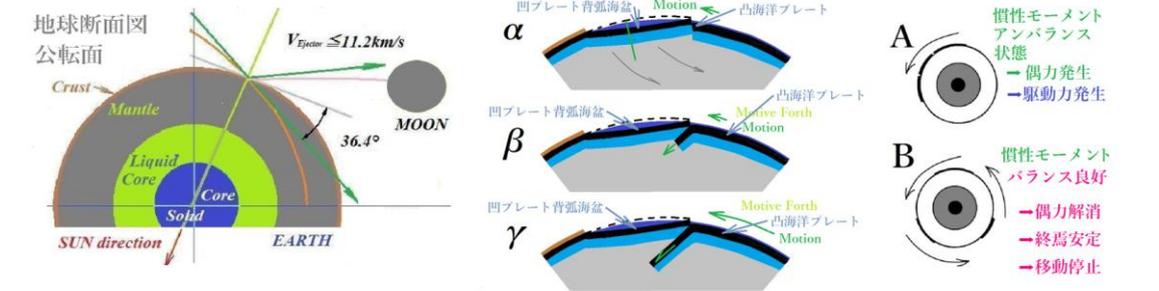
種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2016-9.

アブダクション(仮説的推論) 本仮説は、分化した火星サイズの原始惑星 **CERRA**(ボーデ法則のセレス位置)が木星摂動により木星近点側に長軸一定(エネルギー保存)のまま楕円軌道が偏平化し、木星衝突の直前に潮汐力で断裂した。そのマントル破片が地球に**必然メカニズム**で衝突した。衝突位置や方向(後方)と速度(12.3km/s)と衝突角度(約 30°)により、地球マントルはニュートンの揺り籠の様に、月軌道(60\*R<sub>E</sub>)まで射出されて**月が形成された**。

マルチインパクト仮説は、「月と地球の統一的な起源」を解明した世界初のオリジナルでユニークな衝突仮説です。「ウェゲナー氏が指摘した地球表面の二山頻度<sup>[2]</sup>」, 地球表面積の70%の海が平均深度**5km**となっている事実(地球半径約**6400km**に比較し)という**深海洋底の起源は、既に一昨年度解明された。昨年度はジャイアントインパクト仮説との比較。**



太平洋位置へ断裂片が衝突し、地球マントル欠損がアイソスタシーで隆起して、液体コアの**500km**の偏芯と成り、ブラジル位置でバンアレン帯の低下を説明できた。更に、周囲の亀裂によるプレートの凹みが、環太平洋弧状列島と背弧凹海盆形成の起源であり、マントルの偏芯による慣性能率を最少化させる偶力が、プレートテクトニクスの駆動力である。



凹プレートと凸プレートが互いに押し合う場合には、凹プレートの下に凸プレートが潜り込み始める。高緯度へのマントル片衝突による偶力で軸が傾くと、駆動方向が変化する、  
<sup>[1]</sup>種子彰マルチインパクトによる月と地球の起源(2014),<sup>[2]</sup>A,Wegener 大陸移動説(1927)

## はやぶさ 2 の科学観測

○渡邊誠一郎<sup>1,2</sup>、はやぶさ 2 統合サイエンスチーム<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名大環境、<sup>2</sup>JAXA/ISAS、<sup>3</sup>はやぶさ 2 プロジェクト

始原小惑星からのサンプルリターン (SR) をめざす探査機「はやぶさ 2」は 2014 年 12 月の打上げ、2015 年 12 月の地球スイングバイに成功し、現在は Ryugu (1999 JU<sub>3</sub>) に向けた飛行を続けている。Ryugu は C 型の地球接近小惑星であり、母天体における水質変成や有機物の多様化を記憶する含水鉱物や有機物が表面に存在することが期待されている。

惑星形成過程の研究においては、従来の微惑星集団からの合体成長による惑星形成論に対して、強いガス抵抗を受けるサイズのダスト集合体 (pebble, cm オーダーサイズ) を 1000 km サイズの惑星コアが集めて成長するペブル集積説が近年提案されている。また、木星や土星の動経方向移動が、地球型惑星の形成にも大きな影響を与えたことが示唆されている。一方、小天体からの SR 計画は目白押しである。米国による OSIRIS-REx 計画は B 型小惑星 Bennu からの SR を目指し、2016 年 9 月に打ち上げられる。さらに米国は彗星コアからの SR 計画も検討されている。日本でも、はやぶさ 2 に続く 20 年代前半の打上げに向けた戦略的中型ミッションとして、火星衛星フォボスからの SR をめざす火星衛星探査 (MMX) 計画の検討が進められている。こうした小天体探査成果を総合することによって、未解決の惑星形成過程を実証的にアプローチする「小天体からの惑星科学」を私たちは標榜している。

そこで、本講演では、はやぶさ 2 のサイエンスに立脚して、今後の小天体からの惑星科学を展望したい。まずは、リモートセンシングにより明らかになる天体スケールの不均質と、帰還試料の分析により明らかになる粒子スケールの不均質から、原始太陽系における物質混合を通じた形成過程の制約に迫れることを指摘したい。特に小惑星表面の複数点からのサンプリングに成功すれば、リモートセンシングによる表面地質マップに物質的な対応付けをすることができ、天体スケールの不均質性をより明確にできる。それらの結果から、ペブル集積の適否、小惑星帯での天体移動、外惑星領域からの混入 (巨大惑星移動の影響、彗星起源物質の寄与など)、地球接近小惑星の供給と喪失、スペクトル型の起源、地球型惑星への物質供給などが制約できる可能性がある。また、複数の探査対象天体間での比較小天体学も重要である。微惑星のアナログ天体として、微小重力下での衝突関連物性などを明らかにすること、表層の砂礫/レゴリス層の様態・進化過程、表面微粒子学 (マイクロクレーター、微小熔融附着物、宇宙風化) などに興味を持たれる。さらに小天体での物質進化の解明は、宇宙における生命の準備過程 (前生命進化) の理解に欠かせない。<sup>26</sup>Al による加熱が母天体上での水質変成や有機物の多様化をもたらした証拠を帰還試料から明らかにしたい。

# はやぶさおよびはやぶさ2試料キュレーションと 地球外物質研究グループ

## Curatorial work for Hayabusa and Hayabusa2 sample and Astromaterials Science Research Group

○安部正真<sup>1,2</sup>, 垠本尚義<sup>3,1</sup>, 矢田達<sup>1</sup>, 岡田達明<sup>1,4</sup>, 坂本佳奈子<sup>1</sup>, 吉武美和<sup>1</sup>, 中埜夕希<sup>1</sup>,  
松本徹<sup>1</sup>, 川崎教行<sup>1</sup>, 熊谷和也<sup>1</sup>, 松井重雄<sup>1</sup>, 西村征洋<sup>5</sup>

<sup>1</sup>宇宙科学研究所, <sup>2</sup>総合研究大学院大学, <sup>3</sup>北海道大学, <sup>4</sup>東京大学所,  
<sup>5</sup>株) マリン・ワーク・ジャパン

Masanao Abe<sup>1,2</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>3,1</sup>, Toru Yada<sup>1</sup>, Tatsuaki Okada<sup>1,4</sup>, Kanako Sakamoto<sup>1</sup>,  
Miwa Yoshitake<sup>1</sup>, Yuki Nakano<sup>1</sup>, Toru Matsumoto<sup>1</sup>, Noriyuki Kawasaki<sup>1</sup>, Kazuya Kumagai<sup>1</sup>,  
Shigeo Matsui<sup>1</sup>, and Masahiro Nishimura<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Institute of Space and Astronautical Science, <sup>2</sup>SOKENDAI, <sup>3</sup>Hokkaido University,  
<sup>4</sup>University of Tokyo, <sup>5</sup>Marine Works Japan LTD

Astromaterials Science Research Group (ASRG), established in last year, is continuing curatorial work for Hayabusa return samples and developing the curation facility for Hayabusa2 return samples. For the former, we are going to research, such as international announcement of opportunity. For the latter, we are beginning the detail design of curation facility from this year in time for the sample return in 2020. In this talk, we report on the activities of ASRG after start of organization.

昨年度発足した地球外物質研究グループでは、現在ははやぶさ帰還試料のキュレーション作業を継続するとともに、はやぶさ2帰還試料の受入れ準備作業を進めている。前者については、国際研究公募を行うなど利用研究を行っている。後者については、2020年末の試料帰還に間に合うように、今年度から受入れ設備の詳細設計が始まる予定である。本講演では地球外物質研究グループ発足後の活動状況について報告する。

## はやぶさ 2 搭載レーザー高度計による アルベド観測のための炭素質隕石反射率測定

○山田竜平<sup>1</sup>, 浅利一善<sup>1</sup>, 花田英夫<sup>1</sup>, 野田寛大<sup>1</sup>, 並木則行<sup>1</sup>, 松岡萌<sup>2</sup>, 佐藤勇大<sup>2</sup>,  
中村智樹<sup>2</sup>, 千秋博紀<sup>3</sup>, 吉田二美<sup>1</sup>, 平田成<sup>4</sup>, 松本晃治<sup>1</sup>, 石原吉明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>国立天文台, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>千葉工業大学, <sup>4</sup>会津大学, <sup>5</sup>宇宙航空研究開発機構

我々は小惑星探査機「はやぶさ 2」に搭載したレーザー高度計(LIDAR)を使用して、近地球型 C 型小惑星「Ryugu」のレーザー波長(1.064  $\mu\text{m}$ )におけるノーマルアルベド分布を観測する事を計画している。はやぶさ 2 搭載用の LIDAR には、送信光レーザーと小惑星表面で反射した受信光レーザーの強度を測定する機能が付いており、これまでに LIDAR フライトモデルの調査から、レーザー光強度データよりアルベドを推定するのに必要となる LIDAR の機器特性を決定してきた。この LIDAR で観測されるノーマルアルベド分布から、Ryugu 表層の宇宙風化や水質変成、外来物質の付着などによる変成の程度とその分布に関する情報を得る事が期待される。

その一方、LIDAR の観測条件(波長 1.064  $\mu\text{m}$ 、観測位相角 0deg)において、C 型小惑星表層のアルベドが表層変成に伴いどのように変化するかは未だ十分に理解されていない。また、Ryugu 表層で検出され得るアルベド分布の変化の要因を調べるためには、広い波長範囲での反射率(反射スペクトル)の情報が必要となる。はやぶさ 2 では、搭載されている可視光カメラ(ONC)(観測波長:0.4-0.9  $\mu\text{m}$ )や近赤外分光計(NIRS3)(観測波長:1.8-3.2  $\mu\text{m}$ )の観測から、他波長の反射率情報を得る事が可能である。LIDAR では反射率推定に良く較正されたレーザー光源を使用するので、ONC や NIRS3 で得られた反射スペクトルを比較・統合する際に、1.064  $\mu\text{m}$ において測定したノーマルアルベド値を、比較的高精度な絶対反射率スケールとして利用する事ができる。その一方、各機器では、測定感度や観測位相角が異なるため、データ統合のためにはその補正を行う必要がある。

そこで、本研究では、国立天文台水沢において、波長 1.064  $\mu\text{m}$  レーザーを使用して、C 型小惑星の模擬物質である炭素質コンドライトの反射率を 0-30deg 以上の位相角で測定可能な装置を構築した。この装置では、LIDAR で観測する位相角 0deg でのサンプルの反射率を調べるとともに、位相角( $\alpha$ )で測定される反射率への補正值を得ることができる。本発表では、まず国立天文台で構築したこの反射率測定装置の概要を述べる。そして、加熱脱水の程度が異なる炭素質(CM)コンドライト粉末試料を測定した初期結果、及びアルベド観測への応用について報告する。

## 模擬画像作成のためのラフ地形モデル

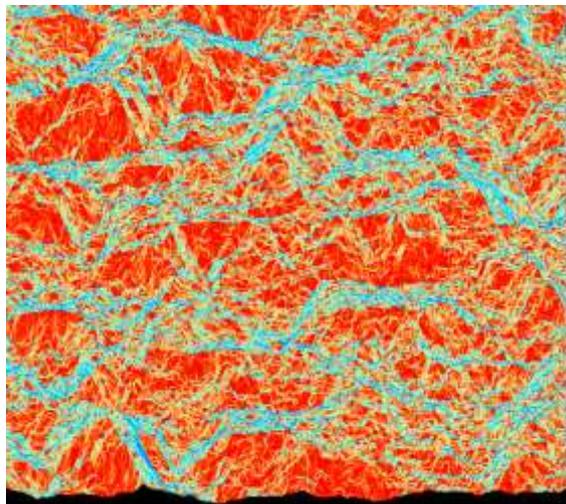
千秋博紀<sup>1</sup>, 諸田智克<sup>2</sup>, 横田康弘<sup>3</sup>, 坂谷尚哉<sup>4</sup>

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター,
2. 名古屋大学大学院環境学研究科,
3. 高知大学,
4. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

天体表面には、大なり小なりの凹凸がある。凹凸は天体衝突や天体同士の合体によって作られた大規模なものから、熱ひずみや外来起源のマイクロインパクトの衝突による微小構造まで、スケールは様々である。従来の研究では、これらの凹凸が見た目の明るさや表面の温度構造に与える影響を、ひとつまたは少数の変数に押し付けることで近似してきた。しかし、これらの変数と実際の地形との関係は必ずしも単純ではなく、観測値とモデル値とを合わせるためのフィッティングパラメタとなっている。このため、例え観測値とのフィッティングによって、表面状態を表すパラメタの値が決まったとしても、表面が細かな凹凸で覆われているのか、それとも大規模な地形が卓越しているのかは区別できないのが現実である。

日本の小惑星探査機「はやぶさ2」の場合、目標天体の形状や自転軸の向きはまだ確定できていない。このため、様々な状況を想定して運用の準備をしておかなければならない。この場合、目標天体の形状を数値的に模擬して作った模擬画像が有用である。しかし、模擬画像を作るにあたって必要な、モデルの解像度（ポリゴンモデルの場合、ポリゴンサイズ）は必ずしも明らかでない。解像度が過剰であれば運用の準備に必要以上に時間を要し、一方解像度が不足している場合には、準備の意義が失われる恐れもある。このため、想定する惑星の地形に応じた、適切なモデル解像度を予め知っておく必要がある。このためには、小規模でパラメタスタディに使える局所モデルを用いた検証が有用である。

我々は、正規分布に従った乱数を用いて模擬的な天体表層地形を作り出すコードを開発した。また、模擬地形をなす面素それぞれに光学特性を与えることで、地形全体としてどのような明るさに見えるのかを求めるコードも開発した。これらのコードを組み合わせることで、素性のわかっている模擬凹凸表面に対して、任意の方角から光を当て、任意の方角から見た際にどのような明るさに見えるのかを数値的に求めることが可能となる。右図にその一例を示す。これはスケールの異なる6層の凹凸を重ねて作った地形を45度の方角から見下ろした際の模擬画像で、観測角の余弦に応じて色をつけている（はやぶさ2 LIDARのように、光源と受光部が同じ位置にある場合に相当する）。本講演では、我々のコードとそこから得られる結果を紹介する。



## 含水鉱物による 700nm 吸収帯の分光撮像

○高松知広<sup>1</sup>, 亀田真吾<sup>1</sup>, 杉田精司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>立教大学, <sup>2</sup>東京大学

2014年、C型小惑星「Ryugu」を目標天体とした小惑星探査機「はやぶさ2」が打ち上げられた。はやぶさ2ミッションの目標の一つは、熱変成の進んでいない始原的な物質（含水鉱物）をRyuguから地球へと持ち帰ることであり、地上からの反射分光測定の結果[Vilas, 2008]から含水鉱物がRyugu表面の一部に存在することが示唆されている。そこで、はやぶさ2では、フィルターホイール内に7枚のバンドパスフィルタが備わった望遠カメラ「ONC-T」を用いてマルチバンド分光観測をおこない、その撮像結果から含水鉱物による700nm吸収帯の存在する地点を特定し、着陸地点を決定する。したがってマルチバンド分光観測から700nm吸収帯の検出が可能であることを地上実験において事前に確認しておくことが重要である。我々はこれまでに、ONC-Tのフライトモデルを用いて、700nm吸収帯を持つCM2コンドライトに対する反射分光実験をおこない、太陽-Ryugu-はやぶさ2の位相角が30°のときに700nm吸収帯を検出可能であることを確認した[Kameda et al., 2015]。しかし、はやぶさ2がRyuguへと到着し、出発するまでの2018年6月から2019年12月の期間において位相角は0°から40°の範囲で変化する。したがって、位相角30°以外においてもマルチバンド分光観測から700nm吸収帯が検出可能であることを検証する必要があると考えられる。またONC-Tによるマルチバンド分光観測は、フィルターを変更する時間などから7バンド合計80s程度の時間を要するので、Ryuguの自転により各バンドでの観測領域に差が生じる。例えば高度5kmにおける観測では、Ryuguが球体であると仮定すると、観測領域が15画素自転方向に移動する可能性がある。よって、観測領域の差を補正した画像から求めたスペクトルが及ぼされる影響の有無を事前に確認することも重要だと考えられる。

そこで本研究では、ONC-Tを模擬したカメラを用いて700nm吸収帯の深さ及び反射スペクトルの位相角依存性の測定と補正による影響の確認を目指した。

本研究では、位相角が0°から40°の範囲での反射スペクトルを得るために、出射角を0°に固定し、入射角が0°から40°の範囲で可変な実験系をハーフミラーと回転ステージを用いることにより作製した。そしてその実験系で、ONC-Tで使われているCCDイメージセンサーと同じものを組み込んだ模擬カメラと、ONC-Tに搭載されているバンドパスフィルタと1枚を除いて同じ透過中心波長をもつフィルターを用いて、炭素質コンドライトの反射スペクトル及び700nm吸収帯の深さを各位相角において求めた。また補正による影響を検証するためにバンドごとに試料の位置をずらした測定を、模擬カメラを用いておこない、反射スペクトル及び700nm吸収帯の深さを求めた。本発表では、その結果について報告する。

## JUICE/GALA-J (1) : JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) ー 概要および日本チームの役割

JUICE/GALA-J (1) : Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission  
 - Introduction, current status, and role of the Japan team

- 塩谷圭吾<sup>1,2</sup>, 並木則行<sup>3,2</sup>, 小林正規<sup>4</sup>, 木村淳<sup>5</sup>, 荒木博志<sup>3,2</sup>, 野田寛大<sup>3,2</sup>, 押上祥子<sup>6</sup>,  
 鹿島伸悟<sup>3</sup>, 宇都宮真<sup>3</sup>, 石橋高<sup>4</sup>, 小林進悟<sup>7</sup>, 尾崎正伸<sup>1,2</sup>, 水野貴秀<sup>1,2</sup>,  
 斎藤義文<sup>1</sup>, 東原和行<sup>1</sup>, 山脇敏彦<sup>1</sup>, 鎌田俊一<sup>8</sup>, 松本晃治<sup>3,2</sup>, 倉本圭<sup>8</sup>, 佐々木晶<sup>9</sup>,  
 岩村哲<sup>10</sup>, 飯田光人<sup>11</sup>, 松本吉昭<sup>11</sup>, 藤井雅之<sup>12</sup>, 藤代尚文<sup>13</sup>, 山室智康<sup>14</sup>,  
 Kay Lingenauber<sup>15</sup>, Thomas Behnke<sup>15</sup>, Juergen Oberst<sup>15</sup>, Judit Jaenchen<sup>15</sup>, Horst-Georg Loetzke<sup>15</sup>,  
 Harald Michaelis<sup>15</sup>, Hauke Hussmann<sup>15</sup>

宇宙科学研究所<sup>1</sup>, 総研大<sup>2</sup>, 国立天文台<sup>3</sup>, 千葉工大<sup>4</sup>, 東工大地球生命研究所<sup>5</sup>, 工学院大<sup>6</sup>,  
 放射線医学総合研究所<sup>7</sup>, 北海道大学<sup>8</sup>, 大阪大学<sup>9</sup>, MRJ<sup>10</sup>, PTI<sup>11</sup>, FAM サイエンス/  
 明星電気<sup>12</sup>, アストロオプト<sup>13</sup>, オプトクラフト<sup>14</sup>, ドイツ航空宇宙センター<sup>15</sup>

We present an introduction, current status, and role of the Japan team for the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) mission. JUICE is a mission of ESA to be launched in 2022, and GALA is one of the payloads of JUICE. Major objectives of GALA are to provide topographic data of Ganymede, the largest satellite of Jupiter, and to measure its tidal amplitudes. The latter is crucially important to detect and to characterize an underground ocean on Ganymede.

For the laser altimetry, GALA emits and receives laser pulses at ~500 km altitude. Wavelength, energy, and nominal repetition frequency of the laser pulse are 1064 nm, 17 mJ, and 30 Hz, respectively. Reflected beam from the Ganymede surface is received by the receiver telescope with 25 cm diameter aperture, re-focused by the BEO including a narrow band-pass filter, and then detected by the APD detector.

GALA is developed in international collaboration from Germany, Japan, Switzerland, and Spain. GALA-Japan will develop the Backend Optics (BEO), the Focal Plane assembly (FPA) including an avalanche photo-diode (APD) detector, and the Analog Electronics module (AEM) in the receiver chain. It should be noted that responsibility of development of the receiver telescope has been moved from Japan to Germany. Based on the heritage of studies for the telescope, GALA-Japan will contribute to the receiver telescope development through the German team.

JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA: the Ganymede Laser Altimeter) におけるプロジェクト概要、現状、および日本チームの役割について示す。ここで JUICE は ESA が主導する 2022 年打ち上げ予定の木星氷衛星探査ミッションであり、GALA はその搭載機器の一つである。GALA の第一の目標は、ガニメデ表面の 3 次元地形及びその時間変動データを取得することである。そのデータは潮汐を通じての地下海の存在、特徴を調べる等の科学研究に極めて有益である。

GALA 基本的には高度~500 km のガニメデ周回軌道にて運用する。高度測定に用いるレーザの波長、出射出力、計測頻度はそれぞれ 1064 nm、17 mJ、30 Hz である。高度測定のため、GALA より射出され、ガニメデ表面で反射されたレーザ光を受光望遠鏡で受ける。その後、受信光は狭帯域フィルターを含む後置光学系(BEO)を経て検出器(APD)に到達する。得られた送受信光の時間差から高度を算出する。

GALA の開発はドイツ、日本、スイス、スペインによる国際協力によって推進している。日本チームは BEO、(APD を含む)焦点面モジュール(FPA)、アナログエレクトロニクスモジュール(AEM)を担当する。従来の国際協力の構想は、日本はこれらに加えて受光望遠鏡の開発も担当する案であったが、その後の状況に合わせた最適化によって、受光望遠鏡はドイツが担当することとなったことを報告する。

GALA のサイエンスおよび回線設計、機器開発について、より詳しくは本学会の関連発表 (JUICE/GALA-(2)~(6))も参照して頂きたい。

## 地球低周回軌道におけるアストロバイオロジー 実験：たんぽぽ計画現況報告を中心に

○小林憲正<sup>1</sup>，三田肇<sup>2</sup>，癸生川陽子<sup>1</sup>，藪田ひかる<sup>3</sup>，奥平恭子<sup>4</sup>，中川和道<sup>5</sup>，別所義隆<sup>6</sup>，  
今井栄一<sup>7</sup>，佐々木聡<sup>8</sup>，矢野創<sup>9</sup>，橋本博文<sup>9</sup>，横堀伸一<sup>10</sup>，山岸明彦<sup>10</sup>，たんぽぽRG<sup>9</sup>  
<sup>1</sup>横浜国大，<sup>2</sup>福岡工大，<sup>3</sup>大阪大，<sup>4</sup>会津大，<sup>5</sup>神戸大，<sup>6</sup>理研 Spring8，<sup>7</sup>長岡技科大，  
<sup>8</sup>東京工科大，<sup>9</sup>JAXA/ISAS，<sup>10</sup>東京薬大

惑星科学やアストロバイオロジーの研究手法としては、理論・計算、観測、探査、室内実験に加え、宇宙実験が考えられる。宇宙実験では微小重力、高真空、強紫外線/放射線などの複合環境利用や高速衝突など、地上で実施が困難な実験が可能である。実験の場としては、国際宇宙ステーション(ISS)や小型衛星などを用いた地球低周回軌道環境が中心である。

たんぽぽ計画は、ISS きぼう曝露部を利用し、超低密度エアロゲルを用いた宇宙塵等の捕集や、有機物・微生物の曝露を行う複合アストロバイオロジー実験であり、2015年5月に実験が開始された。目的は、微生物の惑星間移動の可能性（パンスペルミア）の検証や、地球に降り注ぐ宇宙塵中の有機物の分析やその安定性の評価による、地球生命誕生における地球外有機物の寄与の検証などである。後者においては、捕集実験・曝露実験の両面から、地球外からのアミノ酸前駆体供給を実証することを主要な目的のひとつとしている。そのため、曝露実験においては遊離アミノ酸とその前駆体との宇宙環境下での安定性の比較を中心に行っている。また、捕集した宇宙塵は、アミノ酸分析に供するとともに、種々の顕微分析手法による複雑有機物の総合的キャラクタリゼーションを予定している。

捕集実験は約1年の捕集パネルの曝露を3回、曝露実験は1～3年間の曝露を予定している。そのため、実験開始から1年間曝露された捕集・曝露パネルがすでにきぼう与圧部に取込まれ、NASAにより回収された後、宇宙研に移送され、そこで初期分析・試料分配の後詳細分析が行われることになっている。

曝露実験においては、ヨーロッパとロシアが熱心で、これまでISSや衛星を利用した多数の実験(EXPOSEなど)を行ってきた。たんぽぽやEXPOSEはまったく電力を使用しない実験であったが、欧米ではCubeSatを利用し、電力を使用する実験も考案されている。たんぽぽ宇宙実験の2018年終了予定をにらみ、その後継宇宙実験を海外とのコラボレーションの可能性も含め、検討中である。テーマとしては、宇宙環境下での有機物生成などが考えられる。宇宙から惑星に入射する宇宙線と太陽紫外線の同時照射により、惑星大気中でどのような有機物が生成するか、オゾン層生成前の原始海洋での化学進化などのテーマを検討中である。

## 火星衛星探査ミッションとそのサイエンス

○倉本 圭<sup>1</sup>, 藤本 正樹<sup>2</sup>, 玄田 英典<sup>3</sup>, 今村 剛<sup>4</sup>, 亀田 真吾<sup>5</sup>, 川勝 康弘<sup>2</sup>, 松本 晃治<sup>6</sup>, 三  
柘 裕也<sup>2</sup>, 宮本 英昭<sup>4</sup>, 諸田 智克<sup>7</sup>, 中村 智樹<sup>8</sup>, 小川 和律<sup>9</sup>, 尾崎 正伸<sup>2</sup>, 澤田 弘崇<sup>2</sup>, 橘  
省吾<sup>1</sup>, 寺田 直樹<sup>8</sup>, 臼井 寛裕<sup>3</sup>, 和田 浩二<sup>10</sup>, 渡邊 誠一郎<sup>7</sup>, MMX サイエンスチーム

<sup>1</sup>北大, <sup>2</sup>宇宙研, <sup>3</sup>東工大, <sup>4</sup>東大, <sup>5</sup>立大, <sup>6</sup>国立天文台, <sup>7</sup>名大, <sup>8</sup>東北大, <sup>9</sup>神戸大, <sup>10</sup>千葉工大

火星の二つの衛星、フォボスとダイモスの起源には二つの有力な仮説があり、現時点では決着がついていない。その一つは、揮発性物質に富む始原的小惑星の捕獲説であり、これは低アルベドで吸収特徴に乏しい両衛星の反射スペクトルから支持される。もう一つは、巨大衝突説であり、こちらは離心率の小さな赤道軌道という天体力学的特徴から支持される。衛星は一般的に母惑星形成の副産物と言え、探査により火星衛星の起源を確定することは、火星の起源に迫ることにもつながる。もし捕獲説が正しいと証明されれば、これらの衛星は火星の材料物質の生き残りと思えることができ、その物質科学的性質と捕獲過程の制約を通じて、火星の形成や原始火星圏の姿に迫ることができると期待される。他方、巨大衝突説が正しければ、衛星物質には初期火星の地殻やマントルの破片が含まれるはずであり、それらは火星の初期状態を知る貴重な手がかりとなる。火星は地球型惑星のもっとも外側の軌道を持ち、その形成過程は、低温の外惑星領域からの揮発性物質供給の影響を色濃く受けたと考えられる。火星衛星に刻まれた、これらの過程の記録を解読することは、火星のみならず地球型惑星における大気水圏の形成過程の解明に貢献する。

火星衛星探査計画MMX (Martian Moons eXploration mission) は、衛星物質の組成やその全球分布、内部構造、衛星からの分子放出等を求めるその場リモートセンシングと、フォボスレゴリス試料のサンプルリターンならびに試料の地上分析を組み合わせ、火星の衛星の起源を確定する。試料には鉱物組成、同位体組成、物質組織、年代学など掘り下げた分析が可能であり、その場リモートセンシングによる衛星全球の物質分布についての情報と付き合わせつつ、衛星の起源に決定的な制約を与える。そして、従来の火星本体の探査からはアプローチ困難な、火星の形成過程と当時の物理化学的状態、火星や地球型惑星への揮発性物質の供給機構に対して制約を導く。また、高解像度撮像によるクレータ密度や層序関係の同定、採取試料の分析による宇宙風化過程の解明等を通じ、衛星ならびに火星圏の現在に至るまでの進化とその駆動過程に新たな制約を得る。さらに、衛星が火星赤道軌道を持つことを活かし、火星の大気循環の全球連続モニタリング観測を行う。そして採取試料に火星表層からの形成期以降の衝突放出物が含まれるか探索し、もし見出だされればその詳細分析を行う。これらの観測や分析を通じて、母惑星である火星の表層環境進化とその駆動メカニズムの解明に迫る。

本計画は、我が国の進める次期戦略的中型宇宙科学ミッションとして位置づけられ、2024年の打ち上げと約5年の往還期間を設定し、科学目標の設定と探査機システム、搭載機器の検討が進行中である。我が国が優位性を持つ小惑星サンプルリターンミッションを発展させ、「かぐや」で培った月リモートセンシング探査ならびに「あかつき」が進めつつある惑星大気探査のノウハウを融合して、地球に似る環境を持つ火星圏に迫るミッションであり、多様な科学テーマを包含することが大きな特色である。なお、本計画は始動間もないため、科学目標等の設定は今後修正が加えられる可能性があることには留意されたい。

## 着陸機による火星環境探査の意義・戦略

○臼井寛裕<sup>1</sup>，火星着陸 RG

<sup>1</sup>東工大地球生命研究所

我々は、日本独自の火星着陸探査を目指し、JAXA 内のリサーチグループ（着陸機による火星環境探査 RG：以下、火星着陸 RG）として 2016 年度より活動を開始した。国際的な枠組みでの実施が検討されている火星サンプルリターンや有人探査において日本が主導的な役割を果たすためには、2020 年代までに独自の火星着陸探査を成功させ、国際的な信頼を獲得することが必須となる。

火星は、液体の水を表層に保持していた地球外太陽系天体として、比較惑星学および宇宙生命学的研究を行ううえで理想的な天体といえる。近年の火星研究により、かつて古海洋として表層に存在していた水は、現在は地下氷としてグローバルに遍在している可能性が指摘されており、表層・浅部地下環境の共進化過程の理解の重要性を示している。そこで、先行する欧米の探査では軽視されてきた地下環境に着目するという日本独自の視点と、それを可能にする新規な地下環境探索技術に基づき、火星の表層・地下環境進化の包括的な解明を目指す。

火星着陸 RG では、MMX による火星重力圏への往還技術、および SLIM による重力天体への着陸技術を最大限活用することで、火星着陸探査に特化した技術の獲得を目指している。具体的には、本 RG 活動を通じ、ハビタブル環境を有する可能性のある火星表層・浅部地下探査に必要と考えられる科学測機群（化学探査パッケージ・地中探査パッケージ・生命探査パッケージ）の開発を進めている。また、科学目標の達成に必要な不可欠な着陸候補地点の選定および科学観測を支える工学技術（ローバー走破技術・掘削技術・輸送および EDL システム）の検討も同時に行っている。このように、探査計画の最初期段階から理工間における密なフィードバック作業を行うことで、実際の探査提案に向けたスムーズな移行を目指している。

## 火星着陸探査計画のための生命探査装置

### Life detection instrument for the Mars rover exploration

○山岸明彦（東薬大・生命）、佐藤毅彦（JAXA・ISAS）、宮川厚夫（東薬大・生命）、吉村義隆（玉川大・農）、長沼毅（広島大・生物圏科学）、佐々木聰（東京工科大・医療保健）、今井栄一（長岡技大・生物機能工学）出村裕英（会津大・コンピュータ理工）、藪田ひかる（阪大・理）、三田肇（福岡工大、工）、癸生川陽子（横浜国大・工）、小林憲正（横浜国大・工）、塩谷圭吾（JAXA・ISAS）、宮本英昭（東大、研究博物館）、石上玄也（慶応大）、藤田和央（JAXA）、臼井寛裕（東工大・地球生命研）

近年の火星探査結果を反映して、火星における微生物存在の可能性が再検討されている。第一に、40億年前の火星には海があり、厚い大気に覆われていた可能性がある。すなわち、初期の火星は地球に極めて似た環境があり、生命が誕生していたかも知れない。第二に、現在も微生物生存可能環境が保たれている。すなわち、火星表面の温度は高温時には20℃と、微生物増殖可能な温度となる。気圧が地球表層大気圧の0.6%前後と低いが火星大気圧でも増殖する細菌が地球で発見されている。放射線は200mGy/年程度と、微生物の生存に全く問題無い強度である。火星周回衛星の観察によって、クレーター斜面に季節変動し春と夏に出現する流出地形が発見された。この流出地形はRecurring Slope Lineae (RSL)と呼ばれる。RSLは、地下の凍土の溶解あるいは気化に関連した現象である可能性がある。さらに、NASA探査車MSL: CuriosityはGale Craterで探査を行っているが、表層土壌中に2%の水分子が含まれる事、還元性の硫黄を含む鉱物があること等を見いだした。Curiosityはさらに、一時的な数ppbのメタンを検出し、それがその後減少することを見いだした。還元性の硫黄やメタンは酸化的化合物との組み合わせから微生物がエネルギーを獲得するのに利用可能な分子である。こうした発見は、火星表面に微生物生存環境がまだ残っている可能性を示している。第三に、Vikingの結果の見直しが進み、Vikingの有機物検出感度は究めて悪く、1g土壌中に数 $10^6$ 個の細胞が検出できる程度でしかなかったことも報告されている。実際Curiosityは、泥岩中に有機物があることを見いだした。こうした発見は、これまで火星表層には有機物が無く、微生物の生存可能性がないというViking実験結果を覆す発見である。我々は、火星土壌表面数cmに今も細胞が生存している可能性があるかと予測し、現存する細胞を検出する装置の開発を進めている。装置開発の現状を報告する。

# MMX リモートセンシングによるフォボス分光観測と物質分布推定

○中村 智樹<sup>1</sup>, 亀田真吾<sup>2</sup>, 宮本英昭<sup>3</sup>, 長谷部信行<sup>4</sup>, 岡田達明<sup>5</sup>, ロッシュ テッド<sup>6</sup>, MMX 衛星リモセンコンソーシアム

<sup>1</sup>東北大学, <sup>2</sup>立教大学, <sup>3</sup>東京大学, <sup>4</sup>早稲田大学, <sup>5</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>6</sup>NASA/ARC

MMX (Martian Moons eXploration) 衛星リモセンコンソーシアムチームが検討したリモートセンシングによるフォボス分光観測計画を紹介する。同時に、これまでに得られたフォボス分光測定結果と、隕石物質や隕石加熱実験物との比較検討結果を報告する。

これまでの火星探査機によるフォボス分光観測によって、広い波長範囲のフォボス (red unit と blue unit からなる) の反射スペクトルが得られている。紫外～可視領域: 反射率が非常に低い (可視アルベドが 5~10%)。Red unit、Blue unit とともに 220nm に弱い吸収、350nm 付近に強い吸収がある (Bertaux et al. 2016)。Red unit に 650nm に弱い吸収 (~5%) がある (Fraeman et al. 2012; 2014)。近赤外～中間赤外領域: Red unit、Blue unit とともに 2.7~3 $\mu$ m に吸収があるが、吸収の形状は不明である (Fraeman et al. 2012; 2014)。CF (Christiansen Feature) は 8.6~8.8 $\mu$ m に、RB (Reststrahlen band) は 11、16、20 $\mu$ m 付近に存在する (Giuranna et al. 2011)。MMX ミッションでは、これまでの観測で不十分であった可視、近赤外の高空間分解能分光観測、3 ミクロンバンドの詳細観測、ガンマ中性子分光による化学組成測定を中心に行う予定である。

東北大の研究グループでは、Murchison CM および Tagish Lake 炭素質隕石を真空下 (酸素分圧は 1W) で、400、600、900 $^{\circ}$ C で 100 時間加熱を行い、加熱物生成物の鉱物、反射スペクトル、水分量、同位体分析を行った (Yamashita et al. 2015、Mogi et al. 2016)。また、粒径の効果を調べるため、多くの CM chondrite 隕石の岩石片の反射スペクトルの測定を行い (Sato et al. 2015)、粉体のスペクトルと比較した。

これら実験で得られた実験加熱物や始原隕石の反射スペクトル (0.4~20 $\mu$ m 波長域) をフォボスのそれと比較検討した結果、400、600 $^{\circ}$ C に加熱した Murchison や Tagish Lake 隕石は上述したフォボスの反射スペクトルの多くの特徴を再現できた。1. フォボスの低い反射率、2. 小さく幅狭い 3 ミクロンバンド、3. 可視近赤外領域における全体形状、4. CF 位置、5. いくつかの RB 位置、などが再現できた。一方、red unit に見られる 650nm の吸収やいくつかの RB バンドの位置と形状は再現できなかった。RB に関しては粒径の効果および他の物質の混入が考えられ、また、650nm の吸収の原因に関しては現在のところ不明であり、これらについては今後も検討を継続していく予定である。

## フォボスのレゴリスはどのような進化過程を経ているのか？

Possible evolutionary processes of Regolith on Phobos in a unique circum-Martian environment

○宮本英昭（東大）、和田浩二（千葉工大）、小川和律（神戸大）、坂谷尚哉（宇宙研）、平田直之（神戸大）、菊地紘、新原隆史、逸見良道（東大）、中村昭子（神戸大）、道上達広（近畿大）、諸田智克（名古屋大）、木内真人（神戸大）

現在 MMX(Martian Moons eXploration)と呼ばれる火星衛星サンプルリターン計画の検討が進められている。私たちはその工学・科学の両側面から、フォボスレゴリスの進化過程を適切に評価したいと考えている。工学的には、着陸やサンプル取得時に必要な条件を決めるために、特にレゴリス最上部のバルク物性を理解する必要がある。これは分光学的に得られる情報を解釈する時にも必要となることから、科学的にもその必要度は高い。

フォボスは火星の影響を強く受ける軌道に存在しているため、表面を覆うレゴリスは同じようなサイズの小惑星とは異なった進化過程を経ている可能性がある。フォボスの起源は捕獲小惑星説と火星からの衝突放出物起源説という大きく異なる仮説が支持されており、今の段階では不明であるが、フォボスの低い密度はラブルパイル的な構造を示唆しているのかもしれない。そのような構造を持つ衛星が火星周回軌道に維持された場合、①低い自己重力下における動的な進化（衝突破砕・移動・再堆積による広範囲かつ比較的深い深度までの大規模な攪拌、もしくは天体規模の衝突などによる大規模な削剥などを含む）、②長期間の静的な進化（インパクトデブリを起源とし、多少の垂直攪拌と破砕を繰り返しながらローカルに円熟、圧密などを含む）、③フォボス由来および火星由来イジェクタの分別堆積（火星衛星軌道に散乱した粒子が太陽風の影響を受けて粒径分別を受け、その後土星の環の堆積物が降り積もった衛星アトラスのように、粒径の揃った粒子が低重力下で堆積）、といった3つの方向性をもつレゴリス進化が複雑に関与した形で進むと考えられる。

一方で地形的特徴や粉体工学的な推論などから、たとえば特に工学的に必要な機械的なバルク物性などについては、ある程度現実的な推定を行うことは可能であると考えている。機械的バルク物性は主としては空隙率、粒子間コミュニケーション、化学組成で決まると考えられ、それぞれ粒子サイズ分布・粒子形状・破砕履歴、粒子表面状態・サイズ分布・圧密度、起源・進化過程に応じた地域性と垂直攪拌・水平攪拌の度合い、などが主要因である。これらに関連した情報は例えばフォボス全体としての傾斜分布や、新鮮なクレーターの形状や斜面流動の有無などから、ある程度は制約できるだろう。本講演では、他のいくつかの小天体のレゴリス進化過程のレビューも含め、MMX 計画に向けたフォボスレゴリスに関する検討状況について議論したい。

## フォボス表面の元素分析を行うための LIBS を用いた隕石判別実験

○堀内美沙<sup>1</sup>, 長勇一郎<sup>2</sup>, 亀田真吾<sup>1</sup>, 石橋高<sup>3</sup>, 和田浩二<sup>3</sup>,  
三河内岳<sup>4</sup>, 中村智樹<sup>5</sup>, 杉田精司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>立教大学, <sup>2</sup>NASA Marshall Space Flight Center, <sup>3</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター,  
<sup>4</sup>東京大学, <sup>5</sup>東北大学

火星にはフォボスとダイモスという 2 つの衛星がある。両衛星の起源は、小惑星が火星の重力によって捕獲されたという小惑星捕獲説[Burns, J. (1992) in Mars 1283-1301]と、初期火星に天体が衝突して飛散した火星初期物質が集積したという巨大衝突説[Rosenblatt et al. (2016) Nat. Geosci., 9, 581-583]の 2 つの説が存在している。JAXA は火星衛星の起源を解明するために、フォボスからサンプルリターンを行うという、火星衛星探査計画(MMX)を検討している。起源を判別するためには回収試料が衛星形成時の情報を保持している必要があるため、試料回収地点の詳細な地質均質性を調べるのが重要となる。しかし、搭載が決まっているガンマ線・中性子分光計では、粒子スケールでの元素組成は得ることができない。そこで我々のグループでは、数十秒という短時間で 1 m 以上離れた所を 1 mm 以下のスケールで元素分析が可能な、LIBS(レーザー誘起絶縁破壊分光法)の搭載を提案している。

MMX でその場分析を行える時間は約 1 時間とされている。我々はその時間内で、組成が報告されている炭素質コンドライトと火星隕石を LIBS で計測し、得られた元素組成から双方の判別可能性を検討した。これが可能であれば、MMX の時間内でフォボスの表面が小惑星に似た組成の物質か火星地殻に似た組成の物質かを識別できることになる。実験系は MMX に搭載される実際の装置を想定して製作した。レーザーは出力が約 12 mJ で波長が 1535 nm の小型のレーザーを使用した。分光器は波長範囲が約 195 nm から 1128 nm のものを使用し、解析には約 380 nm~800 nm の範囲を使用した。レーザー光を集光するレンズと試料との間の距離と、分光器用の集光レンズと試料との間の距離は共に約 1.5 m、集光光学系の有効径は約 20 mm とした。試料は真空容器内に設置し  $10^{-3}$  Pa 台になるまで排気した。このような探査の現実的な条件の下で、S/N の成立性なども含めて検証した。計測した試料は、Allende(炭素質コンドライト)、NWA1068(火星隕石)、Zagami(火星隕石)である。レーザーの繰り返し周波数を 10 Hz、分光器の露光時間を 1 s に設定し、1 試料に対して 16 箇所測定を行い、1 箇所に対してレーザーを 150 回照射した。隕石の平均組成を求めるために 16 箇所の発光スペクトルを平均した。平均スペクトルからは主要元素(Fe, Ca, Al, Mg, Si, Ti)の輝線が検出された。さらに Allende から火星隕石の発光スペクトルを差し引くと Allende に多く含まれる Fe, Mg の輝線波長のところは正の値になり、NWA1068 と Zagami に多く含まれる Al, Ca の輝線波長のところは負の値になった。これより LIBS 計測で得られた発光スペクトルの差は、測定試料の元素組成の差を定性的に表していることがわかり、LIBS 計測で小惑星に似た組成の物質と火星地殻に似た組成の物質が判別できる可能性が高いことが示された。また、実際の探査での焦点調整や撮像、測定点の移動にかかる時間を仮定し、16 箇所の測定にかかる時間を計算すると約 34 分となった。これより実際の探査で LIBS を運用できる時間内で本実験と同様の実験が行えることがわかった。以上の結果は、フォボス上で LIBS を用いることで、フォボスの表面が小惑星に似た組成の物質か火星地殻に似た組成の物質かを識別できる可能性が高いことを示している。

## 月火星の地下空洞直接探査 UZUME 計画

○春山純一、西堀俊幸、山本幸生、岩田隆浩、嶋田和人、河野功、大槻真嗣、桜井誠人（JAXA）、佐伯和人（阪大）、諸田智克（名大）、長谷中利昭（熊大）、白尾元理（惑星地質研）、小松吾郎（伊ダヌンツォ大）、小林敬生（韓国地質資源研）、清水久芳（東大）、寺菌淳也（会津大）、辻健（九州大）、道上達広（近畿大）、橋爪光（阪大）、西野真木（名大）、三宅洋平（神大）、長谷部信行（早大）、小林進吾（放医研）、北村健太郎（徳山高専）、横堀伸一（東薬大）、小林憲正（横国大）、道川祐市（放医研）、新井真由美（未来館）、古谷克司（豊田工大）、岩崎晃（東大）、岡田慧（東大）、大山英明、有隅仁（産総研）、吉田和哉（東北大）、石上玄也（慶応大）

月火星への探査は1990年代後半、膨大な数行われてきた。月探査は、1969年から1972年に行われたアポロ有人探査後に一時期途切れたが、1990年代にはクレメンタイン、ルナーブロスペクター探査で再開され、今世紀になっては、欧州の月探査技術実証衛星スマート1を皮切りに、日本の大型月周回探査 SELENE（愛称「かぐや」）の成功で一気に加速を見せた。SELENEに引き続いてインド、中国、そしてアメリカが、次々と月探査機を打ち上げ、中国に至ってはアポロ以来となる月面着陸を成功させるに及んでいる。火星は、見方によっては月以上に探査が進められている。1970年代に既にバイキング1、2号着陸船が着陸に成功し、その後も多くの探査機が送り込まれている。特に今世紀になっては、2年ごとに訪れる探査の機会を欧米は確実に活かし、周回機、そして探査車を火星へと送り込み、非常に多くのデータを得ることに成功してきている。インドもまた火星周回機を送り込むことに成功した。月火星の表面はこれら欧米、インド、中国の遠隔・その場探査によって、詳細な調査が続けられている。

これまでの月火星の遠隔・着陸探査によって、数多くの知見が蓄積されてきた。一方で、新たな問題も見えてきている。こうした時代の中で、我々は、次の探査の対象は「地下空洞」内であると考えている。月火星には地球のような厚い大気は全くなく、放射線を遮る十分な磁場も無い。月火星の表層は、変形・変成を受け続けている場所である。場合によっては、必要となる過去の情報をかなり失っていると考えられる。それに対して、地下空洞は構成する物質や、その組織が「新鮮」なまま保存されているはずであり、得られる情報も新たな可能性を秘めている。こうした地下空洞は、これまで地下故、遠隔探査では発見されにくかったが、最近、月火星に、通常の隕石孔に比べ深さ-直径比が大きい縦孔が発見されてきており、これらは地下空洞につながっていることが分かってきた。すなわち、地下への道筋が見出された。今まさに、月火星の地下空洞への直接探査を具体的に検討すべき時機が来ていると我々は考えている。

2016年6月、宇宙理学委員会により、「月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ」の設立が承認された。UZUME計画として研究を重ねてきたものが、正式にプロジェクト化へ向けて開始するように容認されたことになる。一方、海外でも月や火星の縦孔・地下空洞探査への興味が高まり、研究も進み始めている。昨今の世界の月火星探査成果、日進月歩の月火星研究の現状を踏まえてこれまでの検討をブラッシュアップし、我が国の長期的な宇宙探査構想の中で、月火星の地下空洞直接探査を位置づけること、実りある月火星の地下空洞直接探査を具体化することが、急ぎ進められなければならない。

本講演では、国内外の動向を踏まえ、月火星の地下空洞直接探査 UZUME 計画についての検討状況を述べることとする。

## UZUME 計画に向けて室内衝突実験からの考察

### ～楕円クレーターと縦孔形成の実験的研究

○道上達広<sup>1</sup>, アクセル・ハガーマン<sup>2</sup>, 諸田智克<sup>3</sup>, 春山純一<sup>4</sup>, 長谷川直<sup>4</sup>

<sup>1</sup>近畿大学工学部, <sup>2</sup>オープン大学, <sup>3</sup>名古屋大学, <sup>4</sup>ISAS/JAXA

UZUME 計画では、月と火星の縦孔探査を予定している。月に見られる 100m サイズの縦孔は楕円形をしており、縦孔以外の楕円クレーターも含めた形成過程を本研究では実験的に調べた。

天体表面で観測されるほとんどの衝突クレーターは、斜め衝突によって形成される。しかしながら、斜め衝突の実験的研究は少なく十分とは言えない。特に、月で観測される 100m サイズのクレーターは、強度支配領域で、1MPa オーダーの強度で形成されると考えられるが、1MPa オーダーの標的に対する斜め衝突実験は行われていない。衝突クレーターは、衝突天体がある臨界角以下になると、楕円クレーターになる。臨界角は物質強度に影響されるので、本研究では、圧縮強度 3.2MPa、引張強度 0.83MPa のモルタル標的に対して、斜め衝突実験を行い、楕円クレーターが形成される臨界角を実験的に調べることにした。本研究の目的は、100m サイズ以下の月の楕円クレーターと縦孔の形成条件に制約を与えることにある。

実験は、JAXA 宇宙科学研究所の 2 段式軽ガス銃を用いて、弾丸には直径 7.14mm のナイロン球を使用した。1 つ目の実験は、楕円クレーター形成を調べるために行われた。直方体の標的に対して、衝突速度約 2.3 km/s、衝突角度（標的表面からの仰角）5°から 90°で衝突実験を行った。その結果、楕円クレーターが形成される臨界角は 15°から 20°の範囲であることが分かった。2 つ目の実験は、縦孔形成を調べるために行われた。地下空洞に繋がる月の縦孔を模擬して、標的の衝突反対面に直方体の空洞を作り、1 つ目の実験と同様の条件で衝突実験を行った。その結果、クレーターは衝突反対面にも形成され、衝突面のクレーターと繋がったときに縦孔が形成された。同じ衝突角度では、縦孔を含むクレーターの大きさと輪郭は、1 つ目の実験結果の縦孔を含まないクレーターの大きさと輪郭と、ほぼ同じであることが分かった。加えて、この実験で得られた縦孔の断面は、月の縦孔の断面と非常に類似している。これは、月の縦孔が斜め衝突によって形成された可能性を示している。

最後に、今回の実験結果と衝突臨界角とクレーター効率の経験式から、月に楕円クレーターが形成される確率を、衝突速度別に見積もった。その結果、衝突速度が小さいほど、楕円クレーターが形成されやすく、縦孔を含む 100m サイズの月の楕円クレーターの大部分は、2 次クレーターの可能性が高いことが新たに分かった。

## スペクトルプロファイラデータ可視化 Web-GIS 「月光」

### への統計解析機能の導入：

### 分光データに基づく月面鉱物マッピングに向けて

飯村彰太<sup>1</sup>, 小川佳子<sup>1</sup>, 林洋平, 平田成<sup>1</sup>, 寺菌淳也<sup>1</sup>, 出村裕英<sup>1</sup>, 松永恒雄<sup>2</sup>, 山本聡<sup>2</sup>,

横田康弘, 大竹真紀子<sup>3</sup>, 大嶽久志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>会津大学 <sup>2</sup>国立環境研究所 <sup>3</sup>JAXA

月周回衛星「かぐや」によって得た可視-近赤外分光計スペクトルプロファイラ(SP)のデータは、Web-GIS「月光」([http://fructus.u-aizu.ac.jp/gekko\\_info/](http://fructus.u-aizu.ac.jp/gekko_info/))上で閲覧・ダウンロード可能である(Hayashi, et al. 2015)。しかし、現在の「月光」では、実用的な解析機能や統計分析機能の実装には至っていない。

そこで、今回は今後の拡張に向けた初期段階として、主成分分析機能の実装を行う。SPデータの反射率を主成分分析し、抽出した第N(N=1, 2, 3...)主成分のスコアを色別に分けて、「月光」のGIS上にマッピングさせる。各主成分スコアの分布は、SPスペクトルの明度(アルベド)分布や赤化度分布、吸収帯の特徴量分布にそれぞれ対応すると考えられ、月面の鉱物分布に関する情報を含んでいる。

今回の実装は先行研究(Sugimoto, AY2013, Graduation Thesis, University of Aizu)で追加された、「月光」への機能追加のためのフレームワークを十分理解し、今後の発展的解析機能の実装の足がかりにするという位置付けである。今後、ユーザが機能方法を指定・選択するだけで、簡単に解析結果を表示することができ、解析機能の組み合わせも行えるような汎用性を持たせることを目標としている。

本講演では、今回の実装についての報告、今後の機能拡張にむけての方向性と課題についても議論したい。

# 画像マッチングによる かぐや搭載スペクトラルプロファイラの 観測点位置の高精度化

○石原吉明<sup>1</sup>・大竹真紀子<sup>1</sup>・横田康弘<sup>2</sup>・松永恒雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISAS/JAXA・<sup>2</sup>筑波惑星研究会・<sup>3</sup>国立環境研究所

月周回探査衛星「かぐや」に搭載されたスペクトラルプロファイラ（SP）は、月面の約7000万点（フットプリントサイズ500 m x 500 m）について、可視・近赤外領域の波長域の連続分光データを提供し、これまで純粋斜長石やカンラン岩の全球分布など、多くの重要な知見をもたらした。しかしながら、SP プロダクトに付与されている観測点位置情報は、ローカルな詳細解析を行うには十分な位置精度を有しないという問題があった。これは特に延長ミッションフェーズ移行後の軌道追跡データの減少後やさらにリアクションホイールの不具合によりスラストによる姿勢維持モードへ移行した後の軌道決定精度・姿勢決定精度の悪化後に取得されたデータについて顕著である。このため、特徴的な岩相の地域の詳細解析の為に、マルチバンドイメージャ（MI）のデータ等との統合解析を行う際、個々の研究者が改めて対象とする SP 測点位置を確認し、必要に応じて補正することが必要であった。SP データには補助観測画像として、同時観測された MI の単バンド画像もしくは TC 単眼視画像が付随しており、同時観測画像上での SP 測点位置（画像上でのピクセル座標）は別途補助情報として提供されている。従って、研究者は同時観測画像が月面の何処を撮像したものを目視等でリファレンスデータと比較確認し、SP 測点を補正してきた。

本研究では、SP プロダクトに含まれる測点位置の補正を予め行ない、絶対位置精度として SP 測点サイズ程度まで高精度化した観測点位置をプロダクトに付与して提供することを目指し、手法の検討から実作業、プロダクト更新まで行った。観測点位置の補正にあたっては、月地形およびアルベド分布データを元に模擬同時観測画像を生成、模擬画像と実画像との画像マッチングにより実同時観測画像の月面位置情報を更新するという手順を取った。また、模擬画像生成にあたって用いる地形・アルベド分布データは、地形データとアルベド分布データ間の整合性等の観点から MI マップデータを用いた。高精度化手順の適用が出来ない観測点を除いた約5560万点について観測点位置を更新し、プロダクト作成を行った。一部抽出して目視にて検証したところ、目標精度は概ね達成されている。

本研究により更新された SP プロダクトは、SP\_Level2C ver03 として、かぐや（SELENE）データアーカイブを通じて公開済みであることを付記する。

## 宇宙科学研究所／月惑星探査データ解析グループ の取り組みについて

○大嶽久志<sup>1</sup>，大竹真紀子<sup>1</sup>，田中智<sup>1</sup>，増田宏一<sup>1</sup>，山本幸生<sup>1</sup>，三浦昭<sup>1</sup>，石原吉明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構／宇宙科学研究所

月周回衛星「かぐや」は月惑星科学の進展に貢献し、1990年代以降の世界の月探査機で第2位の論文数を創出している。今後、月惑星の起源・進化解明をめざして更に高次の研究で世界を牽引し、「かぐや」等の月惑星探査の成果を最大化するためには、大量の探査データ（海外探査機も含む）を高次処理・解析可能な体制と環境が必要である。これは日本が月惑星探査の戦略／計画を立案し、技術研究を行う観点でも重要である。

米国ではNASAやUSGS（地質調査所）等が高次プロダクト作成のための体制・環境を構築し、研究・探査に活かされている。日本においてはユーザ個人のデータ処理能力・努力に依存する状況であるため、このままでは世界トップクラスのサイエンス成果の発信や、自立的な探査戦略／計画の立案が今後難しくなることが予想される。

このような現状の課題に対し、今後のSLIM等の月探査、火星衛星探査（MMX）計画等の成果最大化に向けて、JAXAとして今後どう取り組むべきかについて述べたい。

## 着陸探査用その場元素分析・年代測定装置の開発

○亀田真吾<sup>1</sup>, 堀内美沙<sup>1</sup>, 長勇一郎<sup>2</sup>, 黒川宏之<sup>3</sup>, 臼井寛裕<sup>3</sup>, 三浦弥生<sup>4</sup>, 関根康人<sup>4</sup>,  
杉田精司<sup>4</sup>, 岡崎隆司<sup>5</sup>, 笠原慧<sup>6</sup>, 横田庄一郎<sup>6</sup>, 齋藤義文<sup>6</sup>

<sup>1</sup>立教大理, <sup>2</sup>MSFC/NASA, <sup>3</sup>東工大 ELSI, <sup>4</sup>東大理, <sup>5</sup>九大理, <sup>6</sup>ISAS/JAXA

我々はこれまでに月惑星着陸探査機搭載用の元素分析装置の検討を進めており、特に、その場での K-Ar 年代測定を実現するための検討を中心とした技術開発を行ってきた。現状で最良と考えられる手法では K を LIBS で計測し、Ar を質量分析器で計測する手法である。LIBS や質量分析器自体は、宇宙での使用実績のある装置ではあるものの、K-Ar 年代測定を実現するためには、その他にも、特に真空槽の開発、小型配管による実験実証などが必要である。2013 年度頃までの検討においては、実験の原理実証は完了したものの、日本の中型計画において搭載機器として使用することは不可能な大きさ、質量を要するものになっており、また、小型化の目処は立っていなかった。昨年度までに真空封止部の部品選定と温度試験を実施し、火星環境下でも充分使用可能な真空封止材料を選定することができた。これらの検討結果をもとに、今年度は小型ローバに年代測定装置の試作機を搭載して運用試験を実施する予定である。この試作機では、測定原理実証機に用いた装置に比べて、配管類を小型化し、小型探査ローバに搭載可能な大きさとなっている。また、レーザモジュールには使用可能温度範囲が広く、かつ小型軽量なものが採用されている。完成した装置に、Ar を人工的に封入した試料を設置し、レーザによって抽出したガスが質量分析計で検出できることを確認することが出来た。2016 年度より開始した着陸機による火星着陸探査 RG 活動において K-Ar 年代測定とその他の元素分析・同位体分析 (D/H など) の同時測定の重要性が指摘されており、探査システムの検討に加え、測定装置の検討を進めている。

# Chang'e 3 ローバ搭載月地下レーダおよび SELENE 月レーダサウンダによって 雨の海で観測された地下構造の比較

○熊本篤志<sup>1</sup>, 石山謙<sup>2</sup>, J. Feng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東北大, <sup>2</sup>ISAS, <sup>3</sup>中国国立天文台

Chang'e 3 (CE-3) および SELENE が雨の海北西部で観測した以下構造の比較を行った。

CE-3 ミッションでは, Yutu ローバに搭載された月地下レーダ (Lunar Penetrating Radar, LPR) を用いて直陸地点 (19. 51°W, 44. 12°N) 近傍での地下探査が行われた。LPR は 60 MHz, 500 MHz の 2 周波で観測を行うパルスレーダで, 2013 年 12 月から 2014 年 1 月までの期間, ローバの移動経路 (約 114 m) に沿って地下探査を実施した。60MHz の観測では, 深さ 140 m (~2300 ns), 240 m (~3700 ns), 360 m (~5800 ns) の地下レゴリス層からのエコーが確認された (Xiao et al., 2015)。

SELENE ミッションでは, 高度 100 km の極軌道を周回する SELENE (かぐや) 衛星に搭載された月レーダサウンダ (Lunar Radar Sounder, LRS) で, 月全球での地下探査が行われた。LRS は 4~6 MHz を観測帯域とするチャープレーダで, レンジ分解能は 75m (真空中) である。2007 年 12 月から 2008 年 9 月までの運用期間に, 月全領域を水平分解能 76 m で観測した。これらの全球観測から, 月表側の雨の海を含む複数の海領域において深さ数 100m の地下レゴリス層からのエコーが発見された (Ono et al., 2009)。

本研究では, CE-3 の着陸点近傍での SELENE/LRS データに注目した。これらの領域では, Ono et al. (2009) で報告されたような明確な地下エコーは確認できなかったが, CE-3/LPR で観測された深さ 200~240 m (3000~4000 ns) の複数の反射層に対応するエコー成分が同定できた。CE-3 ローバの探査領域は形成年代 1.98 Ga (Morota et al., 2011) の溶岩流ユニット I22 にあったが, そのすぐ北には, 形成年代 3.52 Ga (Hiesinger et al., 2000) の別の溶岩流ユニット I5 との境界がある。深さ 200~240 m の地下反射層はこの境界で地表に露出しており, したがってその形成年代は I5 と同じく 3.52 Ga と推定できる。深さ 200~240 m の地下反射層は, I5 (3.52 Ga) と I22 (1.98 Ga) の溶岩流ユニットを形成した大規模な火山活動の間の複数の小規模な火山活動を経て形成されたレゴリス層・玄武岩層に対応しているものと推定される。

## 月面探査機に向けた土質調査を行なう超小型ローバ

○吉光 徹雄<sup>1</sup>, 大槻 真嗣<sup>1</sup>, 吉川 健人<sup>1</sup>, 國井 康晴<sup>2</sup>, 前田 孝雄<sup>2</sup>, 石上 玄也<sup>3</sup>,  
小林 泰三<sup>4</sup>, 尾崎 吾伸<sup>5</sup>, SLIM ローバチーム

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

<sup>2</sup> 中央大学, <sup>3</sup> 慶應義塾大学, <sup>4</sup> 福井大学, <sup>5</sup> 横浜国立大学

### 1 はじめに

現在, 日本では, SLIM(Smart Lander for Investigating Moon) と呼ばれる月面着陸ミッションが計画されている. この SLIM ミッションでは, 軽量の探査機システムで月表面への高精軟度着陸を実証することで, 高重力天体への着陸探査の高度化を図ることを目的としている. また, 着陸後に月面で活動するオプションペイロードの検討も行われている.

筆者らは, 2015 年に SLIM のオプションペイロードの公募があった際に, 質量 3.2[kg] のローバシステムを提案した. ローバ本体の質量は 2.5[kg] で, ローバ搭載ペイロード質量は 0.3[kg] である. システムにはローバ本体の他に, ローバの保持・分離機構と通信中継機が含まれている. その後, 搭載する科学観測機器の数を増やしたため, ローバシステムの質量は 5[kg] になった. この時のローバ本体の質量は 3.6[kg] で, ペイロードとして 1.2[kg] を搭載可能である.

このローバは小型のため, 車輪型ではなくホッピングにより移動する機能を備えている. また, 月面の地質調査を行なう bevameter と呼ばれる観測装置を備えており, 広範囲に移動して, 複数地点での土質パラメータを測定すると共に, 地盤-作業機械間の力相互作用(テラメカニクス)のデータを取得可能である.

月や火星などの重力天体表面探査において何らかの作業を行なう際には, 土質パラメータの測定と, 地盤作業機械の間のテラメカニクスモデルの構築が重要である. このような小型のローバパッケージをプリカーサとして派遣することで, 地上での設計や開発をスムーズに行なうことができる. 本発表では, このローバについて説明する.

### 2 ローバ

ローバの機能を以下に示す.

- ホッピングによる移動
- 画像を用いた目標地点までの自律移動
- Bevameter による土質パラメータの測定
- 車輪(ローバの移動には用いない)と土壌の間のテラメカニクスモデルの検証のためのデータ取得
- 母船の着陸時の様子の撮像
- 月面の詳細撮像, 温度計測, 電位計測

# ガス惑星における重力ポテンシャルによる 二層分離の影響

○黒崎健二<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻

太陽系内に存在するガス惑星（木星，土星，天王星，海王星）は，水素ヘリウムを主成分とするガスエンベロープを持っている．このガスエンベロープは純粋な水素ヘリウムを仮定したよりも密度が大きいことが重力場の観測から示唆されており，水成分などの重元素が混合していると考えられている (Helled et al. 2011)．木星や土星ではヘリウムが沈降することが知られている (Stevenson 1975, Hubbard et al. 1999, Lorenzen et al. 2011) が，他の重元素の沈降可能性については，まだよくわかっていない．水素と水の場合は任意の割合で混和すると考えられているが (Soubiran & Militzer 2015)，第一原理計算の結果では重力ポテンシャルの影響を考慮していなかった．そこで，本研究では1次元球対称なエンベロープが水素分子と水分子の混合物からなる状況を想定し，水素分子と水分子の混合物の化学ポテンシャルを，重力ポテンシャルの影響を考慮して計算し，二層分離を起こすための臨界温度を導出した．さらに，重力分離を考慮した状態方程式を用いて，巨大氷惑星（特に天王星）の内部構造計算および熱進化計算を行った．

天王星を例とすると，重力ポテンシャルを考慮したときの臨界温度は，惑星大気中や惑星表面 ( $\lesssim 10^2$  bar) での温度よりも低いが，惑星内部 ( $\gtrsim 10^4$  bar) では臨界温度のほうが高温となり，重力分離が発生しうることがわかった．惑星の時間進化計算を合わせて考慮すると，形成初期に大気とエンベロープが重元素で汚染された場合，進化を通して大気成分の凝縮と同時に，エンベロープの深部で重元素の沈降が発生していることがわかった．重元素の沈降に伴い，惑星のエンロトピーは増大するものの，大気上層では水成分が凝縮する効果もあるため，結果として，天王星の半径および惑星放射強度と整合的な進化経路を見つけることができた．本研究から，惑星のエンベロープ内では，重力ポテンシャルが原因で水成分が沈降する可能性を初めて指摘した．この影響は重力モーメントとの整合性から確認できることが期待される．

# 原始惑星系円盤内縁領域の温度構造の解析解

○ 植田高啓<sup>1</sup>, 奥住聡<sup>1</sup>, Mario Flock<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup>Jet Propulsion Laboratory, Caltech

惑星形成において、惑星の種である微惑星がどのようにして出来たのかは大きな問題の1つである。特に岩石微惑星は、岩石ダストが衝突破壊されやすいという問題から、ダストの付着成長による形成は困難であると考えられている。

岩石微惑星の形成モデルの1つに、デッドゾーン内側境界におけるダスト層の重力不安定がある。デッドゾーン内側境界とは、円盤ガスが熱電離することで乱流強度が大きく変化する領域のことで、温度 $\sim 800 - 1200\text{K}$ のところに位置すると考えられている。ここでは乱流強度が大きく変化することで圧力極大点となり、ダストが濃集することが期待されている。本研究の目的は、円盤内縁領域の温度構造を解析的に導出することで、デッドゾーン内側境界の位置を明らかにし、そこへのダスト濃集を議論するための基礎を作ることである。

最新の流体・輻射平衡計算 (Flock et al. 2016) により、円盤内縁領域は、(i) ダストが存在せず光学的に薄いガス領域、(ii) ダストが徐々に凝縮しはじめるが光学的に薄い領域、(iii) 光学的に厚く、ダスト昇華線への中心星輻射が温度を決める領域、(iv) 光学的に厚く、 $\tau \sim 1$  面への輻射が温度を決める領域、の4つの領域に分けられ、階段状の温度分布をとることが明らかになった。

本研究では、この結果を基に、中心星輻射が支配的な原始惑星系円盤の温度分布の解析解を導出した。領域(ii)では、円盤温度がダストの昇華温度となるようなダスト・ガス比が実現することがわかった。領域(iii)では、ダスト昇華面によって決まる $\tau \sim 1$ 面への中心星輻射によって温度がきまることに着目し、局所平行平板近似を用いて赤道面での温度を導出することに成功した。

本発表では、解析解の詳細を述べたうえで、他の円盤加熱機構が与える影響についても議論する。

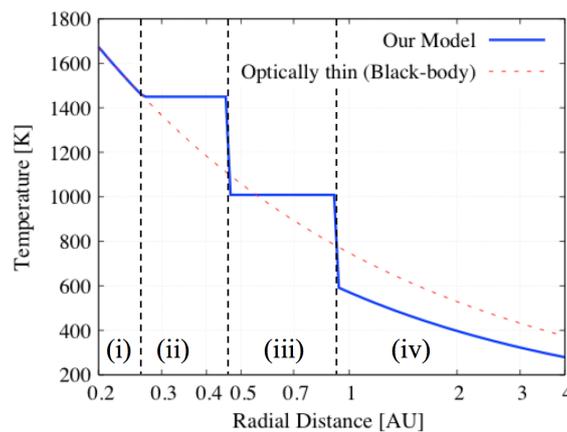


図 1: 本研究で得られた温度分布 (青実線) と光学的に薄い円盤の温度分布 (赤破線)。中心星は温度  $10000\text{K}$ , 半径  $2.5R_{\odot}$  の Herbig Ae 型星を想定した。

## 系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発

山敷庸亮<sup>1</sup>, 細野七月<sup>1</sup>, 黒木龍介<sup>1</sup>, 村嶋慶哉<sup>2</sup>, 佐藤啓明<sup>3</sup>, 真柳和也<sup>2</sup>, 野津翔太<sup>4</sup>, 野津湧太<sup>4</sup>, 伊藤岳陽<sup>5</sup>, 嶋田侑治<sup>5</sup>, 下崎紗綾<sup>6</sup>, 藤田汐音<sup>6</sup>, ○佐々木貴教<sup>4</sup>

<sup>1</sup>京都大学 大学院総合生存学館, <sup>2</sup>京都大学 理学部, <sup>3</sup>京都大学 工学部, <sup>4</sup>京都大学 大学院理学研究科, <sup>5</sup>京都大学 農学部, <sup>6</sup>SGH 滋賀県立守山高校

これまでに発見されている系外惑星系の特徴を統計的に理解するための、新たな系外惑星データベース「ExoKyoto」を開発した。「ExoKyoto」のコアモジュールは C++ で記載され、「系外惑星」「ホスト星」などをはじめとする様々なクラスが定義されており、今後もユーザーの要求に対して柔軟な拡張が可能である。

本データベースは、すでに存在する Exoplanet.eu, Open Exoplanet Catalogue, NASA exoplanet archive などの他のデータベースとの相互比較参照モジュールや、トランジット法のみで確認されているスーパーアースサイズの惑星についての質量推定モジュール (Larsen & Geoffrey, 2014) などを有し、過去のデータベースを包括した上位互換的なデータベースとなっている。また、ハビタブルゾーンについては、Kopparapu *et al.* (2013) の定義の他に、太陽系相当天文単位 (SEAU) などを定義し、異なるハビタブルゾーンの定義を互いに比較することができるようになっている。さらに、Kepler データ等に基づくフレア星のリストや Google Sky を用いた天球上での惑星系の位置表示など、これまでにはなかった多様な機能も新たに組み込まれている。

一方、系外惑星に関するポータルサイト「Extrasolar Planet's Catalogue」の作成も行った。本サイトでは、個々の系外惑星の情報や、主な系外惑星についての紹介記事などを、随時アップデートしていく予定である。系外惑星データベース「ExoKyoto」についても、本サイトにてダウンロードすることが可能である。

Lauren, M. W. & Geoffrey, W. M., The mass-radius relation for 65 exoplanets smaller than 4 earth radii. *ApJL* **783**:L6 (2014).

Kopparapu, R. K. *et al.*, Habitable zones around main-sequence stars: New estimates. *ApJ* **765**:131 (2013).

Extrasolar Planet's Catalogue: <http://www.exoplanetkyoto.org>.

## On the drag capture of a Martian satellite precursor by a disk-like circum-martian atmosphere

Ryo Matsuoka<sup>\*1</sup> & Kiyoshi Kuramoto<sup>\*1</sup>

“Capture scenario” is one of the scenarios explaining the origin of Martian moons. Their reflectance spectrum is consistent with asteroidal origin, and their low- $e$  and low- $i$  orbits suggest that they experienced the dissipation process of their orbital energy. Orbital energy dissipation, however, would shrink the orbital radii, cause the falling of a captured body into Mars, and prevent the formation of a satellite. In this study, we focused to dragging force by a Keplerian-rotating disk-like atmosphere of Mars, because it is expected to extend the life-time of a captured body. To investigate the formation of such atmospheric structure and probability of capture, we performed numerical simulations and analyses. We discuss results of them.

## 周火星円盤状大気による 火星衛星前駆天体の抗力捕獲

松岡 亮<sup>\*1</sup>, 倉本 圭<sup>\*1</sup>

火星衛星の起源説の一つに小惑星捕獲起源説がある。フォボス、およびダイモス両衛星の可視-近赤外反射スペクトルは小惑星起源と調和的で、現在の低  $i$ , 低  $e$  の軌道は軌道エネルギーの散逸が起きたことを示唆する。しかしながら、エネルギー散逸は軌道半径の縮小を引き起こすため、最終的には火星への捕獲天体の落下を招き、衛星の形成を妨げる恐れがある。そこで本研究では、捕獲天体の軌道縮小を抑えつつ軌道進化を引き起こすことが期待できる、Kepler 回転する円盤状大気の抗力に着目した。そのような大気構造の形成と、その抗力による捕獲の可能性を探った数値実験の結果を議論する。

---

<sup>\*1</sup> 北海道大学・理学院・宇宙理学専攻

Department of cosmosciences, Graduate school of science, Hokkaido University

## 高解像度ラージエディシミュレーションで 得られた火星大気最下層における対流の微細構造

○ 村橋究理<sup>1</sup>, 西澤誠也<sup>2</sup>, 石渡正樹<sup>1</sup>, 小高正嗣<sup>1</sup>, 中島健介<sup>3</sup>,  
竹広真一<sup>4</sup>, 杉山耕一朗<sup>5</sup>, 高橋芳幸<sup>6</sup>, 林祥介<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学・理, <sup>2</sup> AICS, <sup>3</sup> 九州大学・理, <sup>4</sup> 京都大学・数理研,  
<sup>5</sup> 松江高専・情報工, <sup>6</sup> 神戸大学・理

火星大気温度構造に大きな影響を与える大気ダストの巻き上げ量は地表面応力, すなわち地表面付近における循環場の構造によって決まると考えられる (Kahre et al., 2006), しかし, 10 m 以下の微細な空間スケールを持つ循環場については, これまで詳しく調べられてこなかった. それに対して, Nishizawa et al. (2016, GRL) は, 火星大気境界層における循環場の微細構造に注目し, 高解像度ラージエディシミュレーションを行った. 彼らは渦度と鉛直風の統計的性質について調べ, 循環場の空間分布について, 高度 62.5 m においては, 細く強い上昇流を境界にして, 比較的弱い下降流を内部に持ったセル状構造の存在を示した. しかし地表面付近における循環場の様子の詳細については調べられていないままである. 本研究ではダスト巻き上げ過程に関わる地表面付近の微細な循環場を理解することを目的として, まず循環場全体を詳細に俯瞰することを開始した. ここではその概況について発表する.

本研究では, Nishizawa et al. (2016) で得られた解像度 5 m のデータを用いて解析を行う. 計算で使用した各パラメータの値は, 火星を想定して設定されている. 加熱・冷却率及び地表温度については, Odaka et al. (2001) による一次元放射対流モデルで得られた結果を外部から与えている. 水平境界には周期境界条件を適用している. 上記データは解像度 10 m で 14:00 (地方時) まで計算した結果を初期値として, 5 m の解像度で 1 時間分計算したものである. 本研究ではモデル最下層 (高度 2.5 m), 14:30 におけるデータを用いた.

図に鉛直風の水平分布を示す. これらは計算領域の一部のみを描画したものである. 上昇流が連なり, 線状につながっている様子が見られる (左図 A 枠内のリング状の構造, 中図 B 枠内の縦方向につながった構造). これに対して, 下降流は細かく分かれて粒状になっている様子が見られる (右図 C 枠内の青色の領域). この特徴は計算領域内のどこにおいても観察される (他の領域については講演で示す). 今後は循環場の発散や渦度, 地表面応力の分布について調べる予定である. その結果より, ダストの巻き上げ過程に対する効果について理解を深めることを目指したい.

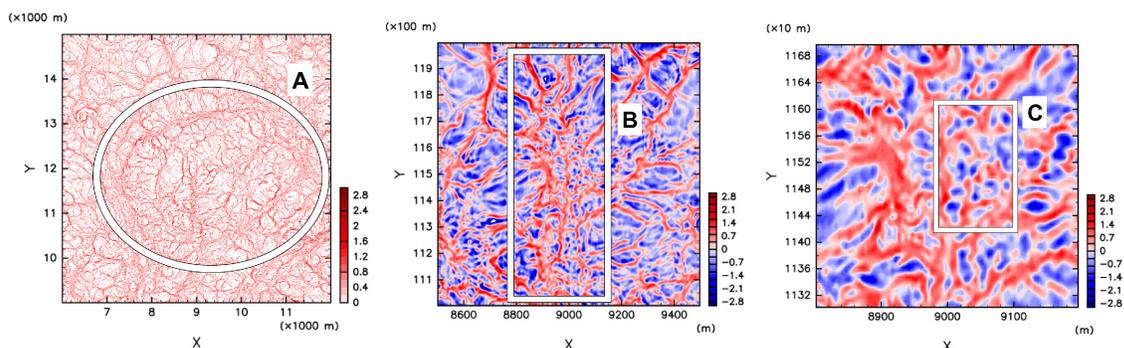


図 1: モデル最下層における鉛直風 [m/s] の水平分布. 左図は計算領域の一部 (6 km 四方) を描画したものの. 中図は左図中心付近の一部 (1 km 四方) を描画したものの. 右図は中図中心付近の一部 (400 m 四方) を描画したものの. 左図は上昇流のみを描画している.

## 2極化した海惑星の表層環境：高圧氷形成による炭素循環への影響

○中山 陽史<sup>1</sup>, 小玉 貴則<sup>1</sup>, 阿部 豊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

惑星表面に液体の水を保持できる軌道領域 (ハビタブルゾーン;HZ) は, 地球のような惑星を想定している [Kasting et al., 1993]. しかしながら, 惑星形成論からは地球に比べ水量の多い (~wt%) 地球型惑星が HZ に形成されうると予測されている [e.g., Raymond et al., 2004]. 惑星に水が供給されるプロセスの多様性を考慮すると, 系外地球型惑星は様々な水量を持ちうると考えられる. 本研究では, 全球が海洋で覆われた惑星を海惑星と呼び, 海洋水量が表層環境に与える影響を考える.

全球的な炭素循環は地表面温度を安定化させる気候調節メカニズムである [e.g., Tajika & Matsui 1992]. 炭素循環の主要プロセスである風化作用として, 大陸風化と海洋地殻で生じる海洋底風化が存在する. 地球では, 大陸風化の寄与が大きく, 負のフィードバックが駆動されることで, 低い CO<sub>2</sub> 分圧に保たれている [Walker et al., 1981]. 大陸の存在しない海惑星では, 大陸風化が働かない. 加えて, 多くの水量を持つ海惑星では海底に固体の高圧氷が形成されると示唆されており [Leger et al., 2004], 海洋底風化さえも働かないと予測されている. その場合, CO<sub>2</sub> 分圧は非常に高く, 高温の環境を持つと見積もられている [Kitzmann et al., 2015].

しかしながら, 惑星内部からの熱によって固体高圧氷が溶融してしまうと予測され, 海嶺近くの高い熱流量を持つ領域では固体高圧氷は存在できないと考えられる. また, 高圧氷の溶融によって, 海底温度は H<sub>2</sub>O の融点に固定され, 海嶺近傍では海洋底風化は効率的に働き, 低温な表層環境が実現される可能性が考えられる. したがって, 本研究では高圧氷の溶融に着目し, 高圧氷形成が表層環境に与える影響を検討した.

高圧氷の溶融とそれに伴う海底温度の上昇を考慮した炭素循環モデルを構築した. 地球に水を足した惑星を想定し, 固体組成等は地球と同等であると仮定した. 高圧氷の溶融に関しては, 1次元の熱輸送モデルと海洋地殻の冷却モデル [Turcotte & Shubert 2002] を組み合わせることで, 高圧氷が溶融する領域を求めている. 炭素循環モデルは地球の炭素循環モデル [Tajika & Matsui 1992] に海洋底風化を付け加えたモデルを用いた. また, 陽イオンの枯渇による海洋底風化の上限 [Sleep et al., 2001] も考慮している. 脱ガス率は惑星内部の熱的状态や惑星炭素量に依存するが, 炭素も水と同様に供給されたと仮定し, 脱ガス率は海洋水量に比例するとした. 海洋水量をパラメータとし, 脱ガスと再ガスが釣り合う平衡状態を求めた.

結果として, 薄い (< 100 km) 高圧氷の場合, 熱伝導で熱が輸送されるため, 全領域が溶融することがわかった. 厚い (> 100km) 高圧氷の場合でも, 典型的に海底の1割以上の領域で高圧氷が溶融することがわかった. これは高圧氷が形成されてもなお風化作用が働くことを示す. また, 高圧氷存在下では, 惑星が全球凍結にいたるほど効率的に海洋底風化が働く. しかしながら, 海洋底風化の上限値を超える脱ガス率を持つ場合, CO<sub>2</sub> が大量に大気中に蓄積してしまい, 高温な環境が実現されてしまう. すなわち, 脱ガス率によって, 海惑星は高温もしくは全球凍結状態といった2極化した表層環境をとることがわかった. これらの結果は, HZ に存在する惑星であっても, 惑星が持つ海洋水量によって表層環境は大きく変わりうるということを示唆する.

# MC-ICPMS を用いた コンドライト隕石の高精度 Mg 同位体分析

○早川瑛庸<sup>1</sup>、福田航平<sup>1</sup>、飯塚毅<sup>1</sup>、比屋根肇<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>26</sup>Al は、半減期 73 万年で <sup>26</sup>Mg に壊変する消滅核種であり、太陽系最初期に形成した物質の相対的な年代を議論するために用いられてきた。マルチコレクター型誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS)を用いた Calcium, Aluminum-rich Inclusions(CAIs)の高精度 Al-Mg 同位体測定から、初期太陽系における <sup>26</sup>Al の初生比(<sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al)<sub>0</sub> は  $5.25 \times 10^{-5}$  であったとされていた(Jacobsen et al., 2008; Larssen et al., 2011)。しかし近年、絶対年代が分かっているエコンドライトの <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al の存在比から逆算した <sup>26</sup>Al 初生比は  $1\sim 2 \times 10^{-5}$  であることが示された(e.g. Schiller et al., 2015)。この値は CAIs から求められた初生比よりも有意に低く、原始太陽系円盤における <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al の均一性について議論の余地が出てきた。

このような背景を受け、我々は初期太陽系における <sup>26</sup>Al の分布を明らかにすることを目的として、MC-ICP-MS を用いた高精度 Al-Mg 同位体分析法の開発を進めている。コンドライト隕石中のコンドルールに関する Al-Mg 同位体分析の例は少なく、その分析対象は炭素質コンドライト中のコンドルールのみに限られている(e.g. Luu et al., 2015)。そこで本研究では <sup>54</sup>Cr 安定同位体異常の違いから、炭素質コンドライト母天体とは異なる形成場で集積した(Warren et al., 2011)と考えられている普通コンドライト隕石中のコンドルールに着目した。

NWA7936(L3.15)のコンドルール 5 つについて電子線マイクロアナライザ(EPMA)による元素組成分析を行った。その後マイクログラインダーを用いてコンドルールを取り出し、硝酸を用いて溶解した。次に作成した溶液の一部を用いて ICP 四重極質量分析計(ICP-QMS)による <sup>27</sup>Al/<sup>24</sup>Mg 比の測定を行った。また残液の一部から、陽イオン交換カラムを用いて Mg を抽出した。得られた Mg の抽出溶液について、MC-ICP-MS を用いて Mg 同位体分析を行った。

EPMA の結果から、1 つはタイプ IA(FeO-poor olivine, ol > 80%)、4 つはタイプ IAB(FeO-poor olivine, ol < 80%, px < 80%)コンドルールであることが分かった。また ICP-QMS 分析から、個々の <sup>27</sup>Al/<sup>24</sup>Mg 比は 0.058 から 0.109 と求められた。Mg の抽出では約 90%以上の高回収率を達成した。MC-ICP-MS 分析の結果、 $\mu^{26}\text{Mg}^*$  の値-13.1 ppm から 4.3 ppm が得られたが、誤差の範囲内で標準試料に対する <sup>26</sup>Mg の過剰は確認できなかった。そのため今回の結果から普通コンドライトコンドルールのバルクアイソクロンが示す <sup>26</sup>Al の初生比を求めることはできなかった。今後は、様々な <sup>27</sup>Al/<sup>24</sup>Mg 比を持つコンドルールについて <sup>26</sup>Mg の過剰の有無を調べ、それらの関係性について議論する予定である。

# 始原的炭素質コンドライト Acfer 094 の マトリクスの微細構造

## Fine-scaled investigation of matrix in primitive carbonaceous chondrite Acfer 094

○中藤亜衣子<sup>1</sup>、土山明<sup>1</sup>、ヴァッカロ・エピファニーオ<sup>2</sup>、ラッセル・サラ<sup>2</sup>、上杉健太郎<sup>3</sup>、  
竹内晃久<sup>3</sup>、中野司<sup>4</sup>、三宅亮<sup>1</sup>、瀧川晶<sup>1</sup>、松野淳也<sup>1</sup>、高山亜紀子<sup>1</sup>

1 京都大学、2 ロンドン自然史博物館、3 高輝度光科学研究センター、4 産業技術総合研究所

○A. Nakato<sup>1</sup>, A. Tsuchiyama<sup>1</sup>, E. Vaccaro<sup>2</sup>, S. Russel<sup>2</sup>, K. Uesugi<sup>3</sup>, A. Takeuchi<sup>3</sup>, T. Nakano<sup>4</sup>, A. Miyake<sup>1</sup>,  
A. Takigawa<sup>1</sup>, J. Matsuno<sup>1</sup> and A. Takayama<sup>1</sup>

1Kyoto University, 2 National History Museum, London, 3 Japan Synchrotron Radiation Institute (JASRI), 4  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Acfer 094 は、プレソーラー粒子に富み、含水鉱物をほとんど含まないことなどから、始原的炭素質隕石であると考えられている[e.g., 1, 2, 3]。我々は、初期太陽系での固体原材料物質の集積過程および水質変成過程を明らかにするため、そのマトリクスに着目した。

FE-SEM/EDS 観察から、約 1x2 mm の研磨片中のマトリクスは比較的均質な組成・組織であることが確認された。特徴的な組織として、周囲よりマグネシウムに富み、フランボイダルマグネタイトを多く含む、100x200 μm 程度の Dark Inclusion が見つかった。また、先行研究[e.g., 4]で報告されている非常に <sup>16</sup>O-poor な酸素同位体組成を示す宇宙シンプレクタイト (Cosmic Symplectite, COS) に類似する粒子がマトリクス中に複数分布していた。

Dark Inclusion 領域と、COS を含む領域 (25x25x25 μm) を FIB (Focused Ion Beam) により切り出し、SPring8 BL-47XU にて放射光 X 線 CT 撮像を行った。各領域は、空隙率や組織の異なる複数の岩相を含む事が明らかになった。特に COS を含む領域では、水質変成鉱物と思われる針状の細粒結晶を含む領域や、非常に空隙率の高い領域など 4 つの岩相が複雑に混合して存在している。これら岩相の違いが、2 次的変成度の違いによるものと仮定すると、ミクロンスケールで非常に不均質な変成が生じたことを示唆する。

To understand accretion and aqueous alteration processes in the early solar system, we have been studied about matrix in a primitive carbonaceous chondrite Acfer 094 [e.g., 1, 2, 3]. Based on SEM/EDS observation, we found a Dark Inclusion having Mg-rich composition and framboidal magnetite, and some Cosmic Symplectite-like phases as similar to previous studies [e.g., 4] in homogeneous matrix. We will present 3D computed tomography images and discuss about the detailed constituent mineral, organics and porosity distribution of the matrix.

Reference: [1] Greshake, 1997, GCA 61, 437. [2] Nagashima et al., 2004, Nature 428, 921. [3] Nguyen and Zinner, 2004, Science 303, 1496. [4] Sakamoto et al., 2007, Science 317, 231.

## 原始太陽系星雲における親鉄性元素の分別過程： コンドライト中の金属粒子の SIMS 分析

○比屋根肇<sup>1</sup>, 森下祐一<sup>2,3</sup>, 齋藤元治<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 静岡大学理学研究科,

<sup>3</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門

目的：本研究の目的は、親鉄性元素の分別という視点から原始太陽系星雲の進化を探ることにある。具体的には、(1) 金属鉄中の微量親鉄性元素分析のための SIMS 用スタンダードの作成、(2) Cs<sup>+</sup>ビームを用いた SIMS 分析における各元素の陰イオン生成効率（相対感度係数）の決定、(3) 始原的な Y-81020 (CO 3.05)コンドライトに含まれる金属粒子中の親鉄性元素濃度の測定、をおこなった。

結果：今回分析した元素は、主要親鉄性元素(Fe, Ni, Co)、白金族元素(Os, Ir, Pt)および Au である。Fe で規格化した陰イオン生成効率(相対感度係数)は、それぞれ、Co: 22, Ni: 67, Os: 1090, Ir: 5590, Pt: 45200, Au: 47600 であった。CO コンドライト Y-81020 中のメタル粒子については、マトリックス中に独立して存在する(比較的大きな)メタル粒子と、コンドルール中に存在する小さなメタル粒子の両方を分析した。分析の結果、コンドルール中とマトリックス中のメタル粒子に大きな違いはなく、似たような親鉄性元素存在度パターンを示すことがわかった。その特徴は、(1) 主要親鉄性元素(Fe, Ni, Co)は CI 組成と比較してほとんど分別を示さない、(2) 超難揮発性の親鉄性元素(白金族元素: Os, Ir, Pt)はコヒーレントな挙動を示し、分別をほとんど示さないものから 2 桁以上に達する欠乏を示すものまで存在度に大きなバリエーションがある、(3) Au も欠乏を示すものが多い、などである。

議論：分析結果で興味深いのは、超難揮発性の親鉄性元素(Os, Ir, Pt)の欠乏が多く、メタル粒子で見られた点である。原始太陽系星雲内で、超難揮発性元素を欠乏させることは容易ではない。可能なプロセスとしては、超難揮発性元素が蒸発しきらない高温の状態で、分別した(超難揮発性親鉄性元素に欠乏した)太陽系星雲ガスが生成し、そこからの凝縮によりメタル粒子が生成する場合である。このとき、Au が完全に凝縮する前にメタル粒子がガスから分離すれば Au の欠乏も同時に説明することができる。これは CAI に見られる希土類元素のグループ II パターンの生成過程に酷似している。今回の結果は、コンドライト中の多くのメタル粒子が、その材料物質の段階で、CAI 形成と同様の超高温のプロセスを経験していることを示唆しているのかもしれない。だとすれば、少なくともメタル粒子について、原始太陽系星雲内での大規模な物質循環を考える必要がある。

# マーチンソン隕石およびアエンデ隕石に産する有機物のその場観察

○小林優<sup>1</sup>・二村徳宏<sup>2</sup>・田中真人<sup>3</sup>・中村良介<sup>3</sup>・  
茅原弘毅<sup>4</sup>・小池千代枝<sup>5</sup>・中嶋悟<sup>6</sup>・西戸裕嗣<sup>1</sup>

1 岡山理科大学、2 日本スペースガード協会、3 産業技術総合研究所、  
4 大阪産業大学、5 立命館大学、6 大阪大学

炭素質コンドライトのマーチンソン隕石 (CM2) およびアエンデ隕石 (CV3) の有機物について顕微赤外分光計および旋光計を用いたその場観察を行った。本研究は、隕石中の有機物の種類およびキラリティならびに他の鉱物との共生関係を明らかにすることが目的である。

試料を楔形の薄片に加工し、厚さ 40–50 μm の先端箇所にて散在する有機物を顕微赤外分光法により特定した。図 1 はマーチンソン隕石およびアエンデ隕石の顕微赤外二次元分析結果を示す。有機物 (脂肪族 CH) は含水珪酸酸塩鉱物 (OH) の分布と調和的であり、Bell 隕石 (CM2) について見出された両者の相関 (Kebukawa et al., 2010) と同様の結果となった。

この結果を基に、各試料中の有機物の部分を対象に紫外可視光旋光分析を試みた (図 2)。この分析手法は、隕石薄片中の有機物をその場観察で旋光測定が可能なが示された。

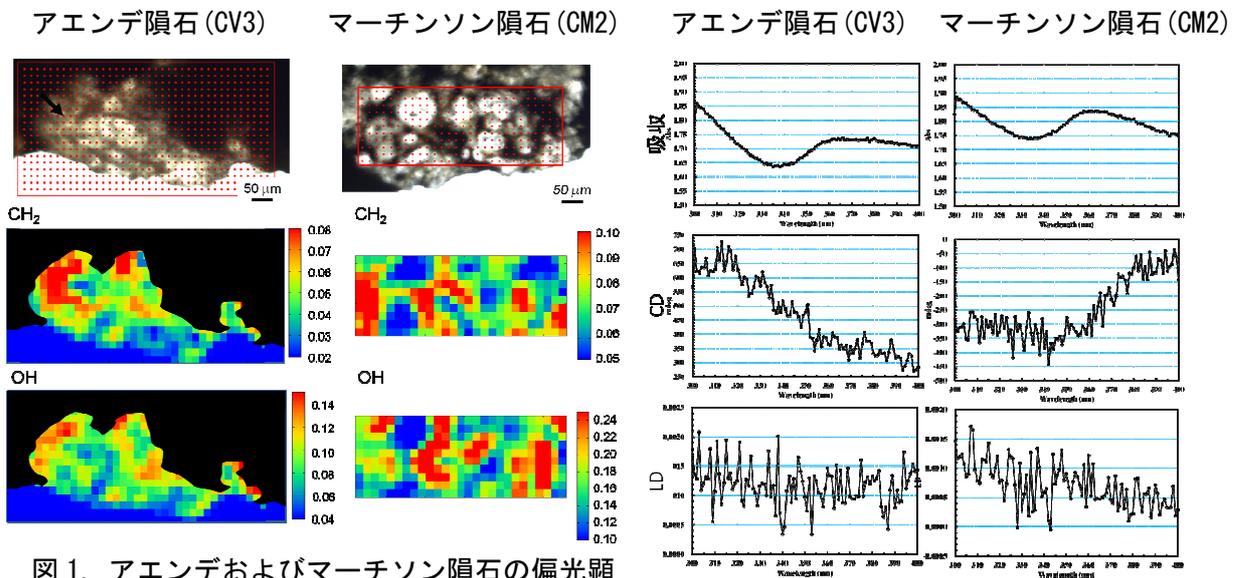


図 1. アエンデおよびマーチンソン隕石の偏光顕微鏡写真ならびに有機物 (CH) および含水珪酸酸塩鉱物 (OH) の吸収強度を示す二次元分布

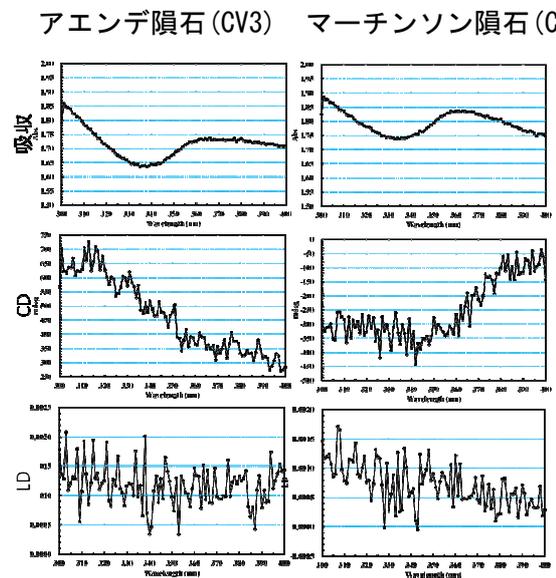


図 2. 隕石薄片を用いた旋光測定の結果アエンデおよびマーチンソン隕石の吸収 (上)、CD スペクトル (中)、および LD スペクトル (下)

## 室内実験による重複クレーター形状の研究

○横山康喜<sup>1</sup>、木内真人<sup>1</sup>、中村昭子<sup>1</sup>、鈴木絢子<sup>2</sup>、長谷川直<sup>2</sup>

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

**はじめに：**天体上のクレーターは二つのクレーターが重なって存在することがある。衝突の際に発生するクレーターのサイズやエジェクタ量に関する研究は進んでいるが、古いクレーターの上に新しいクレーターが重なって形成された時のサイズやエジェクタ量についてはよく分かっていない。今回は材質の異なるターゲットを用いて、重なった二つのクレーターの形状に関する実験を行い、考察を行う。

**実験方法：**ナイロン弾丸を空隙率 30%の石膏に撃ち込む。弾丸の加速には宇宙科学研究所の二段式ガス銃を用いた。衝突速度を 5km/s 程度とし、重なった二つのクレーターの形状をレーザー変位計を用いて測定した。

また、標的物質による違いを調べるために神戸大学でエアガンを用いて砂を標的とした実験も行った。

**結果：**重なった二つのクレーターの境界部の形状を調べた。石膏の場合、境界部の深さはその地点で形成されると考えられる単体のクレーターの深さの和よりも深くなった。クレーター中心間距離にどのように依存するか整理する。さらにクレーターに重なって衝突が起こった領域でスポールが大きくなることがわかった。これは一度衝突が起こったことでその周囲がもろくなっているためだと考えられる。クレーターの深さに関して、先行研究(Yasui et al. 2012, Okamoto et al. 2016)と比較すると、石膏の空隙率が影響する可能性があるため、今後は空隙率を変えた実験を行う。

砂については、元あったクレーターにエジェクタが降り積もり、二つのクレーターの境界部の最も浅い部分が元あったクレーターの方へ偏る。しかし境界部の深さに関しては特筆するような変化は見られなかった。

# 石膏球面にできる衝突クレーターからの エジェクタ破片放出過程に関する実験的研究

○鈴木絢子<sup>1</sup>, 岡本千里<sup>2</sup>, 黒澤耕介<sup>3</sup>, 平井隆之<sup>4</sup>, 長谷川直<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA/ISAS, <sup>2</sup>神戸大学, <sup>3</sup>Chitech/PERC, <sup>4</sup>JAXA/RDD

近年の惑星探査によって、小惑星・小氷衛星等の表面にも衝突クレーターが多数存在することが明らかになった。小天体上でのクレーター形成過程は、主に重力加速度が小さいこととクレーター形成面に曲率がある点において、大きな天体上のそれと異なることが知られている。重力加速度が小さい場合、相対的に物質強度がクレーターサイズに与える影響が大きくなる。直径 1 km 程度の小惑星に存在するクレーターは全て強度支配域であるという見積もりもある (Jutzi et al., 2015)。そして、大きなクレーターになるほど小天体そのものの形状が作る曲率が無視できなくなる。つまり、曲率を持つ面に対する強度支配域のクレーター形成過程は、小天体の衝突史を理解する上で重要である。

曲率を持つ面に対する強度支配域のクレーターは、Fujiwara et al. (1993, 2014), Suzuki et al. in prep.によって実験的に調べられ、曲率が高くなるにつれてスポール部が拡大してクレーター体積が増大することがわかっている。しかし曲率がエジェクタ破片放出に与える影響についての系統的な研究は行われていない。そこで本研究では、エジェクタ破片の放出角度が曲率によってどのように変わるのかを調べた。

JAXA/ISAS にある超高速衝突実験施設の二段式軽ガス銃を用いて実験を行った。標的は含水石膏で、形状は 5 種類 (直径 7.8, 10.9 cm の球, 直径 17.0, 24.8 cm の半球, 一辺 9 cm の立方体), バルク密度 1.08 g/cm<sup>3</sup>, 引っ張り強度 2.36 MPa である。直径 3.2 mm のナイロン球を約 3.4 km/s で標的に衝突させた。本実験の弾丸/標的サイズ比は 0-0.041 である。衝突の様子を高速ビデオカメラ (Shimadzu HPV-X) を用いて 50  $\mu$ s/frame で撮影し、実験後に動画から破片の放出角度を計測した。

曲率の有無に関わらず、最初に細粒破片が円錐形に放出され、数 100  $\mu$ s 後にスポールの放出が始まった。今回はスポールと同程度の時刻・速度で放出される、小さな破片 (数 mm 程度) の放出角度に注目した。衝突点における標的の水平面から測った角度は、曲率が高いほど小さいことがわかった。しかし、放出点における標的の水平面から測った角度は、曲率に依らず同程度であった。つまり、各小破片は局所的には曲率に依らず同角度で放出されるが、標的の形状効果のため、遠景から見ると曲率が高いほどより広がって放出されると言える。

Jutzi et al., 2015, Asteroids IV, 679-699.

Fujiwara et al., 1993, Icarus, 105, 345-350.

Fujiwara et al., 2014, Adv. Space. Res., 54, 1479-1486.

Suzuki et al., in prep.

## 連続スペクトルデータを用いた 月の海の鉱物量比推定手法の開発と適用

○加藤 伸祐<sup>1</sup> 諸田 智克<sup>1</sup> 山口 靖<sup>1</sup> 渡邊 誠一郎<sup>1</sup> 大嶽 久志<sup>2</sup> 大竹 真紀子<sup>2</sup> 二村 徳宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院 環境学研究科 <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

<sup>3</sup>日本スペースガード協会

月のマグマオーシャンからの固化過程とその後の月マンツルの熱進化、大規模な構造変化の有無を理解する上で、月の海の玄武岩組成を調べることは重要である。玄武岩の組成と年代との関係からマンツルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性があり、それによって月マンツルの進化モデルを制約できることが期待される。月の海を構成する玄武岩ユニットの噴出年代とチタン含有量の間を調査したこれまでの我々の研究から、約 23 億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇していることが分かっている。このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えられ、23 億年前以前を「Phase-1 火成活動」、23 億年前以後を「Phase-2 火成活動」と呼ぶこととする。そして、Phase-2 火成活動は嵐の大洋・雨の海の一部の領域で集中して起きていること、海の火成活動のセカンドピークを構成すること、選択的に高いチタン含有量であることから、月深部に起源を持つホットブルームが 23 億年前に発生したという仮説を提唱している。

この仮説を検証するためには、月の海の玄武岩組成をより詳しく調査する必要がある。リモートセンシングデータから、より多く玄武岩の組成に関する情報を得るためには、連続スペクトルデータを用いることが有効である。鉱物はそれぞれの結晶構造を反映した特徴的なスペクトルの吸収帯を持っており、月面の反射スペクトルには様々な鉱物などの混合の影響により複雑な吸収帯が存在する。複雑な吸収スペクトルを個別の鉱物の吸収帯に分離する方法の一つとして修正ガウス関数モデル(MGM)[Sunshine et al., 1990]が一般的に使用されている。しかし、MGM では複数の鉱物の吸収帯をそれぞれ複数のガウス関数で表現するため、フィッティングパラメータが多くなり、安定した解が得られないという問題があった。二村 (博士論文, 2008) では月の主要鉱物であるカンラン石、高 Ca 輝石、低 Ca 輝石、斜長石の反射スペクトルの吸収帯の特徴を少数のパラメータで定式化し、MGM に組み込むことで変数を大幅に減らす方法が考案され、小惑星の構成鉱物の推定に適用されている。本研究では、この手法の式の係数を新たに鉱物サンプルを増やして再決定し、月の海の反射スペクトルに対して適用する。本発表では、手法の紹介とかぐやスペクトルプロファイラーによって得られた月面の反射スペクトルの初期解析結果に関して報告する。

## かぐや分光データの自動分類に基づく 月全球分光特徴量マップで見えてきた大規模地質の特徴

○石原吉明<sup>1</sup>・晴山慎<sup>2</sup>・大竹真紀子<sup>1</sup>・本田親寿<sup>3</sup>・平田 成<sup>3</sup>・諸田智克<sup>4</sup>・Lunar  
Geologic Map W.G. of Japan

<sup>1</sup>ISAS/JAXA・<sup>2</sup>聖マリアンナ医科大学・<sup>3</sup>会津大学・<sup>4</sup>名古屋大学

2000年代中頃以降、日本の月周回探査機「かぐや」や、米国の「Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)」等により、本格的な月リモートセンシング観測が行われ、高精度かつ膨大な探査データが得られている。これらの月探査機によるデータセットは、月の進化や浅部構造を読み解くうえで鍵となる重要な新情報を提供しており、これら近年の探査データを存分に取り込んだ地質マッピングの実施が喫緊の課題となっている。これまでローカルな地質図は多数作成されているが、近年の探査データに基づく全球地質図は未だ作成されておらず、月全球規模の進化や構造を読み解くには全球地質図の作成が強く望まれる。しかし、個々のローカル地質図間では必ずしも地質ユニットの分類基準等が統一されておらず、ローカル地質図の統合による全球地質図の作成は極めて困難である。一方、近年の探査データは単一の観測装置のデータでも数百ギガから数テラバイト以上にもおよび、これまで主流であった研究者の手作業によるマッピングを全球規模で行うことは現実的でない。そこで、我々はコンピュータによる教師なし分類手法を用いた地質マッピングに取り組んでおり、その第一歩として「かぐや」により得られた拡散反射スペクトルデータを元に全球分光特徴量マップを作成した。本研究で作成したマップは全球一様なデータセットから統一基準によるクラス分けにより作成されており、例えばある特徴を持った地域が月面上にどのように分布しているといった、複数枚のローカル地質図では解釈することが困難であった問題に対しても対応することが可能である。下記のような大規模構造の特徴を見いだすことが出来る。

- 表高地と裏高地は分光特徴的に異なり、裏高地はさらに複数クラスに分かれる。また、Mg#はクラス間で分布にある程度重なりはあるものの最頻値は異なっている。Orientale盆地周辺の高地クラスの出現パターンから推定される地殻の深さ方向の構造を合わせ解釈すると、高地領域の分光学的特徴は月マグマオーシャンからの月高地の固化過程をある程度反映していると示唆される。
- 低カルシウム輝石 (LCP) に富むと解釈される分光特徴を持つクラス群は、主として表側の巨大衝突盆地周辺および SPA 内部に分布する。また、表側の氷の海の北岸および裏側 SPA 内のアントニアジクレータ内には最も LCP に富む特徴を持つ同一のクラスが分布している。これは巨大盆地形成衝突によるマントルにまで及ぶ掘削およびマントル成分を大量に含んだ溶融メルトの生成、その後の固化過程を反映していると考えられる。

月画像解析によるクレーター光条線長さの計測：Zモデルとの比較  
 Measurements of crater-ray length on lunar images:  
 A comparison with Z-model

○木下 敏輝<sup>1</sup> 中村 昭子<sup>1</sup> 和田 浩二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院惑星学専攻      <sup>2</sup>千葉工業大学惑星探査研究センター

クレーターから得られるそのクレーターを形成した小天体の情報は限られている。クレーターの直径や深さは衝突天体の直径、密度、衝突速度の関数で表され、具体的にはとある岩石天体表面に残されたクレーターを形成したのが岩石天体の衝突によるものなのか氷天体が高速で衝突した結果によるものなのかを判断することはできない。そこで、新しいクレーターの周囲に見られる光条線に注目し、それが持つ情報からクレーターからは制約できなかったようなクレーターを形成した天体情報を制約することが可能であるかを検証したい。

本研究では、いくつかのクレーターについて光条線の長さを測定した。下の図はクレーター直径に対するクレーター中心から光条線先端までの距離を示す図である。その図に衝突エジェクタ放出モデルであるZモデルから計算した結果を加えた。光条線はクレーター直径が大きくなるにつれ長くなり、Zモデルが予測するエジェクタ厚さが1mm以下の領域には達していない。発表ではクレーター形成年代と光条線長さ、エジェクタ厚さの関係について議論する。

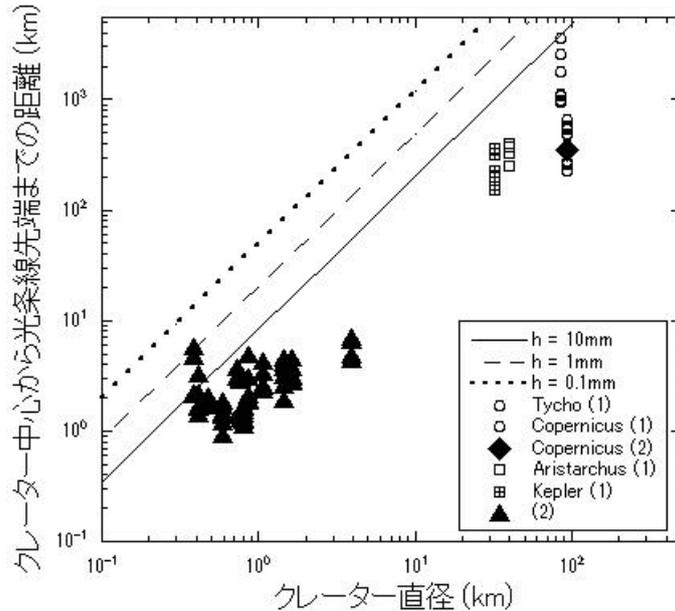


図 クレーター直径とエジェクタ厚さ(h)および光条線長さの比較

(1) Van Diggelen (1969) (2) 本研究

## ディープラーニングを利用した月面スワール探索:

### 月面模擬画像と実観測画像の一致度評価

加藤裕明<sup>1</sup>, 小川佳子<sup>1</sup>, 林洋平, 平田成<sup>1</sup>, 出村裕英<sup>1</sup>, 寺菌淳也<sup>1</sup>,  
大竹真紀子<sup>3</sup>, 大嶽久志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>会津大学 <sup>2</sup> 国立環境研究所 <sup>3</sup> JAXA

月面スワールとは月面において観測されている渦のような形のアルベド特徴を指す。スワールは全部で11個あることが確認されている(Blewett et al, 2011)。しかし、私たちはまだ発見されていないスワールがあるのではないかと考えている。Susa(2016, Graduation Thesis, Univ. of Aizu)はMare Ingenii周辺の一部の領域(20-50°S,150-180°E)で新しいスワール候補を見つけるために目視調査をおこなった。結果新たに13個のスワール候補を発見した。しかし時間を多く要すること、定量的な判定基準がないため客観性が十分でないことなどが問題であった。そこで本研究はディープラーニングによって月面スワール探索の自動化をおこなう。

私たちは最新の数値標高モデルで作成した月面模擬画像とかぐやに搭載したカメラ・イメージャによって得た実観測画像を比較する。対象領域はまずSusa(2016)と同じ領域とする。同領域内には約1000個の実観測画像が含まれる。もし模擬画像と実観測画像間に異なる特徴が見られれば、それがスワール候補となる。スワール周辺の情報を総合的に考慮して、スワール候補からスワールであるものとそうでないものを人間が決定する。この行程を繰り返し、サンプルデータとなるデータセットを用意した後、ディープラーニングを導入して、月面スワール探索の基準を決める学習モデルを作成する。データから繰り返し学習させることで、明確なプログラムを組まなくてもコンピュータが自動でスワールを識別することができるようになる。月面模擬画像と実観測画像を比較したデータを、作成した学習モデルに入力することで、月面スワール探索の自動化が可能となる。

本研究のゴールは模擬画像作成を行うシミュレーションツールと新たなスワールを自動的に見つける学習モデルを作成することである。そして将来的にその手法を適用して月広域でのスワール探索を試みる予定である。

## 地球近傍小天体 Icarus と その同一起源候補天体 2007 MK6 の観測

浦川 聖太郎<sup>1</sup>、大塚 勝仁<sup>2</sup>、阿部 新助<sup>3</sup>、木下 大輔<sup>4</sup>、花山 秀和<sup>5</sup>、宮地 竹史<sup>5</sup>、  
奥村 真一郎<sup>1</sup>、綾仁 一哉<sup>6</sup>、前野 将太<sup>6</sup>、黒田 大介<sup>5</sup>、福井 暁彦<sup>5</sup>、成田 憲保<sup>5</sup>、  
はしもと じょーじ<sup>7</sup>、櫻井 友里<sup>7</sup>、中村 小百合<sup>7</sup>、高橋 隼<sup>8</sup>、谷川 智康<sup>9</sup>、  
伊藤 孝士<sup>5</sup> 吉田 二美<sup>5</sup>、Otabek Burhonov<sup>10</sup>、渡邊 誠<sup>11</sup>、今井 正亮<sup>12</sup>、  
倉本 圭<sup>12</sup>、関口 朋彦<sup>13</sup>、石黒 正晃<sup>14</sup>

<sup>1</sup> 日本スペースガード協会、<sup>2</sup> 東京流星ネットワーク、<sup>3</sup> 日本大学、<sup>4</sup> 国立中央大学、  
<sup>5</sup> 国立天文台、<sup>6</sup> 美星天文台、<sup>7</sup> 岡山大学、<sup>8</sup> 兵庫県立大学、<sup>9</sup> 三田祥雲館高校、  
<sup>10</sup> Ulugh Beg Astronomical Institute、<sup>11</sup> 岡山理科大学、<sup>12</sup> 北海道大学、  
<sup>13</sup> 北海道教育大学、<sup>14</sup> ソウル大学

地球近傍小天体 (1566)Icarus(以下、Icarus) と 2007 MK<sub>6</sub>(以下、MK6) の軌道は類似しており、軌道計算の結果、MK6 は Icarus を起源とする小惑星ではないかと示唆されている (Ohtsuka et al. 2007)。加えて、Icarus と MK6 に類似した軌道を持つ流星群として Taurid-Perseid がある。これらの事象から、我々は「YORP 効果による自転加速、あるいは衝突イベントにより母天体である Icarus(直径 1km) から MK6(直径 250m) が分裂し、分裂により発生したダストが Taurid-Perseid の供給源になった。」と仮説を立てた。仮説を証明するためには、MK6 と Icarus の反射スペクトル (色指数) を測定し、その一致から両天体の起源が同一であることを観測的に示さなければならない。また、YORP 効果が分裂の原因であれば、Icarus の自転周期は、過去の自転周期から変化していると考えられる。あるいは、衝突イベントが分裂の原因であれば、衝突破片天体である MK6 は小惑星のスピリットである 2.2 時間より短い自転周期をしている可能性が高い。いずれにしても、Icarus と MK6 に対する詳細な観測が必要である。我々は、2015 年から 2016 年にかけて、Icarus と MK6 に対する観測を国内外の天文台で実施した。Icarus はこれまで、多くは S 型小惑星と報告され、一部は Q 型小惑星と報告されている (Chapman et al. 1975; Hicks et al. 1998)。Q 型小惑星の観測報告は、宇宙風化を受けていないフレッシュな表面を観測したとも考えられる。2015 年の石垣島天文台における観測結果から、Icarus の  $g-R$  等級に自転に伴うわずかな周期変動の兆候が見られた。一方、 $R-I$  等級には明確な周期変動は表れなかった。また、Icarus の  $R-I$  等級は、典型的な S 型小惑星の色指数 ( $R-I = 0.414$ ) と一致する結果となった。本講演では、データ解析手法 (線状に伸びた光源に対する矩形測光) とこれまでの観測から得られた成果について報告する。

P1-18

地球が宇宙の中心でないのに、赤方偏移が何故地球を中心として観測されるのか？

Though the earth is not the center of the universe,

Why is the redshift observed, as the center of the Earth?

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2016-09.

地球からの星雲距離と赤方偏移の間に比例関係があることを、1929年にエドウィン・ハッブルが提案しています。その法則は、ハッブルの法則と呼ばれています。

銀河の速度は数学的に表すことができ、 $v = H \times d \dots \dots (1)$

ここで、V (速度) は銀河の半径方向の外向き速度であり、d(距離) は、地球から銀河までの距離です。ハッブル定数 H は、(H は ハッブルでは K )  $K = +500 \sim 560 \text{ km./sec. per million parsecs}$  1929~1931年 . 最近では  $72 \pm 4 \text{ km./sec. per million parsecs}$ . です。

その観測結果をドップラー効果だけとして解釈すると、フリードマンの仮説によれば、重力場の方程式では銀河系外星雲が拡大している運動として解釈できる。(アルバート・アインシュタイン) 何故地球を中心、赤方偏移の値が遠方増加し観測されるか、その理由への説明が有りません。観測結果から宇宙が膨張しているとしか云っていません。

赤方偏移の解釈をドップラー効果で説明してから、種々の宇宙論の花盛りです。

<<アブダクションで膨張宇宙論と量子赤方偏移の定常宇宙論を比較すると以下に示す。>>

比較項目 仮説名称	赤方偏移 の原因	地球中心で遠方 ほど周波数の偏 移が大きい理由	3° K背景放射の 説明(証明?) その理由	その他 メリット デメリット
量子赤方偏移 仮説 <i>The Quantum Red Shift Hypothesis</i>	・拡散進行波の エネルギーが空 間で希釈される と、量子効果で波 長が伸びて観測	・観測地点が地 球である ・宇宙が宇宙原 理を満たし等方 均質であるから	閉じた宇宙仮定 ・空間量子赤方 偏移による平均 恒星のスペクト ラムピーク波長 が3° Kにシフト	・宇宙半径が 計算可能 ・輪廻による 宇宙年齢不要 ・コペルニク ス的大転換
ビック・バン 仮説 <i>The Big Bang Hypothesis</i>	・光のドップラ ー効果で波長が 伸びる ・光源の後退速 度に波長が正比 例する	・ビックバン時 の超高压で空間 が均等に膨張を 続けるため ・地球中心の説 明のため	閉じた宇宙仮定 ・ビック・バン 時のなごりで空 間膨張が遠方光 源のドップラー ー効果により波 長がシフトする	・空間膨張の エネルギーが 不明,根拠無し ・一点集中の 理由と根拠は? ・暗黒物質の 仮定が必要

エネルギー保存法則と  $E=h \cdot v$  を考慮すると、希釈されて波長がズレ始める距離  $R_s$  の  $\alpha$  倍の位置では、波長は  $\alpha^2$  倍にずれる。更に、地球(観測地点)中心の赤方偏移も観測される。

宇宙が膨張していなくても、ハッブルの赤方偏移を説明できる新定常宇宙論が完成した。宇宙が閉ていれば、慣性質量は宇宙全ての合力(引力)であり、宇宙が潰れない理由でもある。

[1]Space Quantum Red Shift Hypothesis and New Theory of Non-Expansion Universe 種子彰

地球と月のミッシングリンクを統一的に解明する、

非常にユニークなアイデアによるマルチインパクト仮説<sup>[1]</sup>

The unified manner to clarify the Missing Link of the Earth and the Moon, Multi-Impact Hypothesis<sup>[1]</sup> by the very unique Idea.

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2016-09.

アブダクションにより、月と地球のミッシングリンクとその起源は統一的に解明された。マルチインパクト仮説は極めてユニークで創造的なアイデアである。cf.  $V_{\text{impact}} = 0 \text{ km/s}$

<ユニーク>⇒衝突メカニズムを考えて、偶然 GIH<sup>[2]</sup>から必然 MIH<sup>[1]</sup>のストーリーへ転換。

<< 結論 >> 衝突速度 12.4km/s 角度 36.5度, 地球マントル片が衝撃で射出<sup>[1]</sup>され月となる。

月の起源だけでなく、深海洋底(-5km, 70%表面積)の起源と、隕石重爆撃期と小惑星帯の起源も全て解明した。プレートテクトニクスの起源と駆動力を、衝突によるマントルの欠損と、アイソスタシーによる補償のマントル流動によって、偏芯慣性モーメントの最少化偶力として説明した。分化した隕石と木星大赤斑の起源、水星のコア成分割合が多い事も説明できた。アブダクションによる結論は、以下の①~⑱の多岐に亘る現状を全て説明できた、

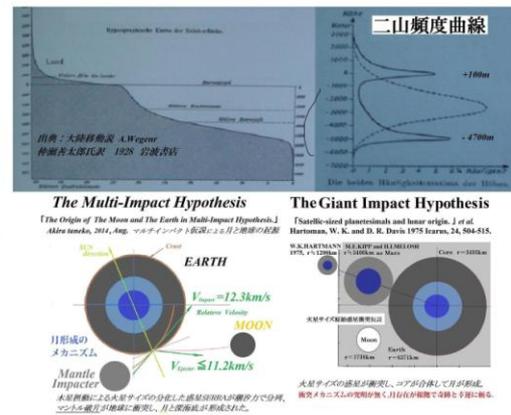
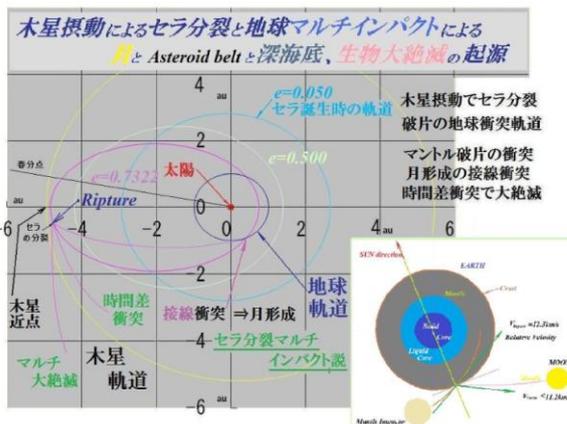


図1 マルチインパクト仮説<sup>[1]</sup>のメカニズム

図2.深海洋底の謎<sup>[3]</sup><二山傾度?何故>

CERRA 軌道変遷, マントル断裂片起源の謎

図3. MIH<sup>[1]</sup> と GIH<sup>[2]</sup>との比較と違い

<<現状>>①小惑星帯の起源,②分化した隕石の起源,③月の起源,④コア偏芯の謎,⑤月の表裏密度の差と隕石重爆撃期の謎,⑥地球 70%の表面積を占める深海洋底<sup>[3]</sup>の起源と二山傾度曲線の謎<sup>[3]</sup>解決,⑦プレートテクトニクスとそのプレート境界の起源,⑧プレート駆動方向の急変理由,⑨その駆動力<sup>[3]</sup>の解明,⑩ダイヤモンド形成キバ-ライトパイプの起源,⑪高緯度衝突の根拠,⑫地軸傾きの謎,⑬環太平洋弧状列島と背弧凹海盆と深海溝の形成の謎,⑭プレート相互の潜り込み始めの謎の解明,⑮生物種大絶滅の繰り返しの謎,⑯木星大赤斑の起源,⑰水星のコア成分が多い謎,⑱冥王星の公転軌道の傾きと密度の謎等.. アブダクションの証明

◎アブダクションの結論は、統一的な現状への説明であり、多ければ多いほど真理である。

[1]種子彰マルチインパクトによる月と地球の起源(2014),[3]A, Wegener 大陸移動説(1927)

[2]キャメロン&ベンス The Origin of the Moon and the Single Impact Hypothesis IV.

ティティウス・ボーデの法則の新証明と確認(マルチインパクト仮説<sup>[1]</sup>の根拠)  
 New proof and confirmation of Titius-Bode law (the basis of multi-impact hypothesis)

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2016-9.

マルチインパクト仮説は、月と地球と太陽系起源のミッシングリンク謎を統一的に解明する極めてユニークで創造的なアイデアである。しかし、ティティウス・ボーデの法則のセレス位置に分化した火星サイズの原始惑星 CERRES が木星摂動で軌道が偏平化し、木星と太陽の引力が拮抗した位置で断裂し、マントル断裂片のトレーン軌道が地球軌道と交差して時間差衝突が起きた。このボーデの法則は証明されていないので私が証明を試みた。



図 1.惑星軌道と禁制帯軌道との関係

図 2. 証明アイデアの比較表, メリット or Not..

太陽系惑星の起源では、太陽を中心とした粒子の合体を考える必要が有る。太陽を片側焦点とした楕円軌道する各微粒子は当然ケプラー運動を行う。長半径が同じなら周期も同じであり、更に運動エネルギーも同じである。相対速度差が少ない程合体が成功する、

Abduction 創造的推論を行うためには、必然の物理的に意味野ある仮説が必要である。つまり、合体は円軌道と略長半径が一致した少し長い楕円軌道の粒子が接線方向の速度が追突可能である。理由としては円軌道の粒子は合体成長しているので、同じ公転周期を持つ半径  $r$  より、粒子径分  $\Delta r$  だけ外半径が大きく其の  $(r + \Delta r)$  の長さだけ周期の遅い粒子に、円軌道の合体した集合惑星が追突する、同時に衝突合体時の熱エネルギーと塑性変形エネルギー分だけ内側軌道に落下する、つまり、図 1.の内側に示す赤色範囲の太陽への禁制帯を考慮すると、ボーデの法則が完成する、太陽系の惑星起源は、周期の短い内側より惑星が形成される。第 1 図によると、金星のフィーディングゾーンは其の外側の地球軌道まで、地球へ縮退する軌道は火星軌道まで、火星へは其の外側に有った筈の CERRA 軌道まで、同様に CERRA に縮退する範囲は木星まで、木星に縮退するのは土星までとなり解決した。

水星が形成されない点と、惑星 CERRA が形成されてしまう問題点は、逆に「マルチインパクト仮説」で CERRA が形成されても木星の摂動で断裂して、小惑星帯の起源と月の形成と地球の深海洋底の起源<sup>[2]</sup>、更には環太平洋弧状列島と背弧凹海盆の起源と、コア有りマントル片が水星となりコア質量比 6 割も説明できる、全てアブダクションの結果です。

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

## 将来の地下空洞直接探査に向けた月面及び縦穴内での放射線線量評価

### The estimation of radiation dose in lunar surfaces and holes for future lunar exploration

○長岡 央<sup>1</sup>、長谷部 信行<sup>1</sup>、齊藤 拓磨<sup>1</sup>、内藤 雅之<sup>1</sup>、青木 大輔<sup>1</sup>、石井 隼也<sup>1</sup>、春山 純一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学、<sup>2</sup>ISAS/JAXA

月は、近い将来長期的な有人探査の対象となる可能性が高い。しかしその表層は、大気がほとんどなく、磁場が非常に弱いため、紫外線やマイクロメテオライトが降り注ぐだけでなく、高エネルギー荷電粒子が常時降り注ぎ、表層物質との間での核相互作用で中性子やガンマ線が発生する。地球での放射線線量は 0.55[mGy/y]であるのに対し、月面での線量は銀河宇宙線によるものだけで最大 83[mGy/y]と、月面表層の放射線環境は地球と比較して非常に過酷である。

そこで将来の月有人基地建設の候補地点として、縦穴が注目されている。縦穴の形成は、溶岩チューブの一部が崩落したものとする見方があり、その奥には空洞が広がっている可能性がある。縦穴は、1) 微小隕石、隕石からの防護、2) 温度環境の安定性等の特徴から基地としての有効性が指摘されている。また線量の観点からも、厚い岩盤に覆われた地下に基地を作ることで、一次宇宙線、二次宇宙線による被ばくを大幅に軽減することが可能となる。

本発表では、表層と縦穴内での放射線環境を数値計算により見積もり、それぞれでの放射線線量を評価した。縦穴の底での吸収線量は $\sim 11$ [mGy/y]と、縦穴に入ること放射線防護は可能だが、人体には多少影響のある結果となった。従って、長時間滞在する場合には1) 移住環境として側面に地下空洞を作り表面から見えないようにする、もしくは2) 縦穴から溶岩チューブに続く穴がみつければ、そこに入ること大幅な線量の軽減(地球以下)が期待できる。

参考文献: 早津佳那子, 「月環境における放射線量の評価」(2012), 博士論文, 早稲田大学

## 月の溶岩流研究と縦穴探査の意義

○諸田 智克<sup>1</sup>, 春山純一<sup>2</sup><sup>1</sup>名古屋大学環境学研究所, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

月の海の噴出年代や組成を理解することは、月マンツルの熱史や構造を理解する上で極めて重要である。我々は、月周回衛星「かぐや」の画像データを用いて、月の海の噴出年代と元素組成、両者の関係について調べてきた。本研究では、それらの成果を解説するとともに、将来月面探査の有望な探査地点の1つである縦孔とその周辺の領域における理学的重要性について述べる。

我々は「かぐや」に搭載された地形カメラの画像データを用いて、主に嵐の大洋・雨の海領域のクレータ数密度を調査してきた(図1)。これをみると、嵐の大洋・雨の海領域では15億年前までマグマ噴出が起きたことがわかる。43.5億年前にはすでにマグマ噴出活動が始まっていたことから、月上部マンツルは全球的に20億年もの間、嵐の大洋・雨の海領域にいたっては30億年もの長期にわたって溶融していたと考えられる。また、我々の年代決定の結果から、月の火成活動の最終期(約20億年前)に第二のピークがあったことがわかった。嵐の大洋・雨の海領域においてなぜこのように長期にわたってマグマ活動が継続したのであるのか。セカンドピークはなぜ起きたのであるのか。その発生メカニズムはどのようなものであったのか。これらの疑問に答えるためには若い溶岩流のより詳細な岩石学的情報を必要とする。

前述のように、アポロ・ルナ試料中の玄武岩は41~31億年前の年代を示しており、20億年前という若い玄武岩は含まれていない。また、月隕石でもこのような若い玄武岩は見つかっていない。月表側の反射スペクトルの地上観測によると、月の玄武岩は十数種のスペクトルタイプに分類されるが、そのうち1/3から2/3程度のみ試料として手にしているだけで、残りの岩石種は未知のものである。若い玄武岩も未取得のタイプである。マリウス丘で見つかった縦孔は若い溶岩流が分布する領域に極めて近く、縦孔の探査とともにその周辺の火山地形の探査が重要である。また、縦孔の壁面は30億年前以前の溶岩流の非常に新鮮な露頭となっている。つまり、月の歴史を通じて、初期から最終期の一連の火成活動を復元する上で、UZUME計画とそれに続く、縦孔とその周辺域探査は重要である。

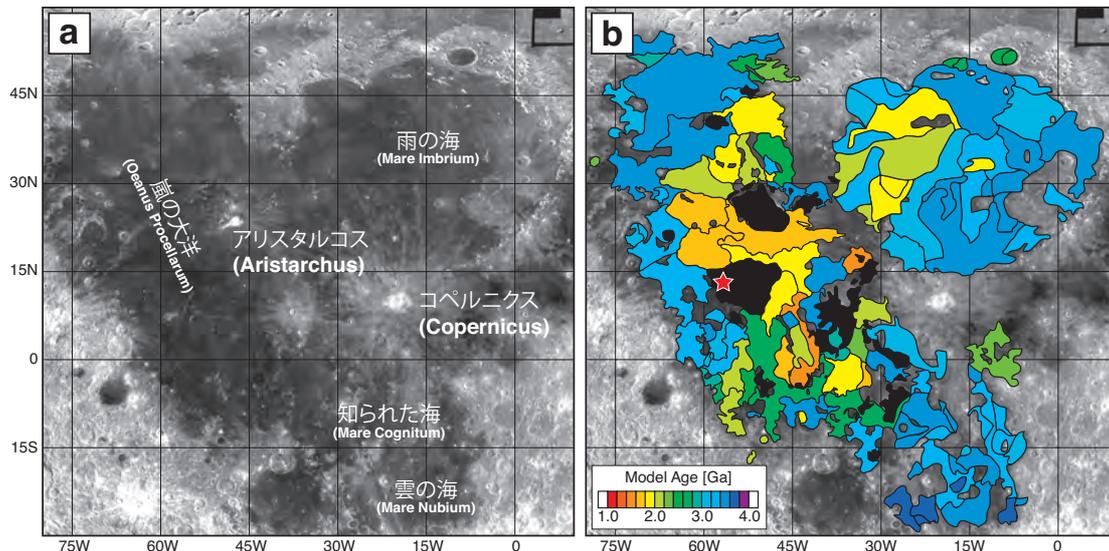


図1 嵐の大洋・雨の海領域の (a) 地形カメラマップと (b) 溶岩流の噴出年代分布。赤い星印は縦孔の位置を示す。嵐の大洋・雨の海領域の中心部において、若い溶岩流が分布している。縦孔が存在するマリウス丘はその領域と接している。

## 表面掘削探査用のオンサイト質量分析システム

○青木順<sup>1</sup>, 豊田岐聡<sup>1</sup>, 河井洋輔<sup>1</sup>, 寺田健太郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学理学研究科

このオンサイト質量分析システムは月探査ミッションSLIMへの搭載を目指して検討したものであり、月面および月内部の揮発性物質、特に水の直接観測を目標としている。探査機由来の汚染の影響を排し確実に月由来の水の存在を確かめるためには、その場の大気を受動的に測るのではなく、高緯度領域においてレゴリスに吸着している物質を、月面の表層を取り除いた上で直接加熱によって能動的に脱離させ測定する方法が有効である。我々の検討している Penetrating Lunar Exploration by Mass Spectrometer (PLEMS) は、月面を段階的に掘り進めながら、加熱と測定を繰り返し行うことで、レゴリスに吸着されている揮発性物質の深度分布を測定する。これまでにLCROSSによって検出された水以外の揮発性物質 (H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>など) も質量分析計を用いて同時に計測することで、探査機による汚染の影響と月由来の成分とを分離し、月の水の存在に関して明確な評価を行う。

観測装置は探査機下面に搭載され(図1参照)、着陸後に多段式円筒ドリルを予備伸展させて測定機器本体(図2参照)を月表面へ下降させる。表面のレゴリスに接地した後に、測定機器本体の下部にあるサンプル取り入れ口の周辺のレゴリスをヒーターで加熱し、レゴリス中の揮発性物質を気化させて測定機器に取り込んだ後にイオン化させて四重極質量分析計(QMS)で測定する。地表面に到達後はドリル先端部よりヘリウムを噴射して地中を掘り進みつつ、同様の質量分析を行いレゴリスに含有されている水をはじめとした成分組成の深さ方向の変化を測定する。本方式では直接的に揮発成分のサンプリングを行うことで、固体のレゴリスのサンプリングやその後のハンドリングに伴う機構が必要ないため、装置の構造や測定シーケンスをシンプルにすることが可能である。この測定結果を基に、月面における揮発性物質の供給、輸送および存在量に関する理解の進展をはかることが期待できる。

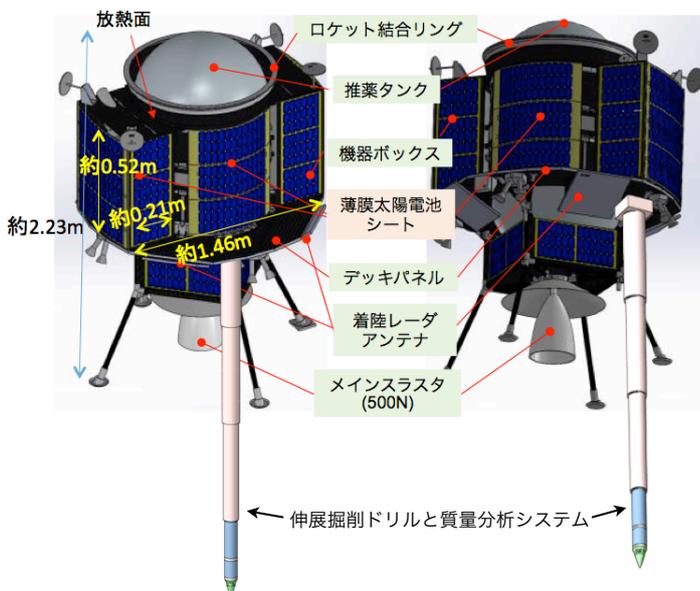


図1. 探査機(SLIMを想定)への搭載状態

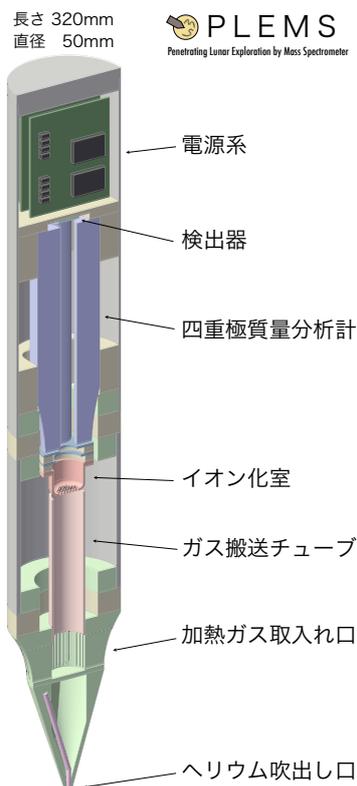


図2. 質量分析システムの概略図

## 将来測地観測によるフォボス内部構造の制約

○松本晃治<sup>1</sup>、池田人<sup>2</sup>、新谷昌人<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室、<sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構/研究開発部門、

<sup>3</sup> 東京大学地震研究所

Phobos の起源には、大きく分けて、小惑星が捕獲されたという説と、巨大衝突起源のイジェクタディスクから作られたという説が存在する。内部構造のみから起源を明らかにすることは容易ではないが、それは起源に対する重要な拘束条件になり得る。慣性モーメント (MOI) は内部構造に関連する重要なパラメータの一つである。フォボスの MOI は短周期強制経度ひょう動の振幅 ( $\theta$ ) と 2 次の重力場係数から導かれる。現状で、画像解析から経度ひょう動の振幅は  $\theta=1.09\pm 0.10^\circ$  と推定されている[1]が、Mars Express のフライバイの数や接近距離に制限があるため、2 次の重力場係数の推定誤差は依然として大きい[2]。したがって、現状で Phobos の MOI は不明である。観測された経度ひょう動の振幅は、Phobos 内部の質量分布が一様であるモデルと矛盾しないが、非一様構造も排除されていない。ここでは、単純な 2 層構造を仮定し、水氷または空隙の存在が一方の層に限定された場合を考え、このような質量分布の非一様性があつた場合に、MOI の値が一様な場合の値からどの程度逸脱するかを調べ、将来測地観測に要求される観測精度について検討する。

Phobos のバルク密度 ( $1.86\pm 0.013 \text{ g/cm}^3$ ) はほとんどの炭素質隕石の密度より小さく、内部に水氷や空隙が存在すると考えられる。低いバルク密度が水氷に起因すると仮定すると、水氷の質量比は岩石の粒子密度に依存して 10~35% であると期待される[3]。もし Phobos 内部の質量分布が非一様で、水氷が表層もしくは中心付近に偏在していれば、MOI の値は一様な場合の値からずれる。この MOI のずれ ( $\Delta\text{MOI}$ ) を次の 3 つの仮定の下に計算した； (1) Phobos は楕円体形状を持つ ( $a=13.03 \text{ km}$ ,  $b=11.40 \text{ km}$ ,  $c=9.14 \text{ km}$ )、(2) Phobos は 2 層構造を有し、その境界は表面と同様な楕円体形状を持つ (この場合、経度ひょう動の振幅は  $1.15^\circ$  となり、観測値と調和的である)、(3) 水氷は上層もしくは下層のどちらかに存在し、岩石密度は二つの層で等しい。

水氷の質量比を 10~30% で変化させた場合、 $|\Delta\text{MOI}|$  の最大値は約 17% であつた。空隙が低密度の原因である場合についても計算したところ、空隙率の最大値を 60% とした場合、 $|\Delta\text{MOI}|$  の最大値は同様に約 17% であつた。ここで考えた非一様構造の検出のためには、少なくとも数% の MOI の精度が必要であり、 $\theta$  と 2 次の重力場係数にも同程度の精度が必要となる。

$\Delta\text{MOI}$  のみから境界の深さと各層の密度を知ることはできない。表層密度を知ることが内部構造の理解において重要である。Stickney の様な顕著な表面地形が作る重力異常を観測できれば、表層密度を推定できるであろう。Phobos 地形の短波長成分 (球面調和展開の次数  $> 5$ ) が高度 2 km の地点に作る重力勾配を計算したところ、 $100 \text{ kg/m}^3$  の密度差に対応して Stickney 周辺で重力勾配が  $\pm 4 \text{ E}$  変化することが分かつた。高度 2 km における精度 1 E の重力勾配観測が実現すれば、Phobos 内部構造に関する我々の理解はより進むと考えられる。

### References:

- [1] Oberst et al. (2014) Planet. Space Sci., 102, 45-50.
- [2] Pätzold et al. (2014) Icarus, 229, 92-98.
- [3] Rosenblatt (2011) Astron. Astrophys. Rev., 19 (44).

## はやぶさ NIRS データを用いた小惑星イトカワの 近赤外スペクトルマップ作成

○ 稲澤朋生, 北里宏平

会津大学大学院コンピュータ理工学研究科

近年、小惑星探査機はやぶさが持ち帰った試料の分析によって S 型小惑星イトカワの鉱物組成や宇宙風化作用の発生メカニズムが明らかになってきている。我々はその地上分析から得られている物質科学的情報とその場観測による全球的な地質情報を統合してイトカワの表層進化を解明することを目的とし、はやぶさに搭載された近赤外分光器 NIRS のデータ解析を進めている。

はやぶさ NIRS は波長 0.76–2.25  $\mu\text{m}$  の連続スペクトルを取得するポイントスペクトロメータであり、小惑星の近接運用が行われた 2005 年 9–11 月の 3 ヶ月間で、イトカワのほぼ全球を m スケールの空間分解能でマッピングすることに成功した。NIRS の観測データから小惑星の地理情報とスペクトルをセットにしたスペクトルマップを作成するには、NIRS のフットプリント位置を探査機の位置や姿勢のデータ等をもとに幾何計算により算出すること、また照明条件の異なるスペクトルを同一の条件に測光補正すること等の処理が必要になるが、これまでの解析では探査機の位置データや NIRS のアライメントの誤差が大きく、各地点のスペクトルを比較するのに十分な精度のスペクトルマップを作成することができていなかった (Kitazato et al., 2008)。そこで我々は巡行期間に取得された恒星や惑星の観測データを用いて NIRS のアライメントの再推定を行った。その結果、アライメントの最適値は従来の推定と比べて  $0.04^\circ$  (視野の約半分) ずれることがわかった。我々はこの値を用いてイトカワのスペクトルマップ作成の再処理を行った。本発表では新たに作成し直したスペクトルマップの結果について報告する。

## はやぶさ2小型着陸機 MASCOT の投下運用シミュレーション

○ 那須翔太郎, 古橋邦章, 渡辺涼太, 勝呂洋介, 北里宏平

会津大学コンピュータ理工学部

2014年12月に打ち上げられた小惑星探査機はやぶさ2には、ドイツ航空宇宙センター(DLR)が開発した小型着陸機 MASCOT が搭載されている。MASCOT は目標とする小惑星に対し、高度約100 m の位置から投下され自由落下によって着地し、搭載している観測装置を用いて表面の詳細な観察を行うことが計画されている。ただし、MASCOT は一次電池で駆動するため、データの取得可能な時間は最大でも探査機からの分離後約15時間に限られる。そのため、MASCOT のその場観測によって得られる科学的成果を最大化するには、探査機のリモートセンシング機器によるグローバルマッピングの結果をもとに、科学的価値の高い場所を狙って着地させることが重要と考えられている。そこで本研究では、MASCOT の狙った地点に対する着地点の距離範囲を把握するため、現在想定されている分離条件をもとに MASCOT の軌道計算を行った。

Dietze et al. (2010) は投下運用のモンテカルロシミュレーションを行い、高度100 m で MASCOT を投下した場合に第一接地点の広がり半径100 m ( $3\sigma$ ) 程度になることを示している。しかし、彼女らの見積もりは小惑星上でのバウンドを考慮していないため、最終的な着地点がどの程度の広がりを持つのかということについては評価できていない。小惑星表面は微小重力下であることから、最終着地点は第一接地点からある程度離れる可能性があると考え、我々はバウンドを考慮した計算を行った。本発表では、その計算結果から推定される MASCOT 着地点の分散範囲について報告する。

## 小惑星 Ryugu のポテンシャル高分布と地形の予測

○平田 成<sup>1</sup>, 松本 晃治<sup>2</sup>

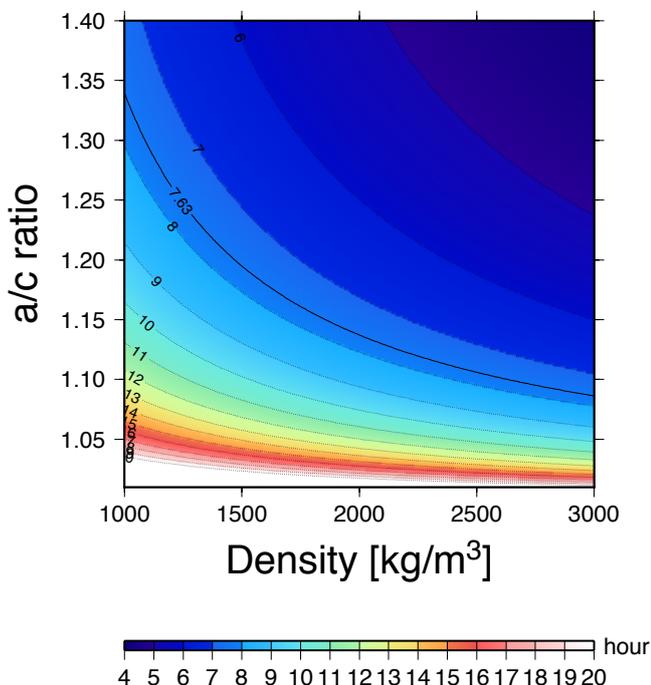
<sup>1</sup>会津大学コンピュータ理工学部, <sup>2</sup>国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

小惑星表面のポテンシャル高は、重力ポテンシャルと全球平均の重力加速度の比で定義され、その分布は小惑星の形状、自転周期、密度によって決まる。小惑星 Itokawa では、両極域が天体上で最もポテンシャル高が低い地域にあたる。そこには、流動しやすい細粒の物質が集まり、平坦な smooth terrain が形成されていた。このため、小惑星探査機はやぶさは、南極側の smooth terrain が一部中緯度域まで分布が伸びていた地域を着陸地点とした。

まだ探査が行われていない小惑星であっても、地上観測によって形状の軸比と自転周期が推定できれば、密度を仮定することで、小惑星の極域と赤道域のどちらが天体上でポテンシャル高が最も低くなる領域となるのかを予測可能である。本研究の目標は、小惑星探査機はやぶさ 2 の目標天体 Ryugu について、この考え方に基づいて、ポテンシャル高分布と地形の予測を行った上で探査機の着陸に好適な平坦地がどこに分布するのかを検討することにある。

右下の図は、与えられた軸比 (a/c) と密度の元で、極域と赤道域のポテンシャル高が等しくなる自転周期の条件 (Equilibrium rotation period) を求めたものである。

はやぶさ 2 の目標天体である Ryugu の自転周期は 7.63 [h]と推定されている。また、Ryugu は炭素質コンドライトに近い組成を持つ C 型小惑星であることがわかっているため、空隙率を仮定することで、バルク密度の取りうる範囲にも制約を与えることができる。発表では、最近の地上観測解析結果に基づく軸比の情報から、Ryugu のポテンシャル高分布と地形について議論するとともに、探査機の着陸可能性についても検討を加える。



図：軸比 (a/c) と密度, Equilibrium rotation period の関係

## 会津大学宇宙情報科学クラスターの取り組み

出村裕英<sup>1</sup>, ○平田成<sup>1</sup>, 小川佳子<sup>1</sup>, 本田親寿<sup>1</sup>, 北里宏平<sup>1</sup>, 奥平恭子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>会津大学 先端情報科学研究センター・宇宙情報科学クラスター

## Activities of CAIST/ARC-Space, University of Aizu

H. Demura<sup>1</sup>, ○N. Hirata<sup>1</sup>, Y. Ogawa<sup>1</sup>, G. Honda<sup>1</sup>, K. Kitazato<sup>1</sup>, K. Okudaira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. of Aizu, CAIST/ARC-Space

会津大学 CAIST/ARC-Space は 2009 年に発足した。以来、深宇宙探査ミッション「はやぶさ 2」や国際宇宙ステーション「たんぽぽ」への参画、地球観測衛星のデータ解析にも取り組み、ハッカソンや卒修論でのソフトウェア開発など実践的教育も根付きつつある。今春、JAXA とアーカイブサイエンスを通じた太陽系科学推進のための連携協定を締結したことを受けて、地理的制約を受けにくい ICT の強みを生かした宇宙科学コミュニティへの貢献スタイルを提示する。ポスター発表を通じて、広くご意見を伺いたい。

### 宇宙情報科学クラスターのミッション（発足 10 年のスコープ）

- 国内外の月惑星探査プロジェクトに参画  
はやぶさ・かぐや等の光学機器開発・運用・解析の経験を踏まえて、小惑星形状認識、機器視野可視化ツール、GIS 等のソフトウェア開発提供ならびに科学データ解析で貢献する。
- 深宇宙探査データのアーカイブサイエンス拠点（データセンター）を形成  
最新の情報工学の知見を取り入れて、データを利用する環境を整える。

### 関連する諸活動

- ・日本惑星科学会・月惑星探査育英会・探査データ解析実習会の継続的取組  
<https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/>
- ・Space Apps Challenge (NASA 主催の国際宇宙ハッカソン) 会津会場
- ・大型研究計画マスタープラン 2014 日本惑星科学会提案「太陽系生命前駆環境の実証的解明のための統合研究プログラム」参加機関
- ・望ましい科学データ公開・利用のあり方について (JAXA/ISAS C-SODA 提言)  
<http://c-soda.isas.jaxa.jp/bibliography/NozomashiiDataKokaiRiyou.pdf>
- ・日本惑星科学会「月惑星探査来たる 10 年」  
<https://www.wakusei.jp/news/activities/decade/>

### 参考資料

出村 (2014) 宇宙科学情報解析論文誌 vol. 3 <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/13848>

出村 (2009) PLAIN News no. 189 [http://www.isas.ac.jp/docs/PLAINnews/189\\_contents/189\\_1.html](http://www.isas.ac.jp/docs/PLAINnews/189_contents/189_1.html)

出村 (2009) 遊星人 vol. 18, pp. 157-158 <https://www.wakusei.jp/book/pp/2009/2009-3/157.pdf>

## 「はやぶさ2」中間赤外カメラ TIR による巡航中の観測

○岡田達明<sup>1,5</sup>, 福原哲哉<sup>2</sup>, 田中 智<sup>1</sup>, 田口 真<sup>3</sup>, 荒井武彦<sup>4</sup>, 今村 剛<sup>5</sup>, 千秋博紀<sup>6</sup>, 出村裕英<sup>7</sup>, 小川佳子<sup>7</sup>, 神山 徹<sup>8</sup>, 中村良介<sup>8</sup>, 関口朋彦<sup>9</sup>, 長谷川 直<sup>1</sup>, 松永恒雄<sup>4</sup>, 和田武彦<sup>1</sup>, 滝田 隼<sup>5,1</sup>, 坂谷尚哉<sup>1</sup>, 堀川大和<sup>10,1</sup>, 遠藤 憲<sup>7</sup>, Jörn Helbert<sup>11</sup>, Thomas G. Müller<sup>12</sup>, Axel Hagermann<sup>13</sup>,  
はやぶさ2・TIR チーム

<sup>1</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>2</sup>情報通信研究機構, <sup>3</sup>立教大学, <sup>4</sup>国立環境研究所, <sup>5</sup>東京大学,  
<sup>6</sup>千葉工業大学, <sup>7</sup>会津大学, <sup>8</sup>産業技術総合研究所, <sup>9</sup>北海道教育大学, <sup>10</sup>総合研究大学院大学,  
<sup>11</sup>ドイツ航空宇宙センター(DLR), <sup>12</sup>マックスプランク地球外物理学研究所, <sup>13</sup>オープン大学

C 型小惑星 162173 Ryugu を目指して巡航中の小惑星探査機「はやぶさ2」では、科学観測機器の健全性確認や機上較正データ取得のための運用を随時行っている。中間赤外カメラ(TIR)は、小惑星表層からの熱放射を2次元撮像する熱赤外カメラである[1]。検出器には NEC 製 320A マイクロボロメータアレイを用いており、画素数は 344 x 260 (有効 328 x 248) 画素であり、毎秒 60 フレームの速度で読み出す。必要な積分時間に応じて最大 128 枚まで自動積算できる。TIR の視野角は約 16° x 12° であり、画素解像度は 0.05°/pixel である。温度検出範囲は約 150~460K(詳細な地上較正データは 230~430K で取得)である。地上較正結果を打ち上げ後にも適用するためには、打ち上げ後から小惑星到着前までに輝度・幾何較正を済ます必要がある。なお、TIR は金星探査機「あかつき」搭載 LIR とは、フード部の熱設計を除いて同設計である[2]。

TIR は打上後の 2014 年 12 月 11 日に健全性確認を実施後、12 月 17 日に機能・性能確認を行った。それ以後、現在に至るまでほぼ毎月1回の頻度で背景宇宙を撮像している。ヒータ設定を毎回 1K 程度変更して機器内の各モニタ温度への依存性を調査し、また側面パネル上にある放熱面への日照条件が異なる場合の温度安定化のためのヒータ設定条件も確認している。

TIR は地球スイングバイ前後に、地球および月の撮像を実施した。小惑星 Ryugu に到着するまでの軌道上で、TIR から観測可能で、かつ天体の表面温度や軌道要素が既知の天体は地球と月のみである。従って、TIR の輝度較正や幾何較正(アラインメント確認含む)を行うことができる唯一の機会であった。TIR から 2015 年 10 月 14 日に地球と月の最初の撮像(同時撮像)に成功した。さらに地球に接近中に複数回の撮像を実施し、地球と月の輝度上昇と、地球-月間距離の増大を確認した。地球スイングバイ翌日の 12 月 4 日には、地球を直径約 32 画素の解像度で南半球側を撮像した。12 月 5 日には、月を直径約 5 画素の解像度で撮像した。いずれも地球や月の表面温度が見積もり可能であり、輝度の較正に有効な情報を得た。TIR の輝度への感度は地上較正值から変化ないことや、探査機の-Z 方向とのアラインメントのずれが TIR 画像内で X 方向に-0.05 画素、Y 方向に+1.94 画素、反時計周りに約 0.1°であることを確認した。TIR は 2016 年 6 月に火星観測も実施したが、感度不足により検知できていない。そのときの火星は1画素の約 3%の面積を占めるものであり、TIR の最低検出感度となる下限温度(画素全体を占める場合で約 150K)についての制約条件を得た。今後も随時、深宇宙観測を継続し、温度依存性や機器の劣化の有無について確認をしてゆく予定である。

参考文献:[1] Okada, T. et al. submitted to SSR. [2] Fukuhara, T. et al. Earth Planets Space, 2011.

## 火星探査の着陸候補地点の検討： 火星環境進化の理解に向けて

○関根康人<sup>1</sup>、火星着陸探査リサーチグループ

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

着陸探査および周回リモートセンシング探査の結果、火星の表層環境は地球以上にダイナミックに進化してきたことが強く示唆されている [e.g., Bibring et al., 2006; Ehlemann et al., 2011]。ノアキアン前期～中期には、地殻内での地下水／地下熱水の存在とそれに伴う岩石の水質変成が卓越していたのに対して、ノアキアン後期には、水の一部が表層を流れて流水地形を形成したと考えられる [Ehlemann et al., 2011]。さらに、ヘスペリアン前期には、表層付近の地下水が蒸発・光分解することで酸性化が進行する一方 [Hurowitz et al., 2009]、地殻内に留まる多量の地下水は惑星の冷却に伴い凍土層へと姿を変え、ヘスペリアン以降のアウトフローチャネルや RSL (Recurring Slope Lineae) の水源となり [Clifford and Parker, 2001]、現在でも主要な水のリザーバーになっていると考えられる [Usui et al., 2015]。

本発表では、このような火星水環境進化の理解の進展を踏まえ、2030 年前後を想定した我が国による火星着陸探査における科学目標と、着陸候補地点や測器候補を議論する。特に、JAXA 内のリサーチグループ（着陸機による火星環境探査リサーチグループ）を中心に議論を行ってきた火星地下環境探査の検討結果を報告する。火星のような低重力、少水量の惑星では、地殻深部まで高い空隙率が保持されるだけでなく、水の三重点を超える圧力・温度を達成しやすいため、かつての水循環の中心は地下にあったことが地球物理的に高い確度で予想される。しかしながら、その地下水の化学的特徴や物質循環については、いくつか予想はあるものの実証を伴った研究は皆無であり、未だ空想の域を出ない。今後の欧米による着陸探査では、火星水環境進化の全容の中では氷山の一角にすぎない表層水によって形成された層状堆積物をターゲットとしており、その本質であるところの地下水／地下熱水の化学的特徴や循環、その形成進化史に直接迫る探査は現在までのところ計画されていない。過去の地下水循環をキャラクターゼーションすることは、現在の火星上での水氷の分布や化学組成の理解、特に 2030 年代に予定される有人火星探査における水資源の確保という観点からも国際的にも重要度が高い喫緊の課題であるといえよう。

本発表では、火星地下環境の探査を行うにあたって、その問題点、着陸候補地点となりうる場所を複数選定する。そして、そのような着陸探査を行う上で必要な研究体制や研究分野の開拓、火星衛星サンプルリターン探査 (MMX) など他の探査計画との関係性などについて広く議論する。

## SLIM 搭載をめざした マルチバンドカメラの開発現状と科学目的

○佐伯和人<sup>1</sup>、白石浩章<sup>2</sup>、SLIM 分光カメラ提案チーム

<sup>1</sup>大阪大学・理学研究科、<sup>2</sup>JAXA・ISAS

小型月着陸実証機 (SLIM) 計画が JAXA により計画されている。SLIM は小型軽量の探査機システムと、重力天体への高精度着陸技術をめざす工学実験機であり、2019 年度末に月面への着陸実験が予定されている。

我々は、マルチバンドカメラ (MBC) (仮称) を SLIM 搭載センサーとして提案している。SLIM のピンポイント着陸技術を活かし、アポロ計画やルナ計画等の着陸探査が未だに実行されていない未知の地質地域を選択して着陸探査を行う。LROC 以上の空間解像度をもつ MBC により、未知地質地域の新情報を得ることが目標である。MBC は可視から近赤外域まで感度があり、冷却条件も近赤外に感度のある素子としては比較的厳しくない VIS-InGaAs 撮像素子を採用したカメラである。可視から近赤外までの 10 枚のバンドパスフィルタを備えたフィルタホイールを装備して、それぞれのフィルタを通して撮像することにより、着陸機周囲の岩石の表面組織と分光特性を明らかにし、岩石、鉱物種を同定する。また、軽量化のために、パンやチルトのためにカメラ本体をジンバルに載せるのではなく、偏向ミラーを動かすことで撮像フレームを変える方式をとる。

MBC の開発メンバーは現在、以下の構成で行われている。

PI: 佐伯和人 (大阪大)、共同 PI 白石浩章 (JAXA)、Sub PI: 本田親寿 (会津大)、以下 Co-I: (所属機関五十音順) 出村裕英 (会津大)、橋爪光、山中千博 (大阪大)、國井康晴、前田孝雄 (中央大)、諸田智克 (名古屋大)、石原吉明、大槻真嗣、吉川健人、吉光徹雄 (JAXA)、天野嘉春、鈴木太郎 (早稲田大)、さらに上階層スタッフとして、大竹真紀子、大嶽久志 (JAXA) を含むメンバーで開発を進めている。

MBC による科学テーマとして、3 種類のを提案している。一つは、「未踏の火山地形探査」で、Marius Hills (最も揮発性成分の多い場所)、Ina (最も若い火山活動の場所)、Hansteen Alpha (最も分化したマグマがある場所) などを探査することで、月の火成活動の新しい知見を得る。二つ目は、「中央丘探査」で、中央丘の岩石、もしくは、中央丘から崩れ落ちた岩石を観測することで、地殻深部の岩石組織や化学組成を解明し、地殻進化モデルを発展させる。三つ目は「カンラン石に富む地域の探査」で、「かぐや」で発見されたカンラン石を多く含む岩石の分布場所にピンポイントで着陸し、同物質が月マントル起源かどうかを判定し、月マントル組成を岩石学的に明らかにする。これら、着陸地点に応じて、MBC のバンドパスフィルタは最適な波長構成に調整されることになる。

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

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

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であった。米国マリナー10号による3回のフライバイ観測(1974-5)は、この小さな惑星にはあり得ないと考えられていた磁場と磁気圏活動の予想外の発見をもたらしたが、その究明は30年以上続く夢に留まってきた。これらの探査耐熱技術の進展に代表される技術革新が、ようやく大きな壁を取り除きつつあり、2011年3月から2015年4月末まで米国MESSENGERの周回軌道からの観測を行った。「ベピ・コロombo (BepiColombo)」は、欧州宇宙機関(以下、ESA)との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査＝「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらすし、磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核など水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。また、MESSENGERによってなされた数多くの発見はBepiColomboによって解き明かされる事が期待されている。

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

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、日本側は昨年3月にFMの総合試験を終了し、4月にMMOをESA/ESTECへ輸送、6月にESA側へHandoverした。現在は本年末より開始される予定のスタックレベル(MCS:Mercury Cruise System)の総合試験の開始を待っている状況である。ESA側はMission CDRを3月に終了。各モジュール(MPO, MTM)の単体総合試験を実施中である。BepiColomboの各モジュールはMCS試験の終了後仏領ギアナにある射場へと輸送され2018年4月に予定されている打ち上げに備える事になる。

## JUICE-JAPAN 木星氷衛星探査計画： 日本の狙うサイエンス

○関根康人<sup>1</sup>、齋藤義文<sup>2</sup>、JUICE-日本チーム

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

<sup>2</sup> JAXA 宇宙科学研究所

JUICE (Jupiter Icy moons Explorer) は、ESA が主導する大型 (L クラス) 木星氷衛星探査計画であり、欧州各国をはじめ、日本や米国が参加する国際太陽系探査計画である。2022 年に打ち上げ、2030 年に木星系に到着する予定であり、2032 年に衛星ガニメデの周回軌道への投入が予定されている。これによってガニメデをはじめとする木星の衛星の内部、表層、プラズマ圏との相互作用を調べることを目的とする。

本発表では、このような JUICE 探査に対して、日本がどのような研究分野をリードしようとするのかといった日本全体で目指すサイエンス・ターゲットについて議論する。日本はこれまで、「はやぶさ」に代表される惑星探査で、太陽系初期の記録を留めたサンプルを地球に持ち帰ってきた。また、2020 年には「はやぶさ 2」の帰還も予定されている。さらに、「京都モデル」をはじめとする惑星形成理論について萌芽的研究を行い、世界をリードしてきた。この研究の潮流は、現在、多様な系外惑星の形成過程の解釈として開花しつつある。これらの日本が世界をリードする強みを活かしつつ JUICE という機会を最大限に利用して展開できる研究、かつ JUICE における欧米の研究ターゲットから外れている研究として、木星の起源を明らかにすることがある。

特に、これまでの惑星形成論に物質進化を含めることで、木星衛星の表面物質などの探査結果と比較可能な、一段階進んだ惑星形成モデルを構築することを目指す。これにより、木星だけでなく、地球などの内側太陽系への物質供給や、太陽系外惑星の材料物質などの予測に対しても大きな波及効果が期待される。また、物質進化を本格的に組み込んだ氷衛星内部進化モデルを構築し、ガニメデなど観測される氷衛星の現在の内部状態から進化を逆算し、集積初期の物理化学状態を推測するモデルを構築することを目指す。このように、これまで物理のみで記述されていたガス惑星の形成過程に、物質進化を導入することで、衛星における生命存在可能性まで最終的に議論可能になることを目指す。このように日本を中心とした独自の研究の拠点を複数構築し、世界に対して存在感を大きくアピールする。

## JUICE/GALA-J(2): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) が拓くサイエンス

JUICE/GALA-J (2): Science objectives of the GAnymede Laser Altimeter (GALA) onboard JUICE spacecraft

○木村淳<sup>1</sup>, 鎌田俊一<sup>2</sup>, 松本晃治<sup>3,4</sup>, 押上祥子<sup>5</sup>, 並木則行<sup>3,4</sup>, 倉本圭<sup>2</sup>, 佐々木晶<sup>6</sup>, 塩谷圭吾<sup>7,4</sup>, 小林正規<sup>8</sup>, 小林進悟<sup>9</sup>, 荒木博志<sup>3,4</sup>, 野田寛大<sup>3,4</sup>, 石橋高<sup>8</sup>, 齋藤義文<sup>7</sup>, Hauke Hussmann<sup>10</sup>

<sup>1</sup>東工大地球生命研究所, <sup>2</sup>北海道大学, <sup>3</sup>国立天文台, <sup>4</sup>総合研究大学院大学, <sup>5</sup>工学院大学, <sup>6</sup>大阪大学, <sup>7</sup>宇宙科学研究所, <sup>8</sup>千葉工業大学, <sup>9</sup>放射線医学研究所, <sup>10</sup>ドイツ航空宇宙センター

The JUpiter Icy Moons Explorer (JUICE), led by European Space Agency, has started development toward launch on 2022, by international collaboration among Germany, Switzerland, Spain and Japan. GALA measures a distance between the spacecraft and the surface of the icy moons, and scientific data will essentially contribute to reveal geological and geodetic characteristics of the icy satellites Europa, Ganymede and Callisto, with synergy among other instruments. Here, we briefly describe the scientific objectives.

木星氷衛星探査計画 JUICE の準備が進行中である。JUICE は欧州宇宙機関主導の大型計画であり、2022 年打ち上げ、2029 年木星系到着、そしてエウロパ、カリスト、ガニメデへのフライバイを経て、2032 年にはガニメデを周回する軌道へ投入される。我々は JUICE へ搭載するレーザ高度計 GALA の開発を、ドイツ航空宇宙センター主導の下で進めている。GALA は、「JUICE が掲げる『生命居住可能領域の探査』の本質的役割を担い、氷に支配された天体の進化の解明に不可欠な情報を史上初めて獲得する」ことを目的に、世界初の氷衛星へのレーザ測距を行う。

これらの衛星に対しては、かつてガリレオ探査機がフライバイ調査を行ったが、アンテナの展開失敗などの数々のトラブルから取得データ量が限定されただけでなく、フライバイ観測という制約からデータの表面被覆率や空間解像度が極めて不十分である。JUICE はこれを本質的に刷新し、特にガニメデに対しては史上初めての衛星周回観測によってその全容を把握する。

GALA は探査機と衛星間のレーザ測距によって衛星の地形情報を得る（ガニメデでは全球、エウロパおよびカリストではフライバイ領域）。これにより多様な地形形態と分布が把握でき、氷衛星の地質活動（氷テクトニクス）の理解が飛躍的に向上するだけでなく、その活動様式をケイ酸塩鉱物でのそれと対比することで、地球のプレートテクトニクスの再考察にも繋がる。また、木星からの潮汐力による変形量や回転変動の測定などを通して地下海の存否を判別できる可能性があるほか、内部構造に関わる因子の精度が大きく向上する。さらにレーザの反射パルスの強度と形状は、レーザ波長での表面反射率や 10 m 規模の表面粗度を反映するため、表面の風化侵食の程度や組成の情報を日射角などの観測条件に依存しないデータとして得ることができる。

GALA の観測が直接的にもたらす氷テクトニクスや表面組成、そして地下海など内部構造に関する情報は、他の搭載機器データと連携することで複眼的な考察を得ることができる。例えば、カメラ (JANUS) が得る画像データは、GALA の計測位置を特定し、点の情報を面的な表面地質の理解へと繋げる最も重要な連携機器である。また、氷層を透過するレーダの RIME や重力場測定を行う 3GM は地質の産状把握に寄与し、可視・近赤外撮像分光計 (MAJIS) や紫外撮像分光計 (UVS)、サブミリ波観測器 (SWI) は様々な波長で表層の組成に関する情報を得る。磁力計 (J-MAG) は木星磁場の変動に伴う衛星の電磁感応をモニターし、プラズマ環境観測パッケージ (PEP) や電波・プラズマ波動観測器 (RPWI) による観測のサポートを得て地下海の規模や組成（電気伝導度）を制約する。このように GALA が得る観測データは、他機器が取得するデータと密接に関係し合い、それらの科学目標の基盤あるいはサポート的役割を担う。

## JUICE/GALA-J (3): JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) における回線設計・性能モデルシミュレーション

JUICE/GALA-J (3): Performance model simulation of Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

○石橋高<sup>1</sup>, 竝木則行<sup>2,3</sup>, 荒木博志<sup>2,3</sup>, 野田寛大<sup>2,3</sup>, 小林正規<sup>1</sup>, 塩谷圭吾<sup>3,4</sup>, 尾崎正伸<sup>3,4</sup>, 水野貴秀<sup>3,4</sup>, 齋藤義文<sup>4</sup>, 東原和行<sup>4</sup>, 押上祥子<sup>5</sup>, 鹿島伸悟<sup>2</sup>, 木村淳<sup>6</sup>, 小林進悟<sup>7</sup>, Gregor Steinbruegge<sup>8</sup>, Alexander Stark<sup>8</sup>, Christian Althaus<sup>8</sup>, Simone del Togno<sup>8</sup>, Kay Lingenauber<sup>8</sup>, Hauke Hussmann<sup>8</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>国立天文台, <sup>3</sup>総合研究大学院大学, <sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>5</sup>工学院大学, <sup>6</sup>東京工業大学, <sup>7</sup>放射線医学総合研究所, <sup>8</sup>ドイツ航空宇宙センター

2022年に打ち上げ予定のJUICEに搭載されるレーザー高度計GALAは、木星の氷衛星ガニメデの周回観測およびエウロパのフライバイ観測を行う。GALAは、ドイツ、日本、スイス、スペインのチームによる国際協力のもとに開発が進められている。GALAは、パルスレーザーを照射し、その反射光を観測することで、測定対象と探査機間の距離を測定する。

GALAの開発を行うにあたり、GALA各モジュール間のインターフェース条件への要求を明確化する必要がある。そこで我々は、BELA (Bepi-Colombo Laser Altimeter) の性能評価モデルをベースとしてGALAの性能評価モデルを構築した。そして、GALAの性能がレーザーの誤検知率(PFD)や測距精度についてのミッション要求を満たすよう設計へ反映するために、性能評価モデルを用いた回線計算を行ってきた。GALAのミッション要求は、以下の4つに集約される：(1) エウロパフライバイにおいてPFD 0.2以下。(2) ガニメデの最悪観測条件下で測距精度10 m以下かつPFD 0.2以下。(3) ガニメデのノミナル観測条件下で測距精度2 m以下かつPFD 0.1以下。(4) ガニメデの最良観測条件下で測距精度1 m以下かつPFD 0.1以下。これまでの検討では、想定されている観測条件下において、上記のミッション要求が満たされることが確認された(荒木ほか, JpGU 2016)。ただし、GALAの受光センサであるアバランシェフォトダイオード(APD)の性能については、放射線試験ほかの各種試験が未実施であったため、カタログ値や文献値などを使用していた。

今回は、性能評価モデルに、APDの放射線試験による性能劣化後の性能を取り込み、より現実的な性能評価を行った。JUICEの放射線環境下でAPDが受ける線量を2 MeVの電子線および50 MeVのプロトン照射で模擬し照射後の暗電流および光電流を測定した(APDの放射線試験の詳細については小林ほかによる発表「JUICE/GALA-J (4): JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計(GALA)におけるエレクトロニクス・検出器関連開発」を参照のこと)。測定データよりAPD性能に関する各パラメータ(ゲイン, 量子効率, 過剰雑音指数, 表面暗電流, バルク暗電流)を求め、それらをGALAの性能評価モデルに入力した。その結果、放射線によるAPD性能劣化後も、GALAの現在の設計は、上記のミッション要求を満たすことが確認された。

## JUICE/GALA-J (4): JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) におけるエレクトロニクス・検出器関連開発

JUICE/GALA-J (4): Electronics and detector development for Gany-  
mede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

- 小林 正規<sup>1</sup>, 奥平 修<sup>1</sup>, 石橋 高<sup>1</sup>, 藤井 雅之<sup>2</sup>, 塩谷 圭吾<sup>3,5</sup>, 田澤 誠一<sup>4</sup>, 竝木則行<sup>4,5</sup>,  
荒木 博志<sup>4,5</sup>, 野田 寛大<sup>4,5</sup>, 尾崎 正伸<sup>3,5</sup>, 水野 貴秀<sup>3,5</sup>, 齊藤 義文<sup>3,5</sup>, 東原 和行<sup>3</sup>,  
山脇 敏彦<sup>3</sup>, 木村 淳<sup>6</sup>, 小林 進悟<sup>7</sup>, フスマン・ハウケ<sup>8</sup>, リンゲンアウバー・カイ<sup>8</sup>,  
ベンケ・トーマス<sup>8</sup>, デルトーニョ・シモーネ<sup>8</sup>, カーレンバツハ・ライナルト<sup>8</sup>  
<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>FAMサイエンス, <sup>3</sup>宇宙科学研究所, <sup>4</sup>国立天文台, <sup>5</sup>総研大,  
<sup>6</sup>東京工業大学, <sup>7</sup>量子科学技術研究開発機構・放医研, <sup>8</sup>ドイツ航空宇宙研究センター

2022 年打ち上げ予定の ESA 木星探査計画 (JUICE; JUperiter ICy moons Exploler) でレーザ高度計 (GALA, Ganymede Laser Altimeter) の搭載が予定されている。GALA は高度 500km の円軌道に入って、ガニメデの地形や木星重力による潮汐変形を調べる。

GALA はドイツ、日本、スイス、スペインの 4 国で共同開発され、日本チームはレーザ反射光受信光学系のうち、バックエンド光学系 (BE0)、APD センサモジュールおよび APD モジュールを収める焦点面アセンブリ (FPA)、そしてアナログ信号処理モジュール (AEM) の開発を担当している。

APD モジュールは、APD センサ、プリアンプ (トランスインピーダンスアンプ, TIA)、温度センサ、ペルチエ素子を含むハイブリッド IC で構成されている。TIA の出力信号の帯域は 100MHz である。一方 AEM は APD モジュールからの信号波形のアナログ-デジタルサンプリング、APD モジュールに対する高圧電圧供給、温度安定制御などを行う。GALA は、受光した光信号の波形にデジタル処理を施すことで微小な受光信号の検出を可能にしている。

現在、APD モジュールで使われる APD センサの放射線耐性を調べる試験や、開発課題をクリアするために AEM のブレッドボードモデルを製作して、設計検討を進めているところである。本講演では、APD モジュールと AEM の開発について状況を説明する。

## JUICE/GALA-J (5) : JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) の逆モンテカルロ法による放射線損傷評価

### JUICE/GALA-J (5): Radiation damage estimation by reverse Monte Carlo simulation for Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

○小林進悟<sup>1</sup>, DelTogno Simone<sup>2</sup>, 小林正規<sup>3</sup>, 尾崎正伸<sup>4,5</sup>, 塩谷圭吾<sup>4,5</sup>, 水野貴秀<sup>4,5</sup>, 齋藤義文<sup>4</sup>, 東原和行<sup>4</sup>, 宇都宮真<sup>4</sup>, 石橋高<sup>3</sup>, 並木則行<sup>5,6</sup>, 荒木博志<sup>5,6</sup>, 野田寛大<sup>5,6</sup>, 鹿島伸悟<sup>6</sup>, 押上祥子<sup>7</sup>, 木村淳<sup>8</sup>, Lingenauber Kay<sup>2</sup>, Althaus Christian<sup>2</sup>, Hussmann Hauke<sup>2</sup>

1. 量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所
2. ドイツ宇宙航空センター
3. 千葉工業大学惑星探査研究センター
4. 宇宙航空研究開発機構
5. 総研大
6. 国立天文台
7. 工学院大学
8. 東京工業大学地球生命研究所

木星磁気圏は高速電子を主成分とする放射線環境となっており、厚さ 10 mm のアルミ板遮蔽の下で、JUICE ミッション期間中 570 krad (安全係数2) と非常に高い線量が予想されている[1]。ガニメデレーザー高度計 (GALA) の性能を確保するためには適切な放射線遮蔽が必要不可欠であり、我々は GALA の放射線量を数値計算により評価してきた[2]。しかし、これには GALA が搭載される JUICE 衛星筐体による遮蔽効果は含まれていなかった。JUICE 衛星 (最大 $\sim 10^1$  m) の内部での、局所領域 ( $\sim 10^{-5}$ – $10^{-1}$  m) での放射線によるエネルギー付与量を計算しなければならないため、通常のモンテカルロ法による放射線輸送計算では多大な計算リソースが必要であったことが理由である。そこで、JUICE 衛星の遮蔽効果を含め、かつ計算量を減らすために、逆モンテカルロ法を利用した放射線量計算コードを Geant4.10.02 [3] を利用し開発した。このコードのベンチマーク、および、他のソフトウェアの計算結果の比較を行なった。また、レーザー受光部のレンズと回路基板上の3次元線量分布の計算し評価を進めている。

The Jovian magnetosphere is a severe radiation environment with high-energy electrons. The radiation dose during JUICE mission is expected to be 570 krad (factor of safety is 2) at a point behind an aluminum board shielding with a thickness of 10 mm [1] and an appropriate radiation shield was essential. We have evaluated the radiation dose of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) by numerical calculations to secure performance of it [2]. However, a shielding effect by the JUICE satellite body has not been included in it, because much computation time is required for a normal Monte Carlo method to calculate an energy deposition in a very small part ( $\sim 10^{-5}$ – $10^{-2}$  m) in the large JUICE satellite (maximum  $\sim 10^1$  m). Therefore a new simulation code based on a reverse Monte Carlo method was developed by using Geant4.10.02 library [3] to reduce calculation time and to estimate the radiation dose including the shielding effect of the JUICE satellite body. This code was benchmarked and compared to other ones. The three-dimensional distributions of radiation dose in lens of the laser receiver of the GALA and the circuit board were also calculated and evaluated.

- [1] K. Lingenauber, The Ganymede Laser Altimeter (GALA) on ESA's JUICE mission: Overview of the instrument design, International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions (IPM-2014), Nov. 5 (2014) NASA GSFC.
- [2] S. Kobayashi et al., JUICE/GALA-J (5): Radiation analysis for Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission, Japan Geoscience Union Meeting 2016, May 20-25 (2016) Makuhari Messe, Chiba.
- [3] S. Agostinelli et al., Geant4—a simulation toolkit, Nucl. Instr. and Meth. A506 (2003) 250–303.

## JUICE/GALA-J (6) : JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における受光部の光学/構造/熱設計

JUICE/GALA-J (6): Optical/Structural/thermal design for the receiver part of GALA

- 塩谷圭吾<sup>1,2</sup>, 小林正規<sup>3</sup>, 石橋高<sup>3</sup>, 小林進悟<sup>4</sup>, 鹿島伸悟<sup>5</sup>, 宇都宮真<sup>5</sup>, 岩村哲<sup>6</sup>, 飯田光人<sup>7</sup>, 松本吉昭<sup>7</sup>, 藤井雅之<sup>8</sup>, 藤代尚文<sup>9</sup>, 山室智康<sup>10</sup>, 尾崎正伸<sup>1,2</sup>, 水野貴秀<sup>1,2</sup>, 斎藤義文<sup>1</sup>, 東原和行<sup>1</sup>, 山脇敏彦<sup>1</sup>, 並木則行<sup>5,2</sup>, 荒木博志<sup>5,2</sup>, 野田寛大<sup>5,2</sup>, 押上祥子<sup>11</sup>, 木村淳<sup>12</sup>, Christian Althaus<sup>13</sup>, Simone DelTogno<sup>13</sup>, Kay Lingenauber<sup>13</sup>, Hauke Hussmann<sup>13</sup>

宇宙科学研究所<sup>1</sup>, 総研大<sup>2</sup>, 千葉工大<sup>3</sup>, 放射線医学総合研究所<sup>4</sup>, 国立天文台<sup>5</sup>, MRJ<sup>6</sup>, PTI<sup>7</sup>, FAMサイエンス/明星電気<sup>8</sup>, アストロオプト<sup>9</sup>, オプトクラフト<sup>10</sup>, 工学院大<sup>11</sup>, 東工大地球生命研究所<sup>12</sup>, ドイツ航空宇宙センター<sup>13</sup>

We present Optical/Structural/thermal design for the receiver part (backend optics: BEO + detector module: FPA) of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) mission.

Thermal environment of GALA is unique: The receiver telescope and some parts are cooled to intermediately cryogenic temperature by radiation to the cold surface of Ganymede and deep space while the APD has to be kept at  $25 \pm 0.1$  degree in its operation time. Many parts of GALA are warmed by self-heating. Furthermore, GALA repeats observation time of 16 hours and data downlink time of 8 (power for observation is off) hours. So the thermal environment is dynamic. Constraints of volume and mechanical interface is also severe issue for design. Nevertheless, GALA have to keep stability of optical performance, especially absolute agreement of the optical axis of the emitter and the receiver and to the spacecraft coordinate system. Radiation shield also has to be mandatory.

Considering these conditions, we are carrying out design of optics, structure and thermal design for the receiver part (BEO + FPA). The current baseline design, the BEO is simply consisting of a collimator lens, a narrow band-pass filter, a focusing lens supported without adhesive. Stainless SUS316 is used for the structural material of both BEO and FPA in order to minimize thermal expansion mismatch and good radiation shielding. A tolerance analysis was carried out and realistic error budget was allocated. Iterative studies of thermal analysis of whole GALA and the optical/thermal/structural design is ongoing.

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における受光部 (後置光学系 BEO および検出器モジュール FPA) の光学/構造/熱設計について示す。

GALA の熱環境は特殊である。まず、受光望遠鏡はガニメデ表面および深宇宙への熱輻射により冷却される。いっぽう APD 検出器は  $25 \pm 0.1$  °C を保って運用する必要がある。GALA の各部分は電量消費による発熱がある。更に、GALA は 16 時間の観測の後、8 時間をデータ転送に当て、その間は観測機能の電力はオフになるため、熱環境は動的である。設計における空間的制約、機械的インターフェースの制約も厳しいものになっている。

このような条件を考慮しつつ、GALA 受光部 (BEO + FPA) の設計を進めている。シンプル化を追求した光学系は、ピンホール、コリメートレンズ、狭帯域フィルター、結像レンズ、の 4 つ (だけ) の光学的素子から成る。これらの光学素子の固定に接着剤は用いない。BEO, FPA の筐体の材料は、熱膨張率のミスマッチを最小化し、放射線遮蔽能力も考慮して SUS316 で統一する。光学的トレランスについて解析して、現実的な誤差配分を定めることが出来た。現在、受光部の設計を GALA 全体での熱解析に取り込み、結果をフィードバックしつつ、設計を収束させているところである。



## 重力天体着陸探査に向けた元素分析装置「能動型蛍光 X 線分光計」の開発

### The development of Active X-ray Spectrometer for future lunar and planetary landing explorations

○長岡 央<sup>1</sup>, 長谷部 信行<sup>1</sup>, 柴村 英道<sup>1</sup>, 内藤 雅之<sup>1</sup>, 天野 嘉春<sup>1</sup>, 太田 亨<sup>1</sup>,  
Fagan Timothy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学

天体の元素組成はその起源と進化を明らかにする上で、質量や半径などの物理量と共に重要な情報である。今後の惑星探査では、周回機による全球的な探査と併せて、科学的に特に特徴的で興味深い領域への着陸探査が同時に行われると考えられる。将来の惑星探査では、表層に着陸し、その場の元素情報を高精度で取得可能な元素分析装置の開発が必要である。着陸探査にて有効的な手法の一つが、蛍光 X 線分析であり、今までに米国の火星着陸探査や中国の月着陸探査にて広く用いられ、その場の元素組成を取得した。しかし、これらの探査で用いられた X 線発生装置には、放射性同位体が用いられており、日本での探査ではその使用が非常に困難である。

我々は、将来の惑星着陸探査に向けて能動型蛍光 X 線分光計 (AXS) の開発を進めている。AXS は、能動型の X 線発生装置とシリコンドリフト検出器 (SDD) を組み合わせた元素分析装置であり、蛍光 X 線分析により着陸地周辺の元素分析を行うことを目的とする。1) 発生装置には焦電結晶を用いる。焦電結晶は、温度変化を与えることで自発分極が引き起こされ、結晶表面に非常に高い電場が形成される。発生装置は焦電結晶とペルチェ素子、金属ターゲットから構成され、これらを低圧ガスで封入する。ペルチェで結晶に温度変化を与え、生じた電場により容器内で発生した電子は加速され、金属ターゲットもしくは結晶に衝突し、それぞれの特性 X 線が発生する。この特性 X 線を利用して、蛍光 X 線分析を行う。焦電結晶型の発生装置を宇宙用として新たに用いることで、小型省電力でかつ放射性物質を用いないという点が特徴的である。しかし、現状での焦電結晶型発生装置にはその強度が弱いという問題点があり、宇宙探査用に十分な強度が得られるよう入射 X 線の高輝度化に関する研究を進めてきた。2) SDD の大面積化と窓厚の薄化への試みによる蛍光 X 線の高感度化と、Na 以下の軽元素測定への対応も検討していく必要がある。

本発表では、我々が提案する AXS の概要と現在の開発状況について報告する。

## ソーラー電力セイルによるトロヤ群小惑星の探査計画

○岡田達明<sup>1,9</sup>, 癸生川陽子<sup>2</sup>, 青木順<sup>3</sup>, 伊藤元雄<sup>4</sup>, 河井洋輔<sup>3</sup>, 藪田かおる<sup>3</sup>, 矢野創<sup>1</sup>, 岡本千里<sup>5</sup>,  
中村良介<sup>6</sup>, Jean-Pierre Bibring<sup>7</sup>, Stephan Ulamec<sup>8</sup>, 大槻真嗣<sup>1</sup>, 松本純<sup>1</sup>, 岩田隆浩<sup>1</sup>, 森治<sup>1</sup>,  
ソーラー電力セイル・サイエンスチーム

<sup>1</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>2</sup>横浜国立大学, <sup>3</sup>大阪大学, <sup>4</sup>JAMSTEC 高知コア研究所, <sup>5</sup>神戸大学,

<sup>6</sup>産業技術総合研究所, <sup>7</sup>フランス宇宙物理学研究所 (IAS), <sup>8</sup>ドイツ航空宇宙センター (DLR), <sup>9</sup>東京大学

ソーラー電力セイル (SPS) による木星トロヤ群小惑星の探査計画 (2016 年 8 月に WG 活動を終了、Phase-A スタディに移行) について、科学観測の概要と搭載観測機器の検討状況を報告する。

SPS は次期中型宇宙探査ミッション候補の工学実験探査機である。世界初の宇宙ヨット「イカロス」で実証されたソーラーセイルの薄膜帆を大面積太陽電池として発電しつつ、「はやぶさ」「はやぶさ2」で培われた技術の延長である増強型イオンエンジンを駆動するハイブリッド推進システムにより、超低燃費で外惑星系にまで至る宇宙航行を行う。打ち上げから約 5 年で木星に到達し、重力アシストによってトロヤ群小惑星に向かう軌道に投入し、さらに数年後にトロヤ群小惑星にランデブーする。合計 10 年を超えるクルージング期間中を活かした科学観測も実施する。黄道光の原因となるダスト帯の外側に出て、赤外線バックグラウンドを数桁下げた条件で赤外線宇宙観測を実施するほか、太陽系内ダストの動径方向の空間分布測定やその磁場観測と組み合わせて磁場・ダストの相互作用を調査する。さらに地球との超長基線を利用したガンマ線偏光観測などを行うことを検討している。

木星トロヤ群小惑星に到着後は、高度 1000km (～数 100km) に滞在し、望遠撮像および赤外分光撮像によるグローバルマッピングを行い、小惑星の形状、自転状態、表面地形、熱物性のほか、水質変成度や物質同定を行う。次に低高度に降下し、重力計測や平均密度などを調べ、かつ高解像度マッピングを行って着陸地点の選定を行う。さらに高度 1km まで降下し、100kg 級の着陸機を投下する。着陸後にパノラマ撮像による周辺地形調査、赤外分光撮像による物質調査、直下のマクロ撮像等による地盤調査を行う。次に、表層および地下数 10cm (最大 1m) の試料を採取し、複数の試料ケースに収納する。採取試料の一部は顕微分光撮像し、粒子単位での物質同定を行う。大部分の試料は順に加熱して揮発性成分を取り出し、熱分解や GC を通して質量分析を行い、同位体比 (D/H、<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N、等) や有機物等のガス分子の同定を行う。また、一部の試料は地球帰還用であり、着陸機が再浮上して母船とドッキングし、試料を受け渡し、打ち上げから約 30 年後にサンプルリターンを行う構想である。

トロヤ群小惑星は木星軌道域の主に D 型天体であり、人類未踏地にある天体の素性を調べること自体が興味深い。また、太陽系内物質分布を調べるための重要な一要素である。それに加えて、太陽系形成過程に制約を与える可能性が期待される。最近の太陽系形成モデルでは、巨大惑星が動径方向に移動する説が提唱されている (e.g., Morbidelli et al. 2005; Walsh et al., 2011)。特に Nice モデルでは巨大惑星の移動に伴って EKBO 天体が重力散乱され、その一部が太陽系内側に移動する結果、木星のトロヤ群として捕獲されたり、地球や月にまで降下 (重爆撃) すると説明される。この場合、トロヤ群小惑星は木星領域起源ではなく、太陽系外縁部起源の同位体比の特徴を示す (Marty et al., 2012) と考えられ、太陽系形成モデルの検証に寄与するであろう。

# 月・火星の縦孔・地下空洞探査(UZUME計画)の アストロバイオロジー的意義

○小林憲正<sup>1</sup>, 横堀伸一<sup>2</sup>, 春山純一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>横浜国大院工, <sup>2</sup>東薬大生命, <sup>3</sup>JAXA/ISAS

日本の月探査機「かぐや」による月の縦孔の発見や, NASA Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) による火星縦孔の発見は, これらの天体に溶岩チューブのような地下空洞が存在する可能性を強く示唆した。これを踏まえて月・惑星の縦孔・地下空洞探査がUZUME計画として検討されているが, これはアストロバイオロジーの観点からも興味深いものである。

## 1. 生物起源・非生物起源有機物の探査

生命の誕生前に宇宙塵などにより地球外起源の有機物が地球に供給されたと考えられている。この検証のためには, 生物圏で汚染されていない宇宙塵の捕集が必要である。「たんぽぽ計画」では, 低地球周回軌道での捕集を行っているが, 月・火星表層での捕集も考えられる。ただ, これらの天体表層は有機物に致命的な強紫外線環境である。しかし, 紫外線が遮られる永久影や地下では有機物も保存される可能性が考えられる。地下空洞はまさにそのような環境で, 縦孔から入り, 地下空洞などの永久影部分に到達すれば, 太陽紫外線に曝露されないため, 分解・変成の少ない試料が得られる可能性が考えられる。さらに, 火星の場合は, 過去および現存する生命の可能性が議論されているが, それらに由来する有機物も, 火星表層では太陽紫外線および過酸化物の影響で分解されやすいとされる。地下空洞では, 紫外線照射を免れるため, 変成の程度の低い有機物や微生物の検出が期待できる。

さらに, 月の場合は, 地球微生物の検出も期待できる。たんぽぽ計画では地球を脱出して低地球周回軌道まで達した微生物の検出をめざすが, もし地球周回軌道まで到達した微生物が存在するならば, 微生物の惑星間移動を検証する次なる場は, 月ということになり, 特に月の地下空洞が注目されるだろう。

## 2. 月面基地と惑星検疫

月に月面基地を作り, 観測や宇宙実験の拠点とする案は古くから提案されてきた。しかし, 月面は寒暖の差や隕石衝突の危険性など, 基地建設の上で問題も多い。そこで, 地下空洞を利用すれば, これらの問題の多くをクリアすることができる。

この月面基地は, 惑星検疫 (Planetary Protection = PP) にも利用できる。火星, エウロパ・エンケラドゥスなどからのサンプルリターンが現在検討されているが, これらはPP Category V (restricted)に分類され, 特別な注意が必要とされる。安全性が確認されるまでの初期分析の場として, 地球と完全に隔離された月面基地は最も適しているといえよう。