日本惑星科学会 2019 年秋季講演会 予稿集

2019年10月7日(月)-9日(水) 京都産業大学神山ホール

日本惑星科学会 賛助会員

Harris Geospatial 株式会社

株式会社 ナックイメージテクノロジー

日本惑星科学会 2019 年秋季講演会 プログラム

2019年日本惑星科学会秋季講演会実行委員会



京都産業大学へのアクセス 京都駅から,地下鉄で「国際会館駅」下車 → 京都バス (40系統)で「京都産業大学前」下車(所要時間約10 分),もしくは地下鉄で「北大路駅」下車 → 市バス (北3号系統)または京都バスで京都産業大学前下車(所 要時間約20分).

【バス増便の予定について】

会期中,「国際会館駅」と京都産業大学との間でバス の増便が行われる予定です.「北大路駅」と京都産業大 学との間でのバスの増便は行われませんので,行き帰り ともになるべく「国際会館駅」発/行のバスをご利用くだ さい.また朝は8:45よりも前に「国際会館駅」もしくは 「北大路駅」を出発するバスは非常に混み合いますの で,可能な限り8:45以降のバスへのご乗車をお願いいた します.

●秋季講演会

- 日程:2019年10月7日(月)~9日(水)
- **場所**:京都産業大学神山ホール(〒603-8555 京都市 北区上賀茂本山)
- 講演数:口頭 76 件(最優秀発表賞選考 7 件を含む),
 口頭発表付きポスター38 件, ポスターのみ
 76 件(最優秀発表賞選考 7 件を含む), 最優
 秀研究者賞受賞講演 2 件
- * 会場に Wi-Fi 設備はございません. eduroam は利 用可能です. それ以外でインターネット接続環境が 必要な方は各自ご用意下さい.

●プログラム概要

- 10月7日(月)
- 9:00 開場·受付開始
- 9:40 LOC 挨拶
- 9:45 特別セッション 最優秀発表賞選考
- 11:50 **口頭発表セッション** 太陽系外縁天体・氷 天体・アストロバイオロジー
- 13:12 2分ポスター紹介セッション
- 13:42 昼食
- 14:40 口頭発表セッション 小惑星・流星・惑星 大気
- 16:50 2分ポスター紹介セッション
- 17:36 ポスターセッション

〇 10月8日(火)

- 9:00 開場·受付
- 9:30 口頭発表セッション 月
- 11:16 **口頭発表セッション** はやぶさ2・小惑星 リュウグウ
- 13:04 昼食
- 14:20 **口頭発表セッション** はやぶさ2・小惑星 リュウグウ
- 15:40 総会
- 16:50 最優秀研究者賞受賞講演
- 18:30 懇親会

○ 10月9日(水)

- 9:00 開場・受付
- 9:30 口頭発表セッション 火星
- 11:28 口頭発表セッション 衝突現象・惑星形成
- 13:16 昼食
- 14:30 口頭発表セッション 惑星形成・衛星形成
- 15:52 口頭発表セッション 系外惑星
- 17:04 閉会

●口頭発表

最優秀発表賞選考は 15 分講演(3 分間の質疑時間 および交代時間を含む),一般講演は 12 分講演(3 分 間の質疑時間および交代時間を含む),ポスター紹介 は 2 分間(質疑時間無し)です.時間厳守でお願い します.以降のプログラムでは講演番号,開始時間, 表題,講演者を掲載しています.

●ポスターセッション

ポスターは 10 月 7 日 (月) 9:00-10/9 日 (水) 17:15 の間, 常時掲示可能です. 以降のプログラムで は, 講演番号, 表題, 講演者を掲載しています. 10 月 7 日 (月) 17:36-19:00 でポスターセッションの 時間を設けています. 一般ポスターのコアタイムは, 奇数番号が 17:36-18:20, 偶数番号が 18:20-19:00 です.

《口頭発表プログラム》

10月7日(月)

9:55 LOC 委員長挨拶

- **特別セッション 最優秀発表賞選考** (座長:黒澤 耕介)
- O1 9:45 火星の化学組成 吉崎 昂(東北大) (講 演キャンセル)
- O2 10:00 高空隙ダストの引張強度と原始惑星系円
 盤内での回転による破壊 辰馬 未沙子
 (東大)
- O3 10:15 太陽系探査を目指した Orbitrap 型質量分 析器の開発 川島 桜也(東大)
 10:30 休憩(10分)
- O4 10:40 太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化 荒川 創太(東工大)
- O5 10:55 原始惑星によって駆動される3次元ガス 流構造がペブル降着に及ぼす影響 桑原 歩(東工大)
- O6 11:10 地球の揮発性元素組成の起源:コア形成 と天体衝突による大気散逸の影響 櫻庭 遥(東工大)
- O7 11:25 土星衛星 Enceladus と Mimas における メタンハイドレートの形成と熱進化 西 谷 隆介(阪大)
 11:40 休憩(10分)

太陽系外縁天体・氷天体・アストロバイオロジー

(座長:大野 宗祐, 木村 淳)

- O8
 11:50
 恒星掩蔽観測によって明かされる太陽系

 外縁天体
 有松 亘(京大)
- O9 12:02 冥王星の窒素氷の昇華と凝結による反射 率分布の変化 松井 弥志(阪大)

- O10 12:14 モンゴル塩湖の凍結時における氷への塩 取り込みと太陽系氷天体への応用 依田 優大(東工大)
- O11 12:26 エウロパ表面での塩化物酸化過程に関す る実験的・観測的研究 丹 秀也(東大)
- O12 12:38 粘土鉱物存在下での蒸発乾固を用いた核 酸塩基とリボースからのヌクレオシド合 成 橋爪 秀夫(NIMS)
- O13 12:50 大気球を用いた成層圏微生物採取実験:
 Biopause プロジェクト 大野 宗祐(千 葉工大)
 - 13:02 休憩(10分)

2分ポスター紹介 (座長:佐々木 貴教)

- P1
 13:12
 月惑星探査アーカイブサイエンス拠点

 に令和元年度認定された会津大学宇宙
 情報科学研究センターについて
 出村

 裕英(会津大)
- P2
 13:14
 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam に よる木星 L5 トロヤ群小惑星のサイズ 分布測定
- P3 13:16 小惑星探査画像の画素単位 DB による 解析と小天体地理情報システム AiGIS と連携した結果の可視化 平田 成(会 津大)
- P4 13:18 小惑星セレスへのアンモニア氷の供給 からみるパラメータ制約 奈良 悠冬 (東工大)
- P5 13:20 地球接近天体 2012TC4 母天体における 衝突イベント時期の推定 浦川 聖太郎 (スペースガード協会)
- P6 13:22 衝突閃光の実験的研究:真空度と発光 メカニズムの関係 布施 綾太(日大)
- P7 13:24 アーク加熱風洞を応用した流星体の機 械的強度と熱伝導率が流星アブレーシ ョンへ与える影響評価 大木 紘介(日 大)
- P8 13:26 2018 年ふたご座流星群に伴う月面衝突 閃光の低分散スペクトル II 柳澤 正久 (電通大)
- P9
 13:28
 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星の

 密度分布構造の推定
 金丸
 仁明(阪大)
- P10 13:30 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた分裂彗星核
 P/2016 BA14 と 252P/LINEAR の可視
 光測光・分光・偏光観測 山形 稜(北 教大)
- P1113:32木星氷衛星探査衛星 JUICE, 日本から
の貢献 ー プロジェクトの概況、現
状、そして展望状、そして展望笠羽 康正(東北大)
- P12
 13:34
 潮汐変形と位相の遅れを考慮した

 Ganymede の強制秤動
 小島 晋一郎

 (阪大)

- P13
 13:36
 ALMA アーカイブデータを用いたイオ

 大気の供給源の推定
 鈴木 達也(名大)
- P14
 13:38
 小規模衝突による傾斜地形緩和に関す る実験的研究

 大村
 知美(名大)
- P15 13:40 多孔質氷天体を模擬した雪のクレータ
 一形成実験:衝突溶融と衝突残留熱に
 関する研究 笹井 遥(神戸大)
 13:42 昼休み

小惑星・流星・惑星大気 (座長:杉山 耕一朗,藤 谷 渉)

- O14 14:40 Aguas Zarcas (CM2)隕石の有機物分 析: Typical CM2 or not? 癸生川 陽 子(横国大)
- O15 14:52 熱変成作用を受けた CM コンドライト Jbilet Winselwan 隕石の加熱源について 藤谷 渉(茨城大)
- O16 15:04 非集積岩ユークライト中シリカ多形が示 す熱変成履歴 大野 遼(東大)
- O17 15:16 L5 コンドライト隕石に対する衝突実験
 ~X線 CT 撮像による隕石内部クラックの3次元分布 道上 達広(近畿大)
- O18 15:28 地上観測・室内実験・6U 超小型探査機
 を用いた月面衝突閃光の総合理解 阿部
 新助(日大)
- O19 15:40 京都大学 MU レーダと東京大学木曽観 測所 Tomo-e Gozen による微光流星同
 時観測 大澤 亮(東大)
- O20 15:52 DESTINY+ミッションにおける小惑星 (3200) Phaethon のフライバイ撮像観測 石橋 高(千葉工大)
- O2116:04ALMA を用いたタイタン大気アセトニト
リル CH3CN における窒素同位体比の初
計測と,銀河宇宙線由来大気化学過程へ
の制約
の制約
飯野 孝浩(東大)
- O22 16:16 金星大気の平均子午面循環 高木 征弘 (京産大)
- O23 16:28 大学規模の太陽系地上観測所、その将来
 計画:東北大の場合 笠羽 康正(東北
 大)
 16:40 休憩(10分)
- 2分ポスター紹介 (座長:瀧川 晶)
- P16 16:50 木星型惑星の大気における湿潤対流の
 禁止条件: NH3 と H2S の化学反応に
 よる NH4SH 生成の場合 中島 健介 (九大)
- P17
 16:52
 NH4SH 生成反応による対流抑制条件 を念頭においた木星型惑星の雲対流の 数値計算

 数値計算
 杉山 耕一朗(松江高専)
- P18
 16:54
 近赤外エシェル分光器/PIRKA 望遠鏡

 による金星大気微量分子の観測
 築山

 大輝(大阪府立大)

- P19
 16:56
 10m 電波望遠鏡 SPART と ALMA

 12m-Array/ACA/TP 同時観測による金
 星中層大気の微量分子スペクトルの解

 析と整合性の評価
 冨原 彩加(大阪府

 立大)
- P20
 16:58
 Web 地図技術を用いた大規模惑星大気 数値シミュレーションデータの可視化 松村 和樹(松江高専)
- P21
 17:00
 月極域探査:既存データの課題と観測

 要求
 大竹 真紀子(JAXA)
- P22
 17:02
 月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)

 計画の搭載機器と観測計画の検討
 岩

 田 隆浩(JAXA)
- P23
 17:04
 月面探査車搭載型中性子検出器の開発の現状

 の現状
 晴山 慎(聖マリアンナ医科大)
- P2417:06レーダによる月表層・小惑星内部探査
の計算機実験の計算機実験熊本篤志(東北大)
- P25 17:08 162173 リュウグウ表面の高解像度画像 から探る岩塊の熱疲労 佐々木 晶(阪 大)
- P26 17:10 リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒 標的に対するクレーター形成実験 山 本 裕也(神戸大)
- P27 17:12 火星 Web-GIS "Red Ace" におけるユ ーザーによるスペクトルデータ管理 福地 裕範(会津大)
- P28 17:14 MMX 搭載近赤外分光撮像器 MacrOmega の観測計画と開発状況 岩田 隆浩(JAXA)
- P29
 17:16
 岩石ターゲットからの高速度エジェク タのサイズ-速度同時測定
 野村 啓太 (神戸大)
- P30
 17:18
 Class 0/l 段階におけるペブル集積に よる巨大惑星の形成条件
 田中 佑希 (東北大)
- P31 17:20 太陽系における地球型4惑星の形成:
 Grand Tack のような幅の狭い円盤は不適
 ソフィア リカフィカ パトリック (近畿大)
- P32 17:22 周木星円盤における光泳動:ガリレオ 衛星の軌道共鳴の起源に対するひとつ の説明 荒川 創太(東工大)
- P33 17:24 イジェクタ層分布と基盤岩衝撃変成に 基づくオーストラリア・アジアテクタ イトイベントの衝突地点推定 多田 賢 弘(東大)
- P34 17:26 火星巨大衝突により生じる衝突破片の 長期力学進化のN体計算 石城 陽太 (東大)
- P3517:28準惑星ハウメアのリング形成シナリオ
の提案の提案角田 伊織(京大)
- P36 17:30 共鳴鎖にある惑星系の軌道不安定条件:
 中心星質量の進化 松本 侑士(中央研究院)

- P37 17:32 系外惑星大気中の雲形成における粒子 サイズ・空隙率分布の共進化 大野 和 正(東工大)
- P38
 17:34
 SPICA による原始惑星系円盤からの複 雑な有機分子輝線の観測予測
 野村 英 子(国立天文台)
 - 17:36 ポスターセッション
 奇数番号コアタイム: 17:36-18:20
 偶数番号コアタイム: 18:20-19:00
 19:00 終了

10月8日(火)

- 月 (座長:嵩 由芙子,諸田 智克)
- O24 9:30 かぐや搭載スペクトルプロファイラ (SP) データから発見された水氷吸収プ ロファイルの解析 小野寺 圭祐(総研 大)
- O259:42月極域探査:ミッション概要と検討状況星野 健(JAXA)
- O269:54月極域及び低緯度領域における表層温度
シミュレーションシミュレーション嵩由美子(会津大)
- O27 10:06着氷月模擬土壌の近赤外スペクトル観測
荻島 葵(阪大)
- O28 10:18 月リモートセンシングのための人工火成 岩の合成と分光観測 荒木 亮太郎(阪 大)
- O29 10:30 SLIM マルチバンドカメラエンジニアリングモデルによる観測性能確認 佐伯和人(阪大)
- O30 10:42 月の縦孔下の溶岩チューブの形状確認に よる溶岩物性値の同定 本多 力(火山洞 窟学会)
- O31 10:54 月火星の縦孔地下空洞直接探査 (UZUME)計画の科学と探査構 春山 純一(JAXA)
 11:06 休憩(10分)

はやぶさ2・小惑星リュウグウ(1)

- (座長:亀田 真吾, 保井 みなみ)
- O32 11:16「はやぶさ2」のリュウグウ近傍探査の
総括 渡邊 誠一郎(名大)
- O33 11:28 「はやぶさ 2」サンプラー:試料採取完 了と回収準備 橘 省吾(東大)
- O34 11:40 はやぶさ2搭載レーザー高度計 LIDAR
 の地形データに基づく小惑星 Ryugu の
 表面ラフネス 増田 陽介(日大)
- O35 11:52 はやぶさ2搭載近赤外分光計によって観 測された小惑星リュウグウの表面組成 北里 宏平(会津大)

- O36 12:04 小惑星リュウグウにおける 0.7 µm 吸収 分布の地形との関係 石田 茉莉花(立教 大)
- O37 12:16 小惑星リュウグウのブライトスポットの スペクトル分類 杉本 知穂(東大)
- O38 12:28 はやぶさ 20NC-T カメラによる分光デー タを用いた Ryugu のレゴリス流動解析 高木 直史(東大)
- O39 12:40 多バンド可視観測による小惑星リュウグ ウとベヌーの比較 杉田 精司(東大)
- O40
 12:52
 小惑星の高速自転変形の数値計算とリュ ウグウなどのコマ型小惑星の形成につい て
 ド浦 圭祐(東工大)
 - 13:04 昼休み

はやぶさ2・小惑星リュウグウ(2)

- (座長:北里 宏平, 嶌生 有理)
- O4114:20はやぶさ2SCIによる小惑星リュウグウ上での衝突実験荒川 政彦(神戸大)
- O42 14:32 「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラ (TIR) 観測による SCI (小型衝突装 置)運用で発生したクレータイジェクタ およびタッチダウン地点(C01)付近の 熱的な特徴について 田中 智(JAXA)
- O43 14:44 小惑星リュウグウのクレーターと周辺ボ ルダーの関係に着目した表層の層構造の 推定 赤羽 大貴(名大)
- O44 14:56 地震波伝搬モデリングを用いたリュウグ
 ウの弾性的特性の制約と seismic
 shaking の可能性の検討 西山 学(東大)
- O45 15:08 小惑星 Ryugu 表層を模擬した粉粒体へ のクレーター形成実験 保井 みなみ(神 戸大)
- O4615:20遠心法で測定した隕石粉の固着力と小惑星レゴリス粒子への応用長足 友哉(神戸大)
 - 15:32 休憩(8分)
 - 15:40 日本惑星科学会総会
 - 16:40 休憩(10分)

最優秀研究者賞受賞講演

- (座長:田中 智)
- 16:50 惑星系の形成と進化 黒川 宏之(東工 大)
- 17:35
 紀元前太陽系を探る:質量放出星から太陽系への物質進化

 瀧川 晶(京大)
- 18:20 会場移動
- 18:30 懇親会

10月9日(水)

- 火星 (座長:臼井 寛裕, 黒川 宏之)
- O47 9:30 炭酸塩コンクリーションにおける形成メ カニズムと形態条件の推定 井原 貴之 (名大)
- O48 9:42 火星タルシス地域アスクラエウス山北西 麓における火山と氷河の相互作用 神崎 友裕(東大)
- O49 9:54 火星古環境の3次元大気圏・水圏結合シ ミュレーション:タルシス山地による全 球水循環への影響 鎌田 有紘(東北大)

O50 10:06非静力学全球火星大気循環モデルの開発
と高解像度計算と高解像度計算樫村 博基(神戸大)

- O51 10:18弱い固有磁場環境下における火星大気流
出機構 堺 正太朗(東大)
- O52 10:30
 光化学反応と放射冷却を考慮した地球・ 火星における還元型原始大気の流体力学

 的散逸
 吉田 辰哉(北大)
- O53 10:42 原始火星大気に包まれた火星衛星系の進化: 微惑星の捕獲と衛星の衝突・軌道進化 松岡 亮(北大)
- O54 10:54 火星衛星探査計画 MMX の進展とサイエンス 倉本 圭(北大)
- O55 11:06 火星衛星探査計画(MMX)のサンプル サイエンス検討 臼井 寛裕(JAXA)
 11:18 休憩(10分)

衝突現象·惑星形成 (座長:黒崎 健二,藤井 悠里)

- O56 11:28 フラッシュ X 線を用いた衝突破壊現象の 観測:多孔質標的の破片速度分布に対す る空隙の効果 中村 誠人(神戸大)
- O57 11:40 岩石の塑性変形加熱: 炭酸塩岩からの衝
 撃脱ガス量を用いた検証 黒澤 耕介(千 葉工大)
- O58 11:52低強度標的を用いたクレーター形成実
験:エジェクタ放出過程の解析杉村
瞭(神戸大)
- O59 12:04数値計算によるイジェクタカーテン模様
の解析の解析末次竜(産業医大)
- O60
 12:16
 進化する原始惑星系円盤中での圧力極大 点の位置について
 瀧 哲朗(国立天文 台)
- O61 12:28 ダスト-ガス摩擦と乱流粘性が駆動する
 原始惑星系円盤の永年不安定性の非線形
 発展 冨永 遼佑(名大)
- O62 12:40原始惑星系円盤のダストと温度構造の共進化進化奥住 聡(東工大)
- O63 12:52 自己重力不安定な円盤におけるダストの 運動と微惑星形成過程への示唆 古賀 駿大(九大)(講演キャンセル)
- O64 13:04巨大衝突起源の破片がもたらす地球型惑星の軌道進化小林 浩(名大)

13:16 昼休み

惑星刑	髟成・ 律	ī星形成	(座長	:瀧	哲朗,	兵頭	龍樹)
O65	14:30	ダスト摩打	察反作月	目が目	三大惑	星移動	に与え
		る影響に	ついて	金J	和弘	ム(東大	;)

- O66 14:42 水素大気を持つ天体の衝突合体 黒崎 健二(名大)
- O67 14:54 Uranian Satellite Formation by Evolution of a Water Vapor Disk Generated by a Giant Impact 井田 茂 (東工大)
- O68 15:06 非理想 MHD 計算により与えられた周惑 星円盤における微衛星形成 芝池 諭人 (ベルン大)
- O69
 15:18
 周惑星円盤起源の単一衛星を持った衛星

 系の形成について
 藤井 悠里(名大)
- O70
 15:30
 長周期彗星の分布を用いたオールト雲形

 成仮説の検証
 樋口
 有理可(国立天文台)
 - 15:42 休憩(10分)
- 系外惑星 (座長:平野 照幸, 堀 安範)
- O71 15:52 詳細な惑星形成過程を考慮したシミュレ ーションによるスーパーアースの形成と 大気量進化 荻原 正博(国立天文台)
- O72 16:04 系外蒸発惑星のダストテイルの理論透過 光スペクトル:惑星組成の制約に向けて 奥谷 彩香(東工大)
- O73 16:16 HD142527 に付随する原始惑星系円盤 のガス・ダスト質量比分布 百瀬 宗武 (茨城大)
- O74 16:28WSO-UV 計画 -海を持つ惑星探し- 亀田 真吾(立教大)
- O75 16:40次世代赤外線天文衛星SPICA: ミッション概要山村一誠(JAXA)
- O76 16:52 SPICA サイエンス検討会「太陽系・系外 惑星班」の活動報告 平野 照幸(東工 大)
 - 17:04 終了

《ポスター発表プログラム》

○ 最優秀発表賞応募ポスター

- O1 火星の化学組成 吉崎 昂(東北大)
- O2 高空隙ダストの引張強度と原始惑星系円盤内での回転による破壊 辰馬 未沙子(東大)
- O3 太陽系探査を目指した Orbitrap 型質量分析器の開発 川島 桜也(東大)
- O4 太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化 荒川 創太(東工大)
- O5 原始惑星によって駆動される3次元ガス流構造 がペブル降着に及ぼす影響 桑原 歩(東工大)
- O6 地球の揮発性元素組成の起源:コア形成と天体 衝突による大気散逸の影響 櫻庭 遥(東工大)
- O7 土星衛星 Enceladus と Mimas におけるメタン
 ハイドレートの形成と熱進化 西谷 隆介(阪大)

○ **一般ポスター(**コアタイム:奇数番号 17:36-18:20,

偶数番号 18:20-19:00)

- P1 月惑星探査アーカイブサイエンス拠点に令和元 年度認定された会津大学宇宙情報科学研究セン ターについて 出村 裕英(会津大)
- P2
 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam による木星

 L5トロヤ群小惑星のサイズ分布測定
 上畑 琴

 美(神戸大)
 上畑
- P3 小惑星探査画像の画素単位 DB による解析と小
 天体地理情報システム AiGIS と連携した結果の
 可視化 平田 成(会津大)
- P4 小惑星セレスへのアンモニア氷の供給からみる パラメータ制約 奈良 悠冬(東工大)
- P5 地球接近天体 2012TC4 母天体における衝突イ ベント時期の推定 浦川 聖太郎(スペースガー ド協会)
- P6 衝突閃光の実験的研究:真空度と発光メカニズムの関係 布施 綾太(日大)
- P7 アーク加熱風洞を応用した流星体の機械的強度 と熱伝導率が流星アブレーションへ与える影響 評価 大木 紘介(日大)
- P8 2018 年ふたご座流星群に伴う月面衝突閃光の 低分散スペクトル II 柳澤 正久(電通大)
- P9 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星の密度分 布構造の推定 金丸 仁明(阪大)
- P101.6m ピリカ望遠鏡を用いた分裂彗星核 P/2016BA14 と 252P/LINEAR の可視光測光・分光・
偏光観測山形 稜(北教大)
- P11 木星氷衛星探査衛星 JUICE, 日本からの貢献
 ー プロジェクトの概況、現状、そして展望
 笠羽 康正(東北大)
- P12
 潮汐変形と位相の遅れを考慮した Ganymede

 の強制秤動
 小島 晋一郎(阪大)
- P13
 ALMA アーカイブデータを用いたイオ大気の供

 給源の推定
 鈴木 達也(名大)

- P14 小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的 研究 大村 知美(名大)
- P15 多孔質氷天体を模擬した雪のクレーター形成実 験:衝突溶融と衝突残留熱に関する研究 笹井 遥(神戸大)
- P16 木星型惑星の大気における湿潤対流の禁止条
 件: NH3 と H2S の化学反応による NH4SH 生
 成の場合 中島 健介(九大)
- P17 NH4SH 生成反応による対流抑制条件を念頭に おいた木星型惑星の雲対流の数値計算 杉山 耕一朗(松江高専)
- P18 近赤外エシェル分光器/PIRKA 望遠鏡による金
 星大気微量分子の観測 築山 大輝(大阪府立
 大)
- P19 10m 電波望遠鏡 SPART と ALMA 12m-Array/ACA/TP 同時観測による金星中層大気の 微量分子スペクトルの解析と整合性の評価 冨 原 彩加(大阪府立大)
- P20
 Web 地図技術を用いた大規模惑星大気数値シ ミュレーションデータの可視化
 松村 和樹(松 江高専)
- P21
 月極域探査:既存データの課題と観測要求
 大

 竹 真紀子(JAXA)
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
 1
- P22
 月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計画の

 搭載機器と観測計画の検討
 岩田 隆浩(JAXA)
- P23 月面探査車搭載型中性子検出器の開発の現状 晴山 慎(聖マリアンナ医科大)
- P24 レーダによる月表層・小惑星内部探査の計算機実験 熊本 篤志(東北大)
- P25 162173 リュウグウ表面の高解像度画像から探る岩塊の熱疲労 佐々木 晶(阪大)
- P26 リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒標的に対 するクレーター形成実験 山本 裕也(神戸大)
- P27 火星 Web-GIS "Red Ace" におけるユーザーに よるスペクトルデータ管理 福地 裕範(会津 大)
- P28
 MMX 搭載近赤外分光撮像器 MacrOmega の観 測計画と開発状況
 岩田 隆浩(JAXA)
- P29岩石ターゲットからの高速度エジェクタのサイ
ズ-速度同時測定デー野村啓太(神戸大)
- P30
 Class 0/I 段階におけるペブル集積による巨大

 惑星の形成条件
 田中 佑希(東北大)
- P31 太陽系における地球型4惑星の形成: Grand Tackのような幅の狭い円盤は不適 ソフィア リカフィカ パトリック(近畿大)
- P32 周木星円盤における光泳動:ガリレオ衛星の軌 道共鳴の起源に対するひとつの説明 荒川 創 太(東工大)
- P33 イジェクタ層分布と基盤岩衝撃変成に基づくオ ーストラリア・アジアテクタイトイベントの衝 突地点推定 多田 賢弘(東大)
- P34
 火星巨大衝突により生じる衝突破片の長期力学 進化のN体計算

 石城
 陽太(東大)

- P35 準惑星ハウメアのリング形成シナリオの提案 角田 伊織(京大)
- P36 共鳴鎖にある惑星系の軌道不安定条件:中心星 質量の進化 松本 侑士(中央研究院)
- P37 系外惑星大気中の雲形成における粒子サイズ・ 空隙率分布の共進化 大野 和正(東工大)
- P38 SPICA による原始惑星系円盤からの複雑な有機 分子輝線の観測予測 野村 英子(国立天文台)
- P39 UZUME 計画における月の縦孔 ~楕円クレー
 ター、縦孔の形成過程の実験的考察 道上 達
 広(近畿大)
- P40 月の最終期マグマ活動と縦穴周辺の若い溶岩流探査 諸田 智克(東大)
- P41 ルナ 16 号試料 L1613 のキャラクタリゼーショ ン 渡邊 宏海(阪大)
- P42 月形成年代毎のクレーターの空間分布について 本田 親寿(会津大)
- P43
 着陸探査におけるオートフォーカス機能の有用

 性
 佐藤 広幸(JAXA)
- P44 月の表面を模擬した混合物組成による宇宙風化実験 島名 亮太(阪大)
- P45 月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計画での磁場計測 疋島 充(JAXA)
- P46
 SLIM マルチバンドカメラ(エンジニアリング モデル)の光学特性評価
 仲内 悠祐(JAXA)
- P47 月の Davy チェーンクレーターの形成は潮汐力 破壊により分裂した彗星の衝突によるものなの か 齋藤 晶也(東海大)
- P48 将来月探査計画 HERACLES の着陸地点検討 唐牛 譲(JAXA)
- P49 短周期ガス惑星からの電波放射を用いた内部構 造の制約 堀 安範(ABC)
- P50
 陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する大

 気大循環モデル実験
 吉田 哲治(北大)
- P51火星全球気候モデリングの精緻化に向けて:水
循環と HDO/H20 比黒田 剛史(東北大)
- P52 火星古気候モデルに向けた積雲対流スキームの 定量的評価 鳥海 克成(東北大)
- P53 火星隕石の放出に与える火星地下氷層の影響 脇田 茂(ブラウン大)
- P54 炭素流出が火星大気組成進化に及ぼす影響:酸素分圧の変化 八木 亮輔(東北大)
- P55 火星のクリュセおよびアキダリア平原における 地下構造の探索 大浦 愛菜(東北大)
- P56
 火星のコプラテス カズマにおける地下氷圏の 分布可能性検討

 野口
 里奈(JAXA)
- P57 粉体のレオロジーに着目した Recurring Slope Lineae(RSL)の形成模擬実験 植村 千尋(総研 大)
- P58 火星衛星探査計画 MMX (Martian Moons eXploration) 探査機搭載用イオンエネルギー 質量分析器 MSA (Mars moon mass Spectrum Analyzer)の設計 出口 雅樹(阪大)

- P59小惑星(3200)Phaethon による恒星食の観測キ
ャンペーン市田二美(千葉工大)
- P60 火星探査機 MAVEN の観測に基づく火星からの
 電離大気散逸の質量依存性に関する研究 関
 華奈子(東大)
- P61火星衛星探査ローバに搭載するラマン分光装置
(RAX)の開発
長
勇一郎(東大)
- P62火星衛星探査計画における望遠、広角カメラの
開発開発加藤博基(立教大)
- P63 数値モデルに於ける月と火星の初期進化の比較 小河 正基(東大)
- P64 火星表面で生命の兆候を検出する生命探査顕微鏡の開発 吉村 義隆(玉川大)
- P65
 量子化学計算による星間空間における複雑有機

 物の反応経路探索
 小松 勇(ABC)
- P66 放射により駆動される雲対流の基礎的数値実験 中島 健介(九大)
- P67 地球類似惑星における遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション:外圏底近傍の断熱 冷却について 寺田 直樹(東北大)
- P68
 大気大循環モデルを用いた金星雲分布の再現 安藤 紘基(京産大)
- P69 ハワイ IRTF/iSHELL 赤外分光データによる木
 星大赤斑上空を含む熱圏温度観測 神原 歩(東
 北大)
- P70 可視マルチバンドイメージング観測による木星 表層大気ダイナミクスの研究 伊藤 颯(明大)
- P71
 ERG 衛星の観測に基づく、リングカレント N+

 の観測研究
 津田 洸一郎(阪大)
- P72 球間焼結ネックの弾性定数 城野 信一(名大)
- P73 スノーライン付近での微惑星形成 兵頭 龍樹 (東工大)
- P74 不均質分子雲コアによる同位体異常生成:初期 不均質と同位体異常の量的関係 中本 泰史(東 工大)
- P75
 球対称ガス大気による微惑星の捕獲
 末次
 竜 (産業医大)
- P76 TW Hya 周囲の原始惑星系円盤におけるダスト 付着度の制約 松浦 孝之(東工大)
- P77 タンデム惑星形成論による岩石惑星形成 二村 徳宏(スペースガード協会)
- P78
 物質強度を考慮した岩石に対する斜め衝突加熱

 脇田 茂(ブラウン大)
- P79 天王星衛星のその場形成の軌道進化 石澤 祐 弥(京大)
- P80
 リュウグウ表層にみられるクレーターの深さ/

 直径比の空間分布
 野口
 里奈(JAXA)
- P81 小惑星 Ryugu での宇宙衝突実験におけるクレ
 ーターからの放出物のその場観測 門野 敏彦
 (産業医大)
- P82Hayabusa2 人工衝突クレータ生成による岩石
サイス頻度分布への影響坂谷 尚哉(JAXA)
- P83 Ryugu クレーターの熱物性 嶌生 有理(JAXA)

- P84 はやぶさ2衝突装置によって生成されたイジェ クタカーテンの解析から推定される小惑星リュ ウグウの表層物性 和田 浩二(千葉工大)
- P85 Hayabusa2 ONC 画像のアーカイブ化と公開計画 本田 理恵(高知大)
- P86 小惑星 Ryugu のブライトスポットのスペクト
 ル特徴と存在量の推定 末満 雅徳(名大)
- P87 リュウグウでみられるリニアメントの空間分布 特性 菊地 紘(JAXA)
- P88 はやぶさ2タッチダウンからあきらかになった 小惑星 Ryugu の表面の色変化と層序 諸田 智 克(東大)
- P89 162173 リュウグウの大クレーターと赤道バル ジの地形 並木 則行(国立天文台)
- P90 Hera 搭載熱赤外カメラによる地球近傍小惑星の観測計画 岡田 達明(JAXA)
- P91 教師無し分類手法を用いた小惑星ベスタの地質 分類の試み 石原 吉明(国環研)
- P92 炭素質地球近傍小惑星の宇宙風化トレンド 櫻 井 祥(会津大)
- P93 近赤外線分光観測による小惑星族母天体の内部 構造探査計画 臼井 文彦(神戸大)
- P94 太陽系小天体の内部構造探査を目指した重力偏 差計の研究開発 野村 麗子(国立天文台) (講 演キャンセル)
- P95 DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発とサ イエンス検討状況 荒井 朋子(千葉工大)
- P96 DESTINY+搭載カメラの機上校正方法について の検討 岡本 尚也(JAXA)
- P97
 DESTINY+計画の理学ミッション検討状況
 荒

 井 朋子(千葉工大)
- P98 Comet Interceptor 搭載イオン質量分析器の設 計 笠原 慧(東大)
- P99 Q型小惑星:風化した表層である可能性 長谷 川 直(JAXA)
- P100 木星トロヤ群、ヒルダ群、およびメインベルト 小惑星のサイズ頻度分布の比較研究:太陽系初 期の惑星移動への手がかり 吉田 二美(千葉工 大)
- P101
 表面凹凸のある小天体の Yarkovsky 効果および YORP 効果の数値計算

 ボ YORP 効果の数値計算
 千秋 博紀(千葉工大)
- P102 彗星探査計画 Comet Interceptor 新中 善晴 (京産大)
- P103 土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の反発及
 び付着に関する実験的研究 豊田 優佳里(神戸
 大)
- P104
 21P/Giacobini-Zinner 彗星の中間赤外線スペクトルにおける複雑な有機分子の検出
 河北

 方世(京産大)

 <
- P105 相対論カー・ニューマン解を利用した 太陽系 惑星軌道ティティウス・ボーデ法則、土星リン グ個数 および ファイン リング径 の導出 犬 山 文孝(九電産業株式会社)

- P106 リュウグウ・イトカワの起源,小惑星帯の起源 ---分化は何時・何処で起きたのか△私が惑 星の起源,水星コアリッチの謎,ボーデの法則 の謎をアブダクションで解明した. 種子 彰 (SEED SCIENCE Labo.)
- P107 月の起源・太陽系の起源,理論仮説で検証できるのは進化の複数の統一的な結果を利用した創造的推論(Abduction)だけである.シミュレーションも一項目だけの Abduction である. 種子彰(SEED SCIENCE Labo.)

火星の化学組成

() 吉崎 昂¹, William F. McDonough^{1,2,3}

1 東北大学 理学研究科 地学専攻

²Department of Earth Science, University of Maryland, College Park ³東北大学 ニュートリノ科学研究センター

地球型惑星の化学組成は、その形成進化過程を理解する上で重要な指標となる。地球や小惑星の 質量の9割以上は難揮発性元素 (Mg, Si, Fe, Al等)の酸化物や金属から成り、また揮発性元素 (K, S等)の存在度は天体の進化過程に大きく影響する。従来の火星化学組成モデル [1] は、火星と炭 素質コンドライト間で難揮発性元素存在度が等しいと仮定していた。しかし、難揮発性元素の組 成 (Mg/Si, Al/Si等) は、炭素質・非炭素質コンドライトや地球の間で異なることが知られており [2]、上記の仮定は不適切である。我々は、地球の化学組成モデリング [2] の手法に倣い、上記の仮 定を用いずに、火星隕石や探査機の物理・化学データに基づく火星の化学組成モデルを構築した。

我々の火星化学組成モデルは,難揮発性元素組成が火星と炭素質コンドライトで異なることを示 唆する。火星も地球と同様に,太陽系内側由来の非炭素質コンドライトに比べ,より太陽系初期 に形成した難揮発性物質を多く取り込んだと考えられる。地球より程度は小さいものの,火星に おいても揮発性の高い元素ほど枯渇していることが認められる。火星中の揮発性元素の相対存在 度や,火星隕石の同位体組成[3]に基づくと,火星における揮発性元素の枯渇は,天体集積後の元 素蒸発ではなく,星雲中の元素の不完全凝縮を反映しているとみられる。火星が地球に比べ揮発 性元素に富むのは,星雲ガスが消失する前に火星が形成していた[4,5]ためである可能性がある。

揮発性の高い元素の欠乏程度に基づくと、火星金属核のS含有量は4wt%程度と制約され、これ は既存の火星化学モデル (> 10 wt% S) [1] に比べ遥かに低い。火星の化学的・物理的(質量、密 度、内部モーメント)特性に整合的な天体内部構造モデルは、火星の金属核の密度が低いことを 示唆するため、Sに加えOとHも金属核中に含まれているとみられる。また、火星の金属核は天 体質量の24%を占め、その半径は1740 km であると見積もられる。火星中の放射性元素量から見 積もられる火星全球のUrey比 (0.81) は、地球全球の値 (0.43) [6] よりも高く、火星の原始熱の大 部分が既に失われたことを示唆する。火星と地球の化学組成を比較することで、ハビタブル惑星 の形成条件が制約されると期待できる。

- H. Wänke, G. Dreibus, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 349, 285 (1994).
- [2] W. F. McDonough, S.-s. Sun, *Chemical Geology* **120**, 223 (1995).
- [3] R. C. Paniello, J. M. D. Day, F. Moynier, Nature 490, 376 (2012).
- [4] N. Dauphas, A. Pourmand, *Nature* **473**, 489 (2011).
- [5] H. Wang, et al., Science **355**, 623 (2017).
- [6] C. Jaupart, S. Labrosse, F. Lucazeau, J.-C. Mareschal, Treatise on Geophysics (Second Edition), G. Schubert, ed. (Elsevier, Oxford, 2015), vol. 7, pp. 223 – 270.

高空隙ダストの引張強度と 原始惑星系円盤内での回転による破壊

○辰馬 未沙子^{1,2}、片岡 章雅²、田中 秀和³

1 東京大学理学系研究科天文学専攻、2 国立天文台、3 東北大学理学研究科天文学教室

近年、原始惑星系円盤でミリ波偏光放射が観測されている。そのうちのいくつかは、整列した 細長いダストの熱放射として解釈されており、この整列にはダストの回転運動が必要である。星 間空間においては、ダストが輻射圧によるトルクで回転運動し、その遠心力により破壊される可 能性が指摘されている (Hoang 2019, ApJ, 876, 13)。この過程では、回転運動による遠心力、すな わち引張応力がダストにはたらき、それがダスト自体の引張強度よりも大きくなると分裂する。

そこで我々は、ダスト集合体の引張強度を付着N体計算で求め、物性値や構成粒子半径を用い て定式化し、それを用いて円盤内でダストが回転により破壊されるかどうか調べた。その際、ダス トの回転運動の駆動源として、輻射圧と円盤ガスのラム圧によるトルクを考慮した。ダストの回 転運動は周囲のガスと馴染むことで減衰すると仮定し、平衡状態にある回転周期を求め(図1左)、 そのときの遠心力から引張応力を求めた。その結果、体積充填率が10⁻²以下である高空隙率のダ ストは、質量がおよそ10⁸ g以上であれば回転により破壊されることがわかった(図1右、灰色の 領域)。この時、支配的なトルク駆動源は円盤ガスのラム圧であった。ダスト集合体のサイズ成長 による密度進化(図1右、黒色の実線)を考慮すると、半径がおよそ40 m になると回転によって 破壊され、成長が止まることが示唆される。



図 1: 体積充填率が 10⁻³ のダスト集合体の様々な質量に対する各トルクによる回転周期 (左)と、 回転により破壊されるダストの質量と体積充填率 (右)。破壊が起こる領域を灰色で示した。軌道 長半径は 10 au、ダスト集合体の構成粒子は半径 0.1 µm の H₂O 氷と仮定した。(左) トルク源は 光子のスピン (点線)、光子の運動量 (一点鎖線)、ガス (破線) を考慮し、引張強度と等しくなる回 転周期を実線で示した。(右) ダストの圧縮なし付着成長、乱流なしガス圧縮、自己重力圧縮過程 (Kataoka et al. 2013, A&A, 557, L4) を実線で示した。

03

太陽系探査を目指した Orbitrap 型質量分析器の開発

川島 桜也¹, 笠原 慧¹, 齋藤 義文², 平原 聖文³, 横田 勝一郎⁴, 杉田 精司¹ 1. 東京大学, 2. JAXA/ISAS, 3. 名古屋大学, 4. 大阪大学

質量分析器は、これまでの惑星探査で顕著な成果を挙げている. この計測器は、 サンプル中に含まれる原子や分子をイオン化し、電磁場を用いてイオンの質量分離 をすることで、サンプルの化学組成やそこに含まれる原子・分子種を調べるものであ る. 本研究では、今後の探査に向け、小型・軽量かつ高分解能を有する質量分析器 の開発を目標としている. 私たちが開発に取り組んでいる質量分析器では、質量分 離部にイオントラップフーリエ変換型の Orbitrap を用いている. Orbitrap では、小型 電極が作るリフレクトロン電場を用いて異なる速度で運動するイオンを分離し、励起 電荷でイオン検出を行う. 地上で用いられている Orbitrap 型質量分析器は高分解能 であり、宇宙機としての応用が期待されているが、未だ飛翔体搭載実績は無い. そこ で私たちは、まずは数値シミュレーションによる性能評価を行い、飛翔体搭載可能な 小型形状(~ 10 cm×10 cm)で高質量分解能(m/Δm>10,000)を達成可能で あることを確認した. これは、従来の探査機搭載用として用いられた分析器では判別 できないような近接したピーク(例:H2¹⁷O⁺と HD¹⁶O⁺)の分離も可能な分解能である. この計算結果に基づき、現在はテストモデルを製作して実験室で性能評価を実施し ている. 今回の発表では主に、現在行なっているテストモデル実験について紹介する.

太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化

○荒川創太¹, 兵頭龍樹², 庄司大悟², 玄田英典² ¹東京工業大学 理学院 地球惑星科学系,²東京工業大学 地球生命研究所

太陽系小天体の形成時期及び形成機構の理解は、地球やその他の惑星がどのように誕生したの かを解明するための重要な鍵を握っている。海王星以遠の太陽系外縁天体のうち、直径 1,000 km 以上の天体は現在 6 つ発見されている(冥王星、エリス、ハウメア、マケマケ、2007 OR₁₀、 クワオアー)。そして、最近のハッブル宇宙望遠鏡による観測などから、全ての直径 1,000 km 以上の太陽系外縁天体が衛星を持つことが明らかになった(e.g., Parker et al. 2016, Kiss et al. 2017)。これらの衛星の質量は中心に存在する天体の約 10 分の 1 から 1,000 分の 1 と大きく

(cf. ガリレオ衛星の質量は木星質量の 3-8×10⁻⁵倍程度),また,衛星系の離心率は典型的に 0.1 以下と小さいことが知られている。さらに,太陽系外縁天体の衛星系に共通して上記の特徴 が見られることから,これらの衛星は同一のメカニズムによって形成されたと考えるのが自然で ある。しかし,その形成機構について具体的な説明は与えられていなかった。

そこで我々は、巨大衝突とその後の潮汐進化によってこれらの衛星系の特徴を再現できるので はないかと考え、巨大衝突と潮汐軌道進化の数値シミュレーションによってその仮説の妥当性を 示した(Arakawa et al. 2019, *Nature Astronomy*)。まず、1,000 km 程度の外縁天体の巨大 衝突によってどのような衛星が形成されるのか、SPH 法を用いた数値シミュレーションによっ て調べた(Genda et al. 2015 の計算コードを使用した)。その結果、脱出速度程度の低速衝突 で、かつ、衝突角度が約 45 度以上のかすり衝突の場合には巨大衝突後の分裂によって観測され るサイズの衛星が円盤を経由せずに直接形成されることを明らかにした。また、衛星が形成され るかどうかは衝突する天体の分化状態にはあまり依存しないことも示した。さらに、衝突角度や 衝突する 2 天体の質量比を変化させることで衛星系の質量比の分布も説明可能である。

次に我々は、巨大衝突によって形成された衛星系の潮汐による軌道進化を計算した。形成直後 の衛星系の離心率は0から1までほぼ一様に分布しており、現在の衛星系を説明するためには 潮汐進化によって離心率を減少させる必要がある。離心率の高次の項まで考慮し、衛星及び本体 の自転角速度の変化も考慮して潮汐進化を準解析的に計算した結果、衛星が潮汐進化の初期数万 年以上の期間溶融していた場合には離心率や自転・公転周期が観測をよく説明できる一方、衛星 形成直後から固化していた場合には衛星の離心率が低下せず、観測を説明できないことが明らか になった(Arakawa et al. 2019)。なお、現在我々は粘弾性モデルを用いた温度進化と軌道進 化のカップリング計算に取り組んでおり、本発表ではその結果も紹介する予定である。

以上の結果から我々は、太陽系の進化初期に1,000 km サイズの外縁天体が形成され、それら が溶融した状態で巨大衝突が発生し、衛星系が形成されたというシナリオを提示する。この仮説 は脱出速度程度の低速衝突によって衛星が形成されるという要請と整合的であり、また、海王星 以遠においても太陽系初期数百万年で100 km サイズ以上の微惑星が形成されたことを示唆する。

原始惑星によって駆動される3次元ガス流構造が ペブル降着に及ぼす影響

○桑原 歩¹, 黒川 宏之² ¹東京工業大学, ²地球生命研究所(ELSI)

近年、惑星形成理論において、km サイズの微惑星集積による惑星形成モデルに代わり、 mm-cm サイズの粒子(ペブル)降着による新たな惑星形成モデルが盛んに議論されている[e.g., 1,2]。ペブル降着モデルは、従来の微惑星集積モデルでは説明が困難な問題点を克服できる可能 性がある。また、太陽系内惑星のサイズ分布や系外惑星の多様性も説明することが出来ると期待 されている。ペブル降着モデルと微惑星集積モデルの大きな違いは、ペブルが惑星との重力相互 作用の他に、原始惑星系円盤ガスの抵抗を受けながら運動するという点にある。従って、ペブル 降着による惑星形成を考える際は、円盤ガスの影響を考慮することが極めて重要になる。これま でのペブル降着モデルの大半は、惑星重力による摂動を受けていないケプラーシアー流のもとで 議論されてきた。しかし、先行研究の3次元流体計算[e.g., 3]から、形成途中の惑星の周囲には、 惑星重力によって駆動される3次元的なガス流構造が存在することが明らかになった。この流れ 場は、ペブル降着に影響を及ぼす可能性がある[4,5]。近年のいくつかの先行研究[6,7,8]は、惑 星周囲の流れ場を考慮した粒子降着について考えているものの、ガス流れ場中におけるペブルの 降着効率は明らかになっていない。

本研究では、まず原始惑星周りの円盤ガス流の3次元非等温流体計算を行った。そして、流体 計算結果をもとに、惑星重力によって駆動されるガス流の影響を考慮して幅広い惑星質量・ペブ ルサイズに対するペブル軌道計算を行った。

軌道計算結果から、惑星重力によって駆動されるガス流中におけるペブルの軌道は、従来仮定 されていたシアー流中におけるペブルの軌道と大きく異なることが分かった。より小さなペブル は、ガスの影響をより受けやすくなるため、惑星重力によって摂動を受けた流れの構造が重要に なる。次に、軌道計算結果を元にして、ペブル降着効率の見積もりを行った。ペブル降着が 2次 元的に生じる場合(ペブルが円盤中心面に集中している場合)、惑星が駆動するガス流の影響によ り、従来仮定されていたシアー流中と比較して、サイズの小さなペブル降着効率が大きく減少し た。一方、ペブル降着が 3 次元的に生じる場合(ペブルが乱流によって巻き上げられている場合) は、ペブル降着効率はシアー流中のものとほぼ一致することが分かった。本研究結果から、ペブ ル降着は原始惑星系円盤内の固体物質のサイズ分布及び乱流構造に依存することが示唆される。

[1] Ormel, C. W. & Klahr, H. H., 2010, A&A, 520, A43 [2] Lambrechts, M. & Johansen, A., 2012, A&A, 544, A32 [3] Ormel, C. W., Kuiper, R., & Shi, J.-M., 2015, MNRAS, 446, 1026
[4] Kurokawa H. & Tanigawa T., 2018, MNRAS, 479, 635 [5] Kuwahara A., Kurokawa H., & Ida S., 2019, A&A, 623, A179 [6] Ormel, C. W. 2013, MNRAS, 428, 3526 [7] Popovas, A., Nordlund, Å., Ramsey, J. P., & Ormel, C. W. 2018, MNRAS, 479,5136 [8] Popovas, A., Nordlund, Å., & Ramsey, J. P. 2019, MNRAS, 482, L107

地球の揮発性元素組成の起源:

コア形成と天体衝突による大気散逸の影響

○櫻庭 遥¹, 黒川 宏之², 玄田 英典², 太田 健二¹ ¹東京工業大学 地球惑星科学系,²東京工具大学 地球生命研究所 (ELSI)

地球の揮発性元素組成の起源は, ハビタブル惑星の形成条件を探る上で非常に重要で ある。地球表層及びマントル (Bulk Silicate Earth, BSE)の揮発性元素組成はその供給源と考 えられるコンドライト隕石と比較して窒素・炭素・水素の順に欠乏した組成パターンを示す が, その原因は明らかになっていない[e.g., Bergin et al., 2015].地球にもたらされた揮発性元 素は,供給時期と地球内部及び表層環境に応じてコア・マントル・地殻・大気へそれぞれ分 配される.地球集積時のマグマオーシャンの内部では金属コアが分化し,表層では解放され た揮発性成分が大気を形成する.その際,親鉄性元素のコアへの取り込みや天体衝突による 大気剥ぎ取りによって BSE の揮発性元素組成が決定づけられたと考えられる.

我々は惑星集積をマグマオーシャン形成期と後期天体集積期に分け,各段階の表層・ 内部の各リザーバー間の元素分配と天体衝突による大気散逸の理論モデルを構築した[図 1]. マグマオーシャン形成期については金属鉄・シリケイトメルト・大気の3つのリザーバー間 の平衡分配を仮定し[e.g., Hirschmann, 2016],マグマオーシャン固化後の表層環境については 海洋と炭素循環の存在を仮定した地殻・海洋・大気間の元素分配を考慮した[Sakuraba et al., 2019]. 岩石微惑星集積による惑星形成を想定し,各層に分配される揮発性元素 (炭素,水素, 窒素)量を計算した.

計算の結果,全集積過程を考慮することで現在の地球揮発性元素組成の再現に成功した.マグマオーシャン形成期に最も親鉄性の高い炭素が優先的にコアへ分配されることで現在の BSE 中炭素量が得られた.一方後期天体集積期には,炭酸塩や海洋などのリザーバーに分配される炭素・水素と比べ,大気に分配される窒素が天体衝突によって優先的に剥ぎ取られることで最も枯渇している BSE の窒素存在量を再現できた.加えて講演では,巨大衝突を考慮した場合,結果にどのように影響するのかについても議論を行う.



図1:各集積期における元素分配モデル概念図 (a) マグマオーシャン形成期, (b) 後期天体集積期

土星衛星 Enceladus と Mimas における メタンハイドレートの形成と熱進化

〇西谷隆介¹,木村淳¹,谷篤史²,佐々木晶¹
¹大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻
²神戸大学大学院人間発達環境学研究科人間環境学専攻

土星の氷衛星である Enceladus は南極付近から吹き出す間欠泉など非常に活発な地質活動 が存在し、氷殻の下に液体層(内部海)を有することが知られている(Porco et al., 2006)。その一方で同じ土星衛星である Mimas は Enceladus と同程度の大きさであり、現在 の離心率から予測される潮汐加熱量が Enceladus より大きいにも関わらず、不活発であるこ とが知られている。こうした違いが何に起因するものかは未だわかっていないが、秤動観測 によると Mimas においても内部海が存在する可能性が示唆されている(Tajeddine et al., 2014)。そこで我々は、Enceladus と Mimas の両方が内部海を持ち、Mimas が Enceladus よ り不活発で硬い氷殻を持ちうるかを調べるために様々な初期内部構造と潮汐加熱量のもとで 1 次元熱進化計算を行った。ここで氷殻は純氷層とメタンハイドレート層の2層から成ると した。メタンハイドレートは氷よりも熱伝導率が低く、粘度が1桁ほど高いことが知られて いる。Enceladus の間欠泉からメタンは発見されており、内部海温度圧力のもとハイドレー トが存在しうることも分かっている(Bouquet et al., 2015)。

計算の結果,メタンハイドレート層が存在する場合,現在の軌道から予測される潮汐加熱 量では内部海を維持することができないが,5GW程度の潮汐加熱を仮定するとEnceladus, Mimas どちらにおいても内部海を現在まで維持することができる。この値は氷殻が氷のみで 形成されていた場合に比べ,半分以下の潮汐加熱量であり,軌道進化の研究から予測された 値と同程度である(Nakajima et al., 2019)。この時 Enceladus で維持される内部海厚さ は約 30km であり,観測によって予測される範囲(Iess et al., 2014)と整合的である。ま た,氷殻内部で熱対流に比べ熱伝導が優位な層をリソスフェアとして考えた場合,氷殻厚さ, およびリソスフェアの厚さは Mimas の方が Enceladus に比べ厚くなることがわかった。これ は Mimas の方が硬い表面を持ち地形の緩和が起きにくいことを示している。しかし,潮汐加 熱が 10GW を超え,大きくなりすぎた場合, Mimas ではほぼ全てのメタンハイドレートが溶 けてしまい, Enceladus よりもリソスフェアが薄くなってしまうこともわかった。

メタンハイドレートの存在は Enceladus, Mimas の熱進化史および内部海の有無を説明しう ることがわかった。潮汐加熱量の大きさはメタンハイドレート層の有無に影響し、メタンハ イドレート層の有無は氷殻の硬さに影響を与える。これら結果は Enceladus, Mimas を含む 土星衛星の進化に制約を与える可能性がある。

O8 恒星掩蔽観測によって明かされる太陽系外縁天体

○有松 亘¹, 津村 耕司², 臼井 文彦³, 新中 善晴⁴, 市川 幸平⁵, 大坪 貴文⁶, 小谷 隆行^{7,8},
 和田 武彦⁶, 長勢 晃一⁶, 渡部 潤一⁷

¹京都大学,²東京都市大学,³神戸大学,⁴京都産業大学,⁵東北大学,⁶ISAS/JAXA,⁷国立天文台, ⁸アストロバイオロジーセンター

本講演では半径1-10 km(以下キロメートルサイズ)のサイズを持つ太陽系外縁天体(trans-Neptunian objects; TNO)による恒星掩蔽イベントのモニタ観測を実施した、Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (OASES) プロジェクトの研究成果について 報告する。キロメートルサイズのTNOは暴走成長前の原始微惑星の特徴的なサイズを保持したサ イズ分布を持っている可能性があるほか、その一部は木星族彗星の供給源であると推定されてい る。よってキロメートルサイズのTNOのサイズ頻度分布を観測的に解明することは、太陽系の形 成進化プロセスの解明および彗星の起源を解明する上で重要である。しかしこうした天体は見か けの明るさが極めて暗く、直接検出は不可能であった。

我々の研究グループはキロメートルサイズのTNOによる恒星掩蔽イベントをモニタ観測すること で、サイズ頻度分布の観測的解明に挑戦した。発生頻度が極めて低い短時間変動現象である恒星 掩蔽イベントを検出するため、本研究では有効口径280 mmの既製品光学系の主焦点に民生品の CMOSビデオカメラを組み合わせた可視広視野動画観測システム計2台を開発し、沖縄県宮古島市 で掩蔽モニタ観測を実施した。15.4 Hzのフレームレートで取得されたおよそ2000の恒星に対す る約60時間の動画観測データから、カイパーベルト付近に位置する半径およそ1.3 kmの天体によ る恒星掩蔽イベント候補を一例発見することに成功した。今回の観測結果から推定されるカイパー ベルト付近での半径約1 km以上のTNOの個数密度はおよそ10⁶ deg⁻²であり、キロメートルサイ ズ領域での超過を特徴とする理論的なサイズ分布モデルを支持する値となった。本結果は原始太 陽系円盤の外側の氷微惑星が暴走成長前の段階でキロメートルサイズまで秩序成長し、現在でも カイパーベルト領域の主要なサイズ群になっていることを示唆している。さらに本研究で得られた 個数密度は、木星族彗星の供給源として必要とされるキロメートルサイズTNOの個数密度の下限 値と比較して十分に大きい値であることも判明した。

本講演ではOASESの観測によって得られたTNOの個数密度分布とNew Horizons探査機によっ て明らかになったCharon表面のクレーター頻度分布とを比較した結果についても提示するほか、 今後の恒星掩蔽観測の展望についても議論する。

【参考文献】

 K. Arimatsu et al., "Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (OASES): design and performance" Publ. Astron. Soc. Jpn 69, 68A (2017)

• K. Arimatsu et al., "A kilometre-sized Kuiper belt object discovered by stellar occultation using amateur telescopes" Nature Astronomy, 3, 301-306 (2019)

09

冥王星の窒素氷の昇華と凝結による 反射率分布の変化

〇松井弥志,木村淳 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

2015 年、探査機ニューホライズンズにより初めて冥王星の接近観測が行われ、冥王星表面には H₂O, N₂, CH₄, CO などの氷が共存することや、中緯度及び高緯度帯は明るく低緯度帯は暗いという強い明暗のコントラストが存在することが明らかになった。しかしながら、この明暗コントラストの起源については、いまだ明らかになっていない。

木星や土星の衛星における反射率の変化に着目した先行研究では、日射による H₂O 氷 の昇華が反射率変化に強く影響する可能性が示されている。さらに冥王星は、N₂を主成分 とする表面大気圧約 1Pa の大気を持つことから、大気からの凝結も含めた N₂の鉛直方向の 移動が反射率に影響すると考えられる。本研究では、冥王星表面の明暗分布の起源を探る ことを目的として、日射の変化に伴う N₂ 氷の昇華・凝結といった振る舞いと、表面の反射率 の変化との関係をモデル化し、数値シミュレーションによる定量的な考察を行った。

モデルでは、明るい N₂ 氷と暗い非氷物質が均一に混ざった状態で表層を構成し、それらの体積比に従った全球で一様な反射率を持つ表面状態を初期条件として仮定した。全球を南北それぞれ低、中、高緯度の計6つの緯度帯に分割し、公転軌道や自転周期、自転軸の歳差運動などを考慮した緯度帯ごとの日射角の時間変化と、仮定した熱慣性を用いて表面温度とその時間変化を計算する。その温度変化に伴って N₂ 氷は昇華する一方で、暗い非氷物質は表層に残存するとし、見積もった N₂ 氷の昇華量に従って反射率を再計算する。昇華した N₂ 氷は気体として大気に存在するとし、表面温度が凝固点を下回った場合は、大気から再凝結した氷が表面に沈着し反射率を上昇させる効果も考慮した。その上で、微小隕石衝突などによって混合されると考えられる深さまでに含まれる氷と非氷物質との体積比から表面の反射率を再計算し、時間発展を計算した。約6日という冥王星の自転周期における昼夜の温度差を考慮するために、時間刻みを12時間とし、数百万年にわたる反射率分布の時間変化を、複数の初期反射率と熱慣性の値を用いて調べた。

その結果、自転軸傾斜角が約120度と大きい冥王星では、季節や緯度ごとの日射量の 違いが大きく、N₂氷の昇華・凝結量が緯度や季節によって大きく変化することから、初期に 全球均一な反射率を持っていても現在の冥王星に見られる明暗の強いコントラストを持った 分布を説明できる可能性があることが分かった。また、用いる熱慣性や初期反射率の値に 従って、反射率分布の変化が大きく異なることから、現在の冥王星の反射率分布には、表層 の空隙率に強く依存する熱慣性や、氷と非氷物質の割合によって決まる初期反射率が大き く影響している可能性があることが分かった。本講演では、これらさまざまな初期状態や物理 量の仮定に従ったモデル計算の結果を示し、冥王星の反射率分布に与える影響の定量的 な考察を行う。 O10

モンゴル塩湖の凍結時における 氷への塩取り込みと太陽系氷天体への応用

〇依田優大^{1,2}、関根康人^{1,3}、福士圭介³、高橋嘉夫²、北島卓磨⁴、

Baasansuren Gankhurel⁴、Davaadorj Davaasuren⁵、庄司大悟¹

(1 東京工業大学 地球生命研究所,2 東京大学 地球惑星科学専攻,3 金沢大学 環日本海域 環境研究センター,4 金沢大学 自然科学研究科,5 モンゴル国立大学 地理学科)

太陽系に存在するエウロパ、エンセラダス、セレスといった氷天体には、氷地殻下に液体 の地下海が存在する(あるいは過去に存在した)。これらの氷天体の氷地殻は、形成・進化 過程で地下海水を取り込んできたと考えられる。地下海水に含まれる塩物質が氷地殻に取り 込まれると、そのレオロジーを変化させ、天体の内部・表層進化にも影響を与える可能性が ある。しかしながら、塩取り込みのメカニズムや量に対する定量的評価はなされていない。

本研究では、モンゴル中南部に存在する塩湖(Olgoy 湖、Orog 湖)への冬季のフィールド 調査を実施し、塩湖凍結時に氷に取り込まれた塩の組成と量の鉛直分布を調べた。これらの 塩湖は流出河川が無い閉鎖湖である。地球の海氷と異なり、これら湖は周囲を陸地で覆われ ているため、氷の形成・成長・体積膨張に伴い圧力増加を経験する。このような氷層内部で の圧力増加は、氷天体の冷却過程でも起きると考えられる。

調査ではこれらの塩湖の氷試料を表面から鉛直方向に数試料採取し、Orog 塩湖では氷下 の湖水も採取した。氷試料は凍結乾燥後、X 線回折(XRD)、X 線吸収微細構造分析(XAFS) により鉱物同定を行った。湖水は ICP 発光分光分析(ICP-OES) およびイオンクロマトグラ フィーにより組成分析を行った。

氷試料は、0.01~0.1wt%の塩化ナトリウム、硫酸ナトリウムを含み、表面から採取深度が 深くなるにつれてこれらの含有量は増加することがわかった。湖水はこれらの塩に不飽和で あることから、これらの塩は氷が成長するにしたがって、氷内に取り込まれた湖水に由来す ると考えられる。また、氷試料中のこれら塩の存在量から、氷内に取り込まれた湖水の体積 分率は5%程度と推定される。この体積分率は氷粒子形成時に粒間に水が捕獲される理論値 より数倍大きい。このことは閉鎖的な環境では氷粒子間に捕獲される以外にも、凍結時の体 積膨張で形成されるクラックに湖水が入り込むことで、効果的に湖水が氷中に捕獲されるこ とを示唆している。このような氷内クラックは、氷天体の地殻でも生じることが提案されて おり、氷地殻にも塩分を効果的に供給する可能性がある。

本発表では調査結果に基づき、氷内クラックを考慮した氷天体における塩物質の取り込み、 氷地殻のレオロジー変化、および氷天体の内部・表層の進化に与える影響について議論する。

エウロパ表面での塩化物酸化過程に関する実験 的・観測的研究

 ○丹秀也^{1,5}、関根康人¹、葛原昌幸^{2,3}、羽馬哲也⁴、高橋嘉夫⁵
 ¹東京工業大学地球生命研究所,²アストロバイオロジーセンター,³国立天文台,⁴北海道大学 低温科学研究所,⁵東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

木星の氷衛星エウロパの表面は、木星の磁場により加速された電子などの高エネルギー 粒子の放射にさらされている(e.g., Paranicas et al. 2009)。こうした高エネルギー粒子の照 射は、水氷の解離を引き起こし、水素が宇宙空間に散逸することで、塩化物(e.g., NaCl, MgCl₂)を始めとした表面物質を酸化すると考えられる。塩化物が酸化する場合、塩素酸塩 (e.g., NaClO₃, Mg(ClO₃)₂)や過塩素酸塩(e.g., NaClO₄, Mg(ClO₄)₂)が生成する可能性がある。 実際、塩化物酸化は火星表面でも紫外線により生じていることが示唆されており(Carrier and Kounaves, 2015)、表層物質進化の観点からも酸化的な塩類の生成は重要である。エウロ パ表層は地質的に活動的であり、こうした酸化的な塩は内部へ供給される。氷地殻に混入す る場合、氷の融点降下により氷地殻の粘性率が変化し、レオロジーや熱進化に影響する可能 性がある。さらに、内部海に流入する場合、酸化剤として生命利用可能な酸化還元非平衡を 作り出す可能性が考えられ、生命生存可能性の議論においても重要となる。

しかしながら、先行研究では塩化ナトリウムへの電子照射による可視スペクトル変化が 調べられているのみで、組成の変化については研究がなされていない(e.g., Hand et al., 2015)。一方で、実際のエウロパ表面に分布している塩類の組成、特に過塩素酸などの酸化 的な塩類については同定がなされていない。エウロパ表面の塩類について、近年では Keck, VLT などの大型地上望遠鏡による高波長分解能面分光観測がなされているが、この波長域は 1.5–1.8, 1.9–2.5 µm に限られる(e.g., Fischer et al., 2015)。これに対し塩素酸塩、過塩素酸塩 はより短い波長域にもピークをもつことで知られるため、塩類の同定にはより広い波長域で の分光観測データが必要となる。

そこで本研究ではエウロパ表面での塩化物酸化に対して、その反応を室内実験により制 約し、またその存在を地上望遠鏡観測により明らかにすることを目的とする。

本研究ではエウロパ表面環境を模擬した低温真空条件下での氷・塩化物の混合物への電子照射装置を構築した。金メッキ加工を施した銅基板上に、サンプルとして塩化ナトリウム、あるいは塩化マグネシウムと H₂O 氷の混合物薄膜(厚さ約 100 µm)を生成した。これを真空チャンバー内に約 10⁻⁶ Pa, 100–130 K の条件で設置し、電子銃により~5–10 keV のエネルギーの電子を~1.0 µA のフラックスで 10 時間程度照射した。照射後に取り出したサンプルについてイオンクロマトグラフ、XAFS 分析により組成の変化を調べた。

また、エウロパの表面について、すばる望遠鏡の近赤外分光撮像装置 IRCS を用いて観測 を実施した。本研究ではこれまでの地上観測でカバーされていなかった 0.95–1.0 μm の波長 域について、δλ = 0.0023 μm の高波長分解能で観測した。地質活動が活発で内部海由来の物 質が分布しているとされるカオス領域を中心に、補償光学を用いて 200–400 km/pixel の高空 間分解能で観測した。

本発表では室内実験と観測データの解析結果を報告する。特に、室内実験と観測の結果を比較し、エウロパ表面での酸化的な塩類の生成の有無とその役割を議論する。

粘土鉱物存在下での蒸発乾固を用いた核酸塩基と リボースからのヌクレオシド合成

○ 橋爪秀夫¹、ベニー テン²、シェリー ガースト³、藤井和子¹ ¹物質・材料研究機構、²ニュージーランド ランドケアリサーチ、³オランダ王立海洋研究所

[はじめに] 生命の起原研究において核酸やタンパク質の合成は重要である。特にリボ核酸 (RNA)に触媒作用を示すものが発見されて以来、RNA が核酸の遺伝情報やタンパク質の機能 を併せ持つことから、RNA の合成がさかんに行われるようになった。RNA は核酸塩基とリボ ース、リン酸より成り、核酸塩基とリボースの反応によりヌクレオシドが合成され、ヌクレ オシドとリン酸が反応し、ヌクレオチドが合成される。ヌクレオチドが高分子化し、RNA が 合成されたと考えられている。この仮説の問題点はリボースが水溶液中で5種類の異性体に なり、生物が使用しているβ-フラノース型のリボースの存在量が少なく、また核酸塩基と リボースが反応した場合にβ-フラノース型ヌクレオシドが殆ど合成されないという点であ る。そのため RNA 合成の再検討が必要になっている。我々は反応条件を工夫し、核酸塩基と リボースを 40 から 80℃の温度条件で、粘土鉱物の存在下で蒸発乾固を繰り返すことにより、 ヌクレオシドの合成を行った。

[実験] 核酸塩基のアデニン(A)10 mmol・dm⁻³とリボース(Rb)10mmol・dm⁻³溶液と粘土鉱物 のカオリナイト(Kn)とモンモリロナイト(Mt)や層間イオンを Mg²⁺に置換した Mg-Mt を用意し た。混合溶液 10cm³に粘土鉱物を 200mg 加え、40 から 80°Cのオーブンで乾燥させ、乾燥後 1cm³の超純水を加え、再び乾燥する操作を 20 回行った。処理後、試料に 10cm³の超純水を加 え、一晩放置し、有機物を抽出した。固液を分離後、抽出された有機物はLC-MS、1H NMR、 LC-MS/MS により分析し、 β -フラノース型アデノシンの合成を確認し、収率を求めた。 [結果] Kn が共存した場合、用いた温度領域で A と Rb から β -フラノース型アデノシンが 合成された。70、80°Cで最も収率が多く、約 13%であった。また Mg-Mt では 70°Cで、 β -フ ラノース型アデノシンの合成が確認され、収率は約 1.6%であった。Mt や粘土鉱物を加えな かった場合においても、70°Cで、 β -フラノース型アデノシンのピークは確認されたが、生 成量はごくわずかであった。比較のために密閉容器に混合溶液と粘土鉱物を加え、同様の温 度領域で、5~7 日間保持し、アデノシンの合成を行ったが、殆どの場合、アデノシンは合 成されなかった。現在、A と Rb、リン酸からのアデニル酸の合成やアデノシンとリン酸から のアデニル酸の合成を行っているので、それらについても報告する予定である。

大気球による成層圏微生物採取実験: Biopause プロジェクト

○大野宗祐¹、三宅範宗¹、石橋高¹、奥平修¹、河口優子¹、前田恵介¹、山田学¹、山岸明彦²、飯嶋一征³、梯友哉³、山田和彦³、福家英之³、吉田哲也³、高橋裕介⁴、野中聡³、瀬川高 弘⁵、松井孝典¹

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター、² 東京薬科大学、³ 宇宙航空研究開発機構、⁴ 北海道大学、⁵山梨大学

これまでの研究から、成層圏での微生物の存在が知られており、これが地球生物圏の上 端"biopause"に相当すると考えられる。ところが、先行研究では地上微生物の混入防止策 が不十分なものも多いほか、散発的な試料採取と培養法での分析しか行われておらず、成層 圏微生物の動態や全体像の把握には至っていない。

そこで我々は、成層圏微生物の全体像を把握することを目指し大気球による成層圏微生物 採取実験 Biopause プロジェクトを行っている。

本講演では、2019 年 7 月に北海道の JAXA 大樹航空宇宙実験場にて行った本プロジェクト の第 3 回目の気球実験の概要と、その後の初期分析の進行状況について報告する。

※本大気球実験は、JAXA 宇宙科学研究所が提供する大気球による飛翔機会を利用し、JAXA の協力のもとで行われました。また、本研究には自然科学研究機構、日本学術振興会科研費 の助成を頂きました。

Aguas Zarcas (CM2)隕石の有機物分析: Typical CM2 or not?

〇癸生川陽子¹, Michael E. Zolensky², 大東琢治³, 近藤正志¹,
 伊藤元雄⁴, 兒玉優⁵, 小林憲正¹

¹横浜国立大学,²NASA Johnson Space Center,³分子科学研究所, ⁴JAMSTEC 高知コア研究所,⁵マリン・ワーク・ジャパン

1 つ新しい CM コンドライトが落下した。本発表では, 2019 年 4 月 23 日にコスタリカに 落下した CM2 炭素質コンドライトである Aguas Zarcas 隕石の有機物分析について報告する。 隕石の有機物は、原始地球において生命の原材料となった可能性や太陽系始原物質の形成や 進化の理解において重要である。CM コンドライトの有機物分析など Murchison でさんざん 行われているのに、なぜあえて新しい隕石に飛びつくのか?もちろんフレッシュであること は重要だが(特に有機物分析の場合、汚染や劣化が最小限であることが重要である)それだ けではない。CM とひとくくりにしても、これらがどのくらいの規模のグループなのかは実 際のところよくわかっていない―1 つの母天体なのか、複数なのか、あるいは 1 つの母天体 の一部なのか?Aguas Zarcas 隕石はブレッチャであり、明らかに CM とはことなる組成のク ラストも見つかっている。このようなクラストは多様な隕石から見つかっているが、その中 には既存の隕石の分類に属さないユニークなものもある。そんな重箱の隅をつつくようなこ とをして何がうれしいのか?例えば、CM と CI では圧倒的に CM の方が多い。しかし、これ が本当に小惑星全体の構成を反映しているのかというとおそらく違う。同様に、クラストと して少量しか見つかっていないような物質が小惑星全体の中でマイナーな存在とは限らない。 さらに、より始原的で科学的価値の高いものが隠れていたりするかもしれない。特に有機物 を多く含むような天体は脆いため、大きな隕石としては回収されにくい場合もある。したが って(はやぶさを 100 機送り出さない限り) 我々は重箱の隅をつついておせち料理を再現す る試みをするしかない。

現時点ではまだプレリミナリーな分析結果しか得られていないが、Aguas Zarcas 隕石の バルクの赤外吸収スペクトルは Murchison などの CM コンドライトと同様であった。走査型 透過 X 線顕微鏡 (STXM) 分析によると、Murchison 隕石と比較して、ナノグロビュールのよ うな構造が比較的多く、有機物のマイクロメータースケールの不均質が多い傾向が見られた。 Aguas Zarcas 隕石からは CI や CR 的なクラストも見つかっており、これらの分析も行う予 定である。

熱変成作用を受けた CM コンドライト Jbilet Winselwan 隕石の加熱源について

O藤谷渉¹、東久人¹、山口亮²、木村眞²、菅原慎吾¹、橋爪光¹ ¹茨城大学理学部、²国立極地研究所

CM 炭素質コンドライトは水による変質作用(水質変質作用)の影響が顕著で、その程度 は様々である。また、CM コンドライトには水質変質作用を受けたあとに熱による変成作用 (熱変成作用)を受けたものが存在し、層状ケイ酸鉱物が脱水して無水ケイ酸塩鉱物が生成 するなどの変化が見られる。小惑星リュウグウの反射スペクトルは層状ケイ酸鉱物の存在を 示す 2.7 ミクロンの吸収がわずかしか検出されず、熱変成作用の影響を受けた CM コンドラ イトとの関連が示唆されている。このような CM コンドライトを加熱したエネルギー源はこ れまでに明らかになっておらず、CM コンドライト母天体の熱史および物質進化を理解する うえで重要である。

本研究では、熱変成作用を受けた CM コンドライトである Jbilet Winselwan 隕石を分析した。この隕石はコンドルール斑晶の変質の程度から、CM コンドライトの中では中程度(CM2.3)の水質変質作用を被っているといえる。しかし、層状ケイ酸鉱物の X 線回折ピークが見られないこと、金属鉄の化学組成が均質であること、含水鉱物である tochilinite が分解していることなどから、熱変成作用を受けている。

さらに、炭酸塩鉱物である calcite の周囲を硫酸塩鉱物である anhydrite が取り囲んでい る組織が普遍的に見られた。anhydrite は 300°C 以上で安定な鉱物であり、この隕石が加熱 されたことと調和的である。tochilinite は硫黄を含み、120°C 以下で安定な鉱物であるこ とから、anhydrite を構成する硫黄は加熱による tochilinite の分解によって供給された可 能性が高い。すなわち、calcite-anhydrite という組織は水質変質作用による calcite の析 出と加熱による anhydrite の析出が連続して起こったことを示唆している。

calcite は微量元素として Mn を含むため、⁵³Mn-⁵³Cr 年代測定法を適用したところ、4564.8 Ma という形成年代が得られた。これは熱変成作用を受けていない典型的な CM コンドライト の平均値(4562.7 Ma)よりも古い年代である。このことは、Jbilet Winselwan 隕石におけ る水質変質作用が典型的な CM コンドライトよりも早い時期に始まったことを示している。 したがって、Jbilet Winselwan 隕石は典型的な CM コンドライトと別の母天体に由来し、 Jbilet Winselwan 母天体のほうが早い時期に集積した可能性がある。その場合、Jbilet Winselwan 母天体では集積時の短寿命放射性核種²⁶Al の存在量が多くなるため、典型的な CM コンドライトよりも温度が上昇したのであろう。以上の結果は、Jbilet Winselwan 隕石は ²⁶Al の壊変エネルギーによって加熱されたことを示唆している。

非集積岩ユークライト中シリカ多形が示す熱変成履歴

〇大野 遼^{1,2}, 竹之内 惇志³, 三河内 岳^{1,2}, 山口 亮³ 「東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ²東京大学総合研究博物館,

³国立極地研究所

はじめに:ユークライトは小惑星ベスタの地殻で形成されたと考えられている玄武岩質エコンドライ トであり(Binzel and Xu, 1993)、主に集積岩・非集積岩の2つのサブグループに分けられる。非集積岩 ユークライトでは輝石の組織や化学組成に基づき熱変成度がタイプ1~6に分類されている(Takeda and Graham, 1991)。熱変成はベスタ地殻表層で起きたと考えられており、その熱源には衝撃や溶岩流、貫 入岩など様々な説が存在している。これらのほとんどの熱変成履歴は主要構成鉱物である輝石や斜長 石を用いた、600~1000°C程度の温度領域でしか議論されていない。熱変成が引き起こされる原因を 明らかにするためには、隕石が経験した最後の熱史まで詳細に議論する必要がある。そのため本研究 では、これまでに集積岩・非集積岩ユークライト中のシリカ鉱物に着目した研究を行ってきた。その 結果、シリカ鉱物の一つであるトリディマイトには晶系が異なる多形が存在し、その晶系の違いによ って400°C以下での冷却速度が異なることを明らかにすることができた。さらに、非集積岩ユークラ イトでは、熱変成度とシリカ鉱物の組み合わせに相関が見られることが明らかになってきた。本研究 では、これまで観察していなかったタイプ3に分類されているユークライト中に見つかったシリカ鉱 物を分析し、熱変成度とシリカ鉱物組み合わせから見られるユークライト層の熱変成履歴についての さらなる議論を試みた。

結果:試料はYamato (Y-) 790266非集積岩ユークライト薄片を用いた。Y-790266はポリミクト角礫 岩であるため、タイプ3に分類される岩片(計4つ)を中心に観察を行った。各岩片中には石英と直 方晶系トリディマイト、石英とクリストバライト、石英と単斜晶系トリディマイトといった多様なシ リカ鉱物組合せが観察された。

考察と結論:本研究で、Y-790266中のタイプ3に分類した岩片に単斜晶系トリディマイトを含むも のと直方晶系トリディマイトを含むものを発見した。これまでの研究によると、直方晶系トリディマ イトを持つユークライト隕石は、単斜晶系トリディマイトのみを持つ隕石よりも400°C以下でより速 く冷却されたことを示唆している (Ono et al., 2019)。このことから、Y-790266中の2つの岩片は少なく とも角礫化する前に400°C以下で冷却速度が異なっていた可能性が考えられる。本研究の結果とこれ までの研究をまとめると、熱変成度がタイプ3までのユークライトにはクリストバライトが存在し、 タイプ4までは直方晶系トリディマイトが見られ、タイプ3以上になると単斜晶系トリディマイトが存 在することが明らかとなった。単斜晶系トリディマイトは集積岩ユークライトに普遍的に存在するた め (Ono et al., 2019)、タイプ3以上の単斜晶系トリディマイトを含むユークライトに 書通的に存在するた のでか存在した深さ程度まで及んでいた可能性がある。熱変成が集積岩ユークライトを形成す る程度の深さまで影響を与えていたとすると、熱源は衝撃変成や溶岩流だけではなく、貫入岩や内部 熱など深部に存在するものによると考えられる。以上のように、輝石や斜長石に加えシリカ鉱物にも 着目することで、ユークライト隕石が経験した熱変成史に新たな制約を与えることができた。

O17

L5 コンドライト隕石に対する衝突実験

~X線CT撮像による隕石内部クラックの3次元分布

○道上達広(近大)、ハガーマン・アクセル(スターリング大)、土'山明(立命館大)、山口裕貴 (京大)、入江輝紀(名大)、野村啓太(神大)、佐々木理(東北大)、中村美千彦(東北大)、奥村 聡(東北大)、長谷川直(ISAS/JAXA)

今回の発表は、Planetary and Space Science に受理された論文の内容である(Michikami et al., in press, https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.07.005)。

直径 1km にも満たない小惑星イトカワにおいて、その表面は大小様々な岩塊、粒子を含む レゴリス層で覆われていることが分かった。しかしながら、イトカワのような微小重カ下で、 どのように小さな粒子が形成されるのか不明な点が多い。小さな粒子の形成メカニズムとし て、主に熱疲労と衝突破片の2つが考えられる。

Delbo et al. (2014)は、小惑星表面の粒子は、熱疲労で形成される可能性を示した。つまり、 小惑星の自転による昼夜の温度差が原因となって、表面物質の熱疲労をもたらし、表面物質 がさらに細かく壊れ、粒子の形成が進むとしている。さらに Molaro et al. (2015)は、熱疲労で は、斑晶や石基の熱膨張係数の違いで、コンドリュールなどの境界に沿ってクラックが成長 することを指摘している。

一方、衝突破片では、小惑星イトカワの母天体が衝突破壊を受け、飛び出した大小様々な 衝突破片が再集積し、イトカワが形成、その際に表面に小さな粒子も一緒に再集積したと考 えられる。その一つの証拠として、Tsuchiyama et al. (2011,2014)は、解析した直径 120µm 以下 のイトカワ粒子は単結晶、多結晶鉱物に関係なく、形状分布は玄武岩などの衝突破片と同じ であることを指摘している。さらに、Michikami et al. (2018)では、イトカワ模擬物質として L5 コンドライト隕石を用い、衝突実験を行った。その結果、それら直径 120µm 以下の衝突破片 粒子の形状分布は、イトカワ粒子の形状分布と等しいことが分かった。また、その形状分布 は岩石組織に依らないことから、衝突破片の場合、クラックはコンドリュールの境界に関係 なく成長する可能性を示唆している。

そこで本研究では、衝突によってクラックがコンドリュール内部をどのように成長するか 明らかにするために、イトカワ模擬物質のL5コンドライト隕石(1辺9mmの立方体)に対 して衝突実験(弾丸は直径1mmのアルミナ球、衝突速度2km/s)を行った。そして、X線CT 撮像を通じて、衝突前後の隕石中のクラックの進展(特にコンドリュール内部)を調査した。 その結果、クラックは、コンドリュール中を粒子境界に関係なく成長することが分かった。 イトカワ粒子は粒子境界を含まない破片の可能性が高いので、今回の実験結果は、小惑星イ トカワ粒子が衝突破片であることを示唆している。

地上観測・室内実験・6U 超小型探査機を用いた 月面衝突閃光の総合理解

Comprehensive Understanding of Lunar Impact Flash Phenomena using Ground-based Observations, Laboratory Experiments and 6U Cube-sat Exploration 〇阿部新助¹, 布施綾太¹, 柳澤正久², 小野寺圭祐³, 山田竜平⁴,

福原哲哉⁵, 長谷川直³, 矢野創³, 船瀬龍^{3,6}

○Abe,S.¹,Fuse,R.¹,Yanagisawa,M.²,Onodera,K.³,Yamada,R.⁴, Fukuhara,T.⁵, Hasegawa,S.³, Yano,H.³, Funase,R.^{3,6}
 ¹日本大学, ²電気通信大学, ³ISAS/JAXA, ⁴会津大学, ⁵立教大学, ⁶東京大学

太陽系を形成した固体物質は、合体集積と衝突破壊を繰り返して現在の惑星、衛星、小天 体(小惑星、彗星、流星体=メテオロイド、塵=ダスト)を生み出してきた。太陽系天体の直 径や質量の個数分布は、平衡状態に達した太陽系の衝突と集積の進化史を反映しているとい える。しかし、これらの小天体の観測手法は、地上望遠鏡によるリモート観測から探査機に よるその場計測、観測波長も可視光から赤外線、電波と多岐に渡っており、固体物質のサイ ズ分布を統計的・統一的に一つの線として繋ぐことはできていないのが現状である。本研究 の最終目標は、メテオロイド(meteoroid)と呼ばれる直径数 10 μm~数 10 cm の太陽系固体物 質のうち、これまで観測的に困難であった Small End と Large End の End-to-End のサイズ 分布を決定し、太陽系内におけるダスト(直径数10µm以下)と小惑星(直径数m以上)を 繋ぐダスト・メテオロイドのサイズ分布を明らかにすることである。Small-end は、大出力 大型レーダーと広視野光学望遠鏡を組み合わせた超高感度・高速観測システムを応用した 「微光流星の多波長同時観測」を用い(本講演会;大澤 et al.)、Large-end は、メテオロ イドが月面衝突する際に発生する短時間発光現象である「月面衝突閃光(Lunar Impact Flash、以下 LIF)」を用いて行う。また、メテオロイドの無大気天体衝突に伴う短時間発光 現象の物理過程の理解を深めることは、発光エネルギから導出され得る衝突体(メテオロイ ド)のサイズ決定にも重要な役割を果たす(本講演会;布施 et al.)。

cm~sub-mサイズのメテオロイドが月面夜側領域に衝突する際に発生する可視・近赤外波 長域での 1/10~1/100 秒程度の短時間発光現象が LIF である。広大な月面を利用した LIF 観 測を通して,地球-月(シスルナ)空間での衝突頻度とサイズ分布の統計的調査が可能である。 本講演では、(1)日大・船橋キャンパスに設置した 40cm/F3.8 望遠鏡(通称ガンダム)を用 いた「2018 年ふたご座流星群」に伴う 11 イベントの LIF 解析結果、(2) JAXA 超高速衝突施 設を用いた衝突閃光の高速度分光計測の初期成果、(3) 2020 年 NASA-SLS で打上げ予定の東 大/JAXA が開発中の 6U 超小型探査機 EAUULEUS (EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)に搭載される LIF 観測カメラ「DELPHINUS (DEtection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft)」のフライトモデルについて紹介し、本研究の応用にも言及する。

京都大学 MU レーダと東京大学木曽観測所 Tomo-e Gozen による微光流星同時観測

大澤 亮¹, 弘田 旭², 森田 晃平², 阿部 新助², Daniel Kastinen³, Johan Kero³, 藤原 康徳⁴, 中村 卓司⁵, 西村 耕司⁵, 酒向 重行², 渡部 潤一⁶

¹東京大学理学系研究科天文学教育研究センター,²日本大学理工学部航空宇宙工学科,³スウェーデン宇宙 物理研究所,⁴総合研究大学院大学,⁵国立極地研究所,⁶国立天文台天文情報センター

我々の住む地球は彗星や小惑星に依ってつくられた微細な粒子 (惑星間空間ダスト) によって取り 囲まれている. 惑星間空間ダストの性質を知ることで,ダストそのものを理解することはもとより, 太陽系小天体の組成に関する情報も得られる. 惑星間空間ダストの性質を調べる方法としては黄 道光の観測や宇宙機による直接観測などの手法がある.一方で質量が 1 µg 以上の惑星間空間ダス トは空間密度が低いため上記のような手法では非効率である. こうしたサイズの惑星間空間ダス トを研究するためには大面積の検出器が必要となる. 惑星間空間ダストが地球大気に突入すると, 運動エネルギーの一部が光のエネルギーとして放出されることで流星として観測される. 流星観 測とは,地球大気を巨大な検出器として使用する研究手法であり,地上にいながらにして惑星間空 間ダストを 1 粒づつ観測することができる極めてユニークな研究手段である.

一般に流星観測ではレーダによる観測が最も高感度であ, 1 mg よりも軽いダストによる流星 (微 光流星) は主に大出力レーダによって流星ヘッドエコーを捉えることで検出してきた. しかしな がら、レーダ観測による観測量 (レーダ反射断面積; RCS) だけからダストの質量を導くことは難 しく、可視光との同時観測によって観測量を較正することが求められてきた (e.g., Nishimura+, 2001; Brown+, 2017). 先行研究では主に可視光観測の検出限界によって制限されていた. より高 感度なカメラを用いることで研究対象をより暗い流星まで広げることができる.東京大学木曽観 測所では 1.05-m 木曽シュミット望遠鏡に搭載する次世代広視野カメラ"Tomo-e Gozen"を開発 してきた. Tomo-e Gozen は CMOS センサを搭載することで広視野・高感度・動画観測を実現し た初めての天文学用カメラであり、およそ 12 等級の流星まで検出可能である (Ohsawa+, 2019). 我々は Tomo-e Gozen と京都大学生存圏研究所 MU レーダを用いた可視・レーダ同時観測計画 を立ち上げ, キャンペーン観測を 2018 年 4 月 18-21 日に実施した. 可視・レーダともに一晩あ たり 1,000 件以上の流星を検出した. 流星を発生時刻, 移動方向, 天球上での位置から注意深く選 別した結果, 合計 894 件の流星が可視・レーダで共に検出されたと判定した. この内 294 件の流 星については可視・レーダでほぼ同時に捉えることができていた. 我々は今回の観測結果と 2009. 2010 年に実施した CCD カメラによる観測結果を合わせて, RCS と可視等級がほぼ線形の関係 で説明できることを示した.また、今回得られた変換則を 2009-2015 年に MU レーダで得られた 全流星に適用した. その結果, MU レーダによって検出可能な流星の可視光での明るさはおよそ 10 mag (~10⁻⁵ g の惑星間空間ダストに相当) であり, 流星 (散在流星) の等級分布 (光度関数) は 傾き $r = 2.80 \pm 0.02$ のべき関数でよく近似できることが分かった.

DESTINY⁺ミッションにおける 小惑星 3200 Phaethon のフライバイ撮像観測

○石橋 高¹, 洪 鵬¹, 石丸 貴博², 岡本 尚也², 佐藤 峻介², 鍵谷 将人³, 亀田 真吾⁴,
 荒井 朋子¹, 吉田 二美¹, 山田 学¹, 奥平 修¹, 岩田 隆浩², 岡田 達明², 高島 健²
 ¹千葉工業大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³東北大学, ⁴立教大学

現在,日本の深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUSt science) が提案されており,イプシロンロ ケットで打ち上げる小型探査機により,小惑星 3200 Phaethon(以下 Phaethon)のフライバイ探査を実 施予定である. DESTINY⁺の理学目的は,宇宙から地球へ飛来するダストの実態解明および地球飛 来ダストの特定供給源である流星群母天体の実態解明である. Phaethon は三大流星群の1 つであ るふたご座流星群の母天体として知られている地球近傍小天体で,ダスト(宇宙塵)を放出し,その ダストが地球に供給されている非常に興味深い天体であるが,地上からの光学観測では空間分解し て観測することができず,その実態はまだよくわかっていない. 特に, Phaethon のように岩石質の天 体からなぜ大規模な流星群を発生させるほどのダストが放出されている(された)のか,その放出機 構は不明である. 一般的に宇宙塵には有機物が含まれており,宇宙塵は生命の起源の鍵となる有 機物の,宇宙から地球への供給の重要な媒体であると考えられている. Phaethon はそのような宇宙 塵の供給源の1つであり, Phaethon を探査してその素性を明らかにすることにより,地球への物質供 給,特に有機物供給機構解明のための手掛かりを得ることができると期待されている.

本発表では、DESTINY⁺探査機に搭載される 2 台の理学観測カメラの検討状況を報告する. 望遠 カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon)は、高空間分解能のモノクロカメラで、Phaethon を追 尾しながら主に Phaethon 表層の高空間分解能撮像(≦10 m/pixel, 最接近時約 3.5 m/pixel)を幅広 い太陽位相角(0°~90°)において行い、特に Phaethon 上のダスト放出地形の検出を目指す. Phaethon と探査機のフライバイ相対速度は打ち上げ時期にもよるが 30~40 km/s と非常に高速であ り、追尾しながらぶれずに撮像する事が重要である. マルチバンドカメラ MCAP (Multiband CAmera for Phaethon)は、Phaethon 表層を多波長(400, 480, 550, 700*, 850, 950* nm, *はオプション)で撮像 して、表層の物質分布を観測する. これまでに両カメラについて行った概念検討や試作による評価 の結果を報告する.

ALMAを用いたタイタン大気アセトニトリル CH₃CNにおける窒素同位体比の初計測と,銀河宇 宙線由来大気化学過程への制約

○ 飯野孝浩¹ 佐川英夫² 塚越崇³

1東京大学情報基盤センター,2京都産業大学理学部,3国立天文台科学研究部

タイタン大気の主成分は窒素及びメタン CH₄ であり、太陽紫外線や高エネルギー粒子の流入に伴うこれら分子群の解離を起点とする、太陽系随一の複雑な大気化学過程が存在する. これまでシアン化水素 HCN やアセトニトリル CH₃CN,シアノアセチレン HC₃N といった複雑な窒素化合物群が検出されてきており、その¹⁴N/¹⁵N 窒素同位体比についても導出が進んでいる. その同位体比には分子間で大きな差が生じており、窒素分子とシアン化水素でそれぞれ 167±0.6 (Niemann et al. 2010), 60 – 70 (e.g. Marten et al. 2002) と 2 倍ほども異なっている. これはタイタン大気内において効果的な同位体分別過程が生じていることを示しており、その分別過程の理解には、窒素化合物群における窒素同位体比の観測的取得及び、理論計算による観測結果のモデリングが重要である.

我々は ALMA がキャリブレーション用に観測してきた膨大なタイタンのデータ群に着目し,その 中からアセトニトリルの¹⁵N 置換体を高い S/N で検出することに成功した. 観測日は 2015 年 4 月 29 日,観測周波数は 380 GHz であり, J=19-18 の回転遷移に伴って複数の輝線構造を取得でき た.ほぼ同時に¹⁴N を含むアセトニトリルの振動励起 (J=19-18, v8 = 1, 350.15 – 350.85 GHz) の観測も行われており,アセトニトリルの高度分布は高 S/N の本データを用いた大気中の放射伝 達計算の反転解析により導出した.¹⁵N 置換体の混合比はアセトニトリルの高度分布をスケーリ ングすることによって導出した. 今回導出した¹⁴N/¹⁵N 同位体比は ~112⁺¹²⁸ であり,化学反応 ネットワークシミュレーションにより予想された値 (70 - 200, Dobrijevic et al. 2018) と調和的で あるいっぽうで,シアン化水素やシアノアセチレン (67±14, Cordiner et al. 2018) と非調和的で あった.

金星大気の平均子午面循環

○ 高木 征弘¹, 杉本 憲 $\tilde{ e}^{ 2}$, 樫村 博基³, 安藤 紘基¹, 松田 佳久⁴

¹京都産業大学 理学部,²慶應義塾大学 日吉物理学教室, ³神戸大学 惑星科学研究センター,⁴東京学芸大学 自然科学系

1. はじめに

平均子午面循環は金星大気スーパーローテーションを生成・維持するもっとも重要なプロセスの ひとつであると考えられているが,従来の観測ではその構造や強度はまったく明らかになってい ない。また,大気大循環モデル (GCM)を用いた研究で得られている子午面循環の構造は,モデ ル間で大きく異なっている。本研究では金星における子午面循環の構造および形成メカニズムを 明らかにしたい。

2. モデル

本研究では金星 GCM である AFES-Venus を用いる。AFES-Venus は球面上のプリミティブ方程 式系に基づき,簡略化した金星用の物理過程を備えている。AFES-Venus は観測と整合的な大気 スーパーローテーションを再現することができ,これまでに,雲層における傾圧不安定波,極域 にみられるコールドカラー (周極低温域),太陽加熱によって励起される惑星規模の波である熱潮 汐波,金星探査機あかつきが発見した惑星規模の筋状構造など,いくつかの興味深い大気現象の 再現にも成功している。時間発展の初期値は理想化されたスーパーローテーション状態とし,初 期の温度場は風速に傾度風バランスするように与えた。以上の設定を用いて 10 地球年の数値積分 を実施し,ほぼ準定常状態にある最後の2地球年を解析した。

3. 結果

準定常状態において,観測と整合的な 130 m/s 程度のスーパーローテーションが維持されること を確認し,長期間 (234 地球日)時間平均したオイラー平均子午面循環と残差子午面循環を求めた。 オイラー平均子午面循環をみると,高度 60-70 km,緯度 0°-60°の領域には,低緯度側に直接循 環と高緯度側に間接循環が存在する。この間接循環は残差子午面循環にはみられないため,地球 大気のフェレル循環同様,傾圧不安定波によって作られているものと考えられる。雲層中 50-60 km には顕著な子午面循環が存在するが,その構造は従来の GCM で得られたものとは大きく異 なり,等温位面にほぼ平行に傾いている。この傾いた子午面循環は非定常性が強く,赤道に対し て非対称になる (つまり,赤道をまたぐ東西平均南北流を伴う)こともある。傾いた子午面循環 による運動量輸送と熱輸送は,短周期擾乱(主に傾圧不安定波)によるものに匹敵し,大気大循 環に対する強い影響が予想される。渦位 (PV)分布から,この傾いた子午面循環は対称不安定に よって作られている可能性が示唆された。高緯度には間接循環がみられるが,傾圧不安定波によ るものと考えられる。雲底付近の 40-50 km には赤道から極に延びる残差子午面循環がみられる が,その成因はいまのところ不明である。 大学規模の光太陽系地上観測所、その将来計画:東北大の場合 A Future plan of a university-scale ground-based observatory for solar system science: The case of Tohoku University

○笠羽康正¹, 坂野井健¹, 鍵谷将人¹,平原靖大², 栗田光樹夫³, 三澤浩昭¹, 熊本篤志¹,
 土屋史紀¹, 秋山正幸¹, 中川広務¹, 大友 綾¹, 佐藤 愼也¹, 小原隆弘¹, 岡野章一¹,
 J. Khun⁴, P. Zarka⁵
 ¹東北大²名古屋大³京都大⁴Univ. Hawaii ⁵Obs. de Paris

東北大は、小規模ながら長期継続した太陽系天体の地上観測能力を擁し、惑星ミ ッション群を支援してきた。現在、光赤外ではハワイ・ハレアカラ山頂 60cm 光 赤外・40cm 光学、電波では福島県飯舘 VHF 帯 30m(IPRT)の各望遠鏡を中核と する。

将来に向け、オフセット・グレゴリアン型のユニークな構造を持つ 1.8m PLANETS 光赤外鏡(国内では名大・京大、国外ではハワイ大他と共同)の建設 中、欧 LOFA(低周波電波干渉計)拡張としてパリ天文台が進める NenuFAR 計画 への参画検討中である。ご参加・ご支援を希望する。

Tohoku University has supported planetary missions with small-scale but longlasting capability of the ground-based observations dedicated to solar system. At present, our core telescopes are Vis-IR 60-cm and Vis 40-cm at Mt. Haleakala, Hawaii, and VHF-Radio 30-m (IPRT) at litate, Fukushima.

For future, we are running the construction of 1.8-m PLANETS Vis-IR telescope with a unique Offset-Gregorian type (with Nagoya/Kyoto Univ. in Japan and Univ. Hawaii et al. in overseas), and also investigating the participation to the NenuFAR project promoted by Obs. de Paris as the expansion of Euro LOFA (Low Frequency radio interferometer).

For the effort to expand the future observational capability toward Sun, planets, satellites, minor bodies, and exoplanets, we hope to get the participations and supports from the communities in Japan.

かぐや搭載スペクトルプロファイラ(SP)データから発見された

水氷吸収プロファイルの解析

Analysis of KAGUYA Spectral Profiler Data Suggesting the Presence of Water Ice

^〇小野寺圭祐¹,田中智²,大竹真紀子²,經田原弘³,仲内悠祐²,長岡央² 1.総合研究大学院大学/宇宙科学研究所,2.宇宙航空研究開発機構,3.東京大(現:リクルート)

1. SOKENDAI/ISAS, 2. JAXA, 3. Univ. Tokyo (currently Recruit co., ltd.)

近年,月極域における水や揮発性元素の存在可能性が 示唆されており,極域探査の計画も鋭意検討されている. 本年5月に開催された日本地球惑星科学連合大会におい て,かぐや搭載SPの極域データを調査した結果,水氷特 有の吸収を見出したことを報告した.本研究では水氷とし て検出されたデータを詳細に調査分析した結果を報告す る.

かぐや搭載SPは可視-近赤外領域のスペクトロメータで あり、高度100kmにおいて562×400mの空間分解能,520 -2600nmの範囲で296バンドの波長分解能を有している. 特に1300-1600nmの波長領域で1000以上のS/Nを有し ており,水氷の強い吸収がこの波長付近に吸収ピークが 存在していることも水氷検知に有利な点である.

我々は両極の緯度 80 度以上に存在する約 1000 万のデ ータから一次反射データや不良データなどを, 経験的な ロジックも適用することにより,約 39000 データを選別した. これをデータベースとして波形形状や吸収の有無などの 調査を行った.その結果,水氷の吸収が存在する約 6000 データを抽出することに成功した.これらのデータは極域 の広範な領域に見られ,月面の永久影(PSR)との相関性 も小さいことがわかった.

これらのデータの内,特に吸収強度の高いデータが 2009/4/19-21の南極域(Nobile, Shoemaker crater付近) に集中的に観測された.これらの観測プロファイル個々に 分析した結果,水氷に加え,water gas,およびsolid Methaneの吸収と同定される吸収ピークが存在することが わかった. 他の場所や期間に得られた観測データについ ても、これら3つのフェーズの混合プロファイルとして説明 できる. なお、これら以外にも存在可能性が考えられる揮 発性元素、例えばCH₃OH、SO₂、NH₃などについては水氷 吸収と重なるか、S/Nの悪いNIR2領域(1600nm以上)に 吸収が卓越しているために存在を確認することができな かった.

今回発見された水氷などの吸収が見られるデータは限 られた期間に見出されたものである.別の期間に同一の 地域のデータを調査しても同様のデータを見出すことはで きず,一時的に見られる現象であった.さらに,これらの 吸収が見られるデータの観測位置および太陽光入射角 度条件から、1次光もしくは2次光反射の可能性が低いこ とがわかった. つまり, この時に得られたスペクトルデータ は地表からの反射光ではなく、何らかの浮遊物の反射ス ペクトルを観測したことを示唆している. 最近, 米国の LADEE探査機に搭載された質量分析装置の観測におい てMeteoroid impacts起源で飛散したダストから水が検出 された報告がされたが(Benna et al., 2019), これと同様に 浮遊した物質を観測した可能性が考えられる. 大規模な ダスト浮遊の原因としては、この他にもレビテーション現 象なども考えらえる. ダスト浮遊の原因については今後さ らに検討を必要とするが、今回の結果は月極域において、 水や揮発性元素が広範囲に存在していることを示唆する. Reference)

Benna et al., Lunar soil hidration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts, Nature geosci. 12,333-338, 2019

月極域探査:ミッション概要と検討状況

Current Status of the Planned Lunar Polar Exploration Mission

〇星野健,大竹真紀子,唐牛譲,白石浩章(JAXA/国際宇宙探査センター)

近年行われた複数の月探査機によるデータの解析から,月極域(約85度以 南,以北の領域)の表層ないしは地下数十 cm から 1m 程度の深さには水(H₂0 や 水酸基を含む広義の意味での水)が存在する可能性が報告されている.ただし, 例えば中性子観測のように水の観測ではなく水素の観測であるなど,水の存在 自体,H₂0 なのか水酸基の形で存在するのか,存在形態(氷の層・塊なのか,霜 の状態なのか),存在量など不明なことが多い.実際に水氷が存在するならば, それは科学的に水の供給源や過程を知る上で重要であるのみならず,水を電気 分解してロケットの燃料として使うなど,資源としての利用価値も高い.そのよ うな資源的な観点で,近年,米国,ロシア,中国,インドなど複数の国において 月極域や高緯度地域で水や揮発性成分の探査を行う検討が進められている.

日本国内でも JAXA では国際宇宙探査の枠組みで、インド宇宙研究機関との 共同で月極域において水氷が本当に存在するのか、またそれが資源として利用 可能な量・質であるのかを評価するための探査を 2020 年代前半に行う検討を実 施している.この探査機は着陸機とローバより構成され、日本側はローバの開発 を担うことを想定する.本探査では月極域に着陸して数ヶ月の間ローバで移動 しながら観測を行うとともに、複数箇所において地下 1.5m までレゴリスを掘削 して試料をローバ搭載の観測機器に運び、月面その場観測を行うことを目指す. これにより水氷の有無、存在量、存在形態、純度、水氷の濃集機構について調査 する.

検討状況として昨年11月に「月極域探査のための観測機器の検討提案および搭載希望調」の公募を行い、8件の観測機器の検討提案を選定して各チームによる搭載課題の解決に向けた研究・検討を実施した.また今年7月にはJAXAの ミッション定義審査を行った.発表では、国際的な検討背景、本探査の目的と概 要、昨年の発表からの検討の進捗状況や今後の観測機器選定等マイルストーン について紹介する.

月極域及び、低緯度領域における表層温度シミュレーション

二書 由美子¹、山本 光生²、田中 智²、滝田 準³
 「会津大学宇宙情報科学研究センター、
 2宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、³北海道北見北斗高等学校

天体表層の温度変化を知ることは、表層を覆う物質の物理的状態を知る手がかりとなる。近年、月では水氷の存在が話題となっているが、水が氷として地層にとどまるためには、少なくとも110 K以下でなければならず、水氷の空間分布の推定にも、表層温度を知ることは役立つだろう。また、月面探査の観点でも、機器の設計等で必要となる。

月表面の温度は、Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)に搭載されたDiviner Lunar Radiometer Experiment (DLRE)が観測している。しかし、月が1自転する間に同一地点で観測される回数は少 なく(低緯度では数回、極付近でも数十回)、日変化を知るには不十分である。これは、LROは 1周回した後、衛星直下点の経度は約1度変化するが、DLREの視野範囲はそれよりも狭く、連続 した周回で同一地点を観測できる領域は限られるためである。そのため、月表層の温度の時間変 化を連続して知るためには、数値実験を行う必要がある。

そこで本研究では、月表層の温度変化を明らかにすることを目的とし、まず小惑星の表層温度 シミュレーションプログラム(Takita et al., 2017)を月へ適用できるように改変を行った。次に、 改変したプログラムを使って、月が1自転する間のシミュレーションを行った。研究地域は、極 域と低緯度帯の2地点である。またシミュレーション結果と、DLREによる実観測データとの比較 を行い、再現性を確かめた。この時、極域では、観測日時がわかる温度データをマップ化したも のが、公開されていないため、DLREの低次プロダクトであるReduced Data Recordをマップ化する ツール(JAXA Diviner Mapping Tool; Daket et al., 2019)を使って独自に作成した温度マップを使用 した。

下図に極域でのシミュレーション結果と実観測データの比較を示す。1 自転する間の同一地点 における観測数が少ないため、観測データは、3カ月間(月の約3日間)分のデータを統合し比 較を行った。その結果、周囲の地形が平坦な場所(地点A)ではよく一致し、周囲の地形が凹凸に 富み複雑な場所(地点B)ではあまり一致しなかった。A地点でも、一部合っていないが、これ は、シミュレーション内で太陽を点光源として扱っていることが原因だと考えられる。極域では 太陽高度が低いために、太陽の一部が遠くの地形で隠れることがあるが、この効果を考慮できて いないのである。太陽を点ではなく、面として扱うことが次の課題である。また、B地点のような 複雑な地形を持つ場所での違いは、太陽を点光源として扱っていることだけでは説明がつかな い。より詳細な地形データを使ったシミュレーションが必要であると考えられる。



Reference

Takita, et al. (2017) *Space Sci. Rev.*, 208, 287—315, <u>https://doi.org/10.1007/s11214-017-0336-x</u>. Daket et al. (2019) *Lunar Planet. Sci. Conf.* 50th, #2286
着氷模擬月土壌の近赤外スペクトル観測

O荻島 葵、佐伯 和人¹
 ¹大阪大学大学院理学研究科

近年、月の極域において水氷の存在を示唆する報告がいくつも上がっているが、水の形態や 量に関しては議論が続いている。2017年12月に宇宙航空研究開発機構(JAXA)とインド宇宙 研究機関(ISRO)によって月極域での水資源探査計画の検討が始まった。この極域探査におい て、我々は近赤外画像分光によるその場観測を提案しており、月面または掘削した穴の側面 の近赤外スペクトルから水の含有量を推定することを目指している。本研究ではこの探査に 向けて、極低温で鉱物表面に霜として水が付着している状態を想定した、実験室での月模擬 土壌への着氷実験と近赤外分光観測を行なった。模擬土壌試料として、主要な月鉱物である かんらん石 (San Carlos 産、Fo90) と、月の高地に多く存在する斜長石 (Casas Grandes 産、 bytownite)を用いた。試料は砕いてからふるいによって粒径を125-250umに揃えた。着氷に は、自作の着氷実験装置を用いた。この装置では窒素環境の中で液体窒素により冷やされた 試料が、湿潤空気で満たされた筒の中を約 2m 垂直に落下し、液体窒素が入ったボックスへ と回収される。試料の取り出しは、窒素充填した自作のグローブボックス内で行なった。回 収した試料を液体窒素からすくい出し、自作のスルースボックスで混入した氷のみの粒を取 り除いた後、スペクトル観測用のクーリングステージに入れてスペクトルを観測した(波長 範囲 950-1600nm)。このとき、試料の一部を顕微鏡観測用のケースに入れて、着氷状態を顕 微鏡で観測した。スペクトル観測の後再びグローブボックス内でクーリングステージから試 料を取り出し、一部をすくい取って電子はかりで質量を計測した。その後ヒーターで試料を 加熱して霜を蒸発させ、再び質量を計測することで、加熱前後で減少した分の質量を霜の質 量として求めた。この計測値から着氷量を質量分率で計算した。落下により着氷したかんら ん石、斜長石のスペクトルは、どちらも鉱物単体のスペクトルと比べて 1500nm 付近に吸収 が見られた。この吸収の深さと着氷量の関係を求めると、吸収深さ(=検出のしやすさ)はか んらん石より斜長石に着氷している場合の方が大きいということが示唆された。





↑ 図 2. 斜長石に付着した微小氷((a)蒸発前,(b)蒸発後)
 ←図 1. 付着していた氷の質量と 1500nm の吸収深さの関係

月リモートセンシングのための人工火成岩の合成と分光観測

○荒木亮太郎¹ 佐伯和人¹ 小木曽哲²
 ¹大阪大学 理学研究科 ²京都大学 人間・環境学研究科

月惑星探査における分光観測は地表面の鉱物 を同定する有力な手法である.その際,現在は主に Hupke(1981)などで確立されている粉体光散乱 モデルが利用される.一方レゴリスではなく岩石 を対象とした分光では,このモデルとはやや違っ た挙動を示すことが経験的に知られている.しか し岩石を対象とした光散乱モデルは未だ構築さ れておらず,粉体光散乱モデルを近似的に利用し ているにすぎない.今後の月着陸探査等における 岩石観測を見据え,岩石組織を対象とした光散乱 モデルを構築する必要がある.本研究ではその第 一段階として,ピストンシリンダーを用いた焼結 による人工かんらん岩の合成と,そのスペクトル 分光観測を行った.

出発物質となるかんらん石は San Carlos 産 (Fo~90)のものを使用した.これを粉砕し,ふる いを用いて粒径の異なる3種類のかんらん石粉 末に分けた.粒径はそれぞれ25~45 μ m,75~125 μ m,180~250 μ m である.この粉末を京都大学 のピストンシリンダー型高圧発生装置 PG-100 を用いて1GPa,1500°Cの条件で1時間加熱圧縮 し,直径5mm,高さ9mmの円筒形状の人工かん らん岩試料を作成した.

試料の一部を薄片化して観察し,粒子の近似楕 円体の長径および短径のヒストグラムを作成し た(図 1) .25~45 μ mの試料は焼結によって粒 径が大型化したものが多くみられた.一方で粒径 の大きい 75~125 μ m および 180~250 μ m の 試料は初期圧縮過程で破砕されており,深成岩組 織とは違い石基のような 20 µ m 以下の細粒部が 新たに形成されたことが分かった(図 2).

また波長 900nm~1600nm を観測できる赤外 線分光計を用いてそれぞれ 3 種類の粒径のかん らん石粉末および人工岩石を分光観測した.その 結果,かんらん石の 1 µ m 付近の吸収ピークで大 きく減衰することが確認された.



図 1. 作成した人工かんらん岩中結晶の長径と短径の分布 (横軸の違いに注意)





SLIMマルチバンドカメラ

エンジニアリングモデルによる観測性能確認

〇佐伯和人¹、本田親寿²、大竹真紀子³、仲内悠祐³、白石浩章³、佐藤広幸³、 石原吉明⁴、前田孝雄⁵

¹大阪大学、²会津大学、³宇宙航空研究開発機構、⁴国立環境研、⁵中央大学

小型月着陸実証機(SLIM)計画が2021年度打ち上げを目指してJAXAにより計画されてい る。SLIMは重力天体への軟着陸に関する様々な技術を実証するための着陸機である。鍵と なる技術は精密航法制御アルゴリズム、画像認識航法、衝撃吸収脚などである。SLIM計画 を実行することにより、天体着陸技術に関して「降りやすいところに降りる」着陸から、 「降りたいところに降りる」着陸へのパラダイムシフトが起こると期待される。SLIMで実 証する重力天体へのピンポイント着陸技術を活かす観測機器として、我々はマルチバンドカ メラ(MBC)を開発している。MBCは小型の可視・近赤外力メラで、InGaAsのイメージングセ ンサーと、10バンドのバンドパスフィルターを持つホイール、そして、パンやチルトをす るための可動ミラーからなる。MBCの科学目的は、着陸機周辺の岩石の岩石種や造岩鉱物の 同定である。特に、着陸地点に存在すると期待されるマントル由来カンラン石のMg 値、 Mg#(=Mg/(Mg+Fe) atomic ratio)の推定を大きな目的としている。

現在、MBC はエンジニアリングモデル(EM)が稼働状態となり、各種性能試験が始まって いる。これまでは主として各部品のカタログ値等を基にして総合性能の推定がなされてきた が、現在は EM で実測した値を使っての性能評価に移行している過程にある。今回は、バン ドパスフィルターの透過率、量子化効率(間接的に推定)、ノイズ蓄積速度などの測光系の パラメーターに関して EM を使った実測値を用いて推定精度を上げて、カンラン石の Mg 値の 推定精度について確認する。



図:MBC エンジニアリングモデルの試験データ例:バンドパスフィルター透過率実測値。1750 nm 以上の波長領 域に透過があるが、撮像素子の量子化効率がほぼ0の領域なので、総合性能には影響しない。

月の縦孔下の溶岩チューブの形状確認による 溶岩物性値の同定

O本多力¹,春山純一² ¹NP0 法人火山洞窟学会,²JAXA 宇宙科学研究所

[はじめに]

伊豆大島三原山の 1951 年噴出の溶岩流で形成された溶岩チューブ洞窟である三原山ホル ニトケイブでは、チューブ形状、溶岩流温度、粘性係数、降伏値、表面張力が明確にされた唯一 の貴重な例である(水上 1951、横山他 1970)。一方、宇宙では、月の溶岩地帯に縦孔が発見され その縦孔下に溶岩チューブ洞窟が存在していることが想定されている(Haruyama 他 2009, 2010, 2012, Kaku 他 2017)。地球の伊豆大島三原山の調査例(本多, 2006 地球惑星)に基づき、 月での縦孔下の空洞形状と内部構造から溶岩チューブであることを確認し、さらに溶岩降伏 値と表面張力を求め溶岩チューブ形成時の溶岩温度を同定する可能性について紹介する。

[伊豆大島溶岩チューブから得られる知見]

三原山ホルニトケイブについては、内部観察により水平断面と縦断面の測量図の作成が行われた(立原他,2005)。この溶岩チューブ洞窟の空洞高さHとその傾斜率 α から、傾斜した円管内を流れるビンガム流体の流動限界条件により、溶岩降伏値 f_Bは f_B=H($\rho g \sin \alpha$)/4 から推定される溶岩降伏値 5000Pa が、内壁表面の溶岩鍾乳のピッチから天井からたれ下がる溶岩鍾乳の凹凸のピッチPにより溶岩の表面張力 $\gamma = P^2 g \rho / 4\pi^2$ を得ることが出来た(本多,2006 地球惑星)。計測されたピッチはおおよそ P=3~4cm であり、その時の表面張力は 600~1000mN/m が得られている。伊豆大島溶岩の表面張力は横山ら(1970)によって実験室で計測されており、その外挿値の範囲内にある。噴火時の降伏値は粘性係数とともに温度の関数として計測されている(1125℃で 4300Pa, Hulme1974)

[月への適用と将来探査]

月の縦孔の露頭断面には、停止した溶岩流厚さ、溶岩チューブ洞窟高さ、溶岩チューブ洞窟 内部には溶岩鍾乳ピッチ、等の痕跡が残されていると考えられるので、その痕跡を利用して溶 岩流物性値とチューブ形成時の温度の同定が可能と考えられる。マリウス丘のリル-A に存 在する Marius Hills Hole については、露頭の溶岩層平均厚 6m,チューブを想定した空洞高 さ 17m (Robinson, 2012)と推定傾斜率から降伏値 131Pa と推定している(本多, 2017 地球惑 星)。さらに降伏値や表面張力の温度依存データが取得されればリル-A を流れた溶岩の温度 の推定も可能である(本多, 2019 地球惑星)。

[おわりに]

溶岩チューブの内部形状が明らかにできれば、過去に噴火した地球上および月の溶岩流の 溶岩チューブ洞窟の存在の確認とその高さから求めた降伏値と内部の溶岩鍾乳のピッチから 求めた表面張力から溶岩の温度を同定し、さらにその温度から溶岩の流れたときの粘性係数 を同定できる可能性がある。月縦孔での試料採取がすぐには出来ない段階では、溶岩組成情 報に基づいた計算による温度変化の物性データを得て、評価するか、あるいは合成試料を作成 して温度変化を実測することが考えられる。

月火星の縦孔地下空洞直接探査(UZUME)計画の 科学と探査構想

Science and Mission Concept of Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME)

〇春山純一¹,岩田隆浩¹,山本幸生¹,西堀俊幸¹,大槻真嗣¹,河野功¹,桜井誠人¹, 石上玄也²,月火星の縦孔地下空洞直接探査リサーチグループ

1宇宙航空研究開発機構,2慶應義塾大学

2009年に月に、溶岩チューブのような火成活動起源の地下空洞に開いたと考えられる 深さ直径共に数10mに及ぶ縦孔が、SELENE(かぐや)の地形カメラの取得したデータに見 つかった。同様の縦孔は火星でもたくさん見つかっている。

こうした中、JAXA 宇宙科学研究所の理学委員会の下、月火星の縦孔地下空洞直接探査リ サーチグループ(RG)が2016年に設立され、理工学研究者40名以上により活動を行ってき た。また、このRGメンバー他、アウトリーチなどを検討するメンバーも含めて、UZUME 計画の名の下に、幅広く探査を検討している。

これまでの活動で、月火星科学(探査)の目指すものを、コミュニティの議論、国内外学 会での発表内容の動向から、①月惑星への揮発性物質供給、②天体衝突史(or クレータ年 代学再考)、③内部進化(火成活動、マントル物質確認)、④地球外生命、もしくは生命前 駆体の発見の4点に整理されると結論し、これらが学術コミュニティの動向、目指すところ に対して、月火星の地下空洞探査で期待に応えること、すなわち探査による科学的リターン が大きいことを確認し詳細を詰めた。この成果を踏まえ、関連最新科学成果の収集、グルー プメンバー自らの関連解析成果を積み上げつつ、探査におけるサイエンス重点項目の整理、 更に、国内外のミッションへの共同参画議論を行ってきた。今後、L. Kerber 博士(JPL) をPIとする、米国ディスカバリプログラムに提案されている、月の静の海の縦孔(地下空 洞に開いた天窓)へのローバー接近・降下観察ミッション「Moon Diver」 計画への、小型 プローブ提供による「国際共同」探査相乗りや、自らの着陸機・移動体・小型プローブを主 とするミッションを企画する「公募型小型」探査(打ち上げは、イプシロン(増強型)、あ るいは H2A 相乗りを念頭に置く)の検討を開始している。

探査機はやぶさ2のリュウグウ近傍探査の総括

 ○渡邊誠一郎^{1,2},吉川真²,田中智²,杉田精司³,竝木則行⁴,岡田達明²,北里宏平⁵, 橘省吾^{3,2},荒川政彦⁶,池田人⁷,石黒正晃⁸,はやぶさ2サイエンスチーム⁹
 ¹名古屋大学,²JAXA 宇宙科学研究所,³東京大学,⁴国立天文台,⁵会津大学,⁶神戸大学,
 ⁷JAXA 研究開発部門,⁸ソウル大学,⁹はやぶさ2プロジェクト

探査機はやぶさ2は、2018年6月から14ヶ月、C型小惑星リュウグウの近傍に滞在し、 搭載機器(光学カメラ ONC,熱赤外カメラ TIR,近赤外分光計 NIRS3,レーザ高度計 LIDAR)による観測、重力計測運用、ローバ MINERVAII-1とランダ MASCOT による表面探査、 サンプラによる2回の表層試料採取、衝突装置 SCI による人エクレーター生成と分離カメラ DCAM3 による放出物カーテンの撮像などを順調に行ってきた。特に 2019年4月には8°N、 301°E付近に SCI により直径10mを超える人エクレーターを生成することに成功し、さら に7月にはこのクレーターから二十数m離れた CO1-C領域に2回目のピンポイントタッチダ ウンを行い、SCI 衝突で掘削された地下物質を含む可能性の高い表層物質の採取を行った。 サンプル帰還後の分析により、タッチダウンの1回目と2回目で採取された表面物質を相互 に比較できれば、地下由来の物質の同定が可能になり、ラブルパイル小惑星表層での衝突・ 流動・混合過程、宇宙風化過程などに制約を与えられるものと期待される。

リュウグウは、周期 7.63 時間という比較的遅い逆行自転をしているが、典型的なこま形 状を示し、直径約 500 mのほぼ円形の赤道リッジを持つ.重力計測の結果から、バルク密度 は 1.19 g cm⁻³と小さく、60%程度の平均空隙率をもつと推定される[1].表面には大きいが 空隙率の高い岩塊が散在し、形状中心と重心のずれも小さいことは、リュウグウがラブルパ イル天体で伸張強度が弱いことを示唆する[1].SCI クレーターの直径にリュウグウ表層の 強度による影響が見られないことも、強度が小さいことを支持する[2].

表面スペクトルは可視・近赤外ともに、反射率が低く、波長に対する勾配はほぼ平坦である[3]. 全球で 2.72 µm 付近に弱い吸収が見られ、水 (MgOH)の存在が示唆される[4]. 空間的には均質に近いが、緯度方向や東西半球で違いも見られ、進化史と関係する可能性がある. こま型形成はリュウグウ形成時もしくは以後の高速自転時の 2 つの可能性がある.後者ではこま型形成時に既存のクレーターが消去された可能性が高く、SCI 実験に基づくリュウグウのクレーター年代学の精密化が形状形成過程の特定に重要である.

はやぶさ2は今後,2019年11月末から12月初めにリュウグウを出発し、その1年後に 地球に帰還し、試料入りのカプセルをオーストラリアに落下させる予定である.

[1] Watanabe et al. 2019. Nature **364**, 268. [2] 荒川他 **2019**. 地球惑星科学連合大会. [3] Sugita et al. 2019. Nature **364**, 252. [4] Kitazato et al. 2019. Nature **364**, 272.

「はやぶさ 2」サンプラー: 試料採取完了と回収準備

Hayabusa2 Sampler: Sample collection and recovery operations

○橘 省吾^{1,2},澤田弘崇²,岡崎 隆司³,三浦 弥生⁴,高野 淑識⁵,坂本 佳奈子¹

¹東京大学 大学院理学系研究科 宇宙惑星科学機構,²宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙 科学研究所,³九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門,⁴東京大学 地震研究所, ⁵海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 海洋機能利用部門 生物地球化学研究プログラム

小惑星サンプルリターン探査機「はやぶさ 2」は 2018 年 6 月に探査対象天体である C 型小惑星リュウグウ到着後,搭載リモートセンシング機器,着陸機による科学観測 [e.g., 1–5]をおこない、2 月 22 日に第一回目の着陸サンプリングをおこなった(当初計画では 10 月に第一回目の着陸運用の予定であったが,ボルダーに覆われたリュウグウ表面への安 全な着陸のために詳細観測などをおこない、2 月に第一回目の着陸となった).4 月に実施 した人工クレーター形成実験後には、クレーター形成で放出された地下物質の採取を目的と し、クレーター近傍で第二回目の着陸サンプリング運用をおこなった。

ニ回の着陸ともに、サンプラー [6-8] は試料採取のための弾丸発射に成功した.サンプ ルを格納するサンプルキャッチャは3室構造をしており、2月、7月の着陸時のサンプルは それぞれ別の試料室に保管された.また、8月下旬には、サンプルキャッチャを地球帰還カ プセル内のサンプルコンテナに収納した(サンプルコンテナはメタルシール機構で密封され [7,8]、回収試料から放出される揮発性物質を逃さず、保管する).この運用により、回収 試料の地球帰還準備は完了した.

2020年末,地球帰還カプセルはオーストラリアで回収される.カプセル回収後,コンテ ナ内の圧力調整と揮発性成分採取のため,サンプルコンテナ開封前にガス採取オペレーショ ンをおこなう [7,8].現在,宇宙科学研究所において,ガス採取装置の性能評価,分析リハ ーサルが進められている.

講演ではリュウグウでのサンプル採取運用,そこから導かれる科学成果,ならびに帰還後 作業について紹介する.

参考文献 [1] Watanabe S. et al. (2019) *Science* **364**, 268-272. [2] Sugita S. et al. (2019) *Science* **364**, eaaw0422. [3] Kitazato K. et al. (2019) *Science* **364**, 272-275. [4] Grott M. et al. (2019) *Nature Astronomy*. doi.org/10.1038/s41550-019-0832-x. [5] Jaumann R. et al. (2019) *Science* **365**, 817-820. [6] Tachibana S. et al. *Geochem. J.* **48**, 571-587. [7] Sawada H. et al. (2017) *Geochem. J.* **48**, 81-106. [11] Okazaki R. et al. (2017) *Geochem. J.* **48**, 107-124.

はやぶさ2搭載レーザー高度計 LIDAR の 地形データに基づく小惑星 Ryugu の表面ラフネス

〇増田陽介¹, 阿部新助¹, 並木則行², 松本晃治², 野田寛大², 千秋博紀³, 照井冬人⁴, 水野貴秀⁴

1日本大学, 2国立天文台, 3千葉工業大学, 4宇宙航空研究開発機構

小惑星探査機はやぶさ2は、2018年に小惑星 Ryugu(162173)に到着し、搭載機器の一つである レーザー高度計(LIDAR)を用いて、小惑星の形状測定を行ってきた.本研究では、LIDAR が実 際に測距した地形データに基づき、小惑星 Ryugu の、水平方向距離(ベースライン)に対する m スケールでの表面ラフネスを統計的な手法^[1]を用いて計算した.

ここで、小惑星における表面ラフネスの研究は、主にレーダー観測や熱赤外カメラによる熱放 射観測に基づいた cm スケールの表面ラフネスと、本研究における LIDAR のようなレーザー高 度計の測距データに基づいた m スケールの表面ラフネスの 2 つに大別される.後者の場合、表 面ラフネスは、ベースライン毎に傾斜を取り除いた標高(ジオポテンシャル高度)変化の平均二乗 誤差として計算され、複数のベースラインにおける表面ラフネスのフィッティングから、粗さの 傾向を示すハースト指数 H (粗さ指数:H=0~1)を算出することが出来る.この手法を用いること で、同じベースライン毎に複数の局所的な領域における表面ラフネスの比較や、月や水星といっ た小惑星より大きな天体との定量的な比較が可能となる.過去の研究から、月や水星、低空隙率 (約 20%)・小惑星 Eros の表面ラフネスは、ハースト指数 H が 1 に近い傾向、すなわち、ベース ライン毎に表面ラフネスが線形的に増加する自己アフィン性が確認されているが^{[2],[3],[4]}、高空隙 率(約 40%)・小惑星 Itokawa に関しては、そうした傾向が見られていない^{[5],[6],[7]}.このことから、 表面ラフネスと、そのラフネスの傾向を示すハースト指数は、小惑星の起源と進化を特徴付ける 一つの手がかりになることが期待される.また、表面ラフネスを計算する上で、水平方向への距 離の物差しとなるベースラインについては既に複数の計算方法が考案されており^[7]、使用する LIDAR のデータセットに合わせて適切な手法を選択する必要がある.

そこで、本発表では、小惑星 Ryugu におけるベースライン計算方法を示すとともに、複数のベ ースラインでの表面ラフネスとハースト指数、さらには Ryugu の形状モデルを使用した 3 次元 ラフネスマップを作成し、他の小惑星や惑星との比較を報告する.

[1] Shepard, M. K., et al. (2001) J. Geophys. Res, 106,32777-32795. [2] Rosenburg, M. A., et al. (2011) J. Geophys. Res, 116, E02001. [3] Susorney, H. C.M., et al. (2017) J. Geophys. Res, 112, 1372-1390. [4] Cheng, A. F., et al. (2002) Icarus, 155,51-74 [5] Abe S., et al. (2006) Science, 312,1344-1347. [6] Barnouin-Jha,O. S., et al. (2008) Icarus, 198,108-124. [7] Susorney, H. C.M., et al. (2019) Icarus, 325, 141-152.

はやぶさ2搭載近赤外分光計によって観測された 小惑星リュウグウの表面組成

〇北里宏平¹,岩田隆浩²,安部正真²,大竹真紀子²,松浦周二³,荒井武彦⁴,仲内悠祐²,
 中村智樹⁵,松岡萌²,千秋博紀⁶,平田成¹,廣井孝弘⁷,渡邊誠一郎⁸,はやぶさ2チーム
 「会津大学,²ISAS/JAXA,³関西学院大学,⁴足利大学,⁵東北大学,⁶千葉工業大学,
 ⁷ブラウン大学,⁸名古屋大学

はやぶさ2 探査機の対象天体である小惑星リュウグウは、炭素質な始原的天体であり、 はやぶさ2によるその場観測とサンプルリターンからリュウグウの物理化学的進化を紐解く ことによって、地球の水や生命の起源に関する新たな知見が得られると期待される. 我々は、 そのリュウグウの表面組成を調べるために、昨年の6月から現在までの約1年間、探査機に 搭載した近赤外分光計(NIRS3)を用いて観測を行ってきた. NIRS3は1.8-3.2µmの観測波 長域を持ち、水酸基や水分子の赤外吸収が顕著に現れる 3µm 帯の反射スペクトルを取得する ことができる. 観測の結果、リュウグウは反射率が極端に低く(約2%),2.7µmに微弱な吸 収を示すことが明らかになった. この2.7µm の吸収は水酸基に起因するものであり、リュウ グウの表面に含水鉱物が存在することを示す直接的な証拠と言える. また、リュウグウの反 射スペクトルが 500℃程度の加熱か 10GPa 以下の衝撃を受けた炭素質隕石のそれとよく一致 することから、母天体上あるいはリュウグウ形成後に二次的な変成を受けたことが示唆され る. さらに、2.7µm 吸収の強度と中心波長に有意な地域差が見られないことから、リュウグ ウの表面組成は均質であることも明らかになった. 本発表では、最新の観測結果も含め、リ ュウグウの表面組成及び進化史について議論する.

小惑星リュウグウにおける 0.7 µm 吸収分布の地形との関係

○石田 茉莉花¹、諸井 圭市¹、巽 瑛理²、亀田 真吾¹、杉田 精司²、北里 宏平³、
本田 理恵⁴、諸田 智克⁵、横田 康弘⁶、神山 徹⁷、鈴木 秀彦⁸、山田 学⁹、坂谷 尚哉⁶、
本田 親寿³、早川 雅彦⁶、吉岡 和夫²、松岡 萌⁶、長 勇一郎²、澤田 弘崇⁶、
¹立教大学、²東京大学、³会津大学、⁴高知大学、⁵名古屋大学、⁶宇宙航空研究開発機構、
⁷産業技術総合研究所、⁸明治大学、⁹千葉工業大学

小惑星探査機「はやぶさ2」は、C型小惑星「リュウグウ」からのサンプルリターンを目的 とする探査機である。2018年6月27日、はやぶさ2は目標天体である小惑星リュウグウに 到着し、現在も様々な観測が行われている。はやぶさ2には3つの光学航法カメラ(ONC)が 搭載されており、そのうちの望遠カメラ(ONC-T)によって7バンド分光観測を行い、リュウ グウ表面の可視反射スペクトルを取得した。これによって、含水鉱物の存在を示す0.7µm の吸収の分布を調査できる。例えばCMに見られる0.7µmバンド吸収は大きくても3-4%程度 であり、この計測には非常に高いSNRが必要になる。地上試験で得られていたフラット補正 データでは、フラット補正が十分ではなく、0.7µm の吸収が正確には計測できていなかった。 特に、地上試験で得られていたフラット補正データは室温でのデータであるが、感度分布は 温度依存性があるため、温度によって異なるフラット補正データが必要であることがわかっ た。この影響を補正するために新たにフラット補正データを作成し、リュウグウ表面の撮像 画像に適用することで、0.7µm吸収分布と地形の関係について議論する。

また、はやぶさ2に搭載されている近赤外分光計(NIRS3)の観測により、リュウグウ表面に 含水鉱物由来の2.7μmの吸収が確認されている。本発表では、ONC-Tで観測した0.7μmの 吸収とNIRS3で観測された2.7μmの吸収の相関についても議論する予定である。

小惑星リュウグウの

ブライトスポットのスペクトル分類

○杉本知穂¹, 巽瑛理^{1,2}, 長勇一郎¹, 諸田智克¹, 本田理恵³, 亀田真吾⁴, 山田学⁵, 神山徹⁶, Deborah Domingue⁷,
 Patrick Michel⁸, 北里宏平⁹, 中村智樹¹⁰, 松岡萌¹¹, Lucie Riu¹¹, 吉岡和夫¹, 澤田弘崇¹¹, 横田康弘¹¹, 坂谷尚哉¹¹,
 早川雅彦¹¹, 鈴木秀彦¹², 本田親寿⁹, 小川和律¹³, 杉田精司¹

¹東京大学,²カナリア天体物理学研究所,³高知大学,⁴立教大学,⁵千葉工業大学,⁶産業技術総合研究所,⁷惑星科学研究所,⁸ニース天文 台,⁹会津大学,¹⁰東北大学,¹¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所,¹²明治大学,¹³神戸大学

「はやぶさ2」に搭載された光学航法カメラ(ONC-T)による観測から、小惑星リュウグウは全 球的に一様で暗いスペクトルを持つことが明らかになった(Sugita et al., 2019)。その平均アルベド は太陽系内の数ある天体の中でも最も暗い物質の1つであるため、平均的物質と異なるものが存 在すれば"明斑点"として明瞭に際立つと期待される。実際、高高度観測ではブライトスポットと 呼ばれる、際立って明るいものが発見された。さらに、その後の近接観測ではこうしたブライト スポットが小スケールで豊富に存在することが判明した。先行研究では10個のブライトスポッ トが分析され、小惑星のスペクトル分類におけるC型やS型に似たスペクトルを持つものが発 見されたが(Sugimoto et al., 2019, JpGU)、主に低高度観測で発見されたブライトスポットに注目し ていたため調査領域は全球中で極めて限定的であり、その起源の制約に向けてより系統的な調査 が必要であった。そこで本研究では広視野をカバーできる中高度観測画像を網羅的に解析し、多 数のブライトスポットのスペクトルの特色を明らかにした。

本研究ではリュウグウ全休平均の 1.5 倍以上明るい部分を持つ物体をブライトスポットと定 義し、そのスペクトルを抽出した。MASCOT 分離運用後のホバリング観測で観測された 21 個お よび、SCI クレーター事前観測で観測された 32 個のブライトスポットを分析した。前者は ul: 0.40 µm, b: 0.48 µm, v: 0.55 µm, Na: 0.59 µm, w: 0.70 µm, x: 0.86 µm, p: 0.95 µm の 7 バンド観測、後 者は ul, b, v, x の 4 バンド観測である。迷光とバイアス、読み出しスミアの除去及びフラットフ ィールド補正、I/F 値への変換は(Tatsumi et al., 2019)の通りに行った。スペクトルは(Sugita et al., 2019)と同様にして(入射角度,反射角度,位相角度)=(30°,0°,30°)での反射率に測光補正した。これら のブライトスポットのスペクトルをケイ酸塩の存在に起因する 1 µm 付近の吸収の強さで 2 つの 群に分類したところ、調査したブライトスポットの内 9 個は 1 µm 吸収が強く(S 型ブライトスポ ット)、残りの 44 個は 1 µm 付近に特徴がない(C 型ブライトスポット)事が分かった。

S型ブライトスポットの直径はおよそ 0.5-2 m である。NIRS3 のカバーする 2 μm 付近の吸収 帯は苦鉄質ケイ酸塩の同定に有用であるが、NIRS3 は ONC-T よりも大きなフットプリントを持 っため、微小なブライトスポットのスペクトル測定は困難である。しかし、S型ブライトスポッ トの内最大のものは NIRS3 で観測され、輝石の 2 μm 吸収が浅く存在する可能性が示された。こ の観測結果は S型ブライトスポットが典型的な S型小惑星や普通コンドライトと整合的である事 を示唆しているのかもしれない。

C型ブライトスポットは特徴のないスペクトルを持つが、リュウグウ上のボルダーと比較する と紫外線波長での吸収とスペクトルの傾きに多様性が見られる。CM コンドライトは加熱によっ て700-800℃まではUV 吸収が弱まり、それ以降の温度ではUV 吸収強まるとともにスペクトル の傾きが平らになる事が知られている(Hiroi et al., 1996)。C型ブライトスポットの内比較的赤い スペクトルを持つものはスペクトルの傾きに比べてul 吸収強度のバラエティーに富んでおり、 700-800℃以下の温度の加熱トレンドと整合的である。一方で、比較的青いスペクトルを持つブ ライトスポットは青いもの程ul 吸収が強いという傾向を持っており 700-800℃以降の温度の加熱 トレンドに整合的である。この観測事実は、C型ブライトスポットの色の多様性が CM コンドラ イトの脱水トレンドに起因する可能性を示唆するものである。

はやぶさ2ONC-Tカメラによる分光データを用いた Ryuguのレゴリス流動解析

 〇高木 直史¹, 長 勇一郎¹, 巽 瑛理^{1,10}, 諸田 智克¹, 吉岡 和夫¹, 澤田 弘崇², 横田 康弘^{2,3}, 坂谷 尚哉², 早川 雅彦², 本田 理恵³, 亀田 真吾⁴, 松岡 萌², 山田 学⁵, 本田 親寿⁶, 神山 徹⁷, 鈴木 秀彦⁸, 小川 和律⁹, 宮本 英昭¹, 平田 成⁶, 平田 直之⁹, 杉田 精司¹

¹東京大学,²宇宙航空研究開発機構,³高知大学,⁴立教大学,⁵千葉工業大学 惑星探査研究センター, ⁶会津大学,⁷産業技術総合研究所,⁸明治大学,⁹神戸大学,¹⁰カナリア天体物理研究所

小惑星の表面の流動を明らかにすることは、小惑星の地質進化を理解する上で重要である。特に、 持ち帰られるサンプルが経験してきた地質進化を理解しておくことは、サンプルの持つ意味を解釈す る上で必要不可欠である。

小惑星リュウグウはコマ型の形状をしており、赤道が尾根状に盛り上がっている。この地形はリュ ウグウが今よりずっと短い周期で自転していた時代に形成されたと考えられている(Watanabe et al. 2019)。この速い自転速度から今の自転速度まで減速する間に、赤道から中緯度に向かって表面 物質が流れたと考えられているが、地質的な証拠はまだ見つかっていない。

リュウグウ表面の反射スペクトルにも表面流動を示唆する特徴が見つかった。「はやぶさ2」に搭載されている光学航法望遠カメラ(ONC-T)で得られた反射スペクトルのマップデータによると、スペクトルの傾きに地域差があることが明らかになっている(Sugita et al. 2019)。リュウグウの赤道リッジは比較的青いスペクトルを示しており(図1)、新鮮な表面が露出していると考えられている。この分布は、自転周期が短い時代に表面のレゴリスが変性を受けて赤くなり、現在の自転周期に変化する間に表面の赤いレゴリスが赤道から中緯度に向かって流れた結果、赤道リッジは表面下の新鮮な青いレゴリスが露出していると解釈できる。

この赤道から中緯度への流動を示唆する証拠がボルダー周辺のスペクトルからも見つかった。赤道 から緯度 25 度の範囲にあるいくつかのボルダーは、青いスペクトルが中緯度側に分布している(図 2)。これは、赤道から中緯度へレゴリスが流れた際に、ボルダーが下流側にレゴリスが流入するのを 阻害した結果、中緯度側は表面の赤いレゴリスが剥がれて新鮮なレゴリスが露出したと考えられる。

本研究では、このような特徴を持つボルダーとその周囲のスペクトル分布に着目し、リュウグウ表 面のレゴリス流動の定量的な解析を行なった。結果、青いスペクトルを示す領域(以降、流域と呼ぶ) の緯度方向の幅の平均は12m 程度であることがわかった。また、流域の緯度・経度方向の幅はボルダ ーのサイズと強い相関があることもわかった。流域の大きさとボルダーのサイズの相関は、ボルダー が実際に流れをせき止めていることを示しており、リュウグウで赤道から中緯度への表面流動が起こ ったことを強く示唆している。



図 1: リュウグウのスペクトルの傾きのマップ

図2:ボルダー(黒円)周辺の青いスペクトル分布

多バンド可視観測による小惑星リュウグウとベヌーの比較

 ○1,2 杉田精司,3本田理恵,1 諸田智克,4 亀田真吾,1.5 巽瑛理,3.6 横田康弘,2 山田学,6 松岡萌,2 長勇一郎,
 7 神山徹,8 鈴木秀彦,6 坂谷尚哉,9 本田親寿,1 吉岡和夫,6 早川雅彦,6 澤田弘崇,9 渡邊誠一郎,6 津田雄一 4 東大,2 千葉エ大,3 高知大,4 立教大,5 カナリア天体物理研究所,6JAXA,7AIST,8 明治大,9 会津大,9 名大

小惑星リュウグウとベヌーは、含水鉱物量こそ大きく異なるが、コマ型の形状、密度、アルベ ド、岩塊の多さ、クレーター保持年代など可視観測で得られる全体的特徴は酷似する。軌道要素 も類似するため、同一母天体由来の可能性もある。本研究では、両小惑星の画像解析から得られ ている観測事実に照らしながら、両小惑星の作り分けの機構を考察する。

リュウグウとベヌーの作り分けには、(1)近地球軌道投入後の太陽接近による加熱脱水イベントの有無、(2)カタストロフィック破壊時における衝突脱水の度合いの差違、(3)母天体の異なる 含水量を持つ部位からの由来、(4)異なる母天体からの誕生などの可能性が考えられる。

(1)の太陽加熱の効果は、Morota et al. (2919)LPSC の解析により、リュウグウ全体のスペクトル 変成ではなく厚さ1m以下の赤黒い表層の形成に寄与したものの、赤道付近や極域に見られる青 白い層へはほとんど影響を与えていない可能性が高いことが分かった。

(2)については、Michel et al. (2019)の最新の計算によって単一衝突において母天体の脱出速度を 超える破片の2割ほどもが 400°Cを超える可能性があることが示されている。これは、従来の同 種のモデル計算に比べて非常に高い効率であるので注目に値する。しかし、ラブルパイルに再集 積する破片は掘削流の流線に沿って様々な衝撃圧を経験したものであるとの理論計算結果 (Michel et al. 2015 PSS)を信じると、高い衝撃圧のみを経験した物質でラブルパイルを構成するこ とは困難であることが予想される。さらに、高い衝撃脱水が Michel et al. (2019)で実現するのは、 衝撃による激しい compaction が許されるからである。だが、リュウグウとベヌーは、ほぼ同じ 密度を持っている。リュウグウの含水鉱物の欠乏が compaction を伴う衝突脱水に由来する場合、 リュウグウの密度がベヌーと同一になることは難しい。

(3)を支持する最大の観測事実は、リュウグウの一部のボルダー(オトヒメ)がベヌーのスペクトルに酷似していることである(Tatsumi et al., 2018 DPS)。これが正しい場合、母天体は物質的に成層構造を持っていて、異なる深さの物質が両小惑星を作ったと考えるのが自然である。ただし、そのような作り分けが可能になるには、カタストロフィック破壊における母天体中の異なる深さの混合効率が低いことが必要である。しかし、リュウグウでもベヌーでも、複数のタイプのボルダーが観測されている(Sugita et al., 2019 Science, Jaumann et al., 2019, Science, Jawin et al., 2019LPSC)。このような異なるタイプのボルダーは、母天体の異なる場所に由来する可能性が高く、衝突時の物質混合の効率が高いことを支持する。

したがって、2天体の平均値としての含水量の大きな違いは、同一母天体中の物質不均一性に 由来するのではなく、異なる母天体内の物質的差違に由来する可能性が高い。これは、(4)の仮 説を支持するものである。だが、このような消去法的推論は強い説得力を持つとは言えない。こ の問題の根幹には、リュウグウもベヌーも何らかの熱変成を受けた可能性が高いものの、初成物 質がどのような物質なのか不明であるという問題がある。この問題は、恐らく試料の地球帰還と 分析を経るまで解明されないであろう。

スペクトル観測や物質組織観察のような正攻法で攻めるより、他の特徴量に注目した比較の方 が寄り有効であるかもしれない。例えば、リュウグウでもベヌーでもブライトスポットとして外 来性の物質塊が多く見つかっている。リュウグウで見つかる大きな(~2m)のブライトスポットは リュウグウが現在の大きさになってからの降着では説明できない(杉本ほか 2019,本学会)。お そらくカタストロフィック破壊時の混合であったはずである。両小惑星のスペクトルが異なれば、 異なる破壊イベントに由来することを意味する。それは、異なる母天体に由来することを強く示 唆することになる。

小惑星の高速自転変形の数値計算と リュウグウなどのコマ型小惑星の形成について

〇杉浦圭祐¹, 渡邊誠一郎², 小林浩³, 玄田英典¹, 兵頭龍樹¹, 犬塚修一郎³

1東京工業大学 地球生命研究所

²名古屋大学大学院 環境学研究科

³名古屋大学大学院 理学研究科

JAXA の探査機はやぶさ 2 が訪れている小惑星リュウグウはラブルパイル天体であり、「コマ 型」と呼ばれるそろばんの珠のような特徴的な形をしていた (Watanabe et al. 2019). つまり, 自転 軸から垂直に小惑星を見ると低緯度から中緯度にかけて斜面が直線になるようなダイアモンド型 をしている. コマ型小惑星の多くが自転周期 3 時間程度の高速自転をしていることから, YORP 効 果による自転加速の結果としてコマ型に変形したと考えられている. しかしながらコマ型に変形 するための定量的な条件や変形過程は明らかになっていない. そのため, コマ型形成の条件を明 らかにすることで、そのような小惑星の物性や内部構造などに制限を与えられると期待される.

我々は自転加速及び高速自転による変形過程及びコマ型の形成条件を明らかにするために、粉体の動力学を扱える Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (Sugiura et al. 2018) によるラブルパイル 小惑星の自転変形の数値シミュレーションを行った.小惑星リュウグウ程度である半径 500 m,密度 1.19 g/cm³の球を自転させる.初期の自転速度は変形しない程度の遅さとし (Holsapple 2001),10 万秒間で 0.5 時間自転周期が早くなるような加速をさせて YORP 効果を模擬する.全体の 1%の質量放出が起きた後は加速をやめ、形状が収束するまで計算する.

図 1 は小惑星が最も勢いよく変形している時刻での断面を表す. 変形は軸対象に起きているため,一部の断面のみを示す. 図 1a より摩擦角が 40°の時は変形の速度が図で見えないほど遅く, 準静的に変形していることがわかる. 一方図 1b より摩擦角が 60°の時は動的に変形し,なおかつ 内部深くまで変形が起きていることがわかる. さらに図 1c より摩擦角が 80°まで高いと表面の みが動き,表面地滑りが起きていることがわかる.

図2は変形後の小惑星の断面を表す.図2a,bより準静的・動的を問わず内部変形が起きた場合 については、低緯度域と中緯度域の表面傾斜角の差が大きいような潰れた形状になることがわか

る. 一方図 2c より, 摩擦角が 大きく表面地滑りが起きた場 合には, 表面傾斜角が一定で 直線的な表面が形成され, 軸 対象なコマ型ができることが わかった.

一方, 自転加速がより遅い 場合や初期形状が球ではない 場合で, 前者は摩擦角が 70° 以上, 後者は摩擦角が 50° 以 上の場合に, 非軸対象な地滑 りが起き, 局所的に直線的な 表面ができることがわかった. そのため現実には局所的な地 滑りが何回か起きることで軸 対象なコマ型に進化する可能 性がある.









O41

はやぶさ2 SCI による小惑星リュウグウ上での 衝突実験

 ○荒川政彦¹、佐伯孝尚²、門野敏彦³、高木靖彦⁴、和田浩二⁵、飯島祐一^{2*}、今村裕志²、岡本千里
 ^{1*}、 嶌生有理²、白井 慶²、中澤 暁²、早川雅彦²、平田 成⁶、矢野 創²、澤田弘崇²、小川和 律¹、 石橋 高⁵、木村 宏⁵、小林 正規⁵、坂谷尚哉²、早川 基²、本田理恵⁷、杉田精司⁸、諸 田 智克⁸、亀田真吾⁹、巽 瑛理¹⁰、本田親寿⁶、横田康弘²、神山徹¹¹、山田 学⁵、鈴木秀彦¹²、 吉岡和夫⁸、長 勇一郎⁸、松岡 萌²

¹神戸大学、²宇宙航空研究開発機構、³産業医科大学、⁴愛知東邦大学、⁵千葉工業大学、⁶会津大学、 7高知大学、⁸東京大学、⁹立教大学、¹⁰カナリア天文物理学研究所、¹¹国立研究開発法人産業技術総 合研究所人工知能研究センター、¹²明治大学

小惑星探査機はやぶさ2は、2019年4月5日にSCI(小型搭載型衝突装置)による宇宙衝突 実験を実施し、その運用に成功した。SCIのインパクターは、リュウグウ上に着弾し、その 時に発生したイジェクタは DCAM3(分離カメラ)により確認された。確認されたイジェク タは非等方的で、衝突直後は北側には、はっきりしたイジェクタが観測されたが、他の方向 には観測されなかった。4月25日には、ONC-Tによる衝突クレーターの探索が行われ、SCI によると思われるクレーターが確認された。この SCI クレーターの形状は半円形であり、そ のリム直径(*D*_{rim})は17mであった。SCIクレーター内部には最大幅5mにも及ぶ大きな岩 (イイジマ岩)が確認されており、この岩は衝突前の画像との比較から北西に3m移動した ことが分かっている。また、このクレーターの南側にも大きな岩(オカモト岩)があるが、 この岩は衝突によってほとんど移動していない。SCI クレーターが半円形であり、特に南側 に成長していない理由は、このオカモト岩を中心とする付近の大きな岩がクレーター掘削流 を妨げたからだと推測される。クレーターの周囲にはイジェクタが堆積してできたと思われ る堆積リムが観測された。この堆積リムの存在は SCI クレーターの形成が、重力支配域で起 きたことを示唆している。また、クレーターの内部と外側ではボルダーのサイズ頻度分布が 異なっており、特にクレーター内壁では外側と比べて大きなボルダーが少なく見える。ま た、SCIクレーターの中心にはピットと思われる凹みが確認された。

DCAM3の取得画像の解析から、イジェクタカーテンは衝突後約200秒までは成長を 続けているように見えた。この成長は非等方的かつ不均質に起きており、特に、南側へのイ ジェクタ放出はほとんど観測することができず、これはクレーターの形成がオカモト岩によ り制約されている事実と整合的である。また、北側に成長するイジェクタも幾つかの領域に 分かれており、それぞれの領域のイジェクタカーテン内部には非均質な構造も確認された。 このイジェクタが幾つかに別れた原因及びイジェクタ内部の構造を形成した原因は、リュウ グウ上を覆うボルダーだと考えられる。一方、イジェクタカーテンは、衝突後300秒以降は 地表面から decoupling することなく、リュウグウの重力により再堆積する様子が確認され た。この観測事実もSCI クレーターが重力支配域で形成したことを意味している。この非等 方的で不均質なイジェクタカーテンは、最終的にはリュウグウ表面に堆積したと考えられる が、その堆積物は ONC-T の観測から作成された反射率マップ(事前事後の反射率の変化量 をマッピングした図)でも確認された。今後、この SCI クレーターから推定されるクレータ ーサイズスケール則をリュウグウ表面のクレーター年代学に適応することで、信頼性の高い 表面年代の推定が可能となる。

O42

「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラ(TIR)によるSCI(小型衝突装置)運用で 生成したクレータイジェクタおよびタッチダウン地点(C01)付近の熱的な特徴 Thermal Characteristics of a Crater and Ejecta Materials Generated by a SCI (Small Carry-on Impactor) Experiment and Adjacent Touchdown Area Observed by Thermal Infrared Imager (TIR) onboard HAYABUSA2

[°]田中智¹,坂谷尚哉¹,嶌生有理¹,岡田達明¹,福原哲哉²,千秋博紀³,荒井武彦⁴,神山徹⁵,滝田隼⁶, 伊藤瑞生⁷,森川惠海⁷,須古健太郎⁸,出村裕英⁸,平田成⁸,平田直之⁹

S.Tanaka¹, N.Sakatani¹, Y.Shimaki⁵, T.Okada¹, T.Fukuhara², H.Senshu¹, T.Arai³, T.Kouyama¹, J.Takita¹, M.Ito¹, M.Morikawa¹, K.Suko¹, H.Demura¹, N.Hirata¹, N.Hirata¹,

1,宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2, 立教大, 3, 千葉工大, 4, 足利大, 5, 産総研, 6, 北見北斗高, 7, 東大, 8, 会津大, 9, 神戸大

1, JAXA, 2,Rikkyo Univ., 3,Chiba Institute of Technology,4, Ashikaga Univ., 5, AIST, 6 Kitami Hokuto High School, 7, Univ. Tokyo , 8, Univ. Aizu, 9, Kobe Ulniv.

2019年4月4日, SCI(Small Carry-on Impactor)運用が遂 行され、2kgの弾丸が秒速2km程度で打ち込まれた結果、 直径10m以上のクレータが生成された.円錐状のイジェク タカーテンも観察され、Ryuguの内部物質が広範囲に飛 散したことも確認された.SCI実験によってフレッシュな内 部物質情報を得られる非常に重要な機会である.本研究 では熱物性の観点からクレータ内部やその周辺のイジェ クタが堆積していると考えられる地域の熱物性について 調査した.

2019年4月23-25日に行われたSCI運用後のクレータ探 素運用においてSCIクレータがTIR観測で確認された.こ の時には高度約1000mから撮像され(TIR分解能約1m), クレータ部分が周囲と比較して温度が10度程度高いこと が確認された.これはクレータ部分の熱慣性が周囲より 低いことを示唆しており、クレータ内部はより細粒な物質 で覆われていることが推定された.さらに2019年6月13日 に実施したTM1Bと呼ばれる降下運用を行った際には約 260m上空での撮像が得られ、より詳細な温度構造やボ ルダーによる影の温度変化データが得られた.

SCIクレータとその周辺部のDEMを用いた熱シミュレー ションを行った結果、クレータ内部の熱慣性は約300 (J/m²K²s^{0.5})程度が観測と一致する結果となった.これは Ryuguのグローバルな熱慣性と概ね一致しており表層部 分との熱物性の差異は小さいことがわかった.クレータ内 部の温度が高く観測されたのはクレータ傾斜面の日照角 度に起因すると考えられる.

一方, 2019年5月28日-30日に実施したSCIクレータか ら約20m離れた地点にターゲットマーカーを投下した運 用(TM1A)では最下点付近(高度15m程度)でRCS噴射 を行った際に1m程度の比較的大きな岩石が移動し、そ れに伴って影も移動する画像が得られた. この温度変 化によってローカルな熱慣性推定を行った結果,熱慣性 は約300((J/m²K²s^{0.5}) が得られた. この温度変化は10-100秒程度のタイムスケールであるため、熱的なスキン デプスは薄く最表層付近の熱物性を反映していると考え られるが、表面を薄く細粒物質が覆っているデータでは なかった. これらのことから、SCIによって生成されたクレ ータ内部やイジェクタの物質は熱的には差異が小さいと 推定される. クレータ内部に存在するボルダーの影内の 温度解析やクレータ内のアルベド変化を考慮した熱シミ ュレーションなど詳細な熱慣性推定を進行中であり、こ れらの解析結果も含めて本発表で報告する.

小惑星リュウグウのクレーターと周辺ボルダーの 関係に着目した表層の層構造の推定

〇赤羽 大貴¹, 渡邊 誠一郎^{1,2}, 諸田 智克³, 道上 達広⁴, 平田 成⁵, 平田 直之⁶, 嶌生 有理², 野口 里奈², 本田 理恵⁷, 亀田 真吾⁸, 山田 学⁹, 坂谷 尚哉², 小川 和律⁶, 巽 瑛理^{3,10}, 神山 徹¹¹, 横田 康弘^{2,7}, 長 勇一郎³, 鈴木 秀彦¹², 早川 雅彦², 松岡 萌², 本田 親寿⁵, 吉岡 和夫³, 澤田 弘崇², 杉田 精司³, 荒川 政彦⁶, はやぶさ2 サイエンスチーム¹³

¹名古屋大学,²宇宙航空研究開発機構,³東京大学,⁴近畿大学,⁵会津大学,⁶神戸大学,⁷高知大学,⁸立教大 学,⁹千葉工業大学,¹⁰ラ・ラグーナ大学,¹¹産業技術総合研究所,¹²明治大学,¹³はやぶさ2プロジェクト

小惑星探査機「はやぶさ2」による観測から、リュウグウについてクレーターやボルダー など様々な表面の地形的特徴が明らかになっている[1,2,3,4]。クレーターについては、[3] によりリストアップされ、その直径・形状や全球における分布の特徴が報告されている。ま た、2019 年 4 月には、はやぶさ 2 の SCI (衝突装置)により、人エクレーター (SCI クレー ター)生成実験が行われ、クレーター形成過程に対する知見が得られると期待されている。

本研究では、リュウグウのクレーターとその周辺に存在するボルダーに着目し、それらの 相互関係から地下構造を明らかにすることを目的とする。そのために、光学航法カメラ ONC-Tにより撮像された画像と、それを元に作成された形状モデルを用いて、クレーターと ボルダーの関係を調べた。解析には、高度約3 kmの画像と、一部のクレーターについては より低高度で撮像された高解像度画像を使用した。また[3]でリストアップされたクレータ ーのうち、円形のくぼみでリムがあるもの(クラスI)と、円形のくぼみでリムがないもの (クラスII)を調べた。各クレーター内部と外部(クレーター半径の1倍から1.5倍の円環 領域)に存在するボルダーについて、それぞれサイズ頻度分布を調べた。そして、平均直径 1 m以上のボルダーについて、クレーター内部と外部でのボルダー数密度を比較した。

その結果、直径が約30m以下、深さにして数mより浅いクレーターでは、平均直径1m 以上のボルダー数密度が外部に比べて内部では低い傾向が確認された(数密度比は、0.4~ 0.8程度)。一方、直径、深さが大きいクレーターでは、数密度が外部に比べて内部で同じ か高いものが見られた。外部が表面付近の構造を、内部が地下の構造を反映しているなら、 表面付近に大きいボルダーを含む層、その下により小さいボルダーが卓越する層、さらにそ の下には表面付近と同程度の大きいボルダーがある層から成る構造が推定される。そこで、 この考え方をもとに、層構造の厚さの推定を試みた。また、SCIクレーターについても、生 成の前後で、[5]の結果に基づき同様の解析をしたので、その検証結果も併せて議論する。 [1] Watanabe+ (2019), *Science* **364**, 268. [2] Sugita+ (2019), *Science* **364**, 252. [3] Hirata+ 2019, submitted to *Icarus*. [4] Michikami+ (2019), *Icarus* **331**, 179. [5] 坂谷ほか (2019) 日本惑星科学会秋季講演会.

地震波伝搬モデリングを用いたリュウグウの弾性 的特性の制約と seismic shaking の可能性の検討

○西山学¹, 並木則行², 川村太一³, Benjamin Fernando⁴, Kuangdai Leng⁴ ¹東京大学, ²国立天文台, ³Institut de Physique du Globe de Paris, ⁴Oxford University

これまで「はやぶさ」をはじめとした小惑星探査ミッションにより、小さいクレーターの 欠乏等から活発な表面更新活動が起きていることが確認されてきた(例えば Miyamoto et al., 2007)。この原因のひとつとしてこれまで隕石衝突によって生じる地震波が地表に加速度場 を励起し、レゴリスの移動を引き起こすという seismic shaking モデルが提唱されている (Richardson et al., 2004)。しかし、小惑星における地震波の伝搬はこれまで実際に観測され たことがない。そこで「はやぶさ 2」の SCI オペレーションにおいて、衝突実験前後の表面 の変化に着目することで seismic shaking が本当に生じるのか見ることができると期待され ていたが、SCI オペレーションの前後においてクレーターとそのエジェクタ以外による表面 変化は見られていない。本研究ではこの結果を AxiSEM3D による地震波伝搬計算と比較す ることで、リュウグウの弾性的特性の制約を試みた。なお AxiSEM3D は Oxford 大学が開発 したオープンソースの 3 次元地震波伝搬計算コードで、軸対象形について高速計算が可能な ため広いパラメータ範囲での計算が可能となっている。

まず地表に励起される変位への内部構造の影響を見積もった。Q値と弾性定数が1桁異なる2層でできた小惑星を仮定して計算を行ったところ、内部構造の変位への影響は数十%程度であることがわかった。これは最大振幅の変位が表面波によって励起されているためであり、本研究では小惑星表層の弾性的物性を制約することが可能であることを示唆する。

次にこれまで衝突実験で計測されてきた幅広いパラメータを用いて剛性率を 10⁶-10⁹ Pa、 Q 値を 5-1000、seismic efficiency を 10⁻³-10⁻⁶ として計算を行った。震源関数をガウシアン とし、時定数のスケーリング則(Lognonne et al., 2009)を用いると、SCI インパクターのエ ネルギーでは今回のパラメータ範囲においてレゴリスの移動が観測されるはずであるという 結果となり、実際の観測とは異なる結果となった。これは、Q がこれまで実験で求められた 値よりずっと小さく(Q<<0.5)地震波がすぐに減衰するという環境である、もしくは seismic efficiency が小さく(10⁻⁷以下)これまで考えられていた以上に衝突エネルギーが地震波エネル ギーに変換されないということを示していると考えられる。いずれにせよ微小重力下におけ るレゴリス層の Q 値と seismic efficiency の最検討が必要である。

小惑星のレゴリス層を模擬したサイズ頻度分布を持つ ガラスビーズ標的へのクレーター形成実験

○保井みなみ¹, 荒川政彦¹, 長谷川直², 山本裕也¹, 横田優作¹, 杉村瞭¹
 1: 神戸大学大学院理学研究科 2: 宇宙科学研究所

背景:小惑星 Ryugu や Eros は直径 100 m 以下のクレーターが少ない[e.g., Sugita et al., 2019]. その 原因は、小天体が小惑星表面のボルダーに衝突し、ボルダーが破壊してクレーターが形成されない armoring 効果と、小天体の衝突で起こる衝突励起振動によって地滑りが発生し、地形緩和が起こり クレーターが消失することの 2 つの説が提唱されている. 特に小惑星 Ryugu は直径 10m を超えるボ ルダーが多く存在するため[Michikami et al., 2019], armoring 効果によるクレーター形成効率の低下 が起こる可能性は十分高いと予想される. そこで本研究では、小惑星のレゴリス層を模擬したサイズ 頻度分布をもつガラスビーズ混合層へのクレーター形成実験を行い、サイズ分布のクレーター形成効 率への影響を調べた. さらに、衝突励起振動の計測を行い、振動領域の推定を行った.

実験方法: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二段式軽ガス銃を用いた.標的は直径 0.1, 1, 3, 10 mm のガラスビーズを等質量で混合したものを用いた.比較のために、0.1mm ビーズのみの標的も用意した.弾丸には直径 2 mm の鉄球及びアルミ球を用いた.衝突速度は 53m/s~4.4km/s とした.衝突の様子は高速カメラで撮影し、弾丸の跳ね返りや破壊したビーズの 有無を確認した.さらに、衝突点からの距離を変化させて一軸加速度計を 3 つ設置し、衝突に伴う加速度の時間変化を計測した.

結果:実験で得られたクレーター半径は、Holsapple & Schmidt (1986)のクレータースケール則を用

いて整理した.図1は規格化半径 π_R と規格化重力 π_2 の関係を示している.この図から、 π_2 が大きい(衝 突速度が200m/s以下)では0.1 mmビーズ(赤)に 比べて、混合ビーズ(青)の方がクレーター半径は 小さくなることがわかった.さらに、最大径の10 mmビーズに衝突した(水色)場合、クレーター半 径はさらに小さくなった.この場合、衝突した 10mmビーズの破壊と弾丸の跳ね返りにエネルギー が消費されるためであることが予測された.一方、 π_2 が小さい(衝突速度が1km/s以上)では、0.1mm ビーズと混合ビーズはクレーター半径がほぼ同じに なることがわかった.



遠心法で測定した隕石粉の固着力と

小惑星レゴリス粒子への応用

○長足 友哉, 中村 昭子 (神戸大学理学研究科)

はじめに:

細かい粉体からなる層は粒子間力により充填率が低いことが実験的に知られ、小天体上では粒子にかかる重力に比べ、粒子間力が無視できないと考えられる。一方で、重力だけでは説明できないほどに速く自転する天体が知られ、それは構成粒子間の固着力で説明されている (Sánchez & Scheeres, 2016 など)。また、はやぶさ2の SCI が小惑星リュウグウに作った人工クレーターのサイズから、リュウグウのレゴリス粒子の固着力の制約が期待される。

ミクロンサイズの球形シリカ粒子間の固着力は原子間力顕微鏡カンチレバーにより測定され、粒子サイズに比例することが示されている (Heim et al., 1999)。しかしながら、より大きい不規則形状のレゴリス粒子にその結果を外挿するのは困難である。そこで本研究では、数十ミクロンに砕いた隕石粉の固着力を測定した。

実験方法:

過去研究(Nagaashi et al., 2018)でも用いた遠心法により大気中で固着力の測定を行った。この手 法は、数十ミクロンサイズの様々な形状の複数の粒子の固着力を同時に直接測定できる。測定に は、炭素質コンドライト(CV3, CM2)、 普通コンドライト(LL3.5, LL5, LL6)、ユークライトの 粒子を用いた。

結果·議論:

隕石粉の固着力は、ミクロンサイズのシリカ球の測定結果から推定される値よりも数桁小さく、 数桁にわたる範囲をもつことが分かった。これは表面粗さの影響が考えられる。また、炭素質コ ンドライトの粒子の固着力は他に比べて数倍小さかったが、これは物質による表面粗さや表面へ の吸着水量による違いかもしれない。本講演では、隕石粉表面への吸着水量の影響を議論する。 また一方で、数十ミクロンサイズではサイズと固着力が比例関係でないことから、小惑星レゴリ スが数十ミクロンサイズ以上であればサイズの割に固着力は小さいと推測される。さらに、小惑 星全体の強度を数十ミクロンサイズのレゴリスが支配していると仮定すると、隕石粉への吸着水 が固着力測定値を過小評価させている可能性を考慮に入れても、その強度は小さく、数 Pa~数百 Pa 程度と推定される。

炭酸塩コンクリーションにおける形成メカニズム と形態条件の推定

〇井原 貴之¹、城野 信一¹

1名古屋大学大学院環境学研究科

地層中には、特定の物質を主成分に持つ岩塊があり、これをコンクリーションという。 アメリカのユタ州ナバホ砂岩層、モンゴルのゴビ砂漠で主成分が酸化鉄の球状鉄コンクリ ーションが発見されている。火星探査機オポチュニティによりメリディアニ平原でそれに よく似たものが発見された。

球状鉄コンクリーションの形成メカニズムを調べるために名大コンクリーション研究グル ープはフィールドワークや元素マップの解析を行った(Yoshida et al., 2018)。その結果、 球状鉄コンクリーションの先駆物質が球状炭酸塩コンクリーションであると示された。地層 中に球状炭酸塩コンクリーションが何らかのメカニズムにより形成され、次に鉄イオンが含 まれている酸性地下水がそこに流れ込んで炭酸カルシウムと反応し球殻状に鉄が沈殿する (Yoshida et al., 2018)。一方で(Bjørkum, P. A and Walderhug., 1990)によると、地下水には 一般的に Ca が含まれており、それが溶解と沈殿を繰り返し炭酸塩コンクリーションが成長 すると考えられている。溶液中で沈殿物が生成し、凹面や凸面があった際、凸面より凹面に 沈殿ができやすく、また沈殿物の大きさが異なった際、相対的に小さいものは溶解しやすく 相対的に大きな沈殿物が選択的に成長していく。しかし、球状炭酸塩コンクリーションがこ の沈殿メカニズムにより形成および成長するのか分かっていない。

本研究では、炭酸塩コンクリーションが砂層中で沈殿し形成される際、相対的に大きい沈殿物に沈殿が集中し成長するのか実験を行い調べる。

砂層で沈殿がどの様に形成されるのか蒸発実験を行った。実験では Ca (HCO₃)₂ 水溶液を用 いて CaCO₃を沈澱させた。実験①は容器に砂と方解石を用意し、溶液を注入し蒸発温度 60℃ で実験を行った。XGT を用いて蒸発させたサンプルの表面の Ca 元素マッピングを作製し沈 澱の様子を調べた。使用した砂とは事前に塩酸で洗っており、Ca を無くした状態のものを 用いた。実験②では蒸発皿に溶液と方解石のみを入れ、蒸発温度 80℃、20℃で沈殿の様子 を光学カメラで撮影した。

実験①のマッピング画像と実験②の光学カメラの画像を二値化し CaCO₃が沈殿した所を調べた。実験①:方解石との距離に関係なく、CaCO₃沈殿が一様に形成された様になった。実験 ②:方解石の周辺には CaCO₃の沈澱は少なくなり、蒸発温度 20℃でも同様の結果となった。

実験①は方解石の距離に関係なく一様に沈殿が形成されており、これは砂粒と砂粒の接触 面が凹面なので方解石に沈殿せず、接触面に沈殿したと考えられる。このことから、沈殿物 の成長より凹面での沈殿形成がされやすいと言えるだろう。実験②では方解石の周りに CaCO₃の沈殿物は少なくなっており方解石に沈殿したと考えられる。砂があると凹面が多い ので溶解度の低い箇所が多く、そこで沈殿してしましい結晶が成長しにくい可能性がある。

O48

火星古環境の3次元大気圏・水圏結合シミュレーション: タルシス山地による全球水循環への影響

A 3-dimensional coupled atmosphere-hydrosphere global climate model for early Mars: Impact of Tharsis bulge on the global water cycle

〇鎌田有紘¹, 黒田剛史¹, 笠羽康正¹, 寺田直樹¹, 中川広務¹, 鳥海克成¹ ¹ 東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻

OA. Kamada¹, T. Kuroda¹, Y. Kasaba¹, N. Terada¹, H. Nakagawa¹, and K. Toriumi¹ ¹ Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

The planetary environment on the early Mars would have been quite different from that on the current Mars. Many observations have shown geological evidences for the past Martian environment which had been warm and wet enough to allow liquid surface water. A well-known geological evidence is called "valley networks", which are widely distributed within a domain of latitudes ranging from -60° S to $+30^{\circ}$ N. Although the orientation of VNs in the boundary between the Late Noachian and Early Hesperian (3.85-3.6 Ga) had been influenced by the Tharsis bulge, which is the largest volcanic plateau centered near the equator in the western hemisphere of Mars, the formation epoch of the Tharsis bulge is still under debate (e.g. Phillips et al. 2001; Anderson et al. 2001).

We use the DRAMATIC (Dynamics, RAdiation, MAterial Transport and their mutual InteraCtions) PMGCM (Paleo-Martian General Circulation Model) as the base system to reveal the impact of Thasis bulge on the global water cycle of early Mars. It has (1) a radiation scheme with the absorptions of $CO_2/H_2O/H_2$ gases as well as CO_2/H_2O ice clouds, (2) a water cycle scheme including H_2O convection, advection, condensation, and precipitation processes with large-scale condensation and relaxed Arakawa-Schubert cumulus convection, (3) surface parameters including the ancient ocean and lakes assuming sea levels at -2.54 km altitude of the current topography, (4) ocean thermodynamics including sea ice processes and variable surface albedo/thermal inertia, and (5) hydrologic calculations of fluvial and sediment transport with high resolution.

Simulations are performed with a solar flux of 75% of the present value (441.1 W m⁻²) in accordance with the Faint Young Sun assumption. The calculations are made with surface mean pressures of 0.5, 1, 1.5, 2 bar, assuming the H₂ concentrations up to 6% to create warm and wet surface climate of the early Mars. Our PMGCM results assuming several percentages of hydrogen atmosphere show that the early Martian surface environment could have been cool; namely, the surface temperatures could be high enough (> 273 K) during summertime to allow seasonal melting of snow-ice deposits, and low enough (< 273 K) during wintertime to produce considerable snow precipitation and accumulation. Our PMGCM results show that the early Martian surface environment could have been clement surface environment, which is characterized by precipitation and seasonal melting of snow, and enough fluvial and sediment transports. Moreover, our PMGCM, assuming the absence of Tharsis bulge, calculates mature surface runoff system (e.g. Icaria Terra, Aonia Terra, Noachis Terra, Terra Sabaea and Hesperia Planum), which is consistent with observed Martian valley networks. It might show that the Tharsis loading might had not been completed or even begun during the early Martian periods.

非静力学全球火星大気循環モデルの開発と 高解像度計算

 樫村 博基¹・八代 尚²・西澤 誠也³・富田 浩文³

 中島 健介⁴・石渡 正樹⁵・高橋 芳幸¹・林 祥介¹

1神戸大学,2国立環境研究所,3理化学研究所,4九州大学,5北海道大学

火星大気では数十から数百メートル規模のダストデビル (塵旋風) から、数十キロメートル規模 のローカルダストストーム、全球を覆うグローバルダストストームまで、大小様々な規模の砂嵐 が観測されているが、これらのスケール間の相互作用は未解明である。また火星は大気が薄く海 がないため、昼夜間の寒暖差が大きく、鉛直対流が卓越すると考えられるが、全球規模の大気大 循環に対するその役割は解明されていない。これらの謎に挑むためには、水平数キロメートル解 像度の高解像度で、非静力学の方程式系による全球大気計算が求められる。

そこで我々は、大型計算機「京」の後継機、「富岳」で火星高解像度計算の実現を目指し、全球 非静力学火星大気モデル (火星版 SCALE-GM) を開発している。SCALE-GM は、正二十面体準 一様格子上で全球を非静力学の運動方程式系で解く力学コアである。我々は SCALE-GM に、火 星大気用の定数や放射・地表面過程などの物理モジュールを組み込んだ火星版 SCALE-GM を開 発している。開発は、既存の汎惑星大気大循環モデル DCPAM (静力学・スペクトルモデル)の火 星物理モジュールを移植する形で進めている。

本発表では、開発の経過とこれまでに実現できた全球 1.9 km 格子の高解像度計算の結果や水平 解像度依存性 (図 1) を紹介する。

謝辞:本研究は文部科学省ポスト「京」萌芽的課題3「太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星 環境変動の解明」の一環として実施しました。



図 1: 火星大気計算の解像度依存性。北半球の春分から約 30 日後の高度 2 km の鉛直流 [m s⁻¹] の瞬間場。 水平格子間隔 dx = (a) 60 km、(b) 30 km、(c) 15 km、(d, g) 7.5 km、 (e, h) 3.8 km、 (f, i) 1.9 km の場 合。パネル (g, h, i) はそれぞれ (d, e, f) の拡大画像 (鉛直対流が発達しはじめる地方時の赤道付近) であ り、4° × 4° (~ 240 km × 240 km) の領域を表している。

弱い固有磁場環境下における火星大気流出機構

〇堺正太朗¹、関華奈子¹、寺田直樹²、品川裕之³、田中高史^{3,4}、海老原祐輔⁵ ¹東京大学大学院理学系研究科、²東北大学大学院理学研究科、³情報通信研究機構、

⁴九州大学国際宇宙天気科学・教育センター、⁵京都大学生存圏研究所

現在の火星は大気が非常に薄く、寒冷乾燥な気候であるが、過去の火星は分厚い大気を保 持し、温暖湿潤な気候であったと考えられている (e.g., Goldspiel & Squyres, 1991)。つま り、火星は過去から現在にかけて大規模な大気流出を経験したことになる。近年の火星探査 機 MAVEN による観測から、火星大気の大部分は宇宙空間へと流出し、火星の気候変動に大 きく寄与したのではないかと考えられている (Jakosky et al., 2017)。宇宙空間への大気流出 機構は太陽風条件が重要なパラメターの一つである。例えば、太陽極端紫外線 (EUV) が強 い環境下では大気流出率が増加することが知られており、現在よりも太陽 EUV が強かった 45 億年前では、大気流出率、特に水の散逸を知るための良い指標となる酸素イオンの流出 率が現在より3桁から4桁程度高くなることが示された (Terada et al., 2009)。太陽風条件 だけでなく、惑星の固有磁場もまた大気流出機構に影響を及ぼす。現在の火星には南半球を 中心に残留磁場と呼ばれる強い地殻磁場が存在する (e.g., Acuña et al., 1999) ことから、過 去には全球的に固有磁場が存在していたと考えられている。地球では太陽風と固有磁場間の 相互作用は固有磁場強度に依存することが知られている (e.g., Seki et al., 2001)。そこで本 研究では、現在の火星に固有磁場が存在していたと仮定して、固有磁場の存在が大気流出機 構や流出率にどのような影響を与えるのかを、数値計算を行うことで明らかにする。

本研究では三次元大成分電磁流体力学モデルを用いて火星からのイオン流出過程を、火星 赤道表面で 100 nT の弱い固有磁場がある場合とない場合とで比較を行った。固有磁場があ る場合、極域での開いた磁力線及び磁気圏フランク領域での太陽風磁場と固有磁場の磁気再 結合によって生じる開いた磁力線の 2 つの経路から流出することが明らかとなった。また、 本数値計算から弱い固有磁場は、火星からの大気流出率を増加させることを示した。特に、 O₂⁺や CO₂⁺のような分子イオンの流出率が増加していることから、分子イオンが多く存在す る電離圏下部からの流出が増加していると考えられる。

References:

Acuña, M. H., et al. (2001). Science, 284, 790-793 Goldspiel, J. M., & Squyres, S. W. (1991). Icarus, 89(2), 392-410. Jakosky, B. M., et al. (2017). Science, 355, 1408-1410. Seki, K., et al. (2001). Science, 291, 1939-1941. Terada, N., et al. (2009). Astrobiology, 9(1), 55-70.

光化学反応と放射冷却を考慮した
 地球・火星における還元型原始大気の流体力学的散逸

〇吉田辰哉, 倉本圭

北海道大学

微惑星が集積し惑星が形成される過程で、衝突時の微惑星中の揮発性物質の脱ガスや惑星 の周囲に存在する星雲ガス成分の捕獲により、惑星は大気を獲得したと考えられる (Saito and Kuramoto, 2018). 金属鉄を含む微惑星が高速で衝突する際に放出される脱ガス成分は, ガス-マグマ-溶融金属鉄間の熱化学反応によって決定され、大気組成は H₂, CH₄ などの還元 的な分子種に富むと推定される (Kuramoto and Matsui, 1996). H₂に富んだ還元的な原始大気 は流体力学的散逸によって大規模に散逸した可能性がある. 流体力学的散逸とは上層大気が 加熱されることで大気の静水圧平衡が破れた際に起こる熱的散逸過程であり、初期太陽の強 力な極端紫外線 (EUV) 放射によって上層大気が加熱されることで起きていたと考えられて いる. 流体力学的散逸による大気散逸フラックスは主に太陽紫外線による放射加熱率、放射 加熱効率、惑星の重力ポテンシャルによって決まる。地球と火星で加熱効率が等しいとする と、質量の小さい火星の方が散逸フラックスは大きくなるため、現在の地球と火星の表層揮 発性物質量の差は初期の流体力学的散逸による大気損失量の差に起因している可能性がある. これまでの地球型惑星の原始大気散逸の研究は星雲ガス成分や水蒸気の散逸に焦点を当て たものが主であり、還元的な原始大気を想定した研究は行われていない.また、流体力学的 散逸モデリングについては一成分大気を仮定したり、光化学過程や放射過程を簡略化したり と, 原始大気の散逸率を推定する上で不十分である. そこで, 本研究では光化学過程と放射 過程を考慮した多成分大気系における流体力学的散逸の数値モデルを構築し流体力学的散逸 による大気散逸率を求め、地球と火星における現在の揮発性成分量と整合的な大気進化経路 を推定することを目的とする. 数値モデルでは球対称一次元流体方程式を時間積分し定常流 を求めており,波長に依存した UV ならびに赤外放射の放射伝達と光化学反応を考慮してい る. UV スペクトルは G 型主系列星の観測から推定される 44.6 億年前の太陽スペクトルを用 いている (Claire et al., 2012). EUV 強度は現在の強度の約 100 倍に相当する.赤外放射につ いては CH₄の特に放射率の高い遷移を考慮し、光子の脱出確率を用いて放射の再吸収を考慮 した.光化学過程については 92 種の光化学反応を考慮している.大気組成は惑星集積時の

下端での CH4 の混合比が大きくなるほど CH4 の放射冷却により大気散逸率が減少する. 一 方で光解離と他の大気成分との化学反応により CH4 が分解されることで放射冷却の影響の増 大は抑えられる. その結果,地球火星双方で加熱効率は >0.1 となり,大気は効率的に流出 していく.火星では重力が小さいため地球と比べて H2-CH4 間の質量分別の程度が小さく, 初期量に対して流出する炭素種の割合は大きい.地球と比べて現在の火星大気が希薄なのは 初期の流体力学的散逸により原始大気の大部分を失ったためである可能性がある.

ガス-マグマ-溶融金属鉄間の化学平衡の結果を参考にHっとCH4から成るとしている.

原始火星大気に包まれた火星衛星系の進化:

微惑星の捕獲と衛星の衝突・軌道進化

〇松岡 亮·倉本 圭

北海道大学大学院 理学院 宇宙理学専攻

火星の衛星(フォボス・ダイモス)はその形状・サイズ・可視-近赤外反射スペクトル・アルベドが 始原的炭素質小惑星と類似することから, 微惑星捕獲起源説が提唱されてきた. このような微惑 星の捕獲を達成するためには軌道エネルギーの散逸が起きなければならないが, その散逸の媒体 として, 星雲ガスの重力束縛で生じる原始火星大気が提唱されてきた[1, 2]. このとき, 天体は衛星 として捕獲された後も大気と相互作用を続けることになり, その軌道進化は特に大気の回転速度 分布に強く依存する.

火星の衛星の潮汐軌道進化から推測される 46 億年前の衛星の軌道半径は、いずれも静止軌 道付近であると考えられている[3].本研究では、この軌道半径を説明するよう、大気回転速度分布 を次のように仮定した:(1)共回転半径(R_c)以内:火星自転と共回転、(2)共回転半径~Bondi 半 径(R_B): $v(r) = ((R_B - r)/(R_B - R_c))^{\Gamma}v_K(r)$ で距離とともに回転速度が減衰(v_K は Kepler 速 度、「は正定数で、本研究では 1 と置いた)、(3)Bondi 半径~Hill 半径:静止大気で、かつ Hill 半 径で星雲ガスと接続.このような、距離とともに回転速度が減衰する大気は、共回転半径を通じて 外側へと漏れ出す角運動量が Kepler 回転を達成できるほど大きくない場合に生じると考えられ る.大気モデルの構築に当たっては、仮定した速度場による遠心力と火星重力、圧力傾度力が釣り 合うように大気の密度場を決定した.

この大気の下では、一時捕獲された天体のうち、火星自転に対して順行した軌道をもつものは 静止軌道付近に長く滞在するような軌道進化を辿り、逆行した軌道をもつものは大気から強いガ ス抵抗を受けて火星へと速やかに落下する.このような軌道進化の特徴から、順行軌道天体同士 の衝突と順行軌道天体-逆行軌道天体の衝突が想定される.本研究では、ガス抵抗による軌道進 化に加えて衛星同士の衝突・合体を含めた火星衛星系の進化を調べた.本発表では、最終的に形 成される衛星の個数・質量・組成不均質に着目してこの結果を議論する.

[1] D. M. Hunten (1979), *Icarus*, 37, 113—123. [2] S. Sasaki (1990), *LPSC* XXI:1069—1070 (abst.). [3] J. A. Burns (1992) In: H. H. Kieffer *et al.* (eds), "*Mars*", Univ. of Arizona Press, Tucson, 1283—1301.

火星衛星探査計画 MMX の進展とサイエンス

〇倉本 圭^{1,2}, 川勝 康弘², 藤本 正樹², Jean-Pierre Bibring³, 玄田 英典⁴, 平田 成⁵, 今村 剛⁶, 亀田 真吾⁷, David Lawrence⁸, 松本 晃治⁹, 宮本 英昭⁶, 諸田 智克⁶, 長岡 央², 中川広務¹⁰, 中村 智樹¹⁰, 小川 和律¹¹, 大嶽 久志², 尾崎 正伸², 佐々木 晶¹², 千秋 博紀¹³, 橘 省吾⁶, 寺田 直樹¹⁰, 臼井 寛裕², 和田 浩二¹³, 渡邊 誠一郎¹⁴, MMX study team 1.北海道大学, 2.JAXA, 3.パリ=スッド大学, 4.東京工業大学, 5.会津大学, 6.東京大学, 7.立教大学, 8.ジョンホプキンス大学, 9.国立天文台, 10.東北大学, 11.神戸大学, 12.大阪大学, 13.千葉工業大学, 14.名古屋大学

火星衛星探査計画 MMX (Martian Moons eXploration)は、フォボスとダイモスの近接観測と、フォボス からのサンプルリターンにより、火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域における惑星形成 過程と揮発性物質輸送に制約を与えるとともに、火星圏進化史に新たな知見を加えることを主目的とする ミッションである. はやぶさ1号機・2 号機で培った小天体サンプルリターン探査の強みを伸ばしつつ、火 星圏へ独自にアプローチする狙いを持ち、宇宙基本計画工程表においては ISAS/JAXA の実施する戦 略的中型科学探査の 1 号機に位置づけられるとともに、月火星への人類の活動領域の拡大を主眼とす る国際宇宙探査(有人探査ならびにそれに向けた調査・技術実証ミッション)の一環としての位置づけも 有する. 2024 年の打ち上げと約 5 年の往還期間の設定の下、概念検討段階(Phase-A)をほぼ完了し、 現在探査機の基本設計段階(Phase-B)が進行しつつある. 本稿では現時点での科学ミッションの組み立 てについて記す. 今後変更が加わる可能性があることには留意されたい.

望遠カメラ (TENGOO), 広角分光カメラ (OROCHI), 近赤外分光カメラ (MacrOmega; 仏 CNES 提 供), γ線中性子線分光計 (MEGANE; 米 NASA 提供), イオン質量分析器 (MSA), レーザ測距装置 (LIDAR), 火星圏ダストモニタ (CMDM) からなる MMX の搭載観測機器群は, 試料分析と相補的に火星 衛星の起源を判別する独立指標を明らかにする. そして, サンプル採取地点の選定, 特徴付け, そして 火星圏の変遷・進化過程の解明のための観測データを得ることを目的とする. 科学観測機器には, 新た に CNES と DLR が開発提供するローバが加わる予定である. ローバには, カメラ, レーザラマン分光装置, 熱放射計等を載せ, フォボス表層の物理状態と鉱物組成をその場計測する. フォボスの成り立ちに独立 な制約を得つつ, 母船着陸の安全性の確認, 遠隔観測結果の解釈の裏付けに貢献する.

MMX は 2019 年 7 月に H3 ロケットを用いて地球を出発し, 2020 年 8 月に火星圏に到着する. 到着 後, フォボスの軌道とやや異なるが同周期の軌道を取ることで, 実質的に探査機がフォボスを定常周回 する疑似衛星軌道(QSO)へ投入する. γ線中性子分光計は測定原理上, 視野に対象天体を大きく入れ ることが不可欠であり, フォボス平均半径よりも小さな観測高度を必要とする. フォボスは火星のほぼ赤道 上を周回していることから, 火星の春分・秋分を含む時期に, 探査機が日陰に入る時間が特に低高度 QSO を取った場合に伸びる. そこで, これらの時期には, 高高度(長半径 200km×短半径 100km)あるい は中高度の QSO を取る. そして長時間日陰の起きない季節に, 低高度 QSO 運用(例えば 24 km×20 km)を行って, 接近観測を進める. このとき望遠カメラの空間解像度は 10cm 程度, 分光撮像のそれも 10m 程度に迫る. 新鮮な基盤岩露出面の分光データから, フォボスの鉱物組成を求める. また γ線中性 子線分光計は半球スケールで, 表層数十 cm の主要元素平均存在度を求める. QSO からは, フォボスの 形状・地形を求めるレーザ測距, イオンやダスト粒子フラックスの観測, さらに火星大気の撮像観測を行う.

2027 年 3 月には火星が地球に大接近し, 探査機と地球間の交信遅延時間が最小になる. この付近の 時期にローバ放出と2 度の軟着陸を行う. 試料採取は, 母船をフォボスに軟着陸させて行う. その場取得 データに基づいて地球局側で決定した座標に可動アームでコアラーを突き刺し, 試料容器を引き抜いて 帰還カプセル内へ移送する. 採取前後に分光撮像を行い, 採取点の地質学的な特徴づけに役立てる. MMX は 2028 年 8 月に火星圏を離脱する. この直前にダイモスへのフライバイ観測を複数回実施し, ダ イモスとフォボスの成因関係を明らかにするデータを取得する. MMX は 2029 年 7 月に地球に帰還する. 合計 10g 超の試料は, キュレーションを経た後に, 組織, 鉱物組み合わせ, 元素・同位体組成, 年代測 定など一連の詳細分析を実施し, 遠隔観測データと併せて, 所期の科学目的の達成を図る.

火星衛星探査計画のサンプルサイエンス検討

〇臼井寛裕¹, 馬上謙一², 藤谷渉³, 古川善博⁴, 小池みずほ¹, 三浦弥生⁵, 菅原春菜¹, 橘省吾^{1,5}, 高野 淑識⁶, 倉本圭^{1,2}

¹ISAS/JAXA,²北海道大学,³茨城大学,⁴東北大学,⁵東京大学,⁶JAMSTEC

Phobos and Deimos occupy unique positions both scientifically and programmatically on the road to the exploration of the solar system. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) plans a Phobos sample return mission (MMX: Martian Moons eXploration). The MMX spacecraft is scheduled to be launched in 2024, orbit both Phobos and Deimos (multi-flyby), and retrieve and return >10 g of Phobos regolith back to Earth in 2029. The Phobos regolith represents a mixture of endogenous Phobos building blocks and exogenous materials that contain solar system projectiles (e.g., inter-planetary dust particles and coarser materials) and ejecta from Mars and Deimos (Table 1). Under the condition that the representativeness of the sampling site(s) is guaranteed by remote sensing observations in the geologic context of Phobos, laboratory analysis (e.g., mineralogy, bulk composition, O-Cr-Ti isotopic systematics, and radiometric dating) of the retuned sample will provide definitive information about the moon's origin: capture of asteroid or in-situ formation by a giant impact. If Phobos proves to be a captured object, isotopic compositions of volatile elements (e.g., D/H, $^{13}C/^{12}C, ^{15}N/^{14}N$) in inorganic and organic materials will shed light on organic-mineral-water/ice interactions in a primitive rocky body potentially from the outer solar system and the delivery process of water and organics into the inner rocky planets.

	Woon origin			
	capture of asteroid		In-situ formation	
	Outer solar system body	Inner solar system body	Co-accretion	Giant impact
Petrology	Analogous to carbonaceous chondrite, IDP, or cometary material	Analogous to ordinary chondrite	?	Glassy or recrystallized igneous texture
Mineralogy	Rich in oxidized and hydrous alteration phases (e.g. phyllo- silicate, carbonates), amor- phous silicate	Reduced and mostly anhydrous phases (e.g., pyroxene, olivine, metal, sulfides)	Un-equilibrated mixture of chondritic minerals?	High-T igneous phases (e.g., pyroxene, olivine), Martian crustal (evolved igneous) & mantle (high-P) phases
Bulk chemistry	Chondritic, volatile-rich (e.g. high C and high H)	Chondritic, volatile poor	Chondritic (= ~ bulk Mars?) with nebula- derived volatile?	Mixture of Martian crustal (mafic) and mantle-like (ultra- mafic) composition possibly with impactor material (high HSE?). Degree of volatile depletion varies due to impact regime
Isotopes	Carbonaceous chondrite signa- ture (e.g., Δ17O, ε54Cr, ε50Ti, εMo, noble gases), primitive solar-system volatile signature (e.g., D/H, 15N/14N)	Non-carbonaceous chon- drite signature (e.g., Δ 170, e54Cr, e50Ti, eMo, noble gases), primitive (e.g., chondritic D/H, 15N/14N)?	Bulk-Mars (?) signature (e.g., Δ17Ο, ε54Cr, ε50Ti, εMo), planetary volatile (e.g., intermediate D/H, low15N/14N?)?	Mixture of Martian and impactor (carbonaceous or non- carbonaceous) composition, highly mass fractionated plane- tary volatile (e.g., low D/H, low15N/14N)?
Organics	Primitive organic matter, volatile & semi-volatile organ- ics, soluble organics?	Non-carbonaceous signa- ture?	?	?

Table 1: Expected characteristics of endogenous returned samples

O56

フラッシュX線を用いた衝突破壊現象の観測 :多孔質標的の破片速度分布に対する空隙の効果

○中村誠人¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科²宇宙科学研究所/JAXA

太陽系の天体は、衝突破壊・再集積を経て、微惑星から原始惑星へと成長したと考えられている。微惑星の衝突破壊・再集積過程を考える上で重要な物理量として「衝突破壊強度」があり、衝突後の最大破片の質量が元の標的質量の半分になるためのエネルギー密度Q(標的の単位質量あたりに与えられる弾丸の運動エネルギー)と定義される。一方、天体半径が100m以上では衝突後の破片が自己重力により再集積するため、強度支配域の衝突破壊強度とは異なる。しかし、重力支配域の衝突破壊強度を室内実験で調べる事は難しく、これまで数値計算が主に行われてきた。しかし、数値計算においても数値モデルや計算コードで衝突破壊強度が一桁以上も異なる。さらに、Jutzi [2015]は標的の摩擦、圧密、引張強度の物性値を導入し、これらのパラメータが衝突破壊強度に影響することを示した。本研究では、従来数値計算でのみ調べられてきた重力支配域の衝突破壊強度Qbを室内実験で調べるため、フラッシュX線を用いた衝突破壊強度の力学物性に対する依存性について検証を行った。

実験は宇宙科学研究所に設置されている横型二段式軽ガス銃を用いた。標的は直径 60mmの 石膏球(空隙率 50%)を用いて、その内部(弾丸軌道に平行な面上)に鉄球を 12 個埋め込んだ。 衝突速度は 2,3,5 km/s とした。衝突から一定時間後に 3 方向から X 線を照射して、標的の透過像 を撮影し、鉄球の変位と衝突からの経過時間から破片速度を求めた。鉄球速度は外側よりも内側 のほうが遅く、衝突点と標的中心を結ぶ軸対称性がみられた。鉄球の速度が周囲の破片の速度を 代表していると考え、標的を 12 分割にし、各領域の飛翔速度を鉄球速度と仮定した。そして各領 域の破片質量と破片速度から速度と質量の累積分布を作成し、その分布において、累積質量が 0.5 となる速度を中間速度と定義した。中間速度が脱出速度と等しい場合、再集積後の破片質量 は元の標的質量の半分となることがわかる。この結果から、天体半径と重力支配域の衝突破壊強 度 Q^bの関係を求め、さらに、その関係を空隙率 10%未満の凍結粘土球を用いた岡崎[2018 修論] の結果と比較した。その結果、同じ天体半径でも石膏の方がQ^bの値が 3 倍程度大きくなり、これは Jutzi [2015]の数値計算で得られた衝突破壊強度の圧密(空隙率)依存性と整合的であった。

岩石の塑性変形加熱:炭酸塩岩からの衝撃脱ガス量を用いた検証

黒澤耕介 (千葉工業大学 惑星探査研究センター), 玄田英典 (東京工業大学 地球生命研究所) 太陽系の形成末期には天体同士の衝突速度は>1 km/s に達し, 加熱を伴うようになる. 隕石 に刻まれた衝撃変成は太陽系末期の衝突の証拠であり, 変成を起こす条件を解明できれば, 衝撃 変成組織の出現頻度から過去の太陽系の姿を復元できると期待される. 近年 Kurosawa & Genda (2018)は数値衝突計算コード iSALE を用い, <10 km/s の比較的低速度の衝突時には岩 石の塑性変形に起因する加熱が起こり, 従来の想定よりも低速度の衝突(~3 km/s)でも~1,000 K までの顕著な加熱が起こり得ることを報告した. つまり高温変成を起こすのは従来想定より も低速度の衝突で十分である, ということになり, この発見は隕石から復元される初期太陽系の 衝突環境が大幅に塗り替えられる可能性を示唆するものである.

数値計算では理想均質媒体を仮定していることには注意が必要である. そこで我々は炭酸塩 岩からの衝撃脱ガス量の実験データ(Kurosawa et al., 2012)を用いて, 塑性変形加熱の効果を 検証することを試みた. Kurosawa et al. (2012)はアルミナを 2–7 km/s まで加速し, 天然の多 結晶炭酸塩岩に衝突させ, 発生した CO2 量を定量計測した. また 1 次元インピーダンスマッチ ング,等圧核&自己相似的衝撃波伝播を仮定した簡単な理論モデルによる予測値と計測値が良 い一致を示すことも示した. 今回は iSALE-2D を用い, 衝突実験と同様の衝突速度で計算を行っ た. 炭酸塩岩の強度モデルは先行研究で用いられているものを流用し, 臨界降伏応力 Ym をフリ ーパラメータとした. 比較のために強度なしの流体計算も実施した. 炭酸塩岩標的内にトレーサ ー粒子を配置し、そのエントロピー変化を記録した.熱化学平衡の仮定のもとで炭酸塩岩の熱分 解率をレバールールを用いて求め, 数値計算中の CO2 発生量を算出した(以下, 計算値と呼ぶ). その結果, (1)流体計算の場合, 計算値が系統的に実験値を下回ること, (2) Yimを炭酸塩について の参照値 (Ym = 0.5 GPa)としても計算値は系統的に実験値を下回ること, (3) Ym を参照値の 2 倍(Yim = 1 GPa)とすると衝撃圧が>50 GPa のデータで計算値が実験値とほぼ一致すること, (4) Yim = 1 GPa の場合でも衝撃圧が 20-40 GPa の領域では計算値は実験値よりも1 桁程度小さ いこと, がわかった. (1)の結果と Kurosawa et al. (2012)の簡易モデルとの差異は 2 次元的な 衝撃波伝播の場合, 等圧核体積が相当に小さくなることが原因であった. (4)の結果は実験と数 値計算の間に矛盾があることを示している. 先行研究でシアバンド加熱(局所加熱)が顕著に起こ ることが報告されている衝撃圧領域と一致しており, Kurosawa et al. (2012)の実験中でもシ アバンド加熱による脱ガスが起きていたことを示唆する. (2)&(3)の結果は強度モデルのパラメ ータに依存するが, 塑性変形加熱が天然試料でも起きることを示唆している. また数値衝突計 算で衝撃加熱度を定量的に評価する場合.強度モデルの選択と入力パラメータを吟味すること が肝要であることを意味する.

参考文献: Kurosawa & Genda (2018), *GRL*, **45**, 620-626;

Kurosawa et al. (2012), EPSL, 337-338, 68-76.

謝辞: iSALE の 開 発 者 であ る Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します.

低強度標的を用いたクレーター形成実験 エジェクタ放出過程の解析

〇杉村瞭¹、荒川政彦¹、保井みなみ¹

¹神戸大学理学研究科

惑星探査による観測の結果、固体天体は小惑星等の衝突により表層の物質が掘削・放出されて エジェクタとなり、その一部分が表面に降り積もりることで、表層を変化させていることが分か っている。この固体天体表層の衝突進化を理解するためには、クレーター形成実験を行い、エジ ェクタの放出過程を明らかにする必要がある。Housen & Holsapple(2011)は、エジェクタ速度に 関するスケール則を提案している。また、高野[2016 修論]で、強度支配域のエジェクタカーテン の放出メカニズムが Maxwell(1977)のZモデルでは十分に説明できないことが分かった。

本研究では、近年探査が飛躍的に進んでいる小惑星(高空隙・低強度)に注目して、その上で形成するクレーターに伴うエジェクタ放出過程に焦点を置く。小惑星を模擬した石英砂・石膏の混合標的を用いてクレーター形成実験を行い、エジェクタの放出速度、放出角度、放出位置を調べた。用いた標的の引っ張り強度は0.37MPaと0.06MPaの2種類であり、弾丸はアルミ球、衝突速度は4km/sと6km/sとした。破片の放出する様子は、高速カメラ(撮影速度10⁵fps、露出時間380ns)を用いて撮影した。高速カメラの視線方向に飛んでくる破片を遮断するために、標的の衝突面に1cmの間隙を持つスリットを設置した。このスリットにより放出するエジェクタの量が大幅に減少するため、各破片を個別に追跡することが可能になる。

実験の結果、放出角度は最終クレーターの形状を考慮した改良Zモデル、

$$u_r = \alpha(t) \left[\left(\frac{r}{r_c}\right)^{-z} - \left(\frac{r}{r_c}\right)^{\zeta} \right], \tan \sigma = z - 2 + \frac{z + \zeta}{(r/r_c)^{-(z+\zeta)} - 1}$$

を用いて、整理できることがわかった。なお、 μ は半径方向の粒子速度、 α (t)は流れ場の強さの時間変化、 σ はエジェクタの放出角度、 r_a は半球を仮定した時の最終クレーターの半径である。図1にエジェクタの放出角度とその初期位置の関係を示す。衝突速度 6km/s で 0.37MPa の標的の場合、Z=2.8, ξ ==0.5 を用いるとこのモデルで説明できることが分かった。また、図2に放出速度

Figure 1:放出角度と位置の関係

と衝突からの経過時間の関係を示す。 ここから、同じ放出位置にも関わら ず時間によって放出速度が異なる破 片があることが分かる。これは、改良 Ζモデルにおけるα(t)が時間ととも に変化するため生じていると考えら れる。



Figure 2: 放出速度と時間の関係

数値計算によるイジェクタカーテン模様の解析

〇末次竜¹、門野敏彦¹、荒川大¹、笠木祥喜¹、永山秀一¹、鈴木絢子²、長谷川直² ¹産業医科大学、²宇宙科学研究所

小惑星探査機「はやぶさ2」は小惑星リュウグウに到達後、数々の探査を行いリュウグウ の性質を解き明かしつつある。今年4月に行われた Small Carry-on Impactor (SCI)による 人工的にクレータを形成する衝突実験では、リュウグウ表面にクレータを形成するだけでな く、イジェクタカーテンが形成される様子までカメラで観測することに成功した。イジェク タには表面の物質だけでなく、表層付近ではあるが地中の物質も含まれている。そのため形 成されたクレータからだけでなく、イジェクタカーテンの観測結果からもリュウグウの表面 及びその下層にある物質に対して制約が与えられることが期待される。

これまでイジェクタカーテンの性質は主に衝突実験によって詳しく調べられ、形態や表面 模様のターゲット依存性などが明らかにされてきた。これらの実験では、小惑星の表面がレ ゴリスだと想定し、粒径の小さいガラスビーズのみで構成されたターゲットが使用されてき た。一方、はやぶさ2の観測によってリュウグウ表層には岩塊が多く存在することが明らか にされている。そのため SCI による実験結果を解析するには、岩塊に相当する異なる粒径の 粒子が混入した場合のイジェクタカーテンの性質を知る必要がある。

最近、我々は宇宙科学研究所の二段式水素銃を用いた衝突実験によって、大粒子が混入した場合のイジェクタカーテンの性質について調べ、岩塊に相当する大粒子の粒径が大きくなるにつれてイジェクタカーテンが一様なメッシュ構造から非一様なフィラメント構造に変化することを明らかにした(Kadono, Suetsugu, Arakawa, Kasagi, Nagayama, Suzuki, Hasegawa, 2019, ApJL, 880, 30)。本研究では、個別要素法(DEM)のオープンソースコードであるLIGGGHTSを使用して、大粒子が混入した場合の小粒子群の運動を調べ、それらの振舞いが衝突実験の結果と同様の傾向を示すことを明らかにした。

進化する原始惑星系円盤中での圧力極大点の位置 について

○瀧哲朗¹, 小林浩², 小久保英一郎¹, 鈴木建³

1国立天文台,2名古屋大学,3東京大学

微惑星の形成は原始惑星系円盤の内部で進行すると考えられているが、円盤内のダストは成長の 過程でガスとの角運動量を交換を経て速やかに中心星へ落下してしまう.これは「中心星落下の 壁」と呼ばれている、微惑星形成過程における代表的な問題のひとつである.中心星落下の壁を 回避するためのシナリオのひとつに、ガス圧力のバンプ状構造におけるダストの捕獲がある (e.g., Taki et al., 2016). このような構造の内部では円盤動径方向の圧力勾配が非一様になり、圧力が 極大となる位置にダストが集積する.またバンプ構造は様々なメカニズムによって局所的あるい は大域的に円盤内で形成されうることが知られている(Johansen et al., 2014).

これまでの微惑星形成の研究では大域的には定常なガス円盤を考慮することが多かったが、実際の原始惑星系円盤は 100 万年程度の時間スケールで散逸する.特に近年では円盤進化の描像が古典的な粘性降着円盤から変わりつつある.例えば Suzuki et al. (2016)は、数値実験の結果から存在が予言されている磁気駆動円盤風を考慮した円盤進化モデルを提案した.このモデルでは円盤内側に大域的なバンプ状構造が表れ、時間と共に外側へ移動していく.

このような円盤進化モデルを採用する場合, 微惑星形成という観点からは, 圧力極大点がいつ, ど こに形成され, どのような移動速度をもつのかという点が重要になるであろう.本研究では, 粘 性降着と磁気駆動円盤風で進化する原始惑星系円盤の内縁部に形成される圧力極大点の位置の進 化を 1-D モデルを用いて調べた.数値計算の結果から,今回我々は圧力極大点の位置が準定常状 態に至ることを発見した.このような進化は,乱流粘性によるガス降着と円盤風による質量損失 の効果の釣り合いとして理解できる.また,このガス降着と質量損失の釣り合いの条件から, 圧 力極大点の移動速度と最終的な位置を半解析的に定式化することができた.本講演では上記のよ うな円盤進化を決める各種パラメータと圧力極大点の進化との関係性を紹介すると共に, 微惑星 形成への示唆についても議論する.

ダスト-ガス摩擦と乱流粘性が駆動する 原始惑星系円盤の永年不安定性の非線形発展

○ 冨永遼佑¹, 高橋実道², 犬塚修一郎¹

1名古屋大学理学研究科,2国立天文台

近年,アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) を用いた原始惑星系円盤の高解像度観測 が盛んに行われている.その中でも特に注目を集めている観測結果のひとつは,原始惑星系円盤に おけるダストの空間分布の多様性であり,特徴的な構造を持つ円盤が数多く発見されてきた (e.g., ALMA Partnership et al. 2015; Andrews et al. 2016; Tsukagoshi et al. 2016; Isella et al. 2016). 観測された構造は単一もしくは多重のリング/ギャップなどの軸対称構造と,三日月模様/渦状腕 などの非軸対称構造に大別されるが,これまでの観測では軸対称構造が比較的高い頻度で発見さ れている (e.g., Long et al. 2018; Andrews et al. 2018). 観測された軸対称構造の起源は明らかに なっていないが,これまで多くの形成機構がその起源の候補として提案されてきた.提案された 機構の中に永年重力不安定性とTwo-component Viscous Gravitational Instability (TVGI) とい うものがある (Takahashi & Inutsuka 2014, 2016; Tominaga et al. 2019). 永年重力不安定性はコ リオリカ, 圧力勾配力,円盤自己重力がほぼ釣り合った準静的なガスの地衡流の中で,ガスと摩 擦相互作用するダストが動径方向に集積するという現象である. TVGI も永年重力不安定性に類 似しており,ダスト-ガス摩擦とガスの乱流粘性の作用によってダストが動径方向に集積するとい う現象である.またふたつの不安定性は自己重力的に安定なガス円盤で成長する不安定性である ため, 微惑星形成過程にも重要な役割を果たしている可能性があると期待されている.

上記の不安定性の線形成長過程は局所線形解析によってよく調べられてきたが,非線形成長過程は未解明である.非線形成長過程におけるダストリングの幅やダストの集積効率の理解は,不 安定性によるリング形成と微惑星形成の可能性を探る上で重要である.そこで本研究では数値シ ミュレーションに基づき永年重力不安定性とTVGIの非線形成長過程を調べた.これらの不安定 性の成長時間は円盤の回転周期の100倍程度以上と非常に長いため,数値誤差を抑えた数値計算 手法を用いる必要がある.これを受けて我々はLagrange cell 法と Symplectic 法を組み合わせた長 時間流体計算法を開発した (Tominaga et al. 2018).開発した数値計算法では Lagrange cell 法に よって移流に伴う数値散逸を回避し,Symplectic 法によって時間積分に起因する数値誤差の蓄積 を回避している.この数値計算法をもとに永年重力不安定性とTVGIのシミュレーションを行っ た結果,どちらの不安定性でも非線形成長によってダストリングの幅が線形成長段階と比べて非 常に細くなり,ダストが初期の10倍以上集積することがわかった.またこの非線形成長段階では, ダストがリングの中心に向かって円盤の回転周期の数倍程度で集積した.これは100周期程度以 上の時間かけてダストを集積する線形成長過程とは対照的である.このように上記の不安定性の 非線形成長によってダストが効率的に集積されることがわかった.これは不安定性によってダス トリングが形成された後に微惑星形成に発展しうることを示唆している.

原始惑星系円盤のダストと温度構造の共進化

○奥住 聪¹, 植田 高啓², Neal Turner³

¹東京工業大学,²国立天文台,³Jet Propulsion Laboratory

原始惑星系円盤の温度構造を理解することは、円盤のどの場所でどのような組成の天体が 形成されるかを明らかにする上で重要である。一般に円盤の温度分布は、中心星の光や円盤 の内部熱源による加熱と、主たるオパシティ源であるダストによる放射冷却の釣り合いに よって決定する。ダストが成長もしくは円盤内を移動すると、温度分布が変化し、それに よってダストの組成も変化する。このことからわかるように、原始惑星系円盤の温度構造と ダストは互いに影響を及ぼし合いながら進化するものである。

しかし、ダストと円盤温度分布が具体的にどのように共進化するのかは、理論計算上の困 難により十分に明らかになっていない。ダストの空間分布が単純でない場合、円盤表面の一 部に中心星の光が当たらない部分(影)が生じることがある。表面が影となっている円盤領 域の直下は、その周囲に比べて低温になる傾向にある。このような影の影響を考慮できるこ とが望ましいが、広く用いられる簡便な円盤温度モデル (e.g., Kusaka et al. 1970; Chiang & Goldreich 1997) は影領域をもつ円盤に適用できない。影の影響を考慮しながらダストの進化 を調べた理論研究は、これまでに存在しない。

本研究では、未解明となっているダストと円盤温度構造の共進化を明らかにすることを目 指し、影をもつ円盤に適用可能な輻射輸送計算を組み合わせたダスト合体成長シミュレー ションコードを開発した。輻射輸送計算では、独自に導いた簡単な判定条件を用いてダスト 分布から影領域を割り出し、さらに円盤の軸対称性を仮定して円盤全体の輻射輸送を解析的 に計算している。このような工夫により、輻射輸送計算のコストを、ダスト合体成長の数値 計算にかかるコストより小さく抑えることに成功した。過去のモンテカルロ輻射輸送計算 (Jang-Condell & Turner 2012; Ueda et al. 2019) との比較より、我々の輻射輸送計算が影領域を もつ円盤の温度分布をある程度の精度をもって再現できることを確かめた。

さらに、本研究で開発した計算コードを用いて、ダストの合体効率がその組成に依存する 場合のダストと円盤温度構造の共進化をシミュレートした。この計算では簡単のため、温度 が水氷の昇華点を下回る領域ではダストは水氷に覆われ、上回る領域ではダストは岩石質で あるとした。計算の結果、氷に覆われたダストが岩石ダストよりも付着しやすい場合は、氷 の昇華が起こる軌道(スノーライン)の背後に影が形成され、影領域では水氷に富むダスト が急速に微惑星へと成長するという興味深い現象が起こりうることを発見した。また、水よ りも昇華性の高い物質(NH₃, CO₂など)のスノーラインは、影の形成・進化に応じて動径方 向に大きく移動しうることを明らかにした。今後は、ダストと円盤温度分布の共進化をより 系統的に調べていく予定である。

巨大衝突起源の破片がもたらす 地球型惑星の軌道進化

○小林浩¹, 磯谷和秀¹, 佐藤雄太郎¹

1名古屋大学

地球型惑星は原始惑星同士の衝突・合体による巨大衝突期を経て形成されたと信じられている。し かし、巨大衝突により作られると地球型惑星は軌道離心率が現在の地球や金星に比べ大きくなっ てしまう。そのため残留微惑星円盤による力学的摩擦により地球型惑星の離心率が下げられると 考えられてきた。しかし、力学的摩擦により微惑星の離心率は上昇し、微惑星同士の破壊的にな る。その結果、衝突カスケードによりミクロンサイズのダストにまですり潰され、輻射圧によっ て系外に飛ばされるため、微惑星円盤の質量は減少していく。つまり、衝突・破壊により力学的摩 擦は阻害され、地球型惑星の離心率は下げられなくなる。我々は衝突破壊を考慮して、巨大衝突 ステージでの原始惑星の軌道進化を調べた。図1は3つの地球質量惑星と30地球質量微惑星円盤 の1000年後の軌道分布である。左のパネル(a,b)は微惑星半径を1kmとして破壊を考慮した結果 で、右のパネル (c.d) では破壊は無視した結果である。初期条件では、惑星の離心率は 0.03 で、微 惑星円盤の平均離心率も同じ値とし、傾斜角はその半分を与えた。破壊を無視した場合は、原始 惑星の離心率、傾斜角は十分に小さくなる。一方、破壊の効果により、微惑星円盤の離心率や傾斜 角の減少は阻害される。惑星形成期の生き残りのような一様な微惑星円盤を置いた場合、100km 以下の微惑星では力学的摩擦により原始惑星の離心率や傾斜角を落とすことができないことが分 かった。そこで、巨大衝突により作られる地球型惑星の軌道進化を残留微惑星円盤との相互作用 を考慮して調べた。また、微惑星円盤は衝突カスケードによる質量減少を考慮した。巨大衝突起 源の破片の最大サイズは1,000km 程にもなるが、総質量は0.1-0.3 地球質量程度しかない。その破 片円盤との相互作用を計算した結果、3千万年程度かけて地球型惑星が現在の地球程度の離心率ま で下がることがわかった (図2参照)。



図 1: 破壊を考慮した場合 (a,b) と破壊を考慮し ない場合 (c,d) の原始惑星 (青丸) と微惑星 (赤点) の 1,000 年後の軌道分布の比較。



図 2: 上図:惑星 (塗りつぶされた丸) と微惑星 (白丸)の離心率(赤)と傾斜角(青)の進化。下 図:微惑星円盤質量進化

ダスト摩擦反作用が巨大惑星移動に与える影響について

○金川和弘1

1東京大学 ビックバン宇宙国際研究センター

円盤ガスとの重力相互作用によって巨大惑星は円盤にガス密度のギャップを形成し、それ を保ちながら円盤内を移動する(タイプ2惑星移動)。ガスやサイズの小さいダストはこの ギャップをすり抜け内側円盤に流れ込むが、比較的大きなダスト(典型的にはセンチメー トルサイズのダスト)はギャップを通り抜けることができずその外縁部に集積し、ダスト リングを形成する。このダストリング内では、ダスト摩擦反作用によってガス構造が変化 し、その結果、長大なダストリングが形成される(Kanagawa et al. 2018 ApJ). Kanagawa et al. 2018 では簡単のため惑星軌道を固定した計算を行っていた。しかし、ギ ャップ外側の円盤ガス構造の変化によって惑星が外側円盤から受けるトルクが減少し惑星 移動速度が大幅に遅くなる可能性がある。

本研究では、惑星軌道を固定せずガス・ダスト2流体の数値流体シミュレーションを行い、 ダスト摩擦反作用によるガス構造変化が惑星移動速度に与える影響を調べた。巨大惑星は 主にギャップ内部のガスと相互作用しており、大まかには惑星が外側円盤から受けるトル ク(外側トルク)はギャップ底のガスとの相互作用で決まる。しかし、惑星はギャップ端 のガスとも相互作用しており、ダスト摩擦反作用によってこのギャップ端のガス密度が減 少するため、外側トルクはわずかに減少する。この外側トルクの減少量は外側トルク全体 に対して微々たるものであるが、内側トルクと外側トルクのバランス変え、惑星移動速度 に大きな影響を与える。シミュレーションの結果、ある程度広いギャップが形成されると 惑星の内側移動速度が大幅に遅くなることが分かった。特に、円盤粘性が比較的小さく(α =3×10⁻⁴)、惑星が木星質量の場合には外側トルクの減少が大きく、惑星が円盤外側に移動 しうることが分かった。本発表では、上記の結果を紹介し、惑星形成への影響を議論した い。

水素大気を持つ天体の衝突合体

○ 黒崎健二¹, 犬塚修一郎¹

1名古屋大学

宇宙望遠鏡のサーベイに成果により,地球半径の数倍程度の半径の天体が最も多く存在している ことがわかってきた.系外惑星にも見られる海王星サイズの天体は地球質量の10倍程度以下,地 球半径の2-4倍程度であり,この半径を維持するためには水素成分の大気を10%程度保持してい る必要がある.原始惑星系円盤から円盤ガスを獲得した惑星は,その後の惑星形成過程において 巨大衝突を経験することが期待される.したがって,惑星の天体衝突現象は,太陽系のみならず 系外惑星の多様性の起源を理解する上でも重要な現象となる.天体の衝突現象に伴って惑星の自 転軸も変動することが示唆され,インパクターの質量が大きい場合はより多くの角運動量を輸送 できることが期待される.特に,衝突前のターゲットとインパクターの質量が同程度の場合には, インパクター自身も大気を持っていることが予想されるが,天体衝突の規模の増大に伴い,衝突 後に流出する大気量や獲得する角運動量が増大することが期待されるが,ターゲット天体および インパクター共に大気を持った場合の衝突現象はこれまで議論されていなかった.そこで本講演 では,同質量の水素大気を持った天体の衝突計算を行い,衝突によって形成される天体の大気保 持量,角運動量保持量を議論する.

非理想 MHD 計算により与えられた 周惑星円盤における微衛星形成 Satellitesimal formation in circum-planetary disks given by non-ideal MHD simulations

○芝池諭人¹, 森昇志²

1.ベルン大学 NCCR PlanetS, 2.東京大学 天文学専攻

木星や土星などのガス惑星を周回する巨大衛星は、惑星が原始惑星系円盤の中で微惑星から 形成されたと考えられているように、周惑星円盤の中で「微衛星」が集まってできたと考え られてきた (e.g., Canup & Ward 2006)。しかし、周惑星円盤内でのダストの合体成長によ る微衛星の形成には、微惑星形成と同様に、ダストがペブルサイズまで成長すると中心惑星 に向かって落下してしまう問題があるとわかった (Shibaike et al. 2017)。一方で、この研究 はシンプルな円盤モデルを用いており、円盤の構造によっては微衛星形成が可能であること も指摘されている(Drazkowska & Szulagyi 2018)。本発表では、我々が新たに行なった非理 想 MHD 計算から得られた周惑星円盤環境における微衛星の形成を、議論する。

最近の原始惑星系円盤の非理想 MHD 計算では、磁気応力によって円盤進化が駆動さ れ、また、加熱が上空で起こり円盤赤道面が低温に保たれることが示唆されている(e.g., Mori et al. 2019)。我々の計算によって、周惑星円盤においても、磁気応力による円盤の駆 動と低温な赤道面が確認された(Mori & Shibaike et al. in prep. a,b)。このとき、十分な円盤 進化によりガス面密度は低く保たれる一方で、従来の円盤モデルにおけるダストの振る舞い のように、乱流によってダストが赤道面から巻き上げられることがない。したがって、赤道 面におけるダストの密度は高く保たれるため、効率的な合体成長が可能となる。さらに、従 来のモデルよりも円盤の温度が下がり、スノーラインが内側にあることで、氷衛星に必要な 氷微衛星が形成可能となる領域が拡大する。

実際に、非理想 MHD 計算の結果をもとに新たな円盤モデルを構築し、ダストの合体 成長を計算すると、Shibaike et al.(2017)において求められた微衛星の形成条件は緩和される ことがわかった。すなわち、従来は、周惑星円盤に流入するダストとガスのフラックス比が 1:1 となるような非常にダストの多い円盤を仮定する必要があったが、今回の円盤モデルに おいては、よりダストが少ない状況であっても氷微衛星の形成が可能となった。

周惑星円盤起源の単一衛星を持った衛星系の形成について

Formation of a single moon system in circumplanetary disks

○藤井悠里1, 荻原正博2

1名古屋大学 高等研究院/理学研究科, 2国立天文台 科学研究部

°Yuri I. Fujii1, Masahiro Ogihara2

¹IAR & Graduate school of Science, Nagoya University, ²Division of Science, NAOJ

惑星が持つ衛星は、衝突や捕獲によって形成されたものと、周惑星円盤において形成され たものがあると考えられている。木星のガリレオ衛星や土星のタイタンのような比較的大き な衛星は、周惑星円盤中で形成されたと考えるのが一般的である。これまでの研究によって、 大きな衛星を複数持つ系(例:木星衛星系)については、その形成起源を説明し得るモデル が提唱されてきた。一方で、周囲の軌道に他に大きな衛星が存在しない単一衛星系(例:土 星衛星系)の実現は、大きな衛星が複数存在する系や全く存在しない系に比べて難しいとい うことが知られている。

本研究では、どのような条件ならば大きな衛星が一つだけ形成可能かを調べるために、様々 な円盤ガスの粘性率、母体となる原始惑星系円盤の進化段階などを想定した場合において、 周惑星円盤内での衛星のType | 移動を計算した。本講演ではこの計算結果から、単一衛星 系の形成可能性について議論する。

There are several ways to make moons: collisions, captures, and in circumplanetary disks. Relatively large moons, such as Galileans and Titan, is thought to form in circumplanetary disks. We calculated the orbital evolution of moons due to type I migration in various circumplanetary disks and discuss formation of single-moon systems, which are known to be more difficult than multiple-moon or moonless systems.

長周期彗星の分布を用いたオールト雲形成仮説の検証

O樋口有理可¹、伊藤孝士²、Marc Fouchard³、Melaine Saillenfest³、Lucie Maquet³ ¹国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

2国立天文台天文シミュレーションプロジェクト

³パリ天文台

いわゆる長周期彗星(ここでは主に仮符号がC/で始まる天体とする)は軌道傾斜角の分布がほ ぼ等方的である。そのため、太陽系を球殻状に取り囲むように小天体が分布する構造が存在し、そ こから太陽系内部に定常的に落ちてくる小天体が長周期彗星として観測されていると考えられてい る。この球殻状の構造をオールトの雲と呼ぶ。オールトの雲を作る小天体の起源は黄道面近くに分 布していた微惑星であったと考えられている。それらの天体は銀河系からの摂動(銀河潮汐力)を 受け黄道面に集中的に分布していた軌道が大きく広がる球殻状分布へと進化したというのが現在 受け入れられているオールトの雲形成のシナリオである。銀河潮汐力の影響は非対称であり、小天 体の軌道分布をランダム化するわけではない。よってオールトの雲の分布は実は完全に等方的に はなり得ず、そこには初期にオールト雲天体が黄道面上に集中していた痕跡が残されていると考え られる。しかしながら我々が観測できるのは惑星領域まで落下してきた長周期彗星のみであり、遠 くオールトの雲に貯蔵されたままの小天体の軌道分布や雲全体の構造を直接に知ることはできな い。そこで私たちは長周期彗星の軌道要素分布に銀河潮汐力を作用させ、過去の軌道分布を推定 することでオールト雲彗星が元々は黄道面付近で誕生した微惑星であった証拠を探す。

この作業のためにまず必要なことは長周期彗星の原初軌道要素を知ることである。原初軌道とは オールトの雲から惑星領域に落ちて来たばかりの彗星が持つ軌道であり、例えば彗星が太陽から 250 auの距離に達した時点での軌道要素が原初軌道要素と称される。これらの彗星が惑星領域で 実際に観測される際、その軌道は既に原初軌道では無い。250 auの位置から発見された場所に至 る過程で受けた惑星摂動や己自身による非重力効果(ガスの噴出など)の影響により、彗星の軌道 は原初軌道から大きく変化する。長周期彗星の原初軌道要素は何人かの研究者・研究機関により 計算・提供されており、Krolikowska(2014)がよく参照される。今回私たちはKrolikowska (2014)が編 纂した彗星の原初軌道要素に対して銀河潮汐力を過去方向に作用させた軌道伝搬を行い、約180 個の彗星とそのクローンに関してほぼ1回帰前までの軌道を求めた(これを「前軌道」と呼ぶ)。この 前軌道の分布を使って長周期彗星をいくつかのグループに分類し、オールトの雲形成シナリオとの 比較を行うことで、オールト雲彗星の初期分布が黄道面付近に密集した形であったことの新たな証 拠を見出した。

詳細な惑星形成過程を考慮したシミュレーションによる スーパーアースの形成と大気量進化

○荻原 正博¹ 堀 安範^{1,2}
 1) 国立天文台 2) アストロバイオロジーセンター

ケプラー宇宙望遠鏡の観測結果等により、短周期スーパーアースの存在頻度は短周期ガス惑星 と比較して10倍以上高いと見積もられている。従って、短周期軌道に形成したスーパーアース は、原始惑星系円盤から大量のH/He大気を獲得しなかったことが示唆される。また、質量と半 径が測定されたスーパーアースについてはその組成が推定されているが、大量のH/He大気をま とっているスーパーアースが少ないことも指摘されている。

一方で現在の惑星形成理論モデルでは、短周期スーパーアースが大量の大気を獲得しなかった 理由を説明できない。この問題に対し、これまでにいくつかの解決策が提案されてきた。本研究 では、これまで検討されてこなかった効果の影響を検討する。具体的には、ペブル集積に伴う大 気の加熱が大気獲得を妨げる可能性、惑星同士の衝突時の大気散逸が大気量を減少させる可能 性、非完全合体を考慮することで衝突時の大気量が減少しやすくなる可能性、円盤中の質量降着 によって惑星への大気降着が制限される可能性などを考える。

これらの効果の影響を明らかにするために、本研究では詳細な惑星形成過程を導入した惑星形 成シミュレーションを実行した。本講演では、シミュレーション結果を元にスーパーアースの形 成と大気量の進化を議論する。

系外蒸発惑星のダストテイルの理論透過光スペクトル: 惑星組成の制約に向けて

○奥谷彩香¹,大野和正¹,平野照幸¹,奥住聡¹
□東京工業大学地球惑星科学系

惑星の内部組成は、惑星の形成・進化を反映していると考えられるため、これを明らかに することは非常に重要である。現在までの系外惑星の観測においては、惑星の密度や大気の 組成から内部組成を推定するという間接的なアプローチが行われてきた。一方、近年 Kepler 宇宙望遠鏡により、主系列星まわりに超短周期の岩石コアが解体しつつある惑星(解 体惑星)が3天体発見された(e.g., Sanchis-Ojeda et al. 2014)。これらの惑星は強い中心星 放射により岩石コアが蒸発しており、放出された鉱物が宇宙空間でダストとして凝縮し、彗 星のようなテイルを形成している。分光観測からダストテイルの組成を推定できれば、惑星 の岩石コアの組成に直接迫ることができる(e.g., Bodman et al. 2018)。

そこで本研究は、ダストテイルの分光観測から、惑星の内部組成の制約が可能であるか明 らかにすることを目標とする。そのために、(1)ダストテイルの分光観測を通じたダスト組 成の推定可能性 (2)蒸発岩石惑星が生成するダストの組成 を明らかにする必要がある。今 回は、(1)についての研究結果を発表する。まず、公開コード LX-MIE (Kitzmann & Heng 2017) を用いてダストの減光断面積を様々な鉱物に対して計算し、それを用いて各波長にお けるダストテイルの光度曲線を計算した。先行研究 (Bodman et al. 2018) ではダストテイ ルの空間構造が考慮されておらず、トランジット深さの時間変動(光度曲線)を調べることが できなかった。そこで本研究では、ダストテイルの空間構造を考慮することで、ダスト組成 ごとの光度曲線の計算も可能にした。具体的には、円柱形のダストテイルが円軌道を公転し ているとし、ダストの数密度はダストテイルの先端から方位角方向に指数関数的に減衰する と仮定した。本講演では解体惑星 K2-22b を想定し、Kepler 宇宙望遠鏡で観測された光度 曲線を再現するようにダストテイルの空間構造を決定した。鉱物の多くは、近赤外―中赤外 の波長で吸収ピークをもつため、赤外波長での分光観測はダストテイルの組成制約にむけて 有用である。そこで、多様な組成のダストテイルに対して、JWST や SPICA による将来観 測を想定した数 μm から 30μm の赤外波長帯における理論透過光スペクトルを求めた。そ の結果、20µm 付近の波長帯で、鉱物ごとに異なる透過光スペクトルを示すことが分かっ た。講演では、ダスト組成を観測的に識別可能であるかについても議論を行う予定である。

HD142527 に付随する原始惑星系円盤のガス・ダス ト質量比分布

○ 百瀬宗武¹, スンカンロウ¹, 花輪知幸², 武藤恭之³,
 塚越崇⁴, 片岡章雅⁴, 深川美里⁴, 西合一矢⁴, 芝井広⁵

¹茨城大学・理工学研究科 (理学野),²千葉大学・先進科学センター, ³工学院大学・教育推進機構,⁴自然科学研究機構・国立天文台,⁵大阪大学・理学研究科

HD 142527 に付随する原始惑星系円盤に対し ALMA を用いて行なった,99GHz ダスト連続波, および ¹³CO と C¹⁸O(J = 1 - 0) 輝線観測の結果を報告する。99GHz ダスト連続波は,以前得ら れていた 336GHz のダスト連続波同様,北側にピークを持つ強い非軸対称構造を示した。円盤が 99GHz ダスト連続波及び C¹⁸O(J = 1 - 0) に対して光学的に薄いことを活かし,330GHz 帯のデー タとも合わせて,ガスとダストの面密度分布,及びダスト放射率の周波数依存性を表すべき指数 βを求めた。ガスとダストの面密度比 (G/D) は方位角方向で変化し,具体的には G/D はダスト 面密度の -0.53 乗に比例する。また、 β は円盤北側で1程度であるのに対し、南側では 1.7 程度で あった。これらの結果は、北側のガス圧ピーク付近に比較的大きなダストが集積したと考えるこ とで,統一的に説明される。さらに、我々の閣下はガス面密度のピークに比べてより上流側にダ スト面密度ピークが存在していることを示唆した。ガス面密度ピークが高圧渦に対応している場 合、この結果は過去の高圧渦中でのダスト集積に関する理論的結果と整合的である。



図 1: (左)98.5GHz における HD142527 のダスト連続波イメージ,(中央)109.8GHz での C¹⁸O(J = 1 - 0)積分強度図,(右)各方位角範囲でのガスとダストの柱密度関係。 $\Sigma_{gas} \propto (\Sigma_{dust})^{0.47}$ でよくフィットされるが,これは G/D $\propto (\Sigma_{dust})^{-0.53}$ に対応する。

WSO-UV 計画 -海を持つ惑星探し-

〇亀田真吾¹, 村岡徹¹, 小玉貴則², 村上豪³, 成田憲保⁴, 生駒大洋⁵, 塩谷圭吾³, 寺田直樹⁵, 藤原均⁶

¹立教大,²ボルドー大,³ISAS/JAXA,⁴国立天文台,⁵東大,⁵東北大,⁶成蹊大

これまでに 4000 個に近いの系外惑星が確認されており, 巨大惑星だけでなく地球型惑星も 数多く見つかっている。太陽系のように複数の惑星を有する系もあり, 熱輻射量から表層に 海洋を持つ可能性を持つ惑星も複数発見されている. 今後は TESS (NASA), PLATO2.0(ESA)計 画などの全天サーベイ観測が行われ, 2020 年代前半のうちに地球型系外惑星の検出数は飛 躍的に増加する見込みである. 惑星の特徴づけを目的とした計画も進められており, 口径 6.5m のジェームスウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) や 30m 地上望遠鏡計画に加え, 系外惑星専 用の宇宙望遠鏡計画 (CHEOPS) も進行中である.

太陽系周辺では、太陽より温度の低い恒星(3000-4000 K)が8割を占めており、今後精力的 に系外惑星探索が行われる予定である.多くの低温度星では活動度の高さから紫外線強度が 激しく変動している.また黒体輻射を主とする総輻射量と紫外線輻射量の相関は弱く、低温 度星を主星とする惑星系のハビタブルゾーン(地球と総被輻射量が同程度になる領域)におい て大気の加熱源となる真空紫外線輻射量は地球の数10-数100倍に及ぶ.このような状況に もかかわらず、進行中の計画において真空紫外線領域は観測対象外となっている.ハッブル 宇宙望遠鏡で真空紫外領域の観測が可能であるが、想定寿命が過ぎており、後継機のJWSTで も紫外線は観測できない.そこで我々は、ロシアが計画中の1.7m紫外線宇宙望遠鏡WSO-UV に系外惑星観測用真空紫外線分光器を搭載することを検討している。

地球の熱圏大気モデルは、地球高層大気の観測結果に基づいて構築されている。本研究で はこの大気モデルを利用しつつ、低温度星で想定される輻射スペクトルを入力として高層大 気分布の推定を行い、WSO-UVによる検出可能性について検討した。本発表では、この結果 を報告する。

次世代赤外線天文衛星 SPICA: ミッション概要

○山村 一誠¹, 金田 英宏², 大坪 貴文¹, SPICA チーム
 ¹JAXA 宇宙科学研究所,²名古屋大学

SPICA は、「あかり」、Spitzer、Herschel の成功を受けて、日欧を軸として推進して いるスペース大型極低温冷却赤外線望遠鏡である。口径 2.5m の望遠鏡を温度 8K 以下まで 冷却し、高感度赤外線分光(+撮像)観測を行う。波長 12~350 マイクロメートルを、日本が 主導する中間赤外線観測装置(SMI)、欧州が主導する二つの遠赤外線観測装置(分光:SAFARI、 偏光撮像:B-BOP)でカバーする。今後約 10 年かけて設計・組立・試験を進め、2020 年台 後期に H-3 ロケットで打ち上げる想定である。観測運用は、ノミナル 3 年間(半年の調整・ 試験観測等含む)、目標 5 年間行う計画である。SPICA のカバーする中間・遠赤外線波長域 は、固体微粒子の熱的放射、芳香族炭化水素など有機物質の強いバンド放射、分子からの振 動回転繊維、電離領域・光解離領域の原子・イオンの微細構造輝線放射など、宇宙空間・天 体の物理・化学状態を判定しうるプローブが豊富にある。SPICA による観測は、宇宙の中 で物質や天体が生成され、現在のような多様な物質と生命を育む惑星を有する宇宙が作られ てきた過程の最重要部分の解明に大きな貢献をする。また、JWST, ALMA、TMT、Athena などの他波長の大型望遠鏡との強力なシナジーが期待される。

SPICA は、2018 年 5 月の ESA Cosmic Vision M5 一次選抜採択を受けて、現在日欧 で概念検討が進められている。ESA 側では Study Team による初期検討を基にミッション 定義審査(MDR)を経て、今年 7 月から複数の欧州企業による概念検討が始まっている。日本 側ではこれに呼応して、担当する極低温冷却システム(PLM)、冷凍機(MCS)、および SMIの 検討を進めている。

一方、科学面の検討を進めるため、ESA は Sciece Study Team を組織している。11名 のメンバーのうち日本から 5 名が参加している。これに対応する国内組織として宇宙研に SPICA 研究推進委員会を設置し、JAXA 内外の 12 名の委員が国内の科学研究検討を主導し ている。さらにその下に分野別のサイエンス検討班(のべ 71 名)を組織し、国内コミュニテ ィに広く SPICA 検討に参加していただく体制を整えた。惑星科学関係では、「太陽系・系 外惑星班」「惑星形成班」において、活発に議論が進んでいる(平野氏講演を参照)。

SPICAサイエンス検討会「太陽系・系外惑星班」の 活動報告

臼井寛裕¹,大坪貴文¹,水木敏幸¹,奥住聡²,奥谷彩香,²大野和正²,関根康人², ○平野照幸²,藤井友香²,笠羽康正³,川島由依⁴,癸生川陽子⁵,小林仁美⁶,

小林浩⁷, 佐川英夫⁸, 空華智子⁹, 高橋葵¹⁰, 前澤裕之¹¹, 松尾太郎¹², 薮田ひかる¹³, SPICA チーム

¹JAXA 宇宙科学研究所,²東京工業大学,³東北大学,⁴オランダ宇宙研究所,⁵横浜国 立大学,⁶京都虹光房,⁷名古屋大学,⁸京都産業大学,⁹国立天文台,¹⁰アストロバイオ ロジーセンター,¹¹大阪府立大学,¹²大阪大学,¹³広島大学

2020年代後半の打ち上げを目指す赤外線天文衛星 SPICA は、「宇宙が重元素と星間塵により多様 で豊かな世界になり、生命居住可能な惑星世界をもたらした過程を解明すること」を目的とした次 世代衛星ミッションである。SPICA は口径 2.5mの主鏡と 8K 以下にまで冷却した極低温度光学系 を特徴とし、波長 12 – 250 µm の中間~遠赤外線観測において革新的な観測感度を達成すること が期待されている。現在 SPICA は、欧州宇宙機関(ESA)が推進する宇宙プログラム「コスミッ クビジョン」の中期ミッション 5 号機(M5)の候補 3 つのうちの 1 つとして残っており、2021 年 に最終採択されることを目標に日欧が中心となって計画・開発が進められている。

我々は M5 への採択に向け,2019 年 5 月に SPICA で実現可能なサイエンスを国内の研究者で検討する「SPICA サイエンス検討会」を立ち上げ,観測対象ごとに 5 つの班に別れて SPICA によるサイエンスの検討を行ってきた。太陽系と太陽系外惑星に関連するサイエンスを主に扱う「太陽系・系外惑星」班では,約 20 名の班員が各観測天体ごとに多様なサイエンスを包括的に検討している。

太陽系のサイエンスでは,太陽系の形成や形成後の力学進化,化学進化(水の起源等)を解明す ることを目標として,1)巨大惑星・岩石惑星,2)衛星・小惑星,3)彗星,4)惑星間塵,5)巨大 惑星のトロヤ天体,の各天体を対象とした測光(モニタリング)・分光観測を多角的に検討してい る。系外惑星系に関するサイエンスでは,1)トランジット惑星,2)赤外線で明るい巨大惑星(ま たは褐色矮星),3)超短周期の解体惑星(中心星放射によって岩石コアが解体しつつある惑星), 4)残骸円盤,等を対象とした観測を検討しており,これらを通じて系外惑星の岩石コア・大気の 化学的特徴や,惑星軌道や自転等の物理的特徴を制限することで系外惑星系の多様性・形成進化 史を理解することを目標としている。いずれの観測においても,2020年代の他の大型ミッション (例:JWST)との差別化を図り,SPICAが持つ「20 µm 以遠の波長域での高感度」,「12 – 20 µm 帯での高分散分光」等の特徴を特に生かした観測の検討を進めている。また太陽系・系外惑星班 では,SPICA 観測によって太陽系と系外惑星系の類似点・相違点を探り,惑星の形成進化史に対 する包括的な理解を進めることも将来的な目標としている。

本講演では、この数カ月間の「SPICA サイエンス検討会」太陽系・系外惑星班の活動について報告し、SPICA で実現可能な太陽系・系外惑星に関する主なサイエンスを俯瞰する。また、特に検討の進んだ鍵となるサイエンスについては具体的な検討結果を報告する。

月惑星探査アーカイブサイエンス拠点に令和元年度 認定された会津大学宇宙情報科学研究センターについて ARC-Space as a Joint Usage / Research Center certified by MEXT, Archived Data Science Center for Lunar and Planetary Explorations

○出村裕英¹,石橋史朗¹,渡部潤一^{1,2},平田成¹,小川佳子¹,本田親寿¹,北里宏平¹,奥平恭子¹,嵩由芙子¹
 ○H. Demura¹, S. Ishibashi¹, J. Watanabe^{1,2}, N. Hirata¹, Y. Ogawa¹, C. Honda¹, K. Kitazato¹, K. Okudaira¹, Y. Daket¹
 ¹会津大学宇宙情報科学研究センター,²国立天文台

¹Aizu Research Center for Space Informatics (ARC-Space), ²National Astronomical Observatory of Japan

公立大学法人会津大学 宇宙情報科学研究センター[1]は、宇宙科学(惑星科学) と情報科学を融合した宇宙情報科学分野の研究を産学連携により促進させ、その成 果を学術コミュニティに提供することで、この分野の研究の活性化と技術開発の進 展に寄与することを目的としています。同大学の先端情報科学研究センター・宇宙 情報科学クラスターに兼務教員と事務局を加えて 2019 年度に発足しました。また、 本センターは、日本惑星科学会を母体の学協会とした「月惑星探査アーカイブサイ エンス拠点」として、文部科学省の共同利用・共同研究拠点認定[2]を受けました。 この認定期間は 2019 年度(令和元年度)から6年間です。

月惑星探査アーカイブサイエンスとは、過去に実施された月惑星探査や観測的研 究で得られ蓄積されているデータを活用し、最新の知識と解析技術と組み合わせる ことで、新たな知見を得る研究の形態を指します。

本拠点の目的は、アーカイブサイエンスという軸で惑星科学と情報科学の両コミ ュニティを架橋し、JAXA や ICT 企業と連携した公募事業を推進して新たな価値を 付加したデータやソフトウエアを開発提供し、太陽系天体の起源と進化の解明に寄 与することです。

本拠点の特色は大きく2つあります。共同利用機関としてデータ整備やソフトウ エア開発といったアーカイブサイエンスを促進するICT サービスを研究者コミュニ ティに提供すること。また、惑星科学コミュニティが持つニーズやシーズを共同研 究の形で萌芽レベルから拾い上げ、実用レベルまで段階を追って産業界と連携しな がら発掘育成する公募事業制度です。今年度の公募は9月中旬より開始予定で、萌 芽研究と実用研究の2カテゴリで提案を受け付けます。本講演ではその詳細を説明 いたします。多数のご応募をお待ちしております。

なお、これまで惑星科学会の月惑星探査育英会が神戸大学 CPS のサポートで実施 してきた探査データ解析実習会や、宇宙科学のニーズと情報科学のシーズをアレン ジする場としての宇宙ハッカソンも、母体である惑星科学会とともに本拠点の事業 として実施を継続します。

[1] 会津大学・宇宙情報科学研究センター https://arcspace.jp/index.html

[2] 2019 年度からの共同利用・共同研究拠点の認定について(公立大学、私立大学) http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1410089.htm

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam による 木星 L5 トロヤ群小惑星のサイズ分布測定

O上畑琴美¹、寺居剛²、大槻圭史¹、吉田二美³ ¹神戸大学、²国立天文台、³千葉工業大学

巨大惑星の軌道進化モデルとして、いくつかの理論モデルが考えられている。しかし、ま だ不明瞭な点もあり、観測の観点から惑星移動に関して議論する必要性がある。また、太陽 系小天体のサイズ分布の比較を通して、小惑星の起源や経験した衝突進化について推測する ことで、太陽系全体の進化について議論することができると考えられる。そこで、本研究で は、2016年1月9日(HST)にすばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam(HSC)を用いて、木星 L5トロヤ群小惑星のサーベイ観測を行い、サイズ分布を導出した。

本観測では、見かけ等級 m \leq 26 mag までの 185 天体を検出した。また、観測バイアスを 考慮して、本解析では日心距離 r \leq 5.5 au、絶対等級 H \leq 17.08 mag とし、キロメートル サイズのL5 トロヤ群小惑星を 104 個抽出した。これから得られたサイズ分布の傾きは、 α = 0.37 ± 0.01 となった。この値は、同じく HSC を用いて得られた先行研究である、木星 L4 トロヤ群小惑星 (Yoshida & Terai 2017)の値とほぼ一致した。このことから、両者は 同様の衝突進化を経験したと考えられる。



参考文献

Fumi Yoshida & Tsuyoshi Terai., 2017. J.154,71-82
Fumi Yoshida et al., 2019. Planetary and Space Science, vol.169, p.78-85

小惑星探査画像の画素単位 DB による解析と小天体地理 情報システム AiGIS と連携した結果の可視化 Pixel-oriented image DB for small body missions and visualization of analysis with AiGIS

○平田 成¹, 北里 宏平¹, 出村 裕英¹, 大嶽 久志², 佐藤 広幸², 古川 静也¹ ¹会津大学,²宇宙航空研究開発機構

近年、はやぶさ、はやぶさ2、火星衛星探査計画 MMX など、不規則形状を持つ小天体を対 象にした探査が実施あるいは計画されている。これらの探査によって取得された観測データ を有効に活用するためには、観測時刻、観測条件、探査機の位置、姿勢や対象天体表面の観 測覆域などのメタデータを記録し、データベース(DB)として保存しておく必要がある。小天 体探査データを対象とした DB を設計する上でしばしば問題になるのが、特に画像データに ついて天体全体が視野に入るような撮像が多く行われている点と、対象天体の形状が不規則 なため一般的な地理座標の適用がしにくい場合がある点である。これらの問題により、例え ば画像のメタデータとしてよく採用される画像四隅の地理情報だけでは対象天体表面の観測 覆域を適切に表現できないということが起きる。

これを解決するための一つの方策として、画像の画素ごとに天体表面の地理情報を付与する というアイデアがある。また、地理情報として、前記の問題を含むものの簡便な地理座標系 を用いるか、対象天体の形状モデルを基盤として形状モデルのポリゴンに対する ID で換え ることも可能である。単に画像ファイルのメタデータとして全画素に対して地理情報を付与 するのはデータ量を考えると過剰ではあるものの、画像の枠を超えて、画素値一つ一つを個 別のデータとして取り扱える道を開くことになる。なお、画像ファイルのメタデータとして は別途間引きしたものを準備することも考えられる。

本稿では、観測データを画素単位に分割してメタデータを付与した DB 化を行い、観測条件 や対象地理領域など任意の条件で検索し、統計解析が可能なシステムを紹介する。現在、は やぶさ搭載マルチバンドカメラ AMICA の画像データ(較正済み画像データは巽瑛理氏より 提供を受けた)を用いた DB が構築済みである。また、DB と小天体地理情報システム AiGIS と連携させることで解析結果を簡単に可視化する試みについても述べる。

小惑星セレスへのアンモニア氷の供給からみるパラメータ制約

○ 奈良悠冬¹, 奥住聡¹, 黒川宏之²

1東京工業大学,2東京工業大学地球生命研究所

小惑星セレスは、太陽系最大の小惑星であり、小惑星帯全体の質量のおよそ1/3を占め る天体である。探査機 Dawn の赤外スペクトル観測により、セレス全球にアンモニアを含 んだ層状ケイ酸塩の存在が示された(De Sanctis et al. 2015; Ammanito et al. 2016)。こ の観測事実は、かつてセレスが分化を経験した際に、その表面にアンモニアが存在してい たことを示唆する。このアンモニアは氷として供給されたと考えられているが、現在のセ レスの表面温度は、アンモニア氷の昇華温度を上回るため、アンモニア氷は安定に存在す ることができない。セレスへのアンモニア氷の供給過程として、De Sanctis et al.(2015) は、2つの可能性について言及している。1つは、セレスは原始太陽系円盤外側の低温領 域で形成されたのちに、現在の位置まで移動してきたというものである。もう1つは、セ レスは現在の軌道付近で形成されたが、アンモニア氷が安定な遠方領域から移動してき たペブルの集積によってアンモニア氷がセレスに供給されたというものである。

本研究では、以上2つの可能性のうち後者を検証することを目的とし、原始太陽系星雲 内におけるセレスへのアンモニア氷供給量を計算した。まず、標準粘性降着モデルを用い て、原始太陽系星雲内の温度分布を計算し、現在のセレスの軌道における円盤温度がアン モニア氷の昇華温度を下回る時刻を求めた。また、アンモニア氷を含むダストの合体成長 物 (ペブル)の成長および円盤内移動を数値計算し、現在のセレスの軌道における含アン モニア氷ペブルの質量フラックスを計算した。さらに、原始セレスが現在の軌道で形成さ れたと仮定し、ペブル集積の理論公式 (Visser & Ormel 2016)を用いてセレス表面に堆積 する含アンモニア氷の層の厚みを計算した。現在のセレス表面にみられるクレーター起伏 から、かつて存在した含アンモニア氷堆積層の厚みは~10 km 以上であったと考えられ る。この厚みを説明しうるような原始太陽系円盤のパラメータ範囲を模索した。

計算の結果、含アンモニア氷の堆積層の厚みは、 原始太陽系円盤の初期質量 M_{disk} と、円盤の乱流の強さを示す無次元量 α に強く依存することがわかった。円盤質量は、 $M_{\text{disk}} \lesssim 10^{-2} M_{\odot}$ 程度に制約され、 $M_{\text{disk}} \approx 10^{-2} M_{\odot}$ の場合、 $\alpha \gtrsim 10^{-3}$ という制約が得ら れた。なお、より軽い円盤では、より強い乱流が必要であることがわかった。また、 M_{disk} および α が特定の範囲にある場合は、大型の小惑星のみが多量の氷を捕獲することがわ かった。この結果は、アンモニアを含んだ層状ケイ酸塩を表面に持ちうる小惑星は、セレ スのような大型のものに限られることを予言する。さらに、原始地球への水氷ペブルの集 積 (e.g. Sato et al. 2016) も合わせて計算したところ、セレス表面のアンモニアを含ん だ層状ケイ酸塩の存在と地球の低い水含有量を同時に説明できる円盤パラメータの範囲 が存在することがわかった。

地球接近天体2012 TC4母天体における 衝突イベント時期の推定

○浦川 聖太郎¹、大澤 亮²、酒向 重行²、奥村 真一郎¹、櫻井 友里³、高橋 隼⁴、
 今村 和義⁵、内藤 博之⁶、渡辺 文健⁶、永吉 竜馬⁶、村上 恭彦⁶、岡崎 良⁷、
 関口 朋彦⁷、石黒 正晃⁸、道上 達広⁹、吉川 真¹⁰

¹日本スペースガード協会、²東京大学、³岡山大学、⁴兵庫県立大学、⁵阿南市立科学センター、⁶なよろ市立天文台、⁷北海道教育大学、⁸ソウル大学、⁹近畿大学、¹⁰JAXA

太陽系小天体、とりわけ小惑星の地球衝突問題に対する取り組みを Planetary Defense あるいは スペースガードと言う。スペースガードでは、サーベイ観測により地球に近づく小惑星を発見す ることに加えて、個々の小惑星の物理素性を解明することも重要である。2012 TC4 は 2017 年 10 月に地球に約5万kmまで接近した小惑星である。昨年の秋季講演会では、東京大学木曽観測所 1.05m 望遠鏡の Tomo-e Gozen カメラ、美星スペースガードセンター 1.0m 望遠鏡、兵庫県立大学 西はりま天文台 2.0m なゆた望遠鏡、阿南市立科学センター 1.13m 望遠鏡、名寄市立天文台 0.4m 望遠鏡を用いた観測から、2012 TC4 が 8.47 分の自転周期と 12.25 分の歳差周期を持つタンブリン グ運動(自由歳差運動)をしている X タイプの一枚岩小惑星であることを報告した。またその三 軸長が 6.2 × 8.0 × 14.9 m(モデル1) あるいは 3.3 × 8.0 × 14.3 m(モデル2) であることも報告 した。本年は、タンブリング運動の発生原因となったと思われる母天体での衝突イベント時期の 推定方法と、その結果について報告する。タンブリング運動とは、小惑星の自転軸と全回転角運 動量ベクトルが一致せず、首振り運動のような回転をしている状態である。この首振り運動は、小 惑星内部の隙間や岩石のクラックなどに起因する歪みによりエネルギーを失い(内部エネルギー 散逸)、やがて自転軸と全回転角運動量ベクトルが一致する安定した回転状態に落ち着く。この落 ち着くまでの時間をダンピングタイムと呼ぶ。小惑星がタンブリング運動をしているということ は、その小惑星はダンピングタイムを経過していないことを示す。言い換えれば、タンブリング 運動をしている小惑星は、衝突イベントから長い時間を経過していない若い表面を持つ可能性が ある。本研究では、ライトカーブ観測から 2012 TC4 の三軸長や自転軸と全回転角運動量ベクト ルがなす角度(章動角)が得られたために、弾性体の力学に基づきダンピングタイムを比較的正 確に推定することができた。その結果、2012 TC4 が現在の回転状態になるためには、衝突イベン トから長くとも 3.1 × 10⁵ 年 (モデル 1) あるいは 3.2 × 10⁵ 年 (モデル 2) 程度しか経過していな いことが分かった。一方、ダンピングタイムは 1.5 × 10⁷ 年 (モデル 1) あるいは 3.8 × 10⁷ 年 (モ デル2)程度であり、回転が落ち着く前に10mサイズのNEOの軌道力学的な寿命である数百万年 (Morbideli et al., 2012) を迎えると推定された (Urakawa et al., 2019)。

衝突閃光の実験的研究:真空度と発光メカニズムの関係

〇布施綾太¹, 阿部新助¹, 柳澤正久², 福原哲哉³, 長谷川直⁴ ¹日本大学, ²電気通信大学, ³立教大学, ⁴JAXA/ISAS

[背景] cm サイズの流星体(メテオロイド)が月に衝突すると,月面衝突閃光(Lunar Impact Flash: LIF)と呼ばれる短時間の発光現象が地上の望遠鏡で観測される. LIF 観測の統計評価 からは未解明となっている地球月周辺のメテオロイドのサイズ頻度分布を明らかにすること ができる. LIF の発光メカニズムや発光効率(衝突時の運動エネルギーと発光エネルギーの変 換効率)の理解はメテオロイドの正確なサイズを導出する上で不可欠であるが,未だ十分な 理解が進んでおらず,実験と観測の結果を外挿した現状の発光効率モデルではそれらに大き なギャップがある^[1]. さらに,その実験結果は真空度の情報が不明確で,衝突体の蒸発が考慮されていないという問題点がある(LIF 現象では衝突体は完全に蒸発し,発光効率に寄与す る可能性も指摘されている).

[目的・手法] 本研究の目的は「衝突体の蒸発が発光に寄与するか」「真空度の変化が発光 に寄与するか」を明らかにすることである.実験はポリカーボネート球(実験室速度でほぼ 完全に蒸発する)を石英砂に 6.5km/s で衝突させ,真空度のみを 1~1100Pa の範囲で変化させ ることで,先行研究[1]では考慮されていなかった衝突体の蒸発を再現した上で,真空度と発 光効率の関係を調査した.

[結果] 超高速分光観測(時間分解能 200ns)の結果,発光の主要素は高温加熱されたイジェク タからの黒体放射の発光と,蒸発した蒸気雲からの分子バンド・輝線の発光で構成されてい ることが分かった. さらに,発光継続時間が長い(1 秒程度)黒体放射の発光は真空度の影響 を受けず,発光継続時間が短い(数 µs 程度)蒸気雲からの発光は残存大気と蒸気雲内に含まれ る微粒子との衝突(アブレーション)により真空度の影響を受けることから,発光初期の数 µs 間の発光効率(10⁻¹¹ オーダー)は真空度に依存し,発光の主となる ms~s 間の発光効率(10³ オ ーダー)は真空度に依存しない結果となった.

[結論] 本研究により「蒸気雲(分子バンド・輝線)からの発光は黒体放射の発光に比べ無視 できるほど小さく全体の発光には寄与しない」「蒸気雲からの発光は真空度に依存するが, 黒体放射の発光は真空度に依存しない(つまり全体の発光効率も真空度の影響を受けない)」 ことが明らかとなった.また,典型的な LIF は発光継続時間が数十 ms であることから,そ の発光の主要素は黒体放射だと考えられ,実験室で達成可能な真空度(実験:最高 10⁻²Pa,月 面:10⁻⁹Pa)でも十分に LIF の実験的研究が可能であることが示された.さらに本発表では,衝 突計算コードの iSALE や輻射加熱計算コードの SPRADIAN による数値計算の結果と,衝突 実験の結果との比較・議論も行う.

[1] W. R. Swift et al., In: Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies, 125-141, 2011.

アーク加熱風洞を応用した流星体の機械的強度と熱伝導率が

流星アブレーションへ与える影響評価

○大木紘介¹,小川巧覽¹,宮下敦希¹,阿部新助¹, 下田孝幸²,長井遵正²,吉田哲生²

¹日本大学, ²JAXA/ISAS

流星とは流星体(メテオロイド)が惑星大気突入する際に生じるアブレーションや発光 などの一連の物理現象のことである.これをステレオ撮像や分光観測することで流星体の 軌道や組成情報を得ることができ、母天体とされる小惑星や彗星などを地球上から間接的 に探査することが可能となる.

流星観測や落下後の隕石から流星体の空隙率をはじめとした内部構造や強度を推定する 研究が実施されている.これらを調査することは将来の小惑星ミッションやサンプル採 収,地球衝突危険性のある天体への対策にとっても有用な情報となりうる.

例えば 2000 年にカナダへ落下した Tagish Lake 隕石は,35~57%と高い空隙率を有す ること,0.3~1.3MPa と低強度の流星体であることが落下・回収された破片やモデルから 推定されている^{[1] [2]}.また,観測から推定された流星体の強度と回収された隕石における 強度には約 10~100 倍の差が生じている^[3].流星体の強度は動圧から算出しているが,強 度には流星体の内部構造による影響も考えられ,動圧のみによってそれを推定することは 十分とは言えない.

そこで本研究では、異なる密度の流星体の流星発光を調査するために、材料組成と空隙 率をパラメータとして円柱形状の流星体(以下、供試体)を作製し、JAXA/ISAS 所有のアー ク加熱風洞(惑星大気突入環境模擬装置)を用いて流星発光現象を再現する.その際、近紫 外~可視光の発光スペクトルの計測を実施した.また、供試体の引張強度を圧裂引張試験 から算出、さらに各供試体における熱伝導率については、定常(熱流)法を用いて計測し た.ここでは流星アブレーションとそれら物理量の関係性を報告する.

[1]Peter G. Brown, et al., An entry model for the Tagish Lake fireball using sesmic, satellite and infrasound records, Meteoritics & Planetary Science 37, pp.661-675, 2002
[2] Alan R. HILDEBRAND, et al., The fall and recovery of the Tagish Lake meteorite, 2006

[3]Olga POPOVA, et al., Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids, Meteoritics & Planetary Science 46, Nr 10, pp.1525-1550, 2011

2018 年ふたご座流星群に伴う月面衝突閃光の 低分散スペクトル II

Low-dispersion spectra of lunar impact flashes in 2018 Geminids II

〇柳澤 正久¹、内田 有紀¹、栗原 誠弥¹、阿部 新助²、布施 綾太²、

小野寺 圭祐^{3,4}、山田 竜平⁵

Yanagisawa, M.¹, Uchida, Y.¹, Kurihara, S.¹, Abe, S.², Fuse, R.², Onodera, K.^{3,4}, and Yamada, R.⁵ ¹電気通信大学、²日本大学理工学部、³総合研究大学院大学、

4宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構、5会津大学コンピュータ理工学部

太陽系内の衝突では、実験室では再現の難しい 10 km/s を越える速度で起こるものが多い。 このような衝突では、これ以下の速度では起こらないシリケイトや鉄等の溶融、蒸発、プラ ズマ化が起こる。このような過程を伴う高速度衝突の理解は惑星科学にとって重要な課題で あるが、実際にどのような現象が起こるのかはよく分かっていない。月面衝突閃光の観測か らこの問題にアプローチすることができる。

月面衝突閃光の発生頻度や明るさ、その時間変化に関しては幾つかの研究結果が報告され ている。しかしスペクトルに関する報告はわずかである。我々は、月震研究のための衝突閃 光観測を試みる SAKURA 日仏合同観測プロジェクトの一環として、電気通信大学(東京都調布 市)から、可視光簡易スペクトルカメラで、ふたご座流星群に伴う月面衝突閃光の観測を行 った。使用した望遠鏡は、口径 450 mm(焦点距離 2015 mm)のニュートン式反射望遠鏡および、 口径 280 mm(実効焦点距離 920 mm)のシュミットカセグレン式反射望遠鏡である。

12月15日晩(JST)に13個の閃光が電気通信大学から検出された。これらは台湾・鹿林天 文台や日本大学からも同時検出された。スペクトルの一例を図1に示す。ほとんどの閃光は 約3000Kの黒体放射スペクトルでよく近似できる。何故3000Kなのかについて議論する。



図 1:月面衝突閃光のスペクトル. 17:29:33 (JST) に月の北緯 30°西 経 57°で生きた閃光の1フレーム 目 (露光時間 16 ミリ秒).縦軸は地 球大気上端で観測した場合の分光 フラックスである.エラーバーは カウントノイズのみを示す.400 -800 nm 以外では信頼性が落ちる.

67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星の 密度分布構造の推定

○金丸仁明¹・佐々木晶¹・Mark Wieczorek²

¹大阪大学・²ニース天文台

小惑星や彗星の微小重力環境下では、衝突現象に伴う振動・ダストの静電浮遊・氷の昇華といった 現象が天体表層での物質移動を駆動する要因となる。その結果、細かな砂礫が堆積してできた平坦な 地形 (smooth terrain) がいくつかの小天体で発見されている。Kanamaru et al. (2019) では、 smooth terrain が天体表面の等ポテンシャル面に沿って分布しているという仮定のもとで、小惑星 Itokawaの密度分布構造の推定を試みた。今回は、本手法を彗星 67P/Churyumov-Gerasimenko に対 して適用した結果を報告する。

彗星 67P には 3 つの smooth terrain が見られる(Thomas et al., 2015)。そのうち Hapi と呼ばれる 地域は、頭と胴体の間の標高の低い地域に分布している。Itokawaの MUSES-C 地域と同様に、周囲 から移動してきた細かな粒子が堆積してできた地形であると考えられる。周囲よりも平坦な領域を 67Pの形状モデルから抽出した。

67Pの形状を頭・首・胴体と3つに分け(図 a)、それぞれに異なる密度を与えながら重力ポテンシ ャル(標高)の分布を計算した。Hapi地域と等ポテンシャル面との乖離度を標高の標準偏差 σ_hによ って評価した(図 b)。

図(b)の白十字は、67P 全球において密度が一定である場合の評価指標 G_hの値を示している。赤い 点は、今回考慮した密度範囲の中で σ_h が最小値をとるような密度分布を示している。頭の密度が 67P の平均密度 490 kg/m³と等しい場合、すなわち頭と胴体の密度差が小さい場合に、Hapi 地域が等ポ テンシャル面に近づくことがわかった。一方で、評価指標 σ_hは首の密度にはそれほど依存しない。

本研究で推定された密度分布の均質性は、探査機 Rosetta の重力測定の結果とも整合的である (Pätzold et al. 2016)。2 つの天体が低速度で衝突・合体したような形状(contact binary)をもち、か つ頭と胴体に密度差のない彗星核を形成する過程は、Jutzi & Benz (2017)などが提案している。細長

> (a) (b) σh [m] 1000 120 800 100 Neck Neck density [kg/m³] 80 600 Uniform Body density 60 Head 400 40 200 Hapi region 20 0 800 0 200 400 600 1000

> > Head density [kg/m³]







北大 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた分裂彗星核 P/2016 BA14 と 252P/LINEAR の 可視光測光・分光・偏光観測

○山形稜¹,関ロ朋彦¹,黒田大介²,石黒正晃³,高木聖子⁴,内藤博之⁵,岡崎良¹,高橋昂希¹ ¹北海道教育大学,²京都大学,³ソウル大学,⁴北海道大学,⁵なよろ市立天文台

不活動彗星核 P/2016 BA14 とコマを持つ活動彗 星 252P/LINEAR は軌道が非常に似ていることから、 もともと同一の天体であることが示唆されている (Jian-Yang, 2017)。我々は北海道大学 1.6m ピリ カ望遠鏡(北海道名寄市)を用いて、この 2 つの天体 を測光・分光・偏光観測を行った。

P/2016 BA14 の解析の結果、測光観測から二色図を 作成すると、D 型小惑星より少し赤く、一般的な氷天体 よりも青いという結果を得た(図 1)。また、V バンドでの 絶対等級は Hv=17.60±0.01 等であり、アルベドを 0.03 と仮定すると、直径 2.32±0.02 kmである。しかし、 実際には彗星活動を行っているため、本来の核は、今 回の値よりも絶対等級は暗く、サイズが小さいことも考 えられる。分光観測(0.435~0.82µm)から、ガス輝線が 見られなかったことから、彗星活動はとても小さいこと が分かる。スペクトルは、M4AST (DeMeo et al, 2009) からD型小惑星に一番近いが、少し赤い(図2)。今回 取得した分光結果に、Nasa-Database の近赤外(0.82 ~2.43µm)の分光結果をつなげ、隕石のスペクトルと比 較したところ、タギシュレイク隕石と似ていることが判明 した(図 3)。偏光観測から、偏光度は高く、B型小惑星 であるベンヌ(Cellino. 2018)と似ている(図 4)。

252Pの解析の結果、測光観測からBフィルター が一番明るいことから、CN、C³ラジカルの輝線が あり、比較的活動度の高い彗星であることが言え る。偏光観測から、BA14よりも偏光度が低い値を 示していた(図4)。



図 1:2016 BA14 と 252P の軌道図



図 1: P/2016 BA14 の二色図 (B-V vs V-Rc)







図 4: P/2016 BA14 と 252P/LINEAR の偏光度

木星氷衛星探査衛星 JUICE, 日本からの貢献 ~プロジェクトの概況、現状、そして展望~

Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE), with the contribution from Japan ~Overview, recent status, and perspectives~

○笠羽康正¹,関根康人²,塩谷圭吾³,浅村和史³,笠井康子⁴,春山純一³,松岡彩子³
 ¹東北大・理²東工大・ELSI³宇宙研,JAXA

Yasumasa Kasaba¹, Yasuhito Sekine², Keigo Enya³, Kazushi Asamura³, Yasuko Kasai³, Junichi Haruyama³, Ayako Matsuoka³ ¹Tohoku Univ., ²Tokyo Inst. Tech, ³ISAS/JAXA

JUpiter ICy moons Explorer (JUICE) is ESA's first L-class mission and will perform detailed observations of Jupiter and three of its large icy moons, Europa, Ganymede, and Callisto, suing the eleven onboard instruments. Japan is a junior partner of the JUICE mission and is participating into the development of four instruments (PEP, RPWI, GALA, and SWI) and into the science teams of six instruments (the above four plus JANUS and J-MAG).

This paper will present the overview, recent status, and perspectives of this unique project and the contribution from Japan. Toward the planned launch year 2022, JUICE is going to provide a unique and first opportunity for Japanese planetary science community to be involved in Outer Solar System exploration. We will also provide the links to the on-going and planned outer planetary missions in the international level.

JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer)は、木星系磁気圏、大気、氷衛星フライバイ 観測および氷衛星ガニメデの周回観測が目的である。現在、2022 年の打上に向 け急速に開発中で、2030 年に木星系到着、2032 年にガニメデ周回軌道投入、 約8か月後の2033 年6 月に終了する。

本講演は、この欧州最大の惑星探査ミッションへの日本からの貢献について、プ ロジェクトの概況、現状、そして展望を報告する。接続する進行中・計画中の国 際的外惑星探査の状況も述べる。

潮汐変形と位相の遅れを考慮した Ganymede の強制秤動

○小島晋一郎1,木村淳1,鎌田俊一2

1. 大阪大学大学院 理学研究科, 2. 北海道大学大学院 理学研究院

木星の衛星 Ganymede は、過去の探査機による磁気探査や宇宙望遠鏡を用いたオーロラ観測と いった電磁気的アプローチを通して、表面を覆う氷殻の下に電解質を含む全球的な液体水の層(以 後、内部海)の存在が示唆されている.しかしながら、Ganymede 自身が金属核起源の磁場を持 つことなどから、内部海の存否には議論の余地が残る.

そこで本研究では、従来のアプローチとは異なる独立した手段として、潮汐応答を用いた Ganymede 内部海の存否に関する考察を行う. Ganymede は潮汐力により形状変化(潮汐変形) や自転の変化(回転変動)が生じ、これらの大きさや位相は Ganymede の内部構造に依存する. このため、潮汐変形や回転変動から Ganymede の内部の情報を得ることができる.本研究では潮 汐応答のうち秤動(自転速度変動)に関するモデル計算を行った. Ganymede の秤動は、2022 年 打ち上げ予定の JUICE (JUpiter ICy moons Explorer) 探査機によって初めて実測される予定であ り、秤動と本研究のモデル計算との比較を通して、Ganymede 内部、とくに地下海の存否や氷殻 厚を推定することが可能になるかもしれない.

Ganymede の秤動に関する従来の研究(Van Hoolst et al., 2013)では、完全弾性体としての潮 汐変形と秤動の相互作用が考察され、潮汐変形は秤動の振幅を抑制することが示されている.し かしながら、ガニメデの外層を覆う氷は、マクスウェル時間のスケールにおいて粘弾性的に振舞 う.そこで本研究では、Ganymedeを粘弾性体として、粘弾性による遅延時間を考慮した秤動と 潮汐変形の相互作用に関するモデル計算を行った.モデル計算の変数は、氷殻の厚さ、密度、剛

性率,粘性率,海の密度,海下層の高圧氷層の 密度と粘性率である.これらの組み合わせ総数 50万ケースに対する秤動を計算した(図).

秤動の振幅は様々な要因で変化し、例えば厚 い内部海があり氷殻が薄い場合は振幅が大き い.特に振幅が 60 mを超える場合は、氷殻厚 は 20 km 以下の可能性がある.一方で振幅が 60 m 以下の場合は、氷殻厚を制限することは難し い.また、海が存在しない場合の秤動の振幅は、 海が存在するときのそれと同程度になる可能 性があることも分かった.講演ではこのほか、 多様な変数に対する秤動への影響を包括的に 議論する.



動の振幅と氷殻厚との関係.海無しの場合に おける振幅は,左から氷殻密度 1200,1100, 1000,900,800 kg/m³の仮定に対応する.

ALMAアーカイブデータを用いた イオの大気供給源の推定

○鈴木達也¹、平原靖大¹、古賀亮一²、坂野井健² ¹名古屋大学,²東北大学

木星の衛星イオには火山活動が存在し、火山噴出物は霜として全球的に地表面に 堆積している。イオの大気は、地表気圧が数十~数nbarほどで、SO₂が主として構成 している。この大気は火山からの直接の供給のほか、堆積している霜がその地点の 地表温度に応じて昇華することで持続的に供給されている。これらの相対的な寄与 度というのは未だ不明である。先行研究では、紫外領域や赤外領域でのスペクトル 観測によって、大気の不均質な分布や個々の供給源などが議論されてきた [e.g. Spencer *et al.*, 2005; Geissler *et al.*, 2007; Tsang *et al*, 2016]。

本研究では、電波望遠鏡 ALMAによって観測された、イオが木星の影へ突入する 時期・影から脱出する時期の2つのデータを解析した。解析においては、イオの地表 を十分に空間分解しているSO₂輝線強度のマップや時間変動の様子が得られ、また 実際にSO₂を供給していると思われる火山の様子も確認された。

霜の昇華量は地表温度に依存するため、日食時には大気量が変動することになる。日照量変化に起因する柱密度の変動成分が昇華に由来し、起因しない成分を火 山由来のものとして考え、考察を行った。



白円は観測ビームサイズを示している。



ると、因下でホビビ輝緑のスペクトル図 青線はディスク平均のスペクトルを、 赤線は観測ビームサイズで平均した火山周辺の スペクトルを示している。 青線のは左右非対称であり、火山由来と昇華由来 の2つのガウシアン成分から成り立っている と考えられる。

小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的研究

O大村知美¹, 滝沢真太¹, 桂木洋光¹ ¹名古屋大学大学院環境学研究科

はじめに:クレーターの内壁など天体表面の傾斜地形は、微小隕石の衝突による再表面化や、 振動による流動化で緩和すると考えられている.本研究ではこのうち特に微小隕石衝突によ る地形緩和に着目した.斜面の傾斜角と衝突条件が緩和の効率に及ぼす影響を調べることを 目的に、[1]で行われた傾斜粉体層への低速度衝突実験で得られたデータを用いて、緩和の指 標として衝突前後での重心の勾配方向への移動を調べた.

実験手法: 直方体の容器に直径 0.1-0.3 mm の豊浦珪砂を充填し,任意の角度 θ (0°≦θ≦ 34°)傾斜させたものを標的とした.ばね銃を用いて,標的表面に対して衝突角 Φ (10°≦Φ≦ 170°)で弾丸を発射した.弾丸には直径 6 mmの,質量が 0.12 g, 0.25 g, 0.4 g のものを用いた. 衝突速度は 7-97 m/s で実験を行った.クレーター形成前後の表面の三次元形状をレーザー 変位計で測定した.

解析手法:弾丸軌道を含む xz 平面内における,エジェクタ堆積及びクレーターの崩壊の非 等方性による重心移動を考えた. θ=0°, Φ=90°の実験で得られたプロファイルをクレータ ースケーリング則に従って拡大縮小し,凹部分のみを抜き出したものを基準面として,基準 面より高い部分は正の,低い部分は負の質量を持つとして重心を求め,衝突点からの重心移 動距離 Δx を求めた.エジェクタ堆積及びクレータ

一孔の崩壊が衝突点に対し等方的に起こるような場合は Δx=0 となる.

結果: Φ=90°の場合の, クレーター短径で規格化 した重心移動距離と傾斜角の関係を図に示す. 重心 の移動距離は傾斜角 θ の増加と共に増加した. 本研 究で得られた, 規格化した移動距離の tanθ 依存性 はエジェクタの非等方的な堆積の効果のみを考えた モデル [2]とは異なり非線形性を示した. また tanθ =0.36 (θ=20°)の実験結果に着目すると, あるクレ ーターサイズを境に, クレーター内部の崩壊等によ って重心移動が効率的になっていることが示唆され た. 発表では衝突角度の影響についても報告する. References: [1]Takizawa & Katsuragi (2020), Icarus 335 113409. [2]Soderblom (1970), JGR, 75, 2655.



(上)解析に用いた要素.(下)重心移動距離と 傾斜角の関係.

多孔質氷天体を模擬した雪のクレーター形成実験:

衝突溶融と衝突残留熱に関する研究

笹井遥、宮野加菜、保井みなみ、荒川政彦(神戸大学大学院理学研究科)

はじめに:太陽系に存在する氷衛星等の氷天体は主成分が H₂O 氷であり,一部は高い 空隙率を持つ.これらの天体は氷微惑星が互いに広い衝突速度範囲で衝突して形成した と考えられている.衝突が起きると,衝突点とその周囲は標的物質の圧縮により摩擦熱 が発生し,衝突後も衝突残留熱により一定時間,温度の高い状態が続く.そして、この 摩擦熱でクレーター底部に衝突溶融層などが形成されると,長期間に渡って熱変成を維 持する熱源となる.衝突溶融層の範囲は、衝突速度や標的天体の物性により変化するが, 高空隙率かつ融点が低い多孔質氷では容易に衝突溶融が起きるため,より広範囲に衝突 溶融層が形成されると考えられる.そこで本研究では,多孔質氷を用いたクレーター形 成実験を行い,衝突残留熱を計測し,衝突溶融層の形成条件と衝突溶融がクレーターサ イズやその形状に与える影響を調べた.

実験方法:多孔質氷天体を模擬した雪標的は,液体窒素に水を噴霧して作成した粒径数 10µm の氷粒子をアクリル容器に均一に詰めて圧密して作成した.標的の空隙率は,50,60,70%と変化させた.この標的を-25℃の冷凍庫で最長 8 日間保管して焼結させ,標的の引張強度が各空隙率で一定になるようにした.弾丸は直径 2 mm のアルミ・ナイロン・ガラス・鉄球と直径 4.7mm のポリカ球を用いた.衝突速度は 1.0~5.5 km/s とし, チャンバー内の真空度は<120 Pa 以下,温度は-15℃である.衝突の様子は高速カメラで撮影した(撮影速度:10⁵ fps,露出時間:380 ns).実験後は切断して断面を観察し, クレーターサイズや衝突溶融の様子,さらに弾丸の変形・破壊の程度を観察した.

実験結果:クレーターの形状は空隙率や弾丸に関わらず,スポール領域を伴うピット型クレーターになった. Housen and Holsapple (2011)のクレータースケール則に従っ

て規格化強度 π_{Y} と規格化スポール半径 π_{R} に より実験結果を整理した結果,空隙率が同じ 場合には,弾丸の種類によらずスケーリング されることがわかった.一方,空隙率が異な る場合,系統的に π_{Y} と π_{R} の関係にオフセット が生じた(右図).また,熱電対を用いて衝突 直後の衝突点付近(スポール領域から 5.73mm,深さ 30mm)の温度変化を計測し た結果,衝突後約8秒間で 1.3℃の温度上昇 が見られた.



P16

木星型惑星の大気における湿潤対流の禁止条件: NH₃とH₂Sの化学反応によるNH₄SH生成の場合

* 中島健介 (九大·理), 福之上 嘉刀 (九大·理), 杉山 耕一朗 (松江高専·情報工学)

はじめに

ガス惑星大気の雲層では, H₂O, NH₃, CH₄ などの凝結だけでなく, NH₄SH など化学反応による粒子生成も生じ ていると推定される.このうち凝結に関して Guillot(1995) は, 凝結成分の分子量が非凝結成分(H₂, He)の分子 量より大きいため, 正の凝結潜熱放出にも関わらず, 鉛直対流が抑制されることを示した.本発表では, NH₄SH の 化学生成に関して, 類似の考察を加える.

上昇するプルームの浮力

化学反応 NH₃ + H₂S → NH₄SH による NH₄SH の生成を考える.以下, NH₃, H₂S の諸量を, 添字「1」「2」で 表す.また, 両者以外の成分 (H₂, He などの混合物) を添字「0」で表し, 簡単のため, 反応, 凝結しないものとする. 液相, 固相は速やかに落下して系から除去されるとする.このとき, 普遍気体定数を *R*, 温度を *T*, 各成分の分圧と 単位 mol 質量を p_i, μ_i , 圧力を $p \equiv p_0 + p_1 + p_2$, さらに $\hat{\mu}_i \equiv \mu_i/\mu_0$ とすると, 考察する混合気体の密度は,

$$\frac{\mu_0 p_0}{RT} + \frac{\mu_1 p_1}{RT} + \frac{\mu_2 p_2}{RT} = \frac{\mu_0 (p + (\hat{\mu}_1 - 1)p_1 + (\hat{\mu}_2 - 1)p_2)}{RT} \equiv \rho_c(p, p_1, p_2, T). \tag{1}$$

上昇プルームと,同じ高度(等圧力)にある周囲の密度差は,温度,成分の分圧の偏差を $\Delta T, \Delta p_i$ とすると,

$$\Delta \rho \equiv \rho_c(p, p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, T + \Delta T) - \rho_c^e \simeq -\frac{\Delta T}{T} \rho_c^e + \frac{\mu_0}{RT} \left\{ (\hat{\mu}_1 - 1)\Delta p_1 + (\hat{\mu}_2 - 1)\Delta p_2 \right\}$$
(2)

ただし, $\rho_c^e \equiv \rho_c(p, p_1, p_2, T)$ は周囲の密度である.

分圧偏差と温度偏差の関係

プルームの内外ともに「雲って」おり、NH₃, H₂S が NH₄SH に対して平衡と仮定すると,反応の圧力平衡定数 を K(T) とし, van't Hoff の式を用いると (H は反応エンタルピー)

$$(p_1 + \Delta p_1) \cdot (p_2 + \Delta p_2) = K(T + \Delta T) \simeq K(T) + HK\Delta T/RT^2 = p_1 p_2 (1 + H\Delta T/RT^2).$$
(3)

また, プルームの外には生成した NH₄SH が落下除去された気体がリサイクルされていると考え, NH₃ と H₂S プ ルーム内外分圧差は等しいと仮定すると, (3) からこれらが以下のように求まる.

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = p_1 p_2 / (p_1 + p_2) \cdot H / RT^2 \cdot \Delta T.$$
(4)

プルームの上昇可能性:密度偏差と温度偏差の関係

(1) と(4) を(2) に代入して整理すると、プルームの密度偏差が、

$$\Delta \rho = \left[-(1 + \hat{\mu}_1 f_1 + \hat{\mu}_2 f_2) + \{ (\hat{\mu}_1 - 1) + (\hat{\mu}_2 - 1) \} \frac{H}{RT} (f_1^{-1} + f_2^{-1})^{-1} \right] \frac{\mu_0 p_0}{RT^2} \Delta T$$
(5)

と求まる. ただし, $f_i \equiv p_i/p_0$ は NH₃ と H₂S の存在度 (H₂ と He の総計に相対的な) である. (5) 右辺の大括弧の 因子が正である場合, 暖かいプルームは重いことになり, 対流は禁止される.

元素存在度における対流禁止条件、および、凝結の場合との比較

上の条件は、硫黄の窒素に対する存在比 $f_2/f_1 \equiv \gamma$ と置くと、窒素の存在度に関する条件として下に書き直せる.

$$f_N > \left[\{ (\hat{\mu}_1 - 1) + (\hat{\mu}_2 - 2) \} \frac{H}{RT} \frac{\gamma}{1 + \gamma} - \hat{\mu}_1 - \gamma \hat{\mu}_2 \right]^{-1}$$
(6)

この表式は、Guillot(1995)の凝結雲についての対流禁止条件を変形した表式と類似する(具体的には当日).

(6)は、太陽標準組成を基準にして 30 倍程度の重元素存在度に対応し、少なくとも天王星・海王星においては、アンモニアやメタンの凝結と同程度の制約となる.

NH₄SH 生成反応による対流抑制条件を念頭においた木星型惑星の雲対流の数値計算

○杉山 耕一朗¹, 中島 健介², 倉本 圭³, 林 祥介^{4,5}

¹松江高専・情報工学、²九大・理、³北大・宇宙理学、⁴神戸大・理、⁵CPS

1. はじめに

木星型惑星の大気中では H₂O, NH₃, CH₄ の凝結や NH₄SH の化学反応が生じると考えられてい る. 凝結性成分の分子量が主成分大気 (H₂, He) より大きいために, Guillot (1995) は凝結成分の 存在度が大きい条件下では雲対流の発生が抑制される可能性を指摘している. 化学反応について は中島ら (2019 年日本惑星科学会秋季講演会) が, NH₃ と H₂S の存在度が太陽組成の約 30 倍よ り大きい場合に, 雲対流の発生が抑制される可能性を指摘している. これらの研究では大気の運動 を陽に扱っていないため, 本研究では雲対流の数値計算を実行することで, NH₃ と H₂S の存在度 が多い条件下で得られる雲対流構造の特徴を把握することを目的とする.

2. 計算設定

数値モデルとして, Sugiyama et al. (2009) で開発した木星型惑星の全凝結性成分を考慮した雲解 像モデルを用いる. 系の設定は Sugiyama et al. (2009, 2011, 2014) に準じるが, 計算時間の節約 のために放射の代替として与える熱強制の値は木星大気における予想される値の約 100 倍とした. 下部境界での NH₃ と H₂S の存在度を太陽組成の 3 倍から 100 倍まで, H₂O の存在度を 0.0001 倍から 10 倍まで, それぞれ段階的に変化させて計算を行う.

3. 計算結果

 H_2O 存在度が小さい場合には、NH₃ と H_2S の存在度をを大きくするにつれて (1)対流圏界面に 達する NH₄SH の積雲の間欠的な発生、(2) NH₄SH の生成高度が対流運動の境界として作用する、 という 2 つの特徴が得られた.後者の例として図 1 に NH₃ と H_2S の存在度を 3 倍、60 倍した ケースの凝結性成分の分布を示す.3 倍ケースでは 青色や黒色で示される H_2S や NH₃ 蒸気が少 ない気塊が計算領域の下端付近まで下降し、各凝結性成分成分の分布は水平非一様になる.一方で 60 倍ケースでは、NH₄SH 生成高度をまたぐような下降流は限定的で、NH₄SH 生成高度より下方 では各凝結性成分はほぼ水平一様に分布する.



図 1: 木星条件で, H₂O の存在度を太陽組成の 0.01 倍とした時に得られた凝結性成分気体の分布. NH₃, H₂S, H₂O の存在度をそれぞれ青, 緑, 赤の濃淡で表現し, 複数の気体が存在する領域はそれ らの色の合成色で表現する.

近赤外エシェル分光器/PIRKA 望遠鏡による 金星大気微量分子の観測

O築山大輝¹, 田中培生², 高橋英則², 高橋幸弘³, 佐藤光輝³, 高木聖子³,

大野辰遼³, 奥村真一郎⁴, 今井正尭⁵, Yeon Joo Lee⁶, 前澤裕之¹

¹大阪府立大学,²東京大学,³北海道大学,⁴スペースガードセンター,

⁵産業技術総合研究所, ⁶ Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics

近年、太陽系外の様々な惑星の発見が進み、トランジット法において大気のスペクトル分光観 測も展開されている。我々は中心星の活動が地球型惑星の大気環境に与える影響について理解を 深めるために、まずは身近なテストベンチとしての太陽系地球型惑星の大気の監視を推進してい る。特に火星や金星は磁場が存在せず、太陽活動の影響をダイレクトに受けていると考えられる。 また、過去に地球が CO₂大気であったことを考えると、今は CO₂大気の系外惑星でもいつか生 命を育む可能性がある。そこで、まずは CO₂が主大気の火星や金星について、大気環境/物理・ 化学状態のバランスを掌握することが重要となる。

金星では、国立天文台野辺山(標高 1350 m)で運用している我々の口径 10m のミリ波望遠鏡 SPART の観測を通して、上層大気の一酸化炭素(CO)の存在量が太陽活動の影響だけでは説明が 困難な短期的変動(数日~数週間)を有していることが分かってきた。この微量分子の変動は、金 星大気の濃硫酸の雲より低高度の物質との循環が影響していると考えられる。このため低層・高 層の両方の微量分子の時空間変動/リンク/物質循環を捉えたいが、低層の大気はスペクトル線の プロファイルが圧力ブロードニング効果により広がるため、ミリ波帯のヘテロダイン分光では観 測が難しい。

そこで、我々は北海道名寄市立天文台(標高 151 m)に設置された口径 1.6 m の光赤外望遠鏡 PIRKA (北海道大学)に搭載された近赤外中分散エシェル分光器 NICE(東京大学)を用いて、金星 下層大気の CO,H₂O,SO₂,OCS,HCl の吸収スペクトルの観測を実施した。これらの分子は金星大 気の酸化反応ネットワークにおいて重要な役割を果たす。例えば、HCl は塩素負荷であり、太陽 光によって解離された Cl が触媒として働き、大気の酸化反応を促進する。2018 年 8 月 14~23 日に地球大気の吸収の影響が比較的少ない近赤外域の H-band(波長 1.41~1.8 μ m)で観測を実施 し、H₂O や CO₂、硫酸エアロゾルなどによる吸収や HCl などの吸収線の観測に成功し、惑星の 観測が可能であることを検証することができた。得られたスペクトルは金星や地球の大気の近赤 外域の放射輸送モデルとも良い一致を見せている。この時の NICE のスリットのサイズは 2"× 7"、波長分解能は $\lambda/\Delta \lambda$ =2800 であった。

今後、NICE は大気透過度が高いチャナントール山頂(標高 5600 m)の東京大学アタカマ天文 台(TAO)口径 6.5 m 赤外線望遠鏡に搭載される予定であり、太陽系内の惑星の高分散観測が可能 になる。金星についても、より高空間解像度かつ高い S/N で、低層の分子種の存在量の導出が 可能となり、SPART や同サイトのアタカマ大型サブミリ波望遠鏡などが得意とする高層の微量 分子の観測との連携を狙う計画である。

10m 電波望遠鏡 SPART と ALMA 12m-Array/ACA/TP 同時観測による 金星中層大気の 微量分子スペクトルの解析と整合性の評価

〇富原 彩加¹、近藤 滉¹、徳田 一起^{1,2}、築山 大輝¹、前澤 裕之¹、 ¹大阪府立大学大学院 理学系研究科 物理科学専攻、²国立天文台

太陽系内外の地球型惑星の大気の性質を理解すべく、我々は中心星の活動の影響や、惑星 固有の大気の物質循環に着目し、口径 10 m の電波望遠鏡 SPART を用いて太陽系地球型惑星 の大気の監視観測を推進している。例えば、金星の¹²CO (J=1-0 @115 GHz, J=2-1 @230 GHz) の回転輝線の観測では、短 (数日~数週間)~長期 (太陽活動周期程度)の変動を捉えてきた。 その中で、太陽活動では単純に説明できない短期変動についてメカニズムを探るため、 2016-2017 年にアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA)を用いて全てのアンテナシステ ム 12m-Array/ACA 7m-Array/TP (Total Power-Array)を連動させ、CO、SO₂、SO、HDO といっ た微量分子の高分解能観測を試みた。観測周波数は Band6 (@230 GHz)、Band7 (@345 GHz) で あり、ALMA のヘテロダイン分光では、およそ高度 75~115 km 程度の微量分子を捉えること ができる。

干渉計では、アンテナ配列によって決まる Maximum recoverable size (MRS)を超えて広 がった構造の輝度分布には感度を持たず、Flux を欠損してしまう resolved-out の問題が発 生する。金星の視直径がこの MRS よりも大きい時期は、空間的に一様に広がった分子のスペ クトル成分が落ちる可能性がある。そのため、単一鏡である TP をリファレンスとし 12m-Array、ACA 7m-Array それぞれのスペクトルから、Missing Flux の評価を進めている。

また、これらのミリ・サブミリ波帯の観測ではヘテロダイン受信機を採用しているため、 スペクトル解析時にシグナルバンドとイメージバンドのサイドバンド比を正確に把握してお く必要がある。SPART/230 GHz 帯ではダブルサイドバンド(DSB)受信、ALMA TP/Band6 ではシ ングルサイドバンド(SSB)受信を採用しているため、同日(2017 年 5 月 14 日)の観測日にお ける¹²CO のスペクトル線を用いて、両者のスペクトルの整合性の検証を行った。SPART では 単一の周波数分解能 61 kHz で観測を行っているが、ALMA では低い周波数分解能(976.6 kHz) で吸収スペクトルの広がった成分や連続波レベルを観測し、高高度の幅の狭い吸収ス ペクトルは周波数高分解能(15.3 kHz)で高精度に分光している。今回、これらを合成したス ペクトルを用いて比較を行い、SPART 望遠鏡の 230 GHz 帯 SIS 超伝導受信機のサイドバンド 比 0.39~0.42 において、ALMA のスペクトルと良く一致することを確認した。

本講演では、これら一連の解析・整合性評価について報告する。

Web 地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化

〇松村 和樹¹, 村橋 究理基^{2,3}, 杉山 耕一朗¹

1松江高専 電子情報システム工学専攻 2北大理 宇宙理学専攻 3(株)ポーラスター・スペース

近年、スーパーコンピュータを用いた数値計算によって、大規模数値データが次々生成されている.大規模数値データの全体構造・微細構造をシームレスに解析するために、1枚の高解像度の図を自由に拡大縮小ならびにスクロールしたいという欲求がある.村橋ら (2017、惑星科学会)では、京コンピュータで計算された超高解像度の火星大気シミュレーションデータを一辺が1万 pixel を超えるような図にしていたが、通常の PC のビューワがしばしばフリーズするという問題に直面している.そこで本研究では大規模数値データの全体構造と微細構造をシームレスに解析できるようにすることを目的として、Web 地図技術を用いて数値データの可視化ツールを開発する.

Web 地図とは Google Maps に代表されるようなブラウザ上で閲覧可能な地図を指し,ユ ーザが地図を拡大縮小,スクロールすることができる.Web 地図で表示される地図は,一 般に拡大レベル別に異なる解像度で保存され,それぞれが解像度に応じた分割数でタイル状 に分割されている.各タイルの中から表示領域に入ったものだけを読み込むことでスムーズ な操作を実現している.一般に各タイルは画像(png)であるが,我々はWeb 地図上で数値を 参照可能とするための拡張として「数値データタイル」を新たに定義した.これは png 画 像であるが,各ピクセルの RGB 値から数値を計算することができる.

開発したツールでは、ブラウザ上にシミュレーションデータが表示され、その拡大縮小や スクロールは Google Maps と同様の操作で行うことができる. 拡大した際に色のコントラ ストが小さくなり微細構造が解析できなることがあるため、ツール上でカラートーンの最 大・最小値を任意に変更できるようにした. Web 地図技術を拡張することによってスムー ズな図の操作と色の付け直しが両立できるようになり、データの全体構造と微細構造をシー ムレスに解析することが可能になった. 加えて、カラーマップの変更や等高線の描画、対数 表示など従来の可視化ツールで一般的だった機能も実現することができた.

従来の可視化方法と比較すると本ツールを使用する際は、数値データから数値データタイ ルを作成する時間を別途要するが、これは他の作業の妨げになるほどではない. 村橋らが用 いている火星大気シミュレーションデータの作図に必要な数値データタイルは、1 枚の画像 につきおよそ数分で用意できる.

月極域探査:既存データの課題と観測要求

Observation Requirements of the Planned Lunar Polar Exploration Mission

、大竹真紀子,星野健,唐牛譲,白石浩章 (JAXA/国際宇宙探査センター)

近年行われた月探査機による複数種のデータの解析から,月極域(約85度 以南,以北の領域)の表層ないしは地下数十 cm から 1m 程度の深さには水(H₂0 や水酸基を含む広義の意味での水)が存在する可能性が報告されている.実際に 水氷が存在するならば,それは科学的に水の供給源や過程を知る上で重要であ るのみならず,水を電気分解してロケットの燃料として使うなど,資源としての 利用価値も高い.ただし,既存データには下記のような課題があり^{*1},本当に月 極域に水が存在するのか,それを資源として利用可能かどうか,決定的な情報は 未だ得られていない.これら課題を解決するため,JAXA では国際宇宙探査の枠 組みで,インド宇宙研究機関との共同で月極域での探査の実施を検討している.

・中性子観測:水素の観測であり,水分子として存在するかどうか不明.観測 データの空間分解能の限界から1kmスケールでの局所的な濃度の推定が困難.

・人工物を極域に衝突させ、その放出物の分光観測:衝突領域の局所的な観測 であり、極域全体での水の分布や濃度、水が存在する深さが不明.

 ・表層の近赤外波長分光観測:表層温度の観測から水氷が昇華し得る領域でも 水氷が存在するとの結果が出されており,温度データと矛盾がある,表層のデー タであり地下の分布についてはわからない.

上記課題の解決のためには、月極域に着陸してその場観測により高い空間 分解能で表層を観測する、また掘削により地下の水の分布状態についても直接 的に観測を行う必要がある。発表では水氷の存在に関する既存研究の成果と課 題を紹介し、課題の解決に向けた本探査の観測要求(必要な観測項目とその精度 など)および想定される観測シナリオについて議論する。また同探査の検討には 多くの惑星科学コミュニティの研究者に参加いただいており、惑星科学の観点 での同探査の意義についても議論が進められているので、それらについても紹 介する。

*1: 遊星人 2019 年 3 月号特集「月揮発性成分の研究による科学と探査」参照

月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計画の

搭載機器と観測計画の検討

西堀俊幸¹, 〇岩田隆浩¹, 春山純一¹, 山本幸生¹, 月火星の地下空洞直接探査 RG

¹JAXA

Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/ Mars Exploration (UZUME:古今未曽有の月/ 火星の地下世界探査)は、月や火星の縦孔とそれに繋がる溶岩チューブのような地下空洞を探査 するための探査計画である. UZUME 計画の主な目的は、1)地球外生命の生存可能性、および 2) 人類の生存圏拡大の可能性についての知識を積み重ねることである. 我々は 2016 年度から ISAS の宇宙理学委員会の下に「月火星の地下空洞直接探査」の RG を設立し、月や火星の縦孔を直接観 測する科学的価値や縦孔利用の議論を開始している. 現在は WG にフェーズアップするための準備 を進めている.

月の縦孔付近にピンポイント着陸を成功させた上で、縦孔に降下して未踏の縦孔内部 の空間を直接探査するには不確定な要素が多く、また、縦孔内部はリモートセンシング 観測が難しいため事前に得られる情報が少ない.そのため、降下システムや縦孔内部移 動システム、観測機器の環境条件設定が難しく、探査システムの最適な設計が困難であ る.さらに、縦孔内部は未踏の領域であるため、内部空間の大きさやボルダ—の分布と 大きさなど、移動手段の検討や内部観測方法の検討に必要な情報が少ない.この様に、 UZUME 計画を実現するためには、1)垂直移動技術、2)不整地踏破、3)未知領域探査を解決しな ければならない.

そこで、我々は縦孔に降下して縦孔内部を観測するだけの UZUME の「パスファインダー」ミッションを念頭において検討を進め、縦孔を直接探査する外国のミッションへ科学機器を中心に相乗りすることを前提にして検討を進め、早期に探査を実現させる方針に舵を切ることにした。

現在,人類初の縦孔への直接探査計画となるUZUME-1の米国 JPLのKerber 博士が提案するMoon Diver のミッションへの相乗りについて検討を開始しており、本稿では搭載するセンサの候補に ついて紹介する.
月面探査車搭載型中性子検出器の開発の現状

〇晴山慎¹, 上野遥², 大竹真紀子², 唐牛譲², 長岡央², 磯部光孝³, 小川国大³, 小林真³, 草野広樹⁴, 内藤雅之⁴, 長谷部信行⁵, 小林正規⁶, 藤井雅之⁷, 山下直之⁸
 ¹聖マリアンナ医科大学, ²宇宙航空研究開発機構, ³核融合科学研究所,
 ⁴量子科学技術研究開発機構, ⁵早稲田大学, ⁶千葉工業大学, ⁷ファムサイエンス,
 ⁸Planetary Science Institute

現在、JAXA により月極域での掘削による水氷探査が検討されている。我々は、この検討 に対し、月面探査車搭載型の中性子検出器により、移動しながら水がより多く存在する地点 を探索する方法を提案し、0.1 wt.% WEH の水が検出可能であることを目標として、その探 査法と検出器の検討を行った。

シミュレーション計算により、水素を100 ppm(水で 0.09 wt.% WEH) 含む月の土壌が、 2m 四方以上の広がりと1m以上の厚さの層として表層から50cm以内に存在すれば、検出可 能であることが明らかになった。また、水が層状に分布する場合、その層の広がりと深さと 厚さおよび層内の水素濃度または水素量について、観測から制限を加えることが可能である こと、岩塊の存在は水の存在と区別でき、岩塊の大きさと深さを推定できる可能性があるこ とを明らかにした。

水探査用検出器として、熱・熱外中性子検出器として薄いスズシートを巻いた 3He ガス 比例計数管(3HePC)、熱外中性子検出器として薄いカドミウムシートを巻いた 3HePC、高速 中性子検出器としてホウ素添加プラスチックシンチレーター(BLP)をそれぞれ用いること を提案した。それぞれの検出器要素について、中性子照射試験を行ったところ、スズシート およびカドミウムシートを用いた 3HePC によって、熱中性子と熱外中性子を弁別できること を実証した。また、BLP では、中性子捕獲の信号と高速中性子の入射エネルギーに依存した 信号が得られた。今後は、月の水の存在形態について検討を加えながら詳細なシミュレーシ ョン計算を行い、実観測における水存在の判断基準の明確化を行う。また、検出器について は、BLP による高速中性子の弁別実証するための解析を行い、予備設計、基本設計を進める 予定である。

中性子照射試験を行うにあたり核融合科学研究所のスタッフの方々、東北大学高速中性 子実験室のスタッフの方々には大変お世話になりました。本研究は、宇宙航空研究開発機構 「月極域探査のための観測機器の検討提案」に採択され行ないました。また、検出器開発の 一部は、核融合科学研究所「2019 年度一般共同研究」(NIFS19KLPH036)の支援を受けて行わ れています。

レーダによる月表層・小惑星内部探査の計算機実験

Numerical simulation of subsurface radar sounding of the Moon and asteroids

○熊本篤志¹, 宮本英昭², 西堀俊幸³, 土屋史紀¹, 石山謙⁴
 ¹東北大学大学院理学研究科,²東京大学大学院工学系研究科
 ³宇宙航空研究開発機構,⁴鶴岡工業高等専門学校
 A. Kumamoto¹, H. Miyamoto², T. Nishibori³, F. Tsuchiya¹, K. Ishiyama⁴
 ¹Tohoku Univ., ²Univ. Tokyo, ³JAXA, ⁴Tsuruoka NCT

将来の月・小惑星探査ミッションでのレーダによる月表層・小惑星内部探査を想定して, 地下媒質中での電波伝搬を FDTD 法 (Finite-difference time-domain method) を用いた電磁界シ ミュレーションによって再現・検討した.

月面にもたらされた水は光解離によって約20時間で宇宙空間に失われるが、それまでに極 域の永久影の領域に跳躍移動できた成分は消失を免れ、地下等に存在している可能性が理論 的に示されていた[1].また LCROSS による南極 Cabeu クレータでの衝突実験[2]や Chandrayaan-1のSAR 偏波観測[3]からも氷の存在が示唆されている.組成としての氷同定に はより適した観測装置があるが(中性子検出器など)、ローバ搭載高分解能地中レーダ(0.5~ 3 GHz)の最大のメリットは氷の分布形状を明らかにできる点にあり、氷の集積過程の議論に も貢献できる可能性がある.小惑星25143 Itokawa は全体の平均密度(1.9g cm⁻³)や表面の岩 塊サイズから rubble pile 天体であることが示唆されている[4].小惑星表面の観測に加えて、 地下レーダ(50~150MHz)で、内部を構成する主要な岩塊の形状・サイズを観測することが できれば、小惑星形成時の具体的な集積プロセスについてもさらに詳細な議論が可能となる.

レーダ観測時の月表層・小惑星内部での電波伝搬を再現するため、本研究では Meep コード[5]を用いた FDTD 電磁界シミュレーションを実施した.月表層の計算では幅 0.25 m, 高さ 1.25m の 2 次元空間を 2.5 mm ×2.5 mm のグリッドに分割し、上方 0.4m を真空、下方 0.85m を 玄武岩 soil とした.玄武岩 soil の空隙率は Apollo の観測で決定された経験式[6]をもとに、玄 武岩(ϵ_r = 7.3)、空隙(ϵ_r = 1)のグリッドを乱数で混合した.この地下モデル中に、様々な形状で 水(ϵ_r = 3.2)を分布させた.月面上方 30cm から 0.5~3GHz,継続時間 167ns のガウス関数状の チャープパルスを放射し、同じ場所でエコーの電場成分の変動を記録して観測の模擬データ を得た.小惑星内部の計算では、幅 300 m、高さ 600 m の 2 次元空間を 0.3 m × 0.3 m のグリ ッドに分割し、下部 300 m に球状の小惑星を置いた.小惑星内部には複数の球状の岩塊(ϵ_r = 6)を置き、隙間はレゴリス(ϵ_r = 3)で埋めた.小惑星表面の上方 100m から 50~150MHz,継続時間 2 μ s のガウス関数状のチャープパルスを放射し、同じ場所でエコーの電場成分の変動を記録して観測の模擬データを得た.発表では、これらの計算機実験の結果に加えて、月極域 氷探査ミッション用ローバ搭載地中レーダの検討、要素開発の状況、2019 年度から開始した 小惑星内部探査レーダ BBM の開発状況についても紹介する.

References [1] Arnold, JGR, 84(B10), 5659, doi:10.1029/JB084iB10p05659, 1979. [2] Colaprete et al., Science, 330, 463, doi:10.1126/science.1186986, 2010. [3] Spudis et al., GRL, 37, doi:10.1029/2009GL042259, 2010. [4] Fujiwara et al., Science, 312(5778), 1330, doi:10.1126/science.1125841, 2006. [5] Oskooi et al., Computer Phys. Comm., 181, 687, doi:10.1016/j.cpc.2009.11.008, 2010. [6] Carrier et al., Lunar Source Book, 475, 1991.

P25

162173 リュウグウ表面の高解像度画像から探る岩塊の熱疲労 Thermal fatigue of boulders on 162173 Ryugu from high resolution images

○佐々木晶¹,神田志穂¹,菊地紘²,道上達広³,諸田智克⁴,本田親寿⁵,宮本英昭⁴,逸見良道⁴, 杉田精司⁴,巽瑛理⁴,金丸仁明¹,坂谷尚哉²,渡邊誠一郎⁶,並木則行⁷,入江輝紀³,金丸仁明¹, Patrick Michel⁸,平林正稔⁹,平田成⁵,中村智樹¹⁰,野口高明¹¹,廣井孝弘¹²,松本晃治⁷, 亀田真吾¹³,神山徹¹⁴,鈴木秀彦¹⁵,山田学¹⁶,本田理恵¹⁷,長勇一郎⁴,吉岡和夫⁴,早川雅彦², 松岡萌²,澤田弘崇²,横田康弘^{2,17}
¹大阪大学,²JAXA/ISAS,³近畿大学,⁴東京大学,⁵会津大学,⁶名古屋大学,⁷国立天文台,
⁸ニース天文台,⁹オーバーン大学,¹⁰東北大学,¹¹九州大学,¹²ブラウン大学,¹³立教大学,
¹⁴産業総合研究所,¹⁵明治大学,¹⁶千葉工業大学,¹⁷高知大学

小惑星リュウグウ表面は様々なサイズの岩塊で覆われている[1,2]。我々は、100枚以上の高分解 能画像(ローバー放出、サンプル採取地点の調査時に主に撮像)の解析から、20cmから数 10m程 度のサイズの岩塊に割れ目があること、しかもその方向は南北に偏っていることを明らかにした (図)。550個の割れ目のある岩のうち、約50個の複数方向の割れ目のある岩を除いて6方位で分 類すると、6割の割れ目が南北(±15度)の範囲に集中する。割れ目には、蛇行するもの、直線的な もの、途中で止まるもの、分岐するもの、複数方向など複雑なもの、と分類することができるが、 南北方向への卓越はいずれのタイプでも顕著である。蛇行タイプ、途中タイプには、岩塊の内部組 織(ブレッチャなど)の影響を受けているものがある。Itokawa 表面にも、割れた岩塊は存在した が、衝突実験の岩石との比較から(母天体上か Itokawa 上での)衝突起源と議論された[3]。しか し、衝突だけでは、南北方向への割れ目の偏りは説明できない。

岩塊の割れ目の方向が特定の方向に卓越することは、地球の砂漠の岩石[4]や火星表面の岩石[5] で確認されている。岩塊表面の日照による朝夕非対称な温度変化が、熱ストレスを生じて、クラッ クを生んだ可能性が考えられる。リュウグウの自転軸傾斜角は、171.64±0.03度でほぼ逆行自転で ある[6]。この8度の傾斜の影響は本研究の方位角(30度刻み)では出てこない。リュウグウの自転



は速いため、温度の日変化の及ぼすスケールは限定的である。一方 で、軌道離心率は大きく過去には近日点は水星軌道より内側にあっ た可能性がある。表面温度の年変化が役割を果たしたと考えられる。 文献: [1] Sugita et al., (2019) Science 364.; [2] Michikami et al (2019) Icarus, 331, 179-191; [3] Nakamura et al. (2008) Earth Planets Space 60, 7-12; [4] MacFadden et al., (2005) Geol. Soc. Am. Bull. 117, 161-173; [5] Eppes et al., (2015) Nature Comm. 6, 6712; [6] Watanabe et al (2019) Science 364.

図 リュウグウ上の石の割れ目の方向の頻度分布

リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒標的に対するクレーター形成実験 O山本 裕也¹, 荒川 政彦¹, 保井みなみ¹, 長谷川直², 杉村暸¹, 横田優作¹ ¹神戸大学大学院理学研究科,²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

【はじめに】小惑星リュウグウ表面はボルダーで覆われており、そのボルダーは熱慣性率からの推測で比較的空隙が多いと思われており、そのため力学的強度も小さい(200 kPa-280 kPa)と言われている(Grott et al., 2019)。従って、低強度ボルダーで覆われたリュウグウ表面では、既存のクレータースケール則が適用できるかは不明である。また、クレーター形成時には衝突励起振動が発生し、天体表層を伝播する時、表層レゴリスが流動化し、凹凸地形を平坦に緩和する現象が起こる。低強度ボルダーから構成されるラブルパイル天体の衝突進化過程や小惑星上での衝突励起振動とそれに伴って起こる流動過程を解明するためには、ボルダー表層に適応できるクレータースケール毒や衝突励起振動の研究が必要となる。レゴリス層で覆われる小天体上に見られるクレーターは、重力で支配されたメカニズムにより形成されると言われる。一方、このレゴリス層を構成する粒子の破壊強度が小さい場合、クレーター形成時に衝突点付近の粒子が破壊される。従って、重力以外にも構成粒子の破壊強度がクレーター形成過程に影響を与える可能性が高い。しかしながら、レゴリス構成粒子の破壊強度を考慮した実験的研究は少なかった。そこで本研究では、低強度粗粒粒子からなる標的に対してクレーター形成実験を行い、クレータースケール則と衝突励起振動に対する構成粒子の破壊強度の影響を調べた。

【実験方法】クレーター形成実験は(A)神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と(B) JAXA の縦型二段式軽ガス銃を 用いて実施した。弾丸は標的表面に対して垂直に衝突させた。標的には直径 1~4 mm と 1~4 cm の鹿沼土 を用い、粒子の圧壊強度は約 60kPa であった。(A)では、弾丸に直径 3 mm の 5 種類の球(鉄,ジルコニア,ア ルミナ,ガラス,ナイロン)を用いて、それらの弾丸を 40~200 m/s まで加速させた。クレーターの形成過程 はハイスピードカメラ(1000 FPS)で撮影した。(B)では、弾丸に直径 2 mm のアルミ球を用いて、その弾丸 を 1.2~4.3 km/s まで加速させた。クレーター形成過程はハイスピードカメラ(10⁴, 10⁵ FPS)で撮影した。 衝突励起振動は、衝突点からの距離が異なる 3 箇所に加速度計(型番:SV1111, SV1113, 固有振動数:30 kHz) を設置し計測した。加速度データはチャージアンプ(型番:AD-8724D)を通してデータロガー(取込速度:100 kHz)で記録した。実験後の標的は回収して、その表面に作られたクレーターの直径と深さを計測した。

【実験結果】

クレーターサイズと弾丸の運動エネルギーの関係を調べた結果、運動エネルギー0.14 J から 0.63 J の間では クレーターサイズは運動エネルギーとともに変化せず、ほぼ一定となることがわかった(図 1)。また、 π ス ケーリング則を用いて規格化クレーター半径(π_{R})と規格化重力(π_{2})の関係を調べた所、砂やガラスビーズ 標的等の先行研究と比較して π_{R} がかなり小さくなることがわかった。このような関係が見られるのは、衝 突の運動エネルギーが標的である低強度粒子の破壊に使われているからだと考えられる。さらに、加速度 計のデータからは衝突励起振動の伝搬速度が小玉で 30±3 m/s,大玉で 53±2 m/s であり、先行研究のガラス ビーズ標的に比べて小さくなっていることがわかった(図 2)。また、衝突点からの距離とその場所での最大 加速度の関係はガラスビーズ標的で得られた同じ衝突条件の結果と比較すると 1/10 程度とかなり低くなっ ていることがわかった。







図2:衝突励起振動の伝播距離と時間の関係

火星 Web-GIS "Red Ace"における ユーザーによるスペクトルデータ管理

〇福地裕範¹,林洋平²,松原侑哉³,小川佳子¹
 ¹会津大学,²国立天文台,³会津大学(現 NTT ドコモ)

火星探査で観測されている可視近赤外反射スペクトルデータは、火星表層の鉱物やその分布の情報 を得るために欠かせない。鉱物はそれぞれ固有のスペクトル吸収特徴を持ち、既知のスペクトルと観 測されたスペクトルを比較することで鉱物を同定することができる。特に火星のスペクトルデータは 複数の観測機によりこれまで大量に蓄積されている。しかし、研究者がそれぞれの関心対象に応じて 詳しく解析するにはその都度観測データを探し、選び、ダウンロードする必要があり、また解析自体 にも手間が多い。よって現状、高精度かつ大量の火星スペクトル情報を効率よく活用することは難し い。

これまで我々は、火星観測データの視覚的かつ効率的な利用を実現するために、新しい火星 Web-GIS "Red Ace"の開発を進めてきた[1]。Red Ace は、CRISM や THEMIS が観測したスペクトルデータを 可視化する機能や、それらをダウンロードする機能を備えている。本研究の目的は、Red Ace におい てユーザー毎にスペクトルデータの管理を可能にし、データとユーザーグループの議論を結びつけ、 ユーザーが観測データを最大限利活用できるようにすることである。そのためにアノテーション機能 を実装した。

アノテーションとは、既存のデータに対して付加情報を与えること、もしくは加えられた情報その もののことである。例えば、Webページ上にメモ書きを残す場合[2]や、画像に情報を付与して物体検 出をする場合[3]など、様々な場面で利用されている。本研究におけるアノテーション機能とは、ユ ーザーが解析の結果を保存し注目するデータをリスト化し、データと考察や議論等を結ぶことができ る機能を指す。リストには反射率や波長、ピクセル位置等が保存され、ユーザーによって保存された データの位置は地図上にピンで可視化される。よって、ユーザーはスペクトルと共に、その観測地点 をイメージキューブ中の対応する画素として瞬時に視認することが可能である。そして、ユーザーは、 ピンをクリックするとそのデータに自身が付与したアノテーションを確認することができる。

Red Ace にアノテーション機能を実装することで、ユーザーはいつどの観測データにどんな特徴を 見出したのか、過去の自分の考察や注目したデータを振り返ることができるようになった。また、ユ ーザーグループ内での議論や情報共有が可能となり、火星スペクトルデータの効率的な活用に向けた 基盤を築くことができた。今後、ユーザーが付与したアノテーションを活かし、観測データの解析の 実現を目指す。

- [2] Hypothesis; https://web.hypothes.is/
- [3] VGG Image Annotator: http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/software/via/

^[1] Matsubara, Y. et al., A Mars Web-GIS "Red Ace" for viewing reflectance spectral data, American Geophys. Union, Fall Meeting 2018, abst. #IN33E-0896.

MMX 搭載近赤外分光撮像器 MacrOmega の

観測計画と開発状況

〇岩田隆浩¹, 中川広務², Jean-Pierre Bibring³, Vincent Hamm³, Cedric Pilorget³, 土屋史紀², 黒川宏之⁴, 松岡 萌¹, Lucie Riu¹, 吉田奈央², 中村智樹²

¹JAXA宇宙研、²東北大、³Institut d'Astrophysique Spatiale、²東工大

太陽系初期フェーズの物質の進化と移動を調べることは、地球の水や生命前駆物質の起源 を解明する上で重要な手掛かりとなる。火星の衛星PhobosとDeimosの起源には、火星による 小惑星の捕獲説と巨大衝突説があり、これを決めることができれば火星圏における物質の移 動の様子が理解されることになる。衛星起源を決定する上で重要なのは、火星衛星の物質お よびその分布を火星と比較することであるが、これまでの探査では火星衛星の物質に関する 知見は不十分である。そこで我々は、火星衛星探査機MMXに搭載予定の近赤外分光撮像器 MacrOmegaを用いた観測から、火星衛星の含水鉱物および有機物の分布ならびに状態(水の 存在形態、含水量、熱変成度等)を調査する。この結果はMMXが火星衛星上で行うサンプリ ングに対して、その地点を選定する指標としても用いられ、サンプルリターン後の地上での 分析結果と併せて、火星衛星の物質の全球分布の総合的な理解に供する。

MacrOmegaは、観測波長0.9~3.6µmの近赤外線分光撮像装置であり、Hayabusa2搭載 MicrOmegaをベースとして、フランスと日本により共同で開発を推進している。音響光学型 可変波長フィルタ(AOTF)と2次元HgCdTe検出器を用いて、6度×6度の視野(256pix×256pix) を1画像とし、波数分解能20cm⁻¹(観測波長3µmで波長分解能18nmに相当)で波長掃引観測する。 またスキャンミラーを実装することにより、探査機と独立に視野を動かして全球観測・特定 領域のトラッキングを可能にする計画である。MacrOmegaは、火星衛星PhobosおよびDeimos の反射スペクトルにおける含水鉱物、有機物による吸収スペクトルを検出するとともに、火 星大気のH₂0, CO₂, COの吸収・エアロゾルの散乱スペクトルの観測を行う。現在BBM(試作モ デル)による性能検証や数値モデルによる熱輻射成分の混入評価を行うとともに、MMX探査 機のデータプロセッサ上のオンボードデータ処理の検討を進めている。これらの開発状況と 観測計画について紹介する。

岩石ターゲットからの高速度エジェクタのサイズ - 速度同時測定

○野村啓太¹,中村昭子¹,長谷川直² ¹神戸大学大学院理学研究科,²宇宙科学研究所

火星衛星からのサンプルリターンが 2020 年代に計画されている. 衛星には火星か ら飛来した物質が存在すると考えられている. 衝突エジェクタのサイズ - 速度分布は, 衛星表面の火星物質量を考える上で重要となる. 月や火星の二次クレーター解析 (Hirase et al. 2004)や室内実験(Nakamura et al. 1994)からエジェクタのサイズ - 速 度には傾向があることが知られている. しかし, 二次クレーター解析では, キロメー トルサイズの大きく, 天体の脱出速度以下のエジェクタのみについてしか調べられて いない. また, 室内実験においても 100 m/s 以上のエジェクタのサイズ - 速度の情報 は限定的である.

本研究では、従来の実験方法では測定が困難であった小さく高速度なエジェクタの サイズと速度を同時計測することを目的として、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を 用いて玄武岩ターゲットへの衝突破壊実験を行った.弾丸は直径3mmのアルミニウ ム球とアルミナ球を用い、衝突速度は約7km/sでターゲットに対し垂直に衝突させ た.弾丸の玄武岩ターゲットへの衝突(一次衝突)で放出するエジェクタが通過する位 置に二次標的としてガラス板を設置し、高速度カメラを用いて、10⁴-10⁵ fpsでガラス 板への二次衝突によるクレーターの形成を記録した.ガラス板の設置角度θは、ター ゲットの法線とのなす角が25-40°の間で変えた.一次衝突の破片の放出過程はタ ーゲットの側面と上部に設置した高速度カメラで撮影した.一次衝突で放出した玄武 岩エジェクタの二次標的への飛行時間と2点間の距離からエジェクタの速度、玄武岩 エジェクタによってガラス板にできたクレーターの直径からスケーリング則を用い てエジェクタのサイズを算出した.二次標的のガラス板にできるクレーターのスケー リング則は、神戸大のガス銃と宇宙研の二段式軽ガス銃を使用し、ガラス球を60-198 m/s(神戸大)、ガラス球散弾を2-5km/s、不規則形状の玄武岩散弾を約3km/sで衝 突させて得た.

実験より,従来の方法では測定が困難であった 100 µm 未満のエジェクタのサイズ - 速度を推定できることが分かった.また,火星からエジェクタが脱出するのに必要 な速度を上回る,最大約7 km/s のエジェクタのデータが得られた. P30

Class 0/I 段階におけるペブル集積による

巨大惑星の形成条件

○田中佑希¹, 塚本裕介²

1東北大学,2鹿児島大学

近年の惑星形成における理論的研究では、原始惑星系円盤の中でのペブル集積とい うメカニズムが注目されている.この過程では、ペブルと呼ばれるセンチメートル程 度のサイズの粒子が円盤内を移動し、これらが微惑星や原始惑星に集積することで惑 星の成長が促進されると考えられている.これまでに、ペブル集積を仮定した巨大惑 星形成やスーパーアース系の形成など、様々な研究が行われている.

一方で最近の電波観測では、明瞭なギャップとリング構造を持つ非常に若い円盤が 数多く発見されている.これらのギャップ・リング構造の原因はまだ明らかになって おらず、多数の理論モデルが存在する.そのうちの一つとして円盤内にガス惑星が存 在することにより、円盤と惑星の相互作用によってサブ構造が形成されるという仮説 が提唱されている.惑星の存在を仮定した流体シミュレーションでは、観測されてい るものと同様のギャップやリング構造が形成可能であることも示されている.しかし 発見されているギャップの半径は比較的大きいためその場所での惑星形成のタイム スケールは非常に長く、若い年齢で遠方の軌道にギャップを生成するような質量の惑 星が形成可能かどうかはよく分かっていない.

ここでは、一般に惑星形成が起こっていると考えられている段階より前の、Class 0/I 段階での惑星形成に着目し、Class 0/I 天体周りの重力不安定な円盤の解析モデルとペブル降着のモデルを用いて、円盤進化の初期段階における惑星形成の可能性について検証する。その結果、Class 0/I 円盤の条件では円盤の質量降着率が大きいため、ペブル集積のタイムスケールは典型的な原始惑星系円盤での値と比較して短くなることが判明した。しかしペブル集積のタイムスケールは常にガス降着率の増加に伴って減少するわけではなく、パラメータによっては円盤の降着率が上昇するとペブル 集積のタイムスケールが長くなる場合があることも見出した。さらに推定したタイムスケールを用いて、異なるガス降着率やダストガス比などのパラメータの下での原始惑星の成長について検証した。これらの結果を元に、Class 0/I 段階の間に巨大ガス惑星のコアを形成するのに必要な初期の微惑星・原始惑星の質量について議論する。 ー例として、典型的なガス降着率の円盤中では 10 au にある 5×10-4 地球質量の天体が、Class 0/I 段階の寿命の間に 10 地球質量まで成長可能である。 P31

太陽系における地球型4惑星の形成:

Grand Tackのような幅の狭い円盤は不適 Constraining the formation of the 4 terrestrial planets in the solar system: No success in Grand Tack-like truncated disks and other narrow disks

○ソフィア リカフィカ パトリック(Patryk Sofia Lykawka)¹,伊藤 孝士(Takashi Ito)² ¹近畿大学 総合社会学部 (School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University) ²国立天文台(National Astronomical Observatory of Japan)

太陽系における地球型惑星の軌道と質量の再現(実際の 4 惑星と類似する「惑星アナログ」の形成) を試みた先行研究の大半は、数値シミュレーションの結果を集計した総和に対する統計的な議論だけを 行なっている。これでは、個々の数値シミュレーションに於いてどのような原始惑星系円盤からどのよう な惑星アナログが形成するかを個別に議論できない。この問題を克服するため、私達は幾つかの先行 研究が推定する代表的な原始惑星系円盤(どれも微惑星と惑星胚 = embryo から構成される)の力学 進化に関する N 体シミュレーションを行った。540 種類の初期条件から出発した計算の結果、194 種の 円盤では少なくとも 3 つの惑星アナログが同時に形成したが、4 つの惑星アナログを同時に形成したシ ステムはわずか 17 種であった。惑星アナログ達の軌道と質量を分析して現在の地球型惑星と比較する と、Grand Tack モデルから典型的に導かれる truncated disk に関しては以下の結果が得られた。

- この円盤から形成される水星アナログと火星アナログは現在の水星および火星と比べて力学的に冷たすぎ、かつ、それぞれ金星と地球アナログに近すぎる位置に作られる。
- 形成される水星アナログの全ておよび火星アナログの大半は、質量が大きすぎる。
- 原始地球に対する月形成の巨大衝突が早期に起こりすぎる。そして、巨大衝突後に地球アナログに 降着する質量が多すぎる。

このように、Grand Tack モデルが提唱する truncated disk では現在の地球型惑星の形成を説明できない。また Grand Tack 以外のモデルが導く同様な narrow disk も、上記のような問題を抱えた結果を与えることが私達のシミュレーションから明らかになった。

今回の結果より、現在観察される 4 つの地球型惑星が形成されるためには、原始惑星系円盤が満た すべき条件として以下の必要性が示唆される:

- 1. 円盤の質量は 0.7-0.9 au と 1.0-1.2 au の狭い領域に集中する
- 2. 円盤の質量の 80%以上を embryo が担う(微惑星が担うのは 20%以下)
- 3. 円盤は 0.3-0.4 au に内端を持つ
- 4. 円盤には 1.0-1.2 au から始まる低質量の外部領域がある
- 5. 円盤に対して摂動を与える木星と土星は無視できない離心率を持つ(各々0.02-0.1と0.07-0.15)

※この研究成果は The Astrophysical Journal 専門誌に掲載予定です。

周木星円盤における光泳動:ガリレオ衛星の軌道 共鳴の起源に対するひとつの説明

○荒川創太¹, 芝池諭人² ¹東京工業大学 理学院 地球惑星科学系,²ベルン大学

木星の周りを公転するガリレオ衛星は半径 1000 km 以上の規則衛星であり、これらは周 木星円盤の中で形成されたと考えられている。これらの衛星のうち、内側の3つ(イオ、エ ウロパ、ガニメデ)は 4:2:1 の平均運動共鳴に入っている。この共鳴関係の説明の一つに、 周木星円盤にガス面密度の極大が存在し、イオの内側移動がそこで止まり、その後エウロパ とガニメデも内側移動し共鳴に捕獲された、とする説がある(e.g., Sasaki et al. 2010, Fujii et al. 2017)。本研究で我々は、周木星円盤におけるダスト粒子の光泳動によってガス面密度 の極大が形成した可能性を提示する。

光泳動とは、ガス中のダスト粒子が等方的な輻射場によって加熱されることで生じる現象 である。ダスト粒子表面に温度勾配が生まれることで、ダスト粒子に吸着し再放出されガス 分子の速度に差が生じる。この反作用によってダスト粒子は光源(本研究においては形成直 後の明るい木星)から遠ざかる方向に力を受ける。そして光泳動による力が木星へのダスト の落下の力と釣り合う場所で微小ダスト粒子の落下は止まる(e.g., Wurm & Krauss 2006)。 そして、それよりも内側がダスト欠乏領域になり、電離度の上昇によって面密度の極大が形 成されることが期待される。

我々は周木星円盤において光泳動がダスト粒子の落下を止められるかどうか調べた。計算の結果、周木星円盤の質量降着率がおよそ 10⁻⁹-10⁻⁷ *M*_J yr⁻¹(*M*_J は木星質量)のとき、光泳動によって現在のイオの軌道付近でダスト粒子の落下が止まることがわかった。このことから、ガリレオ衛星の軌道は周木星円盤における光泳動によって決定された可能性がある。



The light barrier $(F_{Ph} = F_D)$

図1. 周木星円盤における光泳動によるダスト欠乏領域形成の概念図(Arakawa & Shibaike 2019)。

イジェクタ層分布と基盤岩衝撃変成に基づく オーストラリア・アジアテクタイトイベントの衝突地点推定

Constraint on the Location of the Australasian Tektite Impact Event based on the Distribution of Ejecta Deposits and Shock Deformation of the Basement Rocks

〇多田賢弘(東京大学)・多田隆治(千葉工業大学、雲南大学、東京大学)・Paul A. Carling
 (Southampton University)・Wickanet Songtham (Nakhon Ratchasima Rajabhat University)
 ・Le Xuan Thuyen (ホーチミン市自然科学大学)・鹿山雅裕(東京大学)・三宅亮(京都大学)・常昱(東京大学)・田近英一(東京大学)

およそ79万年前に東南アジア地域に小天体が衝突したオーストラリア・アジアテクタイトイ ベントは、地球上での大規模な天体衝突の中で最も年代が新しいものである[e.g., 1]。そのため 衝突クレーター構造やイジェクタ層などの地質学的な証拠が風化・浸食を免れて残されている可 能性が高く、衝突現象のより詳細な理解に向けて重要な研究対象になることが期待される。しか し、これまでは衝突起源のガラス粒子であるテクタイトの分布に基づき、インドシナ半島東部に 衝突したと推定されてきたものの、衝突クレーター自体は未だに発見されておらず、正確な衝突 地点・規模・様式は明らかになっていない[e.g., 2]。衝突地点や規模を制約するためには、推定 地域におけるイジェクタ層の分布が重要であると考えられるが、これまでインドシナ半島陸域で はイジェクタ層が認定されておらず、分布も明らかになっていなかった。

本研究では、インドシナ半島広域においてイジェクタ層を認定し、その分布を調べるため、タ イ東北部・ラオス南部・ベトナム中部において野外調査を行った。これらの地域には、基盤の中 生界砂岩を不整合に覆う、層厚 15cm~数 m の淘汰の悪い角礫層と、それを覆う層厚数 m の塊状 砂層が連続して分布する。複数地点において角礫層最上部からテクタイトが産出したほか、角礫 層・塊状砂層を通じて、特徴的なラメラ構造(Planar Deformation Features: PDFs)を持つ衝撃変 成石英が含まれていることが分かった。このことから、これらの堆積物がイジェクタ層である可 能性が極めて高い。特に、角礫層の層厚はラオス南部に向かって厚くなる傾向があり、ラオス南 部 Bolaven 高原では層厚 9m に達することから、ラオス南部が衝突地点であることが示唆される。

また、タイ・ラオス国境付近南部においてイジェクタ層直下の白亜系基盤砂岩中にも衝撃変 成石英が含まれていることを発見した。この衝撃変成石英が含まれる基盤砂岩はタイ・ラオス国 境沿いに南北およそ 125 km、タイ・カンボジア国境沿いに東西およそ 100 km に渡っていること が分かった。このことはこの地域の基盤岩が衝撃変成作用を被ったことを示している。そこで、 基盤岩の衝撃変成度の地理的分布を解明するため、放射光X線回折(X-ray Diffraction: XRD)分析 により基盤岩中の石英の格子定数を求めた。これまで衝突実験試料を対象とした実験室での粉末 XRD 分析から、25 GPa 以上の圧力を受けた石英において、格子定数が衝撃圧力とともに増大す ることが知られている[3]。本研究では、より低い衝撃圧力で生じる格子定数のわずかな変化を正 確に捉えるために、高分解能・高強度条件を実現する放射光 XRD 分析を行った。その結果、石英 の格子定数はタイ東北部からラオス南部に向かって東方に大きくなる傾向があることが分かった。 このことは、ラオス南部が衝突地点であることを示唆する。

イジェクタ層の層厚の分布、基盤中の石英の格子定数の分布はいずれも衝突地点がラオス南部 であることを示唆しており、ラオス南部 Bolaven 高原に衝突した可能性が高い。

引用文献 [1] Glass and Simonson (2012), *ELEMENTS*, [2] Glass and Koeberl (2006), *Meteoritics* & *Planetary Science*, [3] Langenhorst (1994), *Earth and Planetary Science Letters*

火星巨大衝突により生じる衝突破片の長期力学進化の N 体計算

○石城陽太^{1,2}, 兵頭龍樹³, 藤本正樹²

1東京大学 理学系研究科, 2宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所,

³東京工業大学 地球生命研究所

火星衛星フォボス,ダイモスの起源や、ボレアレス盆地の起源として、火星における 巨大衝突説が提唱されている(Citron et al. 2015; Rosenblatt et al. 2016; Hesselbrock & Minton 2017; Hyodo et al. 2017; Marinova et al. 2008). 詳細な衝突シミュレーションによ り、この巨大衝突によって火星系外に多くの衝突破片 (火星質量の~1%) が放出される ことが報告されている(Hyodo & Genda 2018). しかし、それらが最終的にどこに終着す るかは明らかになっていない.

本研究では、N体計算を用いて火星巨大衝突後に生じる衝突破片の軌道シミュレーションを行い、衝突破片の惑星や衛星への再集積過程について調べる。衝突破片の初期条件は Hyodo & Genda (2018)の火星の巨大衝突シミュレーションの結果を用いて作成し、 41913 個の衝突破片と金星、地球、月、火星、木星からなる系について計算を行う。こ のシミュレーションにより、太陽系内の火星起源物質がどのように分布するかを考察する.

本研究の結果では、火星巨大衝突後の衝突 破片は、比較的多くが火星に再集積されるか 太陽系外に放出されていることが分かる(図 1). 他の惑星に再集積される破片も存在し、 少数ではあるが、月に集積する破片も存在す ることが分かる.

このようなシミュレーションの結果を詳 細に調べることで、巨大衝突後に生じる衝突 破片の再集積によって太陽系内に分布する オリビン豊富な天体の起源を説明できる可 能性がある.また、この結果は月にも火星起 源物質が存在する可能性を示唆しており、月 探査の結果から本研究の結果を確かめるこ とができる可能性がある.



図 1. 火星巨大衝突後の衝突破片の惑星,衛 星への再集積の個数の割合変化. Ejected は 太陽から 100 AU 以遠まで放出された粒子 の割合.

N 体計算による準惑星ハウメアの リング形成過程の検証

○角田 伊織¹, 石澤 祐弥¹, 細野 七月², 佐々木 貴教¹ ¹京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室, ²海洋研究開発機構

準惑星ハウメアは、リングを持つ唯一の太陽系外縁天体である。そのリングは、ハ ウメアの自転周期と 3:1 の平均運動共鳴を起こす位置にある(Ortiz et al., 2017)。 ハウメアは三軸不等楕円体の形状をしており、その周囲の非球対称重力場がリング の力学に影響を及ぼしていると考えられるが、リングの形成過程については解明さ れていない。我々は、ハウメアの自転による分裂によってハウメアの2つの衛星が 形成されたという説(Ortiz et al., 2012)に着目し、このモデルに基づいて以下のよ うなハウメア系形成のシナリオを提示した。まず、ハウメアから衛星サイズの破片 が複数飛び散ったという状況を考える。ハウメア周囲の非球対称重力場のため、ハ ウメアの近傍では物体が安定して存在できない。また、安定軌道にある物体のうち、 ロッシュ限界の内側にあるものは、潮汐力によって破壊され、それがハウメアを公 転することでリングになる。ロッシュ限界の外側に位置していた物体は、潮汐で軌 道進化し、現在の衛星の位置まで移動する。以上のシナリオのうち、本研究では、 軌道不安定領域の外側かつロッシュ限界の内側に位置している物体が潮汐破壊され、 リングになる過程を検証する。まず、三軸不等楕円体の周囲の重力場を計算し、時 間変動する重力場を組み込んだシミュレーションにより、ハウメアを公転する物体 が安定して存在できる領域を見積もった。その結果、ちょうど現在のリングの位置 よりも内側では、物体の軌道が不安定となることがわかった。さらに、パラメータ スタディとして、物質強度を変数とした N 体シミュレーションを行ったところ、多 くのパラメータにおいて、ロッシュ限界の位置が現在のリングの位置付近になるこ とが示された。そのため、本研究で提示したシナリオによって、リング形成過程を 説明できる可能性があることがわかった。

共鳴鎖にある惑星系の軌道不安定条件:中心星質量の進化

○ 松本 侑士¹, 荻原 正博²

1中央研究院天文及天文物理研究所,2国立天文台

近年の観測により、中心星近傍に複数のスーパーアースサイズの惑星が連続した平均運動共鳴(共 鳴鎖)にある惑星系が発見されている (e.g., Mills et al., 2016, MacDonald et al., 2016)。共鳴鎖 にある惑星系は惑星の軌道落下を考慮した N 体計算によって再現されている (e.g., Ogihara & Ida 2009; Izidoro et al., 2017; Bitsch et al., 2019)。軌道落下を考慮した惑星形成モデルにより、共鳴 鎖にある惑星系とない惑星系の両方が説明できる。これは共鳴鎖に捕獲された惑星の数によって は、共鳴鎖にある惑星系が軌道不安定を起こし共鳴鎖にない惑星系になるためである。共鳴鎖に 捕獲された惑星の数が少ない場合は軌道が長時間安定しており共鳴鎖のままに存在する。共鳴鎖 に捕獲された惑星数が典型的に 10 個程度の臨界数よりも多い場合には、共鳴でない場合と同程度 の時間で軌道が不安定化し共鳴鎖にない惑星が形成する (Matsumoto et al., 2012)。Izidoro et al. (2017; 2019)では軌道落下を考慮した惑星形成モデルの N 体計算を行い、系外惑星の観測 (e.g., Fabrycky et al., 2014)との定量的な比較を行った。N 体計算の結果は惑星系が共鳴鎖にある確率、 共鳴鎖にある惑星系の惑星数でより高い値を示しており、定量的には観測を説明できていないこ とがわかった。

我々はこの観測とN体計算の相違を説明するために、惑星あるいは恒星の質量進化が共鳴鎖にあ る惑星系の安定性に及ぼす影響についての研究を行った。ガス円盤内で軌道落下を経験した惑星 はガス大気を獲得している可能性がある (Ikoma & Hori 2012) が、獲得した大気は中心星の EUV 放射などにより失われる (e.g., Valencia et al., 2007; Owen 2018)。また恒星質量も恒星風やコロ ナ質量放出によって円盤散逸後に質量を失う (e.g., Wood et al., 2005; Aarnio et al., 2012)。そこ で我々は共鳴鎖にある惑星系に惑星質量あるいは恒星質量の時間進化を考慮した N 体計算を行い、 軌道安定時間を調べた。

惑星質量を変化させた場合、Matsumoto et al. (2012) で求められた共鳴鎖にある惑星を安定に保 つ臨界数よりも少ない惑星数であっても惑星は軌道不安定を起こした。特に臨界数に近い惑星数 であるほど少ない質量変化で軌道不安定を起こし、~1%の質量変化でも惑星が共鳴鎖から外れ 軌道不安定を起こした。また恒星の質量変化はより強く共鳴鎖にある惑星系の軌道安定時間に影 響し、~0.1%の質量変化で惑星系が軌道不安定を起こすことがわかった。これらの軌道不安定の 原因は質量進化に伴う軌道長半径の変化が影響している。惑星質量及び恒星質量が変化した際に、 惑星の軌道長半径は変化するが、この軌道長半径の変化率が惑星質量と恒星質量の和に依存する (Minton & Malhotra 2007)。同じ割合の質量変化であっても恒星質量の変化はより大きな摂動を 惑星系に与えるため、共鳴鎖にある惑星系がより少ない質量変化で軌道不安定を起こしたと考え られる。恒星質量の~0.1%の質量変化は恒星風やコロナ質量放出によって十分に起こりうる質 量進化である。この恒星質量の変化が惑星数の多い共鳴鎖にある惑星系の軌道を不安定させるこ とで、惑星系が共鳴鎖にある確率が下がり、また観測された共鳴鎖にある惑星系の惑星数を説明 することができる。

系外惑星大気中の雲形成における 粒子サイズ・空隙率分布の共進化

○大野和正¹、奥住聡¹、田崎亮² ¹東京工業大学²東北大学

系外惑星の大気組成は、形成時の情報を保持していると考えられ、ハッブル宇 宙望遠鏡などで盛んに調べられている。近年の系外惑星の"食"を利用した大気 透過光スペクトル観測の発展により、系外惑星の大気上層には雲や靄が普遍的 に存在することが明らかとなった^[1,2]。雲は大気透過光を遮ることで、観測スペ クトルの形状に多大な影響を与える。そのため、観測結果を正しく解釈するため には、系外惑星における雲形成過程を理解することが非常に重要である。

近年の理論研究により、系外惑星の雲形成において粒子の空隙率進化が重要 な役割を果たすことが明らかとなってきた^[3,4]。系外惑星は高温環境のため、固 体鉱物(e.g., KCl, MgSiO₃)の雲が形成されうる^[5]。この鉱物雲を構成する固体雲 粒は、衝突合体を経て内部に空隙をもつアグリゲイトを形成しうる。我々は、雲 粒の空隙率進化を考慮することで、従来の雲モデル^[6,7]では説明が困難な高層雲 の形成を説明できることを明らかにしてきた^[3]。

これまで我々は、雲粒の平均サイズ・空隙率に着目して研究を行ってきた^[3,6]。 一方、衝突合体による空隙率進化は衝突粒子のサイズ比に依存するため^[8]、雲粒 のサイズ分布が本質的に重要となりうる。そこで我々は、雲粒のサイズ分布・空 隙率進化を同時に考慮した雲微物理モデルを新たに開発した^[9]。モデルでは、平 均体積近似^[8]を用いることで、各質量ビンにおける雲粒の平均空隙率の進化を自 己無撞着に計算した。計算の結果、雲粒はフラクタル次元 *D_f*~2の小粒子と *D_f*~ 2.4 の大粒子にピークを持つ二峰性の分布を取りうることが分かった。空隙率の 高い小粒子群は沈殿速度が低く、大気上空まで輸送される。一方で、空隙率の低 い大粒子群は沈殿速度が大きいため、小粒子群に比べて低い高度までしか到達 しないことが分かった。本講演では、得られた雲分布の大気透過光スペクトル観 測への影響に関しても議論を行う予定である。

[1] Sing et al. 2016, *Nature*, 529, 59; [2] Crossfield & Kreidberg 2017, *AJ*, 154, 261; [3] Ohno et al. 2019, *arXiv:1908.02201*; [4] Adams et al. 2019, *ApJ*, 874, 61; [5] Morley et al. 2012, *ApJ*, 756, 172; [6] Ohno & Okuzumi 2018, *ApJ*, 859, 34; [7] Gao & Benneke 2018, *ApJ*, 863, 165; [8] Okuzumi et al. 2009, *ApJ*, 707, 1247; [9] Ohno et al. in prep

SPICA による原始惑星系円盤からの 複雑な有機分子輝線の観測予測

O野村英子¹, Chen-En Wei², Catherine Walsh³, T.J. Millar⁴ ¹国立天文台 科学研究部,²東工大 地球惑星科学系,³University of Leeds,

⁴Queen's University Belfast

原始惑星系円盤中の物質進化の理解は、太陽系や系外惑星系の物質の起源を探るうえで重要であ る。我々は円盤物理構造モデルにもとづき、ダスト表面反応も含めた化学反応計算を行い、円盤 中の複雑な有機分子生成過程を調べた。その結果、円盤外縁の低温部においてはダスト表面で水 素付加反応が進むのに対し、円盤内縁の暖かな領域においては、光解離により生じたラジカル同 士の反応で複雑な有機分子が生成された。ALMA 観測では、円盤外縁で CH\$_3\$OH や CH\$_3\$CN が 観測されている。特に CH\$_3\$OH は低温領域をトレースする遷移線が観測されており、モデルと の比較により、円盤外縁部において水素付加反応により生成された分子が非熱的な過程により気 相に脱離したものを観測したと考えられている。

本研究では、これまでの化学反応計算の結果を用い、円盤からの複雑な有機分子輝線の赤外線放 射スペクトルの輻射輸送計算を行った。次世代赤外線天文衛星 SPICA は、中間・遠赤外線領域の 高感度分光観測が可能である。本研究では、SPICA で観測可能な波長帯に現れる複雑な有機分子 輝線をモデル計算した。その結果、このような輝線は SPICA を用いれば検出可能であり、また、 赤外線輝線は励起温度が高いため、円盤内縁の暖かい領域から放射されることが示された。この ような領域は、ダスト表面でラジカル同士の反応が進む領域、あるいは分子がダストから熱的に 脱離する領域に相当する。一方で、円盤の化学反応計算の結果は、ロゼッタミッションで彗星か ら検出された複雑な有機分子の存在量ともよい一致を示す。これらの分子も暖かなダスト表面で 生成された分子と考えられており、本ポスターでは、SPICA で観測可能な分子との関連も議論す る。

UZUME 計画における月の縦孔

~楕円クレーター、縦孔の形成過程の実験的考察

⁰道上達広(近畿大)、ハガーマン・アクセル(スターリング大)、諸田智克(名古屋大)、春山純 ー(JAXA)、長谷川直(JAXA)

Haruyama et al. (2009)と Martellato et al. (2013)は、月の縦孔は、溶岩チューブの空洞の天井 に隕石が衝突し、崩落することによって形成されたことを、地形的特徴、数値計算により示 唆した。月と同じく火星の縦孔の一部も、溶岩チューブのような空洞がある天井に、隕石が 衝突して形成された可能性は高い。特に月の縦孔は楕円形をしていることから、隕石の斜め 衝突によって形成された可能性がある。そこで本研究では、月の縦孔の形成メカニズムの理 解のために、空洞を模擬したモルタル標的を作成し、弾丸をその天井部分に斜め衝突させる ことで、どのような形の縦孔が形成されるか実験的に調べた。なお、本研究は、Michikami et al.(2014)と Michikami et al. (2017)の実験結果を基に若干の考察を加えた内容になっている。

実験は JAXA 宇宙科学研究所にある 2 段式軽ガス銃を使用し、弾丸に直径 7.14mm、質量 0.217gのナイロン球を用いた。標的はモルタルを作成し、音速 2280±60 m/s、圧縮強度 3.2MPa、 引張強度 0.8MPa である。標的の大きさは、縦 25cm、横 35cm、高さ 4cm の直方体で、下面の 半分ほどをくり抜き、空洞面の天井の厚さを 1cm にした。標的表面に対して衝突角度は 2°か ら 90°(垂直衝突)の範囲で衝突させた。衝突速度は約 2.4km/s で、全ショット数は 7 である。 真空度は 40Pa 以下で、破片の飛び出す様子を 2 方向から高速度カメラで撮影した。

今回の実験では、衝突面に形成されたクレーターに加えて、衝突反対面にもクレーターが 形成された。これら衝突面、衝突反対面のクレーターが繋がったときに、縦孔は形成された。 衝突角度 30°では 90°の正面衝突の縦孔の形は変わらないものの、衝突角度 20°より小さくな ると、衝突角度が小さいほど、縦孔の形は細長くなった。

縦孔が月の表層で形成される頻度を考える。月の縦孔は 100m サイズ程度であるので、室内 衝突実験の結果はある適用できると考えられる。しかし、月面に衝突する隕石の平均衝突速 度は 20km/s 程度であるので、今回の衝突速度 2.4km/s の室内実験の結果を適用するには注意 が必要である。衝突速度が大きくなるほど、楕円形の縦孔が形成される衝突角度は小さくな る。そのため、月面での隕石衝突では、かなり低い角度でないと発見された月の縦孔は形成 されない。その衝突確率は 1%以下だろう。一方、隕石が月面に衝突して、クレーターが形成 され、飛び出した破片が再び月面に衝突する際の衝突速度は、数 100m/s であり (2 次衝突)、 今回の実験の衝突速度よりかなり小さい。したがって、その場合、衝突角度は数 10°でも月の 楕円形の縦孔は形成可能となる。以上のように、今回の実験を月に適用すると、月の楕円形 の縦孔は、2 次衝突によって形成された可能性が高いことが分かった。

月の最終期マグマ活動と縦穴周辺の若い溶岩流探査

諸田智克¹,春山純一²

「東京大学,2宇宙航空研究開発機構

これまで我々は「かぐや」データをもとに、嵐の大洋・雨の海領域の若い溶岩流と月裏側の海の 年代を計測してきた(1,2). それにより、嵐の大洋・雨の海からなる Procellarum KREEP Terrane (PKT)では 15 億年前までマグマ噴出が起こったことがわかっている. 月隕石試料によると、 43.5 億年前にはすでに月の海のマグマ噴出活動が始まっていたことから(3)、PKT のマントルは 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、 PKT 領域では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 ている(4). さらにこのピークと同期して、マグマのチタン量が増加したことがわかっている (4). これらのことは、それ以前のマグマ活動と 20 億年前のマグマ活動で、マグマを生成したソ ース領域が変化したことを示唆している. チタンは月初期のマグマオーシャンの固化過程において、 マントル上部に濃集し、その後、重力不安定によってマントル深部に沈んだと考えられている(4). 20 億年前の若い活動は深部に沈んだチタンと深く関係していると考えられ、月の長期的熱進化や物 質循環の観点から重要である. 若い活動の発生メカニズムを理解するためには、若い溶岩流のより詳 細な岩石学的情報を必要とする.

縦孔が存在するマリウスヒルは若い溶岩流が分布する領域に近く(5),その周辺の火山地形の探査が 重要である.近年,さらなる高解像度画像データの解析によって,マリウス丘においても若い火成活 動が起こった可能性が示唆されており(6),実際に,かぐやデータを用いた我々の検証においても 20億年程度の溶岩流が存在することが示されている(7).これらの若い溶岩流の岩石学的な調査は マグマがマントルから分離した温度圧力条件を制約するために重要であり,その情報に基づいて,月 の若いマグマ活動の発生機構の理解が得られると期待される.

1) Haruyama, J., et al., Science (2009) 323, 905-908.

2) Morota, T., et al., Earth and Planetary Science Letters (2011) 302, 255–266.

3) Terada, K., M. Anand, A. K. Sokol, A. Bischoff, and Y. Sano, Nature, 450, 849–853, doi:10.1038/nature06356, 2007.

4) Kato, S., et al. Meteorit. Planet. Sci. (2017) doi: 10.1111/maps.12896.

- 5) Haruyama, J., et al., Geophysical Research Letters (2009) 36, L21206.
- 6) Hiesinger, H., et al., Moon (2016) 47th Lunar Planet. Sci. Symp., abstract #1877.
- 7) 諸田智克, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2D19.

ルナ 16 号試料 L1613 のキャラクタリゼーション

〇渡邊 宏海' 寺田 健太郎' 河合 洋輔' 佐野 有司' 高畑 直人' 鹿児島 渉悟' 1 大阪大学理学研究科 2 東京大学大気海洋研究所

月の進化を議論する上で、月試料は重要である。月のレゴリスは、数十億年にわたる連続的 な隕石の衝突によって引き起こされた微細な粒子及び粉末の混合物である。

そのため、レゴリスの年代学においては、玄武岩や斜長岩などの個々の粒子の起源について 考慮されるべきである。

本研究では、 旧ソ連のルナ 16 号ミッションが Mare Foecunditati から回収 L1613、約 1500 粒のレゴリス試料について、SEM-EDS の Spectral imaging 機能を用いて元素マッピングを 行なった。さらに局所 U-Pn 年代分析に適したリン酸塩鉱物とそれらに隣接している輝石に 対して Point&shoot 機能を用いて定量分析を行い、個々の粒子の起源を同定した。その結果、 このフラクションの多くは Low-Ti 玄武岩起源であり、わずかに斜長岩質起源成分が混ざっ ていることが明らかになった。また NanoSIMS を用いた局所分析によって U-Pb 年代が 36 億 年と 44 億年の粒があることが分かった。

ポスター発表では、ルナ 16 号試料 L1613 のキャラクタリゼーションの結果と、U-Pb 年代測 定の結果について報告する。

月形成年代毎のクレーターの空間分布について

〇本田親寿¹, 安田雄飛¹, 横田康弘² ¹会津大学, ²宇宙航空研究開発機構

Spatial distribution of lunar craters based on the Voronoi tessellation which can be regarded a Voronoi cell as a territory of each crater corresponding to a generator was conducted for each lunar surface model age (Wilhelms et al., 1987). The result of spatial distribution for each model age supports an interpretation that the synchronized rotation of the Moon started at least in the Nectarian system.

月の自転-公転の同期回転はクレーターの生成率に影響を与える。月の自転-公転の同期回 転がクレーターの生成率に及ぼす影響を数値計算(e.g., Le Feuvre and Wieczorek, 2011)した結果によると、同期回転効果は月の西側半球の apex においてクレーターの生成 率が最大となることが示されいる。こういった月の自転-公転の同期回転がクレーターの生 成率に影響を与えたことを示す観測的証拠は,過去 10 億年のうちに形成された光条を持つ 比較的新鮮なクレーターの空間分布に表れている(Morota et al., 2005; Werner and Medvedev, 2010)。

本研究ではクレーターの空間分布について月の高地に着目して月高地の形成年代毎に同期 回転効果の影響を調べた。月の高地表面の形成年代は主に Imbrian system、Nectarian system、pre-Nectarian systemの3つに大別されるが、本研究では Wilhelms et al. (1987)の形成年代の地質区分図を基にして形成年代毎にクレーターの空間分布を調べた結果、 Imbrian system、Nectarian systemのクレーターの空間分布は月の自転公転の同期回転を 支持する結果となった。

着陸探査におけるオートフォーカス機能の有用性

〇佐藤広幸¹、石原吉明²、佐伯和人³、仲内悠祐¹
¹JAXA 宇宙科学研究所、²国立環境研究所、³大阪大学

JAXA の小型月着陸ミッション"SLIM"に搭載予定のマルチバンドカメラ(MBC)は、オートフォーカ ス(AF)機能を有している。着陸後の MBC 視野内に入る転石表面を、高解像度で撮像し構成鉱物 のスペクトルを観測する、という MBC の観測目標を達成するためには、近傍約 1.5mから遠方約 30mまでの望遠観測が必要となり、AF は必須の機能である。部品数が多く構造が複雑で、稼働部 が避けられない AF は、トラブルを避けたい惑星探査用カメラには敬遠される傾向にある。しかし AF には、単にフォーカスを合わせるだけの機能に留まらず、いくつかの付加的な有用性があり、本 研究では以下の2点を議論する。

ーつは、デフォーカス状態を利用した較正観測である。運用中の暗時(dark)、および明時 (flatfield)観測では、極力視野内が一様でフラットな状態が必要となる。パンフォーカスカメラでは一 様なシーンを観測可能な視野から探す(もしくは姿勢制御で意図的に作り出す)必要があるが、完 璧なターゲットを探すのは特に明時用にはほぼ不可能である。その点 AF 機能があれば、デフォー カスにより細かい明暗差がフラットになるので、理想的な較正観測を行い易い。

もう一つは、フォーカス深度合成による、簡易地形モデル(DTM)である。フォーカスレンズを細か くー定量ずらしながら同一の画角を撮像すると、フォーカス深度(ピンが最適なレンズ位置)を全ピク セルで求めることができる。フォーカス深度をカメラからの距離に焼き直せば、簡易的な DTM を作 成することができる。太陽高度が高い時に軌道上から直下を撮像する場合と異なり、地上に近い高 さから起伏のある地面を水平線方向に撮像する場合には、光の入射・出射角の影響を受けやすい。 この影響を取り除く為には、DTM を使った正確な角度計算が必要となる。本研究では、宇宙科学研 究所内の管理された巨大な砂場(探査フィールド)で、フォーカス深度合成用観測を行った。発表で は、このデータを用いた簡易 DTM 作成手法と、得られた DTM の精度検証結果を報告する。

月の表面を模擬した混合物組成による宇宙風化実験

〇島名亮太¹、佐々木晶¹、廣井孝弘²

1大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

²Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University

宇宙風化は、月や小惑星など大気のない岩石質天体が長期間宇宙空間にさらされることで光 学的性質や表面構造が変化する作用で、主な光学的性質の変化で、反射スペクトルの赤化(傾 きが大きくなる)、暗化(全体的に暗くなる)、吸収帯が弱くなる、という3つの変化が知られ ている。このような変化は、微小隕石の衝突や太陽風の照射などにより天体表面の鉱物にふ くまれる鉄イオンが還元され、ナノ鉄微粒子が生成されることによる。天体の表面の鉱物組 成や、粒径、太陽との距離など様々な要素によって宇宙風化を受ける程度が異なる。月面に 多く含まれる斜長石は、鉄をほとんど含まず、単体では宇宙風化を受けにくいが、月面は宇 宙風化をかなり受けていることがアポロ計画で持ち帰られた試料やリモートセンシングのデ ータからわかっている。そこで、本研究では、鉄を多く含み宇宙風化を受けやすいカンラン 石を少量含むことで、月面が宇宙風化を受けていると考え、様々な長石にカンラン石を混合 したものを試料とし、ナノ秒パルスレーザーの照射で月面の微小隕石の衝突を模擬し、宇宙 風化による反射スペクトルの変化を再現し、分光器で反射スペクトル(波長 250-2500nm)を 計測して解析した。

その結果、レーザー照射前後を比べると、長石とカンラン石ではスペクトル変化の傾向が異 なり、宇宙風化に特徴的な赤化の傾向については、長石に 20wt%のカンラン石を含むことで、 アポロ試料のうち、月面の高地と海で見られるスペクトル変化のタイムスケールと整合的と なった。



図1:レーザー照射による規格化した 宇宙風化指数の変化

赤化指標= <mark>R(吸収帯の右端)</mark> R(吸収帯の左端)

暗化指標 = R(2500)

月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計画での 磁場計測

O疋島 充¹, 清水 久芳², 春山 純一¹, 大槻 真嗣¹, 西堀 俊幸³, 岩田 隆浩¹
¹宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構,²東京大学地震研究所,³宇宙航空研究開発機構

月には地球のようなダイナモ磁場は存在していないが月面において局所的にmagnetic anomalyが存在することが知られている.1960年代以降の衛星,月表面における静磁場計測 より数百nTまでの磁場が確認されている.さらに,アポロサンプルや月隕石などから,数十 億年前には月表面の磁場が100uTにまで至っていたことが示唆されている.

これまでの月周回衛星により月面には深さ数10m~数100m程度の縦孔が数箇所発見されてお り、縦孔底には溶岩チューブのような火成活動起源の地下空洞の存在が確認されている.強 い放射線に暴露および隕石により破壊を受けた月表面と異なり、地下空洞内では過去の情報 を変わらず有している可能性が高く、地下空洞を形成する岩体が流出した当時(30数億年 前)の磁場を捕獲、残していることが考えられる.縦孔底でそのような残留磁化成分を計測 できる可能性が高い.また、縦孔内の壁は層構造になっており、層ごとの磁場を計測できれ ば当時の磁場変遷が追え、過去の月の火山活動の歴史を知ることができる.

我々はUZUME計画において縦孔や地下空洞を調査するために探査プローブを送る予定である . 縦孔内での磁場計測は月周辺から月面,そして地下へとより詳細な月磁場の情報を得るた めの月の縦孔・地下空洞探査の重要な観測項目候補であり,我々はそれに資する探査プロー ブに搭載する小型磁力計の検討を始めている. 縦孔探査は各国でも検討が進められており, 縦孔,地下空洞内での計測技術をいち早く確立し,月歴史,月環境の理解へと繋げる.

SLIM マルチバンドカメラ (エンジニアリングモデル)の光学特性評価

○仲内悠祐¹,佐伯和人²,本田親寿³,大竹真紀子¹,白石浩章¹,

佐藤広幸¹,石原吉明⁴,前田孝雄⁵,坂井真一郎¹

1宇宙航空研究開発機構,2大阪大学,3会津大学,4国立環境研究所,5中央大学

月着着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) では、小型・軽量な探査機を 用い重力天体の狙った場所ヘピンポイント着陸するために必要な技術実証を計画している. SLIM による精密航法制御アルゴリズム、画像認識航法、衝撃吸収脚などの技術実証により、 重力天体への「降りやすい所に降りる」探査から「降りたい所に降りる」探査が可能となる ことが期待される. SLIM ではこの技術を活用し、月周回衛星 SELENE のデータから推定さ

れた月マントル物質が露出している箇所にピンポイン
 トで着陸し、近赤外マルチバンド分光カメラ (Multi
 Band Camera : MBC)を用いた月マントル物質の Mg#の
 推定を試みる (関連発表: O29, P43, P46).

MBC は指向用ミラーを持つ望遠分光カメラであり、
 700 nm - 1700 nm に感度のあるインジウムガリウムヒ素
 (Vis-InGaAs)の半導体イメージングセンサと 10 枚の

バンドパスフィルターを用いて、マルチバンド画像デ

ータを取得する. 主な仕様を表1にまとめる. MBCは日本の探査機搭載分光カメラで初め て"オートフォーカス機能"と"指向用ミラー"を搭載する. 着陸後, 10mの距離にあるボ ルダーなどを0.13cm/pixelの空間分解能で分光観測をすることが可能となる.

我々は MBC-EM の製造を進めており、6 月には MBC 電気 I/F モデルを用いた SLIM システムとの噛合 せ試験により、Space Wire を用いたテレコマ通信が 確立することを確認した。8 月には筑波宇宙センター の 1m 級積分球を用い、フラットフィールド、検出器 リニアリティなどの性能確認試験を行った。MBC-EM の暗示の出力は、露光時間に対して非常に良いリニア リティ (R² = 0.9984)を示した(図 1).本発表では、 積分球試験で得られたデータの解析結果を報告する.



図 1) 暗時出力の露光時間依存性. 各露光時間に おける全ての画素出力の平均値を用いた.

表1 MBCの仕様		
分光撮像性能	観測波長	750 nm, 920 nm, 950 nm, 970 nm, 1000 nm, 1050 nm, 1100 nm, 1250 nm, 1550 nm, 1650 nm パンド幅 30 nm
	分光方式	パンドパスフィルタ(フィルターホイールにより変更)
	検出器	VIS-InGaAs撮像素子(冷却機構無し)
	FOV	4°、反射鏡を2軸ジンバルで駆動(Azm. ±30°, Elv. +80 [°] -40°)
	空間分解能	0.13 cm/pix@10 m
その他	質量・電力・サ イズ	約4.0kg, 13W (最大24W) カメラヘッド部: W 415 x D 120 x H 220 エレキ部: W 135 x D 140 x H 51
	発生データ量	121 M ~363 M bytes 画像(非圧縮の場合)
	搭載位置	着陸機側面に搭載.(右図参照)
	ミッション期間	着陸後の最初の昼の数日間(越夜不要)

P47

月の Davy チェーンクレーターの形成は潮汐力破壊により

分裂した彗星の衝突によるものなのか

○齋藤晶也1,2,春山純一2,三宅亙1

1東海大学大学院工学研究科,2宇宙航空研究開発機構

月の Davy チェーンクレーター(11.0°S 6.3°W)は,直径約 900 m から約 3.6 km の約 20 個のクレータ ーで構成されている,チェーン(鎖)状に連なったクレーター群であり,チェーンの全長は約 45 km であ る. 一般的に,クレーターの起源には,2 つのタイプがある. i)主に噴火口や断層のズレによってできた, あるいは,溶岩が流れた跡に形成される溶岩チューブが崩落してできた,内因性起源のクレーター. ii) 小 惑星や彗星の衝突,または衝突した際に飛ばされるエジェクタの衝突によって形成された外因性起源のク レーターである.本研究では,まず, Davy チェーンクレーターが内因性起源か外因性起源によるものなの かを議論する.

Davy チェーンクレーターは,チェーンをなす各クレーター周辺に,外因性起源のクレーターの特徴であ る,緑(リム)を有していることが確認されていることに加え,Davy チェーンクレーターが,木星の衛星に 存在するチェーンクレーターと類似していることから,Davy チェーンクレーターも木星衛星のチェーンク レーターと同様に,潮汐力により破壊され分裂した彗星の衝突による外因性起源のクレーター群であると 示唆されているが(Wichman and Wood, 1995),木星に比べ,地球の重力は小さいため,地球-月系において は,分裂した彗星の衝突の起きる可能性は稀である.さらに,Davy チェーンクレーターがソースとなる1 次クレーターから飛ばされたエジェクタの衝突による2次クレーター群であるとしても,月の東の海付近 のチェーンクレーターのように,チェーンの並んでいる先の方向に,ソースとなるような1次クレーターが 存在していない.加えて,Davy チェーンが弧を描くような湾曲した形であることから,Davy チェーンク レーターが2次クレーター群であることについても,不明点が残る.

本研究の目的は、Davy チェーンクレーターの形成起源を月探査によって得られたデータを用いて調査す ることである. 調査には、月周回衛星 SELENE に搭載されている地形カメラ (TC)により取得された画像、 地形データを用いた. 空間分解能は、高度 100 km で 10 m/pixel である. 我々は、 チェーンが弧を描くよ うに湾曲していることから、Davy チェーンクレーターが、ソースとなる1次クレーターの衝突時に、同心円 状に飛んだエジェクタが衝突して形成された2次クレーター群であるという仮説を立て、弧の中心方向に 1次クレーターと考えられるようなクレーターが存在するか調査を行った. その結果、Davy チェークレー ターの北北西方向 210 km の位置に、クレーターLalande (4.4°S 8.6°W)を同定した。Lalande の直径は約 24 km であり、Davy チェーンクレーターの1次クレーターとしても、適切な大きさである. さらに我々は、 過去の月に存在する2次クレーターに関する研究との比較を行い、Davy チェーンクレーターの形成起源に ついて調査した.

将来月探査計画 HERACLES の着陸地点検討

Landing Site Examination of Future Lunar Exploration Mission "HERACLES"

O唐牛讓¹,長岡央¹,石原吉明²,鹿山雅裕³,山本聡⁴,橋爪光⁵,小川佳子⁶, 長谷部信行⁷,矢田達¹,安部正真¹,春山純一¹,大竹真紀子¹

¹宇宙航空研究開発機構,²国立環境研究所,³東京大学,⁴宇宙システム開発利用推進機構, ⁵茨城大学,⁶会津大学,⁷早稲田大学

HERACLES (Human-Enhanced Robotic Architecture and Capability for Lunar Exploration and Science)は、有人月探査ミッションのプリカーサミッションとして欧州宇宙機関 (ESA) リ ードの元,カナダ宇宙庁 (CSA),宇宙航空研究開発機構 (JAXA)の3機関共同で検討が進 められている, 月近傍ステーション (Lunar Orbital Platform-Gateway; Gateway) からの有人支 援を前提とした月面無人探査計画である。基本的なミッション目的は、有人月面探査ミッシ ョンに向けてのサブスケールモデルによる技術実証ミッションであり、かつ月面からサンプ ルを持ち帰るサンプルリターンミッションである.着陸地域は現在議論中であり、持ち帰る サンプルは最大15kgを予定している。現在検討されているミッションシナリオは以下のと おりである. 着陸機 (JAXA 担当), 離陸機 (ESA 担当), 探査ローバ (CSA 担当) で構成され た着陸船で,打ち上げ (Ariane-64 を想定),月面にダイレクトに着陸し探査ローバを展開, 探査ローバにて探査およびサンプル採取を実施する.サンプルを収めたサンプルコンテナを 離陸機に搭載して Gateway にサンプルを運んだ後,有人帰還機によって地球にサンプルを持 ち帰る計画である、月面への着陸および探査ローバの展開・初期運用は地上からのコントロ ールとし, Gateway に宇宙飛行士が滞在した後は, Gateway に滞在する宇宙飛行士のサポー トによって探査ローバはコントロールされる。月面着陸からサンプルコンテナを打ち上げる までの探査期間を70日間とし、離陸機打ち上げ後は残った探査ローバを1年間地上コント ロールによって操作し、長期表面移動・探査技術の実証を行う.

HERACLES ミッションのサイエンスワーキンググループ (SWG) において、月着陸地点 や採取するサンプルの種類、採取方法およびローバに搭載する科学観測機器などの「科学」 に関する議論を行っている. SWG では、月科学の議論を行うにあたり、国際的な月科学コ ミュニティからの意見を求めるため、国際科学定義チーム (International HERACLES Science Definition Team; iSDT) を組織して議論を進めている. 著者らは iSDT の活動に先立ち、日本 月科学コミュニティの意見を集約する目的で、HERACLES 着陸地点検討を開始し、科学提 案を募集、およびコアメンバーによる優先順位の高い着陸探査候補地点の検討を行ってきた. 発表では、これまでの着陸探査候補地点の検討状況を報告する.

短周期ガス惑星からの電波放射を用いた内部構造の制約

堀 安範

アストロバイオロジーセンター/国立天文台

中心星からの恒星風およびコロナ質量放出に伴う高エネルギー粒子と惑星磁場の相互作用に よって、惑星からの(非熱的な)電波放射が起きる。短周期ガス惑星では、金属水素層での ダイナモ運動で駆動される双極子磁場は~10Gから数100 Gと予想されていることから、電 子サイクロトロンメーザー不安定で発生する10MHz-数100MHz帯(メートルからデカーメー トルの波長域)の電波放射強度は、µJy-mJy程度と期待される。そこで、将来的な電波観測 可能性を見据えて、惑星磁場と電波放射強度の関係から、短周期ガス惑星の内部構造に対す る制約の可能性について検討を行なった。

Inferring the Interior Structure of a Hot Jupiter from Radio Emission

Yasunori Hori

Astrobiology Center/National Observatory of Japan

Non-thermal radio emission from a planet is known to occur by interactions between planetary magnetic field and high-energy particles, which come from a stellar wind and coronal mass ejection. A hot Jupiter likely has a relatively strong magnetic field (~10G to a few 100G) that can be generated by dynamo action in a metallic hydrogen region. The expected radio flux from a hot Jupiter ranges from μ Jy to mJy in 10MHz- a few100MHz, which are driven by the electron-cyclotron maser instability. Toward next-generation radio telescope projects, we consider the possibility of inferring the interior structure of a hot Jupiter from radio observations.

陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する大気大循環モデル実験

○ 吉田 哲治 (北大理), 石渡 正樹 (北大理)

1 はじめに

系外惑星が多数発見されており, 生命存在可能 性の検討を念頭に置いた気候推定が行われている (Noda et al, 2017 など). Abe et al. (2011, 以下 AASZ2011)は、系外惑星の1つの姿だと考えられ る陸惑星の気候に関する大気大循環モデル実験を 行った. 陸惑星とは、地球に比べて表層に存在する 水が極端に少ない惑星である. AASZ2011 は太陽 放射吸収量が 415W/m² になるまで惑星表層に少 量ながらも液体の水が存在することを示した.惑星 全体が水で覆われた水惑星の場合,太陽放射吸収量 が 330 – 350W/m² を越えると暴走温室状態が発生 し、液体の水は存在できなくなる (Nakajima et al. 1992). 陸惑星は広い太陽定数の範囲で表面に液体の 水を有し,惑星の生命存在可能性を考察する上で重要 な対象であるといえる. 更に, AASZ2011 は, 太陽放 射吸収量が 415W/m² を越えると土壌水分が全て蒸 発する完全蒸発状態が得られることを示した.本研 究では、当初、陸惑星において完全蒸発状態が発生す る条件の自転軸傾斜・自転角速度依存性を調査する ことを目ざしていた. しかし, AASZ2011 と同様の 設定を用いた再現実験を実施したところ、彼等が示し た臨界値を越えても完全蒸発状態が発生しない可能 性があることがわかってきたので、その報告を行う.

2 モデル,実験設定

本研究で用いたモデルは惑星大気大循環 モデル DCPAM5(http://www.gfd-dennou.org/ library/dcpam/) である. その基礎方程式はプリ ミティブ方程式である. 放射過程では地球を想定し た放射スキームを用いる. 土壌水分の計算には Manabe (1969) のバケツモデルを用いる. アルベドは土 壌では 0.2, 雪氷では 0.75 とする. 凝結過程, 鉛直乱 流混合過程などは地球大気で用いられているパラメ タリゼーションスキームを用いて表現する.水平解 像度は T21, 鉛直層数は 26 とした.惑星の自転軸 傾斜角, 及び離心率はともに 0 とした.惑星半径, 自 転角速度, 重力などは地球と同じ値を用いた.初期状 態として, 水惑星に太陽定数 1365 W/m² を与えて 15 年積分した結果を用いた.太陽定数として 1365, 2400 W/m² を用いた.

3 結果

図1に太陽定数が2400 W/m²の場合の全球平均 土壌水分量と鉛直積分大気水蒸気量の時間変化を示 す.計算開始から300日目までは大気水蒸気量は増 加し,土壌水分量は減少した.300日目以降では逆 の傾向となっている.まだ定常状態に達してはいな いが,計算開始から2000日目の時点で土壌水分量は 依然として増加傾向を示している.太陽放射吸収量 (図は示さない)は計算開始から2000日目の時点で 450 W/m²となっており,AASZ2011の完全蒸発が 起こる入射量を超えている.以上の結果は,完全蒸発 状態が発生する太陽放射吸収量の値がAASZ2011で 示された値よりも大きくなる可能性があることを示 唆するものである.今後は太陽定数の値を更に増加 させた実験を行う予定である.



図1 水分量の全球平均値の時間変化. 横軸は時間 [day] であり 5475 [day](図の左端) が陸惑星実験 を開始した時刻である. 土壌水分量が実線, 鉛直積 分大気水蒸気量が破線である.

火星全球気候モデリングの精緻化に向けて: 水循環と HDO/H₂O 比

○黒田剛史, 東北大学大学院理学研究科

火星大気大循環モデル DRAMATIC MGCM [Kuroda et al., 2019 ほか]を用いた現在の火星 大気環境シミュレーションについて、水循環と HDO/H₂O 比の結果を中心に進捗を報告する。 東大大気海洋研究所などで開発された MIROC を力学コアとし、火星大気の基本的な特徴で ある CO₂ 大気とダストの放射効果・CO₂ 大気の凝結に伴う季節極冠の生成に加え、大規模 凝結過程と Montmessin et al. [2004]に基づく簡単な雲微物理過程を用いて水蒸気⇔氷雲の相 変化と氷雲の粒径を求め、水平・鉛直拡散、氷雲の重力沈降、乱流フラックスによる地表面 氷の消化から水蒸気と氷雲の分布を計算した。また、Merlivat and Nief [1967]に基づいた HDO/H₂O の同位体分別過程を導入し、HDO/H₂O 比の時空間変化を合わせて求めた。北緯 80 度以北に HDO/H₂O 比が 7×VSMOW の無限量の氷床を仮定し、等温静止で大気中の水蒸 気・氷雲がない状態から計算を開始し、約 10 火星年の計算で平衡状態に達した。

下図は現状の T21 分解能(グリッド間隔~333km)計算の水蒸気カラム量(左上)と HDO/H₂O 比(右上)の緯度・季節変化の結果について、MGS-TES 観測データとの比較・差分(左下・右 下)と合わせて掲載したものである。水蒸気カラム量は概ね観測と 6 pr.µm 以内の差で再現 され、HDO/H₂O 比についても先行研究[Montmessin et al. 2005]と定性的に整合する結果が 得られている。また、発表ではこれよりも空間高分解能にした計算(グリッド間隔~67km)の 結果も紹介する予定で、RSL など現在の火星水環境に関わる興味深い現象の観測が進んでい る現状において、この火星水環境モデリングの精緻化にかかる期待についても合わせて議論 する。



火星古気候モデルに向けた積雲対流スキームの定量的評価

○鳥海克成(1), 鎌田有紘(1), 黒田剛史(1), 寺田直樹(1), 笠羽康正(1), 中川広務(1), 村田功(1) (1)東北大学大学院理学研究科

1.はじめに

現在の火星には、多くの流水地形が残され ており、38~36億年前の火星は、地表面に液 体の水が存在できる温暖な気候であったと 考えられている。しかし、その時代の太陽放 射フラックスは現在の75%ほどであり、 CO_2 が2~7bar存在したとしても温室効果による 温暖気候の維持は難しいことが示唆されて いる[*Kasting(1991), Forget et al.(2013)*]。 我々は火山性脱ガスによる H_2 を大気圧の 数%想定することで、地表面に液体の水が存 在可能な温暖な火星環境と、大部分の流水地 形の再現に成功した [*Kamada et al., submitted to Icarus*]。

しかしこのモデルでは、タルシス周辺やエ リダニア平原付近など一部地域で流水地形 が再現されていない。この原因としては、タ ルシス山地の形成前後による風系の変化、氷 河流の未考慮、GCM 中の積雲対流スキーム による水蒸気分布や降水分布の差異などが 考えられる。積雲対流効果は、大気の成層不 安定状態を対流活動により解消し、対流性の 降水を発生させるため、降水の地域分布と量 に影響を与えうる。

2.手法、結果

本研究では、火星古気候モデルに二種類の

代表的な積雲対流スキーム、Relaxed Arakawa-Schubert スキーム(RAS) [Moorthi and Suarez(1991)]とKain-Fritsch スキーム (KF) [Kain and Fritsch(1993)]を導入し、こ れによる差異を評価した。

この二つのスキームの地球大気を想定し た検証では、KFがRASより高度2,000m付近 の地点で雲量が1.3倍多く、また気温が0.5K ほど低くなった。細かい差異はあるものの、 概ね両者は一致した。

続いて、両スキームを我々のPaleo-Martian General Circulation Model (PMGCM) (CO2 1~2 bar, H2 0~6%, 海あ り)に導入し、両者を比較評価した。地球版 における評価と同様、KFでは下層の雲量が より大きくなる傾向が見られた。また火星で は、雲量差の放射への影響により、地表面は 条件によるが温度が0.2~1K程度高くなり、 これに従い降水量が変化する傾向も見られ た。我々の評価では、積雲対流効果の相違に よる降水分布の変化は小さく、流水地形への 影響は微量であるが、細部では影響もあると 思われる。本講演では、更に様々な条件下(気 圧、太陽放射フラックス、水素混合比など) における流水地形への影響度の検証、および 今後の展望について報告する。

火星隕石の放出に与える火星地下氷層の影響

O脇田茂¹, 末次竜², 黒澤耕介³ ¹ Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University ² 産業医科大学 ³ 千葉工業大学 惑星探査研究センター

火星表層付近に氷層が存在することがリモートセンシング観測によって確認されている。火星 に衝突が起きた際に、その地下氷層が蒸発し膨張することで火星表層岩石を加速するという説 がある。これは"steam cannon"モデルと呼ばれ、低衝撃圧かつ高速度の放出を達成する可能性 が指摘されている。そこで、地下氷層が加速過程に与える影響を調べる目的でiSALE-2Dと呼ば れる数値計算コードを用いて計算を行った。その結果、地下氷層の存在によって放出物の一部 が加速されることを確認した。

Effect of subsurface ice layer on acceleration of Martian meteorites

Shigeru Wakita¹, Ryo Suetsugu², Kosuke Kurosawa³ ¹ Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University ² University of Occupational and Environmental Health ³ Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

The presence of an ice layer in subsurface of Mars has been detected via a remote sensing observation (Dundas et al. 2018). It has been proposed an idea that an intense expansion of shock-vaporized water due to impacts onto a region with such subsurface ice layer helps the acceleration of Martian meteorites (De Carli 2013). This idea is referred to as "steam cannon" model and is suitable for reproducing the nature of the Martian meteorites where they have experienced low shock pressures (5 - 50 GPa) despite their high ejection velocities (> 5 km/s). In order to address the effect of ice layer on the ejection of Martian meteorites, we performed numerical simulations using the iSALE-2D shock physics code (e.g., Collins et al. 2016), showing that the intense expansion of shocked water ice makes a velocity boost pertaining to surficial rocks.

炭素流出が火星大気組成進化に及ぼす影響:酸素分圧の変化

○八木亮輔¹, 寺田直樹¹, 小山俊吾¹, 黒田剛史¹, 中川広務¹, 村田功¹, 笠羽康正¹

1. 東北大学大学院理学研究科

本研究の目的は、水素や酸素とともに炭素の宇宙空間への流出も考慮し、過去火星における大 気組成の進化を調べることである。これまで考慮されてこなかった炭素流出を導入する理由は 二つある。一つ目は、初期火星環境における熱的流出は、炭素原子の方が、より重い酸素原子よ り速かったと見積もられることである。初期火星は現在よりも強い太陽紫外線放射の影響を受 けていたとされる。この環境下でのエスケープパラメーター(特定高度における重力ポテンシャ ルと運動エネルギーの比)は、これらの大気成分の大規模流出を引き起こすのに十分な程小さい。 先行研究の見積もりでは、41 億年前の火星大気における炭素原子のエスケープパラメーターは 酸素原子のそれの 0.75 倍で、両者の上層大気における数密度も同程度であった (Tian et al., 2009)。このことから、当時の火星での熱的流出は炭素原子の方が酸素原子より大きかったと考 えられる。二つ目は、キュリオシティ探査機によるゲールクレータでのマンガン濃集の発見によ って、初期火星大気が数 m bar 以上の酸素分圧を保持していた可能性が示唆されたことである (Noda et al., 2019)。先行研究による、現在の火星におけるプロセスを前提とした水素と酸素のみ の流出を考慮した一次元大気光化学モデルでは、酸素分子の分圧が 10⁻⁵ bar までしか上がらない (e.g., Chaffin et al., 2017)。これは、大気が水素、酸素の消失量を 2:1 に自己調整し(cf. McElroy, 1972)、両者の流出量の不均衡を是正して、酸素分子の大規模な蓄積を妨げることによる。私た ちの研究では、炭素原子の流出が酸素分子の大規模な蓄積の要因となり得ると考え、その効果を 調べるため、炭素原子の流出を考慮した初期火星大気の一次元大気光化学モデルを用いた。 モデ ルには、大気の流出だけでなく脱ガスによる大気の供給と過酸化水素やオゾンの地表面反応も 導入し、炭素原子の流出速度やこれらの境界条件の変化が、酸素分圧に与える影響を調べた。発 表では、初期火星大気における、上記の影響について評価する。

火星のクリュセおよびアキダリア平原における地下構造の探索 Search of shallow subsurface reflectors in Chryse and Acidalia Planitiae on Mars

大浦 愛菜1, 笠羽康正1, 熊本篤志1, 野口里奈2,

土屋史紀¹, 臼井寛裕², 石山謙³, 植村千尋⁴

1東北大学大学院,2宇宙航空研究開発機構,3鶴岡工業高等専門学校,4総合研究大学院大学

近年の火星探査により、Recurring Slope Lineae (RSL)と呼ばれる筋状の地形が発見され た。RSL は暖かい時期に急な斜面に長く伸び、寒冷な時期になると消失し、これが毎年繰 り返される。この形成要因について、地層中の氷の融解・流出(Stillman et al., 2017)が検 討されているが、液体水を起源とする整合的な形成メカニズムは明らかでない。RSL が分 布する領域は、(1) southern mid-latitudes, (2) Valles Marineris, (3) equatorial highlands, (4) northern Chryse Planitia and southwestern Acidalia Planitia (CAP)の4つに分けられ、 (2)と(4)は他の領域に比べ、RSL がより密集して見つかっている。

本研究では、Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)に搭載されている Mars Shallow RADar sounder (SHARAD)によって得られた地下エコーデータを使い、比較的平坦である (4) CAP 領域を対象に地下構造の探索を試みている。定量的な同定を行えるようにするた め、キルヒホッフ近似を用いたシミュレーションレーダーグラムを作成することで、地表 面の凹凸に起因するクラッターエコーを再生し、その影響を吟味した。これまでに、data ID:s_04923501 において、地下反射面と思われるエコーを発見した (Fig.1)。本講演で は、これを含む CAP 領域内一定区域の観測データを網羅的に解析した結果を示し、また 反射面が存在すると見られる地域の周辺地下構造を考察する。



Fig.1 CAP 領域内のレーダーグラム例 (dataID: s_04923501)

火星のコプラテス カズマにおける地下氷圏の分布可能性検討 Possible existence of cryosphere in Coprates Chasma, Mars

○野口里奈1,石山謙2,熊本篤志3,植村千尋4,笠羽康正3,臼井寛裕1,大浦愛菜3 1宇宙航空研究開発機構,2鶴岡工業高等専門学校,3東北大学大学院,4総合研究大学院大学

最近1000万年における赤道傾斜角の変動を考慮すると,現在の火星地下氷圏は低緯度域に も分布する可能性がある(例えば,Head et al., 2003).本研究では,低緯度域での地下氷 存在可能性を検証するために,地下レーダーサウンディングデータ(SHARAD),超高解像 可視画像(HiRISE)およびそれから生成された地形データを用いてマリネリス峡谷東部のコ プラテスカズマで地下構造解析を行った.推定された地下誘電率から,コプラテスカズマ 周辺の地下数十mにおいて含氷層が存在する可能性が示された.本発表では,根拠となる誘 電率マップや推定誘電率から見積もられた氷の存在量についても紹介する.



Fig.1: Coprates Chasma壁の露頭(A), 記載した層序(B), 近傍の地下レーダーグラム(C), および(C)中の箇所におけるエコーレベル(D). 地下60 m 付近にレーダー反射が見られる. Noguchi et al., in preparation.

粉体のレオロジーに着目した Recurring Slope Lineae (RSL)の形成模擬実験

〇植村千尋¹,岩田隆浩^{1,2},中原明生³,野口里奈²,臼井寛裕²,松尾洋介³ ¹総合研究大学院大学,²宇宙航空研究開発機構,³日本大学

RSLは、火星表層上の暗い筋上の模様であり、季節に応じて出現・伸長・消失を繰り返す ことが示唆されている。形成には水の関与が示唆されているが、急な斜面にのみ現れること や分光観測で水が検出されていないことから、他の形成要因も提案されている。

RSL が急斜面にのみ現れるという性質は、砂・水系におけるレオロジー挙動によって説明 できる可能性がある。粘性や塑性が弱い流体は、流れやすい、かつ変形しやすいという性質 を持つ。このようなレオロジー挙動は、物質の流動現象の理解に繋がると期待される。レオ ロジーが何に依存するのかが明らかになることで、RSL の形成要因についても迫れるかもし れない。例えば、土壌の剪せん断強度の温度依存性を考慮することで、土砂崩れ発生時期の 理解が進んだとする研究例も存在する(Shibasaki et al., 2016)。そこで本研究では、湿式 粉体のレオロジーの温度依存性に着目し、急斜面における RSL の形成を検討した。

本研究では、粘土鉱物と似た性質を持つ(水中で粒子間に引力が働く)、炭酸水酸化マグネ シウムペーストを用いて、レオロジーの温度依存性に関する測定を行った。その結果、特に 降伏応力においては、従来はペースト中に含まれる粉体の割合(固相率φ)に主に依存すると されてきたが、温度にも強く依存することを明らかにした(Fig. 1)。本研究で明らかになっ た温度依存性は、先行研究で示された理論予測(Ikeda et al., 2013)よりも大きい。このこ とは、RSLの伸長において、温度が流動挙動を変化させる要因の一つとなり得ることを示唆 する結果である。



Fig 1: 固相率 φ を変化させた時の降伏応力の温度依存性(両対数)

火星衛星探査計画 MMX 探査機搭載用 イオンエネルギー質量分析器 MSA の設計

○出口雅樹¹, 横田勝一郎¹, 寺田直樹², 松岡彩子³, 斎藤義文³

¹大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻,²東北大学大学院理学研究科,³宇宙航空 研究開発機構宇宙科学研究所

これまでの観測で得られた火星表層の浸食された地形は、かつての火星には大量の水 が存在していたことを示唆している。また、その当時は現在の地球と同程度の大気があ ったとされているが、これまでの進化過程において宇宙空間に放出されたと考えられて いる(Eric Chassefiere, Francois Leblance, 2004)。先行研究によると、現在の火星散逸 イオンの主要成分(O^+, C^+, N^+, Ar^+)の同位体比を精度よく測定することができれば、 様々な放出機構による総散逸量を推定することができる。そこで、火星衛星探査計画 (MMX:Martian Moons eXploration)に搭載されるイオンエネルギー質量分析器 (MSA:Mars moon mass Spectrum Analyzer)は、火星の第一衛星 Phobosの周回軌道上 において火星散逸イオンを太陽風パラメータとともに観測することを目指す。また観測 の際に要求される質量分解能は $M/\Delta M~100$ 程度である。

MSA は上半部の球殻電極に印加する電圧を掃引することで数 eV/q~数 10keV/q ま での範囲で入射イオンのエネルギー分別を行い、下半部では TOF 法によって質量分析 を行う。質量分析部入口に設置してある薄膜カーボンフォイルを通過する際に二次電子 が放出され、TOF のスタート信号となる。また内部には質量分解能を向上させるため に線形に増加する電場(LEF:Linear Electric Field)が配位されている。

同型の MSA は MMO にも搭載されていて、その時の TOF 部の全長は 100mm で質量分解能は $M/\Delta M \sim 40$ を実現した。本器では質量分解能 $M/\Delta M \sim 100$ を達成するため、TOF 部の全長を 145mm にした。本研究では、TRIM(TRansportation of Ion in Material)を用いて入射イオンと薄膜カーボンフォイルとの相互作用について調べ、得られた相互作用後の粒子のパラメータを用いて、各イオンの TOF スペクトルを数値モデルによる計算を行った。その結果、要求性能 $M/\Delta M \sim 100$ を満たし、火星大気主要成分の同位体の TOF スペクトルを分離できることが確認できたので、これについて発表する。
小惑星(3200)Phaethonによる 恒星食の観測キャンペーン

Observation campaign of stellar occultation by (3200)Phaethon in 2019

○吉田 二美¹, 荒井 朋子¹, 阿部 新助², 有松 亘³, 伊藤瑞生⁴, 岡本 尚也⁵, 洪 鵬¹, 佐藤 勲, 相馬 充⁶, 谷 優希⁷, 野田 寛大⁶, 平田 成⁸, 布施 綾太², 洞口 俊博⁹, 増田 陽介², 森川 恵海⁴, 森田 晃平², 山田 竜平⁸,

山本真行⁷, 渡部潤一⁶, JOIN(Japan Occultation Information Network)他

1千葉工業大学,2日本大学,3京都大学,4東京大学,5JAXA,6国立天文台,7高知工科大学,8会津大学 9国立科学博物館

DESTINY+サイエンス検討チームは、ミッションを成功させるため、前もって地上から 探査対象である小惑星(3200)Phaethonを詳細に観測する観測キャンペーンを機会がある度 に行っている。2017年冬の観測キャンペーンでPhaethonの大きさはレーダー観測では約 6kmとわかったが、WISEのデータに基づいた推定では直径4.4kmだった。またWISEや偏 光観測から導かれたアルベドは0.09-0.14まで幅があった。DESTINY+のカメラの仕様を 決定するまでにPhaethonの大きさやアルベドは精度よく求めておきたい。掩蔽観測は小 天体の直径を直接測定できる機会であり、2019年度はPhaethonによる恒星食が度々起こ ることが予報されていた。そこでDESTINY+サイエンス検討チームはPhaethonによる恒星 食の観測を本年度は実行する事にした。

本ポスターでは今年7月29日にアメリカ南西部で見られた7等星の恒星食と8月22日未明 に日本の函館で見られた12等星の恒星食の結果を報告する。

アメリカ南西部の観測については、DESTINY+サイエンス検討チームはJAXAの協力の元 で国際掩蔽観測者協会(IOTA)、米・ジェット推進研究所に7月29日の恒星食の観測を依頼 し、Marc Buie (Southwest Research Institute) やSteve Preston (IOTA) の協力により、掩 蔽帯の詳細な予報の下、掩蔽帯の幅方向約20kmに約30点の観測隊を布陣させるという緻 密な観測網が展開された。天候にも恵まれ、観測は見事成功し、6地点でPhaethonが恒星 を隠す事による恒星の減光が観測された。David Dunham (IOTA) らが観測結果を整約し、 Phaethonが5.67km×4.72kmの断面をしていることがわかった。

8月22日未明に日本で見られる12等星の恒星食では、別の角度からPhaethonの大きさを 測るため、DESTINY+サイエンス検討チーム自らが観測隊を率いて函館に赴いた。日本で の恒星食の対象星は12等級と暗いので、口径20-30cmの移動式望遠鏡と高感度カメラ、 GPS機能付きの正確な時刻取得装置を所有しているアマチュア観測家8名と研究者18名の チームが北斗市と渡島半島の西海岸沿い15地点に1-1.5kmの間隔で布陣したが、残念な がら掩蔽イベント時は雲に阻まれて観測不成立となった。

次の機会は10月15日の夜中(16日の2時半ごろ)で、山形、宮城を通る恒星食が予報され ている。

Study on Mass dependence of the ion escape from Mars based on MAVEN observations

火星探査機 MAVEN の観測に基づく 火星からの電離大気散逸の質量依存性に関する研究

o関 華奈子 1, 森 悠貴 1, 坂倉 孝太郎 1, 堺 正太朗 1, David A. Brain², James P. McFadden³, Takuya Hara³, David Mitchell³, Jasper S. Halekas⁴, Gina A. DiBraccio⁵, Bruce M. Jakosky² 1東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ²LASP, University of Colorado, Boulder, ³SSL, University of California, Berkeley, ⁴University of Iowa, ⁵GSFC, NASA

In order to explain a drastic climate change at ancient Mars, removal of H₂O and CO₂ from the surface environment is necessary. The atmospheric escape from Mars to the interplanetary space is considered to have played an important role in the removal. On the other hand, mechanisms to achieve substantial rapid escape of heavy species such as carbon and oxygen is far from understood. The solar wind induced ion escape process is one of the promising candidates to achieve significant loss of heavy ion species. In this study, we will report on the mass dependence of the solar wind induced ion escape from Mars based on observations by NASA's Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN) satellite.

Using data from July 2015 to December 2017, we first statistically investigate the effects of solar wind convection electric fields and crustal magnetic fields on the heavy ion outflows in the optical wake regions of Martian induced magnetotail [Inui et al., 2019]. Results show that the average density ratio of $O^+:O_2^+:CO_2^+$ is ~29:68:04. In the southern hemisphere where the strong crustal magnetic fields are located, the heavy ion outflow flux becomes smaller and the relative contribution of molecular ions to heavy ion outflows is larger than the northern hemisphere. The solar wind convection electric field strongly affects the heavy ion outflows. Heavy ion density is larger in the –E (electric-field) hemisphere than in the +E hemisphere, while the dependence of velocity is opposite. Acceleration by the solar wind convection electric field in the +E hemisphere is expected to cause these dependences. The heavy ion flux is larger in the –E (total O: 8.6×10^6 cm⁻²s⁻¹) than in the +E hemisphere (2.9×10^6 cm⁻²s⁻¹) due to the large density in the –E hemisphere. Velocity ratios of O⁺ to O₂⁺ suggest that heavy ion outflows with large velocities tend to have the same energy to each other, while the O⁺ to O₂⁺ ions are more likely to have the same velocity in outflows with small velocities.

As for the light ions, we also investigated the properties of planetary proton escape in the induced magnetotail. Separation of solar and planetary protons was attempted based on properties of energy distributions of the proton phase space densities. The proton escape from Mars show a clear quasi-seasonal variation. We will discuss possible cause of the variation in the presentation.

過去の火星の劇的な気候変動を説明するためには、短期間で表層環境からの水と二酸化炭 素を除去する必要があり、火星大気の宇宙空間への散逸が重要な役割を果たしたと考えられ ている。一方で、酸素や炭素等の重い粒子種を大量に大気散逸させるのは簡単ではなく、そ の散逸機構には不明な点が多い。その中で、太陽風誘導イオン散逸は、大量の電離大気を流 出させることができる散逸機構として注目されている。本研究では、火星探査機 MAVEN のイ オン種別観測に基づき、火星からの電離大気散逸機構の質量依存性に関する研究結果を報告 する。

火星衛星探査計画ローバに搭載する ラマン分光装置(RAX)の開発

○長 勇一郎¹, 亀田真吾², 湯本航生¹, 臼井寛裕³, Conor Ryan⁴, Till Hagelschuer⁴, Roderick Vance⁴, Maximilian Buder⁴, Ute Böttger⁴, Heinz-W. Hübers⁴, Andoni Moral⁵, Fernando Rull⁶

¹東京大学, ²立教大学, ³ISAS/JAXA, ⁴Institute of Optical Sensor Systems/DLR, ⁵Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, ⁶Universidad de Valladolid

日本の火星衛星探査計画 Martian Moons Exploration(MMX)には、フォボス表面を走行して 探査する小型ローバが搭載される予定である。このローバはフランス宇宙機関 CNES とドイ ツ宇宙機関 DLR によって開発される。ローバ搭載に向けて開発中のサイエンス機器の一つ に、ラマン分光装置 RAX(Raman Spectrometer for MMX)がある。RAX は、フォボスの表 面の鉱物組成を計測し、フォボスの起源やフォボス表面の物質分布の不均質性を明らかにす ることをに掲げている。

RAX はラマン散乱光励起用の CW レーザ(波長 532 nm)、分光器(波長範囲 532~680 nm)、および異なる役割をもつ複数の光学系からなる。ローバ内の極めて限られた体積に全 てを収納する必要があり、RAX 全体で 85×125×100 mm に収めることが要求される。RAX はドイツ DLR、スペイン INTA、および日本が分担して開発することになっており、日本側 は集光光学系(Light Shuttle Objective, LSO)とその焦点調節機構(Autofocusing Subsystem, AFS)を担当する。これらは小型でありながら光学系と駆動部を併せ持ち、今後の惑星着陸 探査においても使用されることが見込まれる基礎技術である。

現時点での設計では、小型のステッピングモータとリードネジ、ナットおよびリニアガ イドを組み合わせた直進機構に LSO を取り付け、レンズ系全体を上下に移動させることで 合焦位置を制御する。フォボス表面の凹凸に対応するため、AFS は焦点の合う位置を±10 mm の範囲において、およそ 10 µm の精度で微調整することを目指す。LSO は、532 nm のレーザ光を 50 µm まで絞ってフォボス表面に照射し、生じたラマン散乱光を逆に平行光 に戻して分光器へと導くものであり、ラマン分光計測を成立させるために大きな役割を持つ。 レンズ末端からフォボス表面までの距離はおよそ 80 mm である。また、同光学系は収差補 正のために複数枚のレンズからなり、放射線耐性をもつ硝材から構成されるほか、分光測定 領域全体において反射防止コーティングが施される。

現在、要求性能を満たす光学設計が一通り終了し、メーカを交えた予備設計が進行中で ある。一方 BBM による動作試験の結果からは、搭載が想定される小型のモータによって LSO を模したダミーレンズの一軸方向の運動が実際に可能であること、電力の供給なしでも 光学系の位置を保持できることがわかった。今後は環境試験によって位置制御の精度等を検 証していく。

火星衛星探査計画における望遠、広角カメラ (TENGOO,OROCHI)の開発

○加藤博基¹,亀田真吾¹,尾崎正伸²,高島健²,塩谷圭吾²,石橋高³,石丸貴博²

¹立教大学,²JAXA³千葉工業大学

JAXA では火星の衛星であるフォボスからサンプルリターンを行う火星衛星探査計 画(Martian Moons eXploration, MMX)を 2024 年に打ち上げる予定である。MMX の 科学目標の一つは 2 つの火星衛星の起源を特定することであり、その起源について は捕獲した原始小惑星である説と、火星への巨大衝突による破片が集積し形成され た説の 2 つが存在する。MMX では持ち帰ったサンプルにより火星衛星の起源を特 定するが、このサンプルはフォボスを代表する物質である必要がある。そこで適切 なサンプルを持ち帰るためには、安全な着陸地点を決定し、フォボスの表面物質の 分布を測定する必要がある。これを可能にするのが我々が開発を行っている TENGOO と OROCHI である。

この計画に搭載される望遠カメラ(Telescopic Nadir imager for GeOmOrphology, TENGOO)は高度 20km において 24cm の空間分解能で Phobos の地形分布を撮像 し、安全な着陸地点の決定を行う。また広角カメラ(Optical RadiOmeter composed of Chromatic Imagers, OROCHI)は7つのカメラを同時に使い、7波長で分光観測を することでフォボス全球の物質分布、サンプル回収時の表面状態を測定する。

本発表では、これらカメラの詳細及び現在の開発状況について報告する。

数値モデルに於ける月と火星の初期進化の比較

〇小河正基¹、柳澤孝寿²

1東京大学大学院総合文化研究科、2国立研究開発法人海洋研究開発機構

月の表面は、マグマオーシャン (MO)に於ける結晶分離により生成した高地地殻に 覆われている。後の、マントル対流により引き起こされた火山活動(以下二次的火 山活動と呼ぶ)による溶岩は、地表面の一部を覆って海を形成しているにすぎない。 これに対し火星では、マグマ・オーシャンによる地殻は少なくとも外から見る限り 確認できない。その代わりに、二次的火山活動による地殻が全面を覆っている。こ の違いを理解するため、月と火星の火成活動・マントル対流結合系の数値シミュレ ーション結果の比較を行った。手がかりとなるのは、月の海の火山活動は数十億年 スケールで穏やかにかつ連続的に起こったのに対し、火星の二次的火山活動はより 激しく間欠的に起こったことである。このことは、マントル湧昇流が生成したマグ マの浮力がその湧昇流自身を加速するという火成活動・マントル湧昇流フィードバ ックが、よりサイズの大きな火星でのみ働いてきたことを意味する。この点に着目 して、最初期の数百万年間の、火成活動とマントル対流によるマントル進化モデル を詳しく調べた結果、火星ではマグマ・オーシャンによるマントル分化が終わる前 にこのフィードバックが働き活発な二次的火山活動が開始し、マグマ・オーシャン による地殻をマントル深部にリサイクルしてしまうが、月ではこのような MO 地殻 を押しやるという効果が働かないことがわかった。この結果は、より大きな地球や 金星でも MO 地殻は地表面に安定に存在することはできなかったということを示唆 している。

火星表面で生命の兆候を検出する生命探査顕微鏡の開発

O吉村義隆¹、山岸明彦²、佐藤毅彦³、宮川厚夫²、今井栄一⁴、佐々木聰⁵、小林憲正⁶、癸 生川陽子⁶、岡田朋華⁶、塩谷圭吾³、薮田ひかる⁷、長沼毅⁷、三田肇⁸、藤田和央³、臼井寛 裕³

1. 玉川大学、2. 東京薬科大学、3. 宇宙航空研究開発機構、4. 長岡技術科学大学、5. 東京工科 大学、6. 横浜国立大学、7. 広島大学、8. 福岡工業大学

約40億年前の火星は、海や、大気を保護する磁場が存在するなど、生命が生まれた頃の地 球と類似した環境であることが分かってきた。そのため火星にも生命が誕生した可能性が議 論されている。現在の火星表面は、乾燥した低温環境で、強い紫外線が降り注ぐなど、生命 が生存するには過酷な環境に見えるが、近年、MSL計画(NASA)のキュリオシティローバー によって、有機物の他、メタンや硫化水素など、微生物のエネルギー源となる物質が発見さ れてきた。また、クレーター斜面などで見られるリカリング・スロープ・リニア(RSL: Recurring Slope Lineae)や火星南極の氷の下には液体の水が存在する可能性があるなど、 現在の火星においても生命(微生物)の存在を期待させる発見がなされてきた。2020年打 ち上げの Mars 2020計画(NASA)や ExoMars 2020計画(ESA)では、ラマン分光法などを利 用した有機物検出が行われる予定であり、現在、生命探査は、火星探査における重要なテー マの一つになっている。

日本のグループもまた、微生物を含む有機物を検出するため、蛍光顕微鏡を利用した生命探 査装置(LDM: Life Detection Microscope)の開発を行っている。この装置は、試料(表面 を掘削した土)に、核酸やタンパク質などの生体成分と結合する蛍光色素を添加し、レーザ ーダイオードを励起光源として用いて、試料から発する蛍光を映像化する。特徴としては、 (1) 非生物起源を含む有機物を検出できること、(2) 膜構造や触媒活性を持つ有機物

(微生物細胞)を検出できること、(3)1 µm/pixelの分解能により有機物の他、レゴリ スなどの鉱物粒子の微小な形態を映像化できること、などがあげられる。使用する蛍光色素 としては、有機物を染色する SYT024 や SYPRO Red、膜透過性が低く死細胞を検出する propidium iodide、生細胞が有する酵素活性を検出する CFDA-AM などを予定している。現在、 ブレッドボードモデルの製作を行っており、本講演では、LDM の開発状況を報告する。

量子化学計算による星間空間における複雑有機物 の反応経路探索

○小松 勇^{1,2}, 鈴木 大輝^{1,2}

1アストロバイオロジーセンター,2国立天文台

宇宙における物質進化を考える上で複雑有機分子の生成過程を明らかにすることは重要である。特に、アミノ酸などの生命関連分子が地球外において非生物的にどの程度生成されやすいか、それがどのような条件であるのかを探るのは我々の起源や地球外で我々に類似した機能・構造を持つ 生命が発生しうるかに繋がるものである。

生命を司る重要な機能の1つの自己複製をするのには、RNAやDNAがその中心的な役割を果た している。その中でも遺伝暗号(AGCTU)を司るのは、核酸塩基という環状分子である。核酸塩 基は隕石中からも検出されており、何故このような分子を我々の祖先が採用したのかは非常に興 味深い。

我々は核酸塩基が星間分子として生成される経路、その生成可能性を量子化学計算によって評価 した。本研究ではラジカル反応の特に乖離過程の反応に特化した遷移状態計算を行った。その結 果、いくつか乖離反応が見つかったので発表する。多段階反応を反応速度式として記述するモデ ルに組み込むことを検討している。

* 中島健介 (九大·理)

はじめに

金星雲層の昼面午後側を紫外線で撮像した画像には, しばしば対流的と称される"もくもくした"構造が現れ る(参考文献を).しかし,推定される高度領域の成層 は安定であり,また,観測される構造の水平スケールは, 対流層と想定し得る領域の厚さよりずっと大きい.こ れらの特徴から,この構造は通常の対流ではなく,金星 の雲(または「未知の紫外線吸収物質」)が太陽光を吸 収して大気を加熱することによって生じている可能性 が示唆されてきた(参考文献)が,考察は十分に進んで いない.同様の現象は主星近傍を周回する系外惑星に おいても生じている可能性がある.そこで,ここでは凝 結物と放射強制が相互作用する系における対流運動に ついて線形論および基本的な数値実験により考察する.

線形安定性

成層した Bousinesq 流体の2次元運動を考える.

$$\partial_t u = -\partial_x P, \tag{1}$$

$$\partial_t w = -\partial_z P + g\theta, \qquad (2)$$

$$0 = \partial_x u + \partial_z w, \qquad (3)$$

$$\partial_t \theta + w d\bar{\theta}/dz = Q, \qquad (4)$$

加熱 Q は, 雲 (混合比 q) の凝結潜熱, および, この雲に よる放射吸収加熱の二つの成分から成るとし, 雲は鉛直 流にともなって生成するとすると,

$$Q = L\partial_t q + \epsilon q, \tag{5}$$

$$\partial_t q = \alpha w. \tag{6}$$

(1)-(6) を w について整理すると,

$$\partial_{ttt} \nabla^2 w = -N^2 \partial_{xxt} w + g \epsilon \alpha \partial_{xx} w \qquad (7)$$

ただし, $N^2 \equiv g(d\bar{\theta}/dz - L\alpha)$ は凝結潜熱の影響を加味 した浮力振動数, また $\nabla^2 \equiv \partial_{xx} + \partial_{zz}$ である.

空間的に平面波構造で指数的に成長する擾乱 $w \propto \exp[\sigma t + i(kx + mz)]$ を仮定すると、分散関係として

$$(k^{2} + m^{2})\sigma^{3} + N^{2}k^{2}\sigma - g\epsilon\alpha k^{2} = 0$$
(8)

が得られ, 解は放射加熱係数 ϵ が小さいとき近似的に

$$\sigma \simeq -g\alpha\epsilon/2N^2 \pm iNk/(k^2 + m^2)^{1/2},$$
 (9)

$$\sigma \simeq g\alpha\epsilon/N^2 \tag{10}$$

である. (9) は放射加熱の影響をうけた内部重力波, (10) は新たに現れた停滞性不安定解である. $\epsilon > 0$ のとき前者は減衰するが後者は成長し, その成長率は擾乱の構造によらない.

数值実験

この系の有限振幅における振る舞いを把握するため に、いくつかの数値実験を行なった.下に示す例におい ては、凝結は流体層の中層で集中して生じ、また、凝結 物のもとになる物質が初期に下層に集中していること を想定し、負の凝結は生じないと仮定している.

雲は初期にランダムの生じたのちに上方に成長する が、水平構造を比較的保ちつつも、典型的水平スケール はどちらかというと大きくなっている.この特徴は、成 長率のスケール依存性が弱いという点で線形安定性に よって理解できる.その他、詳細は当日に述べる.

今後にむけて

今後,より広範なパラメタ実験を行う予定である.その結果と,金星における「対流」の様相の比較により,いわゆる「未知の吸収物質」の分布や性質について,何らかの制約を課すことも可能になるかもしれない.



地球類似惑星における遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション:外圏底近傍の断熱冷却について

寺田香織¹, 〇寺田直樹¹, 藤原均² ¹東北大学大学院理学研究科, ²成蹊大学理工学部

形成間もない恒星は、強い極端紫外線を放射する。例えば、45 億年前の太陽の極 端紫外線は、現在よりも 100 倍以上強かったとみられる。原始惑星系円盤から形成 された惑星は、円盤ガスの捕獲や衝突脱ガスにより大気を獲得するが、その大気は 中心星からの強い極端紫外線に照射されることにより加熱され、宇宙空間に大量に 流出する。

非常に強い極端紫外線に曝された惑星大気では、超音速の流体力学的散逸が起こ る。やがて、時間の経過とともに中心星の極端紫外線の強度は弱まり、惑星大気は 亜音速の散逸である遅進流体力学的散逸を経て、現在の地球のような静水圧平衡状 態に至り、ジーンズ散逸による穏やかな散逸に落ち着く。流体力学的散逸と遅進流 体力学的散逸による大気の散逸量は、惑星の大気保有量や組成を一変させるほど大規模 であったと考えられている。

流体シミュレーションを用いた研究では、遅進流体力学的散逸が起こるほど膨張 した大気では断熱膨張による断熱冷却機構が働くため、ある極端紫外線強度を超え ると、極端紫外線強度が上がるほどに外圏底温度が低くなることが示唆されている。 しかしながら、大気の上端、即ち外圏底近傍は分子間衝突が少なく、断熱膨張から 断熱自由膨張へと遷移する領域であり、流体モデルによる断熱冷却率は過大評価で ある可能性がある。

我々は粒子シミュレーションによって外圏底近傍での断熱冷却の検証を行った。 その結果は、断熱冷却機構が十分に働かず、外圏底温度が低くなる現象が弱まるこ とを示唆している。本研究では、DSMC 法を用いた上部熱圏一外圏全粒子コードを用 いて、地球類似惑星で起こる遅進流体力学的散逸のシミュレーションを行い、流体 力学的散逸からジーンズ散逸へと変遷する期間の遅進流体力学的散逸率を示す。

大気大循環モデルを用いた金星雲分布の再現

○安藤 紘基¹, 高木征弘¹, 杉本憲彦², 佐川英夫¹, 松田佳久³

1: 京都産業大学・理学部,2: 慶應義塾大学・法学部,3: 東京学芸大学・教育学部

金星は、高度 50-70 km にかけて存在する濃硫酸の分厚い雲によって全球的に覆われ ている。これまで、プローブ観測による直接観測や赤外線による光学機器観測が実施さ れてきたが、金星の雲分布やその生成・維持メカニズムについては良くわかっていない。 本研究では、金星大気大循環モデル"AFES-Venus"に簡易的な雲物理過程を組み込んで、 金星の雲分布を再現した。雲材料物質としては水蒸気と硫酸蒸気のみを考え、それらの 凝結・蒸発や雲粒の沈降過程を考慮した。

東西平均した Mass loading は高緯度で最大、中緯度で最小となった。計算結果を詳 しく調べたところ、高緯度の分厚い雲は低安定度層で強化された鉛直流の擾乱による雲 材料物質の輸送に伴うものであることが分かった。また、低緯度の雲は硫酸蒸気が平均 子午面循環により輸送されることで維持されていることも分かった。低緯度の雲は時間 変化が激しく、東西波数1や2の構造が見られた。これは、ケルビン波や熱潮汐波とい った雲層内の大気波動によるものと考えられる。本研究の結果は、金星の雲分布が平均 子午面循環だけでなく波動や擾乱の影響を強く受けるということを示唆している。

IRTF/iSHELL 赤外分光データによる木星大赤斑上空を含む 熱圏温度観測

〇神原歩¹、北元²、坂野井健¹、笠羽康正¹、鍵谷将人¹ ¹東北大学大学院理学研究科、²宇宙航空開発機構/宇宙科学研究所

木星を含む巨大惑星の熱圏は、太陽極端紫外線による加熱による予測温度より数 100K 高温で あることが知られている[Yelle and Miller, 2004]。中低緯度での比較的低エネルギー降下粒子 による大気直接加熱や、高緯度でのオーロラ領域加熱の低緯度への輸送が高温となっている説明 として考えられているがよくわかっていない[Waite et al., 1983]。その他の要因として、下層 大気で励起した大気重力波・音波等よるエネルギー輸送がその原因として提唱されている。そこ で本研究では木星の大赤斑に着目した。大赤斑は対流圏の高気圧性の嵐であると想定されている ことから、この領域では大気重力波や音波等の大気波動が発生しやすい可能性がある。大赤斑上 の上層大気温度上昇を捉えることで、下層大気-上層大気間のエネルギー輸送現象を明らかにす ることが期待される。最近、0[']Donoghue et al. [2016]が IRTF 赤外分光装置 SpeX (λ/Δλ~2500)に よる H₃*発光の2つの輝線強度(3.383µm/3.454µm)から熱圏大気温度を推定した結果、大赤斑 上で 1644±161K、その他中低緯度領域では 900±42K と、大赤斑上での加熱を示唆する結果を報 告した。ただし先行研究では波長分解能が低いため、近傍波長 CH4 の発光輝線が分離できず、温 度推定に誤差が残っている可能性が指摘されている。

そこで我々は 2017 年 1 月 9、11 日にハワイ・マウナケア山頂にある IRTF のエシェル赤外分光 装置 iSHELL を用いて、大赤斑近傍での熱圏大気温度観測を実施した。11 日の観測は、Lp1-mode (3. 265-3. 657μm)を用い、空間方向に15″のスリットを大赤斑を含む東西方向に配置し、一つの 撮像フレーム内に大赤斑と大赤斑以外の中低緯度領域の情報を同時にとらえた。観測では30秒 間で木星データ、スカイデータの取得を交互に行った。熱圏温度推定は、O'Donoghue et a/. [2016]と同じH₃*発光輝線(3.3839µm/3.4548µm)を用いた。ここで、3.4548µmの輝線近傍に CH4 輝線が存在するため、精密にその影響を差し引く必要がある。この波長差は最も近接してい るものでおよそ 3×10⁻³µmであり、iSHELL の高波長分解能(λ/Δλ~75000) で分離することがで きる。この特長を生かして 3.4548μmの発光輝線と CH4 輝線の分離を実現し、より正確な温度推 定を可能とした。我々のこれまでの解析結果から、大赤斑の熱圏温度は 988±115K、その周囲の 同緯度域で 889±77K と見積もられ、大赤班上の熱圏温度は周囲より高い傾向があることが明ら かになった。また9日の観測は iSHELL の Lp4-mode (3.83-4.14µm)を用いて、空間方向に 25″の スリットを南北方向に設置し、東西方向に移動させ、大赤斑を含む領域で観測した。観測では木 |星データ、スカイデータを 60 秒間で交互に取得した。9 日の観測の熱圏温度推定には H₃*発光輝 線の強度比(3.9039µm/3.9530µm)を用いて、SystemⅢ経度、緯度の木星温度分布を得られる予 定だが、まだ解析中の部分があり、結果は当日の発表で示す。本講演では、9日、11日の木星熱 圏温度の観測結果とデータ解析の詳細を報告する。

可視マルチバンドイメージング観測法による 木星表層大気ダイナミクスの研究

〇伊藤颯¹、田部一志²、弘田澄人³、鈴木秀彦¹
¹明治大学、²月惑星研究会、³かわさき宙(そら)と緑の科学館

木星上層大気には様々な構造が存在している。例として、帯(Zone)・縞(Belt)と呼ばれる特徴 的な縞構造や、大赤斑(Great Red Spot: GRS)をはじめとする大小様々な渦構造が挙げられる。こ れらの構造の空間スケールや見た目の色は様々なタイムスケールで目まぐるしく変化しているこ とが地上からの精力的な観測により知られている。表面構造の色は渦の収縮や合体などに伴って 変動することが多い事から、地上から得られる見かけの色変動の情報は木星表面大気ダイナミク スの解明のカギになると考えられている。本研究の目的は、木星表面上で起こる様々な渦の形態 と色の変動を地上観測により精密に捉え、木星表面構造の色変化とそのメカニズムを解明する事 である。そこで、本研究では分光データと構造の空間変動を同時に得ることのできるマルチバン ドイメージング観測手法を開発した。観測対象となる帯域の決定には先行研究の分光観測データ を参照し、木星表面で起こる色変化を効率よく捉えるための7バンドを選定した。さらに7バン ドの画像を合成し、忠実な天然色画像を作成するために不可欠なバンド間相対感度を室内実験に よって決定した。この感度較正は比較的容易であり、定期的に実施可能であることから、宇宙望 遠鏡や探査機でしばしば問題となる相対感度の変動の影響を受けない。観測される色は7つのバ ンド間の相対輝度値に大きく依存するため、当研究において、重要な利点となる。本発表では、 開発したマルチバンドイメージング観測装置によって得られた初期観測結果について報告する。 特に木星表面構造のうち最も代表的かつ永続的な SEB(South Equatorial Belt)・EZ(Equatorial Zone)・NEB(North Equatorial Belt)・GRS に着目し、探査機カッシーニ、ハッブル宇宙望遠鏡、 木星探査機 JUNO によって得られたスペクトルとの比較検証結果を報告する。

球間焼結ネックの弾性定数

○城野信一¹,工藤大暉¹

1名古屋大学大学院環境学研究科

原始惑星系円盤中に含まれるダスト微粒子の付着成長で惑星形成過程は開始する. ダスト微粒子が 多数付着したダストアグリゲイトは相互に衝突を繰り返すことによってさらに成長する.ダスト 微粒子は表面張力によって相互に結合する. この状態での力学的相互作用は Domink and Tielens (1997, ApJ 480, 647) によってモデル化されている. 表面張力によって付着している球状の微粒 子は相互に回転することができるため、ダストアグリゲイトは衝突の際に壊れることなく塑性変 形を行い,運動エネルギーを散逸することで合体が可能となっている.一方でダスト微粒子の主 成分が氷である場合は、ダストアグリゲイトにおいて焼結が進む可能性がある (Sirono 2011, ApJ 735, 131). 焼結が進行するとダスト微粒子の結合部に分子が移動し結合部が成長する. この状態 では回転運動を起こすためには結合部を切断する必要があり、衝突の結果が大きく変化すること が Sirono (1999, A&A 347, 720) Sirono and Ueno (2017, ApJ 841, 36) によって示されている. 焼結が進行して成長した結合部の力学応答は Sirono and Ueno (2017) によってモデル化されてい るが、室内実験などによる検証はまだ行われていない、そこで本研究では室内実験と有限要素法シ ミュレーションにより結合部の力学応答を調べた. Sirono (2011)によって算出された結合部の形状 を元に、長さ4.75mmのサンプル(ジュラコン製)を作成した.焼結の進行度が異なるサンプル10 種類を各形状につき3つ作成した.オートグラフ AGX(島津製作所)を用いてサンプルを上下に圧 縮し,変位と負荷を計測した.この計測結果の傾き(荷重 40-90N)からバネ定数を算出した.また, Sirono (2011) によって算出された結合部の形状を元に FreeCAD(https://www.freecadweb.org) を 用いて形状モデルを作成し、有限要素法ソフト Calculix を用いて変形量を算出した.荷重は1Nと した.

伸び縮み(図1左)においては, Sirono and Ueno (2017)のモデルは過大評価をしていることが 明らかとなった.室内実験と有限要素法シミュレーションの結果はよく一致しており,ネック半 径に比例する.一方で曲げ(図1右)の結果から, Sirono and Ueno (2017)のモデルはネック半 径依存性が小さく,広い領域で過少評価していることがわかった.



図 1:伸び縮みのバネ定数(左)と曲げのバネ定数(右).

スノーライン付近での微惑星形成

〇兵頭龍樹¹,井田茂¹
 ¹東京工業大学・地球生命研究所

微惑星は,惑星の基本的な材料物質である.現在のところ,微惑星が,いつ,どこで形成されたかについては,十分な理解が進んでいない.近年の研究によると,微惑星が,原始惑星 系円盤中のスノーラインの前後で局所的にダストが濃集することで形成されうる可能性が指摘されている[e.g. Ida&Guillot 2016, Drazkowska&Alivert.2017, Schoonenberg&Ormel 2017].しかし,これらの独立した研究では,スノーライン前後でのペブル/ダスト/ガスの 振る舞いに異なる仮定・物理が用いられており,互いに異なる結果を示し,包括的な理解が 為難い状況である.

本研究では、ペブル/ダスト/ガスの動径移動/拡散、スノーライン付近での氷の昇華/凝縮を 考慮した動径方向1次元のローカル計算コードを用いて、スノーライン前後でのダストの濃 集について詳細に調べた.また、本研究では、ダストの局所的な濃集に伴うダスト/ペブル からガスへのバックリアクションを考慮することで、ダスト/ペブルが濃集するほど、ダス ト/ペブルの動径移動速度と動径拡散係数が小さくなる効果を考慮した.ペブルは、スノー ラインの十分に外側では、氷とシリケイトダストを半々に含むものとした.シリケイトダス トは、マイクロメートルサイズであると仮定した.

本研究の結果,スノーライン付近で氷の昇華とシリケイトダストの放出が発生し,それらが スノーライン前後に拡散することで,スノーラインの外側では氷が再凝縮し,ダストはペブ ルに付着することで,ペブルが濃集することが分かった.スノーラインの内側では,氷の昇 華に伴って放出されたマイクロメートルサイズのシリケイトダストが濃集することが分かっ た.さらに,バックリアクションを考慮することで,このような濃集が暴走的に発生する円 盤のパラメータを明らかにした.このような暴走的なペブル/ダストの濃集は微惑星形成を 示唆するものになりうる.また,本研究では,先行研究で用いられた異なる仮定によって, どのように結果が変わるのかを包括的に理解し,議論した

本研究の結果は、Hyodo, Ida & Charnoz (2019), A&A に基づく.

不均質分子雲コアによる同位体異常生成: 初期不均質と同位体異常の量的関係

〇中本泰史¹,竹石陽¹

1東京工業大学

隕石中のいくつかの元素に、同位体異常が見られることが報告されている (Cr, Ti; Trinquier+2009, Mo; Budde+2016, Ni; Nanne+2019)。同位体異常の成因としては、原始太陽系星雲 内のダスト粒子に作用した何らかの熱過程が有力視されている。しかし、その過程の詳細は 不明のままである。また、揮発性が異なる複数の元素で同位体異常が見られることは熱過程 説と整合的ではないように思われる (Nanne+2019)。

一方, ⁵⁴Cr の同位体異常の程度と隕石母天体の形成年代の間には相関があるとの指摘もある (Sugiura & Fujiya 2014)。この相関とその程度を量的に説明するシナリオを見出すことが, 本研究の目標である。

本研究では、太陽系を作った分子雲コア内に存在したダスト粒子群が持つ同位体比が、空間的に一様でなかったことが同位体異常につながったとするシナリオを検討する。太陽系を 作った物質は複数の超新星爆発や AGB 星などから来ているので、個々のダスト粒子の同位 体比は同じではない。そうしたダスト粒子群が、分子雲コア内で十分に混合されない可能性 も考えられる。その後、そうした分子雲コアが収縮して原始太陽系星雲を作り、その中でダ スト粒子が移動しつつ混合し、微惑星が形成されてそこに取り込まれる。本研究では、この 間にダスト粒子群の同位体比の違いがどの程度保持されるかを数値計算によって調べた。

計算の結果,初期分子雲コア内における同位体比の違いはある程度保持されることがわかった。円盤内に残る非均質化の程度(初期分子雲コア内の不均質が原始太陽系星雲内で混合され切らない程度)は、1%ほどであった。さらに、その程度は時間と共に変化するが、その傾向は隕石分析から推定されている傾向(Sugiura & Fujiya 2014)と整合的であることもわかった。したがって、観測されている同位体異常の程度(⁵⁴Cr の場合は 10⁻⁴ 程度)を説明するためには、初期分子雲コア内の不均質は 1%程度あればよいことがわかった。本研究の結果、太陽系を作った分子雲コア内に 1%程度の同位体不均質があったことが示唆される。また、原始太陽系星雲内の物質の移動や混合に関しても、いくつかの示唆が得られる。

Budde, G. et al. Earth and Planetary Science Letters 454, 293 (2016)

Nanne, J. A. M., Nimmo, F., Cuzzi, J. N., & Kleine, T. Earth and Planetary Science Letters 511, 44, (2019) Sugiura, N. & Fujiya, W. Meteoritics & Planetary Science 49, 772 (2014) Trinquier, A. et al. Science 324, 374 (2009)

球対称ガス大気による微惑星の捕獲

O末次竜¹、大槻圭史²

1產業医科大学、2神戸大学

太陽系の惑星は、太陽近傍を公転している水星と金星を除き、衛星を持つ。こうした衛星 の起源として(1)天体の衝突によって惑星周りにできた破片円盤からの集積、(2)巨大惑星の 形成過程で惑星の周りにできるガス円盤内での固体物質の集積、(3)惑星近傍を通過した微 惑星の捕獲などが考えられている。上記の(1)、(2)の形成モデルの場合、誕生する衛星の軌 道は惑星近傍をほぼ円軌道で公転するものになり、(3)は離心率や軌道傾斜角が大きい軌道 になりやすい。そのため惑星の主要な衛星(月、ガリレオ衛星など)は(1),(2)で形成され、 巨大惑星の不規則衛星などは捕獲された微惑星が起源と考えられている。

微惑星の捕獲過程として様々なモデルが提案されているが、惑星周りにあるガス円盤や大 気からのガス抵抗による微惑星の捕獲は衛星形成だけでなく、惑星の成長やガス円盤への固 体物質供給にも寄与するためこれまで詳しく調べられてきた。特に巨大惑星周りに形成され るガス円盤に捕獲された微惑星の軌道進化の様子は、軌道計算や解析的手法によって調べら れている(Tanigawa et al. 2014, Kobayashi 2015, Suetsugu et al. 2016)。一方で、大気 による微惑星捕獲は、基本的に集積率に注目されることが多いため、捕獲後の微惑星の軌道 進化まで調べた研究は少ない。しかし木星ほどのガス円盤を持てたか不明な天王星や海王星 の衛星や、捕獲された可能性のある火星衛星の起源を考えるためには、大気に捕獲された微 惑星の軌道進化まで調べる必要がある。

本研究では軌道計算を用いて、微惑星が大気に捕獲され惑星に落ちるまでの一連の軌道進 化を調べた。また微惑星が捕獲された後の惑星を中心とした軌道における軌道長半径と軌道 離心率の球対称大気からのガス抵抗による進化を求める解析解を導出し、計算結果と比較を 行ったので、それらについても議論する。

TW Hya 周囲の原始惑星系円盤におけるダスト付着度の制約

○松浦孝之¹,奥住聡¹,塚越崇²,田崎亮³

1東京工業大学,2国立天文台,3東北大学

原始惑星系円盤中でダストがどのように成長するか理解することは、惑星形成を議論する上で重要である。従来、円盤の外側領域のダストの主成分であるH₂O氷は、シリケイトに比べて高い付着力を持ち、効率的に合体成長することができると考えられてきた。ところが近年の実験では、氷が不均一なサイズの微粒子から構成される場合 (Gundlach et al. 2018) や、200 K 以下の低温環境では、H₂O氷は必ずしも高い付着力を持たない可能性が示唆されている (Musiolik & Wurm 2019)。このように、ダストの付着のしやすさには大きな不定性があり、円盤中でダストの成長がどの程度進行するかは不確かである。

円盤中のダストの性質を理解するうえで興味深い天体の1つが、うみへび座 TW 星 (TW Hya) で ある。TW Hya は比較的高齢のおうし座 T 型星で、周囲を原始惑星系円盤に覆われている。この円 盤は地球から最も近い円盤であり、様々な波長で観測が行われてきた。特に、近年の ALMA 電波望 遠鏡による高分解能観測により、中心星から 25 au、41 au の位置にギャップが存在することが明ら かになった (Andrews et al. 2016; Tsukagoshi et al. 2016)。このようなギャップが形成されるメカニ ズムは様々なものが提唱されているが、その中の1つに惑星と円盤の重力相互作用によるものがある (e.g., Kanagawa et al. 2015)。この場合、ギャップの構造は惑星質量だけでなく、ダストのサイズに も大きく依存することが明らかになっている (Zhu et al. 2012)。

そこで本研究では、観測された TW Hya 円盤のギャップの構造からダストの成長効率を制約する ことを目標とする。具体的には、25 au、41 au の位置に惑星の存在を仮定した円盤中で、ダストの 移動および成長を計算した。そして、計算結果のダストの空間分布からダストの熱放射および散乱 光を計算し、ALMA による観測結果との比較を行った。その結果、ダストが衝突した際に付着でき る限界速度を 0.5 m s⁻¹ と仮定した場合に、観測結果のダストの熱放射の分布がよく再現されること がわかった。付着できる限界速度を最もよく観測を再現する値からより大きく仮定すると、ギャップ 外縁にダストが過剰に堆積する、TW Hya の年齢よりも短いタイムスケールで円盤中のダストが枯 渇する、などの変化が生じた。また、より小さい値を仮定すると、ダストはガスと一体となって運動 し、ほとんど動径方向へ移動せず、観測されたギャップの形状が再現されないことがわかった。

本研究で得られた付着限界速度は、ダストが µm サイズの水氷微粒子から構成されていると仮定した場合に期待される値 (\approx 80 m s⁻¹; Wada et al., 2013) よりも、著しく小さい。この非効率な成長の要因として考えられる可能性は、(1) ダストを構成する水氷微粒子が 10 µm 以上の大きなサイズである、(2) 水氷は低温環境では確かに付着しづらい、(3) ダスト表面が CO₂ 氷などの付着力の弱い物質で覆われている、などが挙げられる。

タンデム惑星形成論による岩石惑星形成

〇二村徳宏¹、戎崎俊一²

¹日本スペースガード協会、²理研

岩石惑星の形成過程を解明することが本研究の目的である。本研究によりアドホックな条件設定を行うことなく、原始惑星系円盤中央面の高密度に沈殿した小石で形成される薄いサ ブ円盤内で生じ得る物理過程の積み上げのみで、地球質量程度の惑星形成を説明することに 初めて成功した。今回は、この物理過程と数値計算結果についての報告を行う。

本研究の土台となるモデルは、タンデム惑星形成論(e.g. Ebisuzaki and Imaeda, 2017) である。この惑星形成論は、惑星形成の標準モデル(e.g., Safronov, 1969; Hayashi et al., 1985)の枠組みに磁気回転不安定(Balbus and Hawley, 2000)、多孔性粒子成長理論 (Okuzumiet al., 2012, Kataoka et al., 2013)、中心星の電離放射線の影響などを組み込 んだ惑星形成論であり、微惑星形成までの過程が精密に議論されている。タンデム惑星形成 論により原始惑星系円盤は図1のような構造を持つことが明らかになった。図1の乱流領域 と静穏領域の境界では、効率的にダストが集積し(図1A およびB)、内側の境界では岩石惑 星形成領域(図1A)、外側の境界ではガス惑星形成領域(図1B)ができる。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論という。



図 1. タンデム惑星形成論の概念図(e.g., Ebisuzaki and Imaeda, 2017の改変)

岩石惑星形成領域では、円盤の外から固体粒子の供給がある。この領域の固体粒子の全質 量は、惑星の質量および惑星の移動開始時間を決める要素となる。よって、はじめにこの領 域への時間当たりの固体粒子の供給量を見積もった。次に、微惑星が成長して、地球質量程 度になると重カトルク(e.g., Lyra et al., 2010)の影響を受け、天体は原始惑星系円盤の 動径方向に移動する。惑星の材料となる固体粒子は主として岩石惑星形成領域に集積してい るため、惑星がその軌道から外れると惑星の成長は遅くなり、ほぼ岩石惑星形成領域で成長 した質量のまま原始惑星系円盤内を移動する。よってこれが、地球質量程度の惑星が形成さ れる要因である。そして、惑星の位置を考察するために共鳴の影響を取り入れる。また、原 始惑星系円盤の質量降着率は時間とともに低下することも惑星の位置を決める要因となるた めこの効果も考慮する。そして、最終的な惑星の大きさ、質量、位置を導出した。

物質強度を考慮した岩石に対する斜め衝突加熱

O脇田茂¹, 玄田英典², 黒澤耕介³, Thomas M. Davison ⁴ ¹ Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University ² 東京工業大学 地球生命研究所

³千葉工業大学 惑星探査研究センター

⁴ Department of Earth Science & Engineering, Imperial College London

抄録(日本語)[250/250文字]

小惑星や微惑星は衝突を繰り返しており、そのような衝突は正面衝突以外にも斜め衝突もある。彼らの歴史を理解したり衝突変成を記録している隕石から初期太陽系での衝突情報を読み解いたりするためには、斜め衝突を調べることは欠かせない。iSALE3Dと呼ばれる数値計算 コードを用いた結果、加熱される質量は正面衝突と斜め衝突でほとんど同じことがわかった。 正面衝突での数値計算結果と同様に斜め衝突においても物質強度を考慮することが重要である ことや、正面衝突に比べて斜め衝突では加熱される領域が浅く広いことが確認された。

Impact heating in oblique impacts with rocks including material strength

Shigeru Wakita¹, Hidenori Genda², Kosuke Kurosawa³, Thomas M. Davison ⁴ ¹ Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University ² Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology ³ Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

⁴ Department of Earth Science & Engineering, Imperial College London

Abstract (English) [998/1000 characters]

Asteroids and planetesimals have experienced collisions during their lives. Such collision occurs not only vertically but also obliquely (e.g., Genda et al. 2012). Therefore, the analysis of the impact heating of oblique impacts is important for understanding the life of asteroids and decoding the impact conditions in the early solar system from shock induced metamorphosed meteorites. Here, we report numerical results of oblique impacts using a shock physics code, iSALE-3D (Elbeshausen et al., 2009, Elbeshausen and Wünnemann 2011). Our results showed that the vertical impacts and oblique impacts with the impact angle of 45 degree can produce nearly the same amount of heated mass in total. It is confirmed that the material strength is also one of the important factors for oblique impacts as well as previous works of vertical impacts (Genda and Kurosawa 2018). We also found that the heated area by oblique impacts is located as a shallower but wider region than that by vertical impacts.

天王星衛星のその場形成と軌道進化

○石澤祐弥¹, 佐々木貴教¹, 細野七月^{2,3} ¹京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室, ²海洋研究開発機構, ³理化学研究所 計算科学研究センター

天王星の衛星はジャイアントインパクト(GI)によって形成された説が提案されている。天王 星のGI直後までの過程はSlattery et al. (1992)によって粒子法流体計算、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)を用いて検証され、自転軸の傾きおよび自転周期が多くのパラメータで再現で きることを明らかにした。しかし解像度が低く、どのようなデブリ円盤が形成されるか不明で あった為、その後の衛星形成過程は検証されてこなかった。Kegerreis et al. (2018)によって、 Slatteryらと同様の衝突計算が新たに高解像度で行われ、天王星衛星形成に十分な質量のH2Oと 岩石が共回転軌道を超えて軌道にばらまかれることがわかった。

本研究ではGI後の広いデブリ円盤を初期条件としてモデルして衛星の集積過程を記述するN 体計算を行い、その場形成によって天王星の衛星形成が説明できるかを検証した。また衛星分 布を説明するためのデブリ円盤の初期条件に制限を加えた。図1は数例のN体計算の結果である 粒子の軌道半径-質量分布を表している。円盤質量分布のべきが-2.0以上、円盤質量が3×10-4M_{Uranus}以下のときに、天王星衛星の外側の4つの衛星、Ariel、Titania, Umbriel、Oberonと同程 度の質量が形成されることがわかった。しかし円盤内側領域では現在の衛星分布に比べて非常

に大きい粒子が形成されることが問題となっ た。そこで我々は惑星の潮汐トルクによる衛 星軌道進化に着目し、N体計算で得られた結 果からの衛星の軌道進化を解析的に計算した。 その結果、共回転半径(3.3R_{Uranus})より内側の 衛星は数百万年で惑星に落下することがわかっ た。一方共回転半径外に近い外側の衛星は45 億年の間に数惑星半径移動し、10R_{Uranus}以遠 の衛星は45億年間は軌道がほぼ変わらないこ とがわかった。内側に落ちた衛星は惑星の潮 汐力によって破壊されてリングを形成し、そ のリングから小衛星が形成される可能性があ る(Crida & Charnoz 2012)。天王星衛星をその 場形成によって説明できる可能性がある成長 シナリオを新たに考えた。本発表では前回の 発表からの計算結果のアップデート、また議 論の変更点を含めて、本研究の総まとめとし て紹介する予定である。



図1. N体計算において成長した粒子の軌道半径 -質量分布。赤い点は計算における粒子、青い 星印は現在の天王星衛星分布を表している。

リュウグウ表層にみられるクレーターの深さ/直径比の空間分布

Spatial distribution of the depth-diameter ratio of craters on the surface of Ryugu •野口里奈¹, 平田成², 平田直之³, 嶌生有理¹, 西川直輝³, 田中小百合³, 杉山貴亮², 諸田智克⁴, 金丸仁明⁵, 杉田精司⁴, 渡邊誠一郎⁶

1宇宙航空研究開発機構, 2会津大学, 3神戸大学, 4東京大学, 5大阪大学, 6名古屋大学

小惑星探査機はやぶさ2搭載の光学カメラ (ONC-T) によって撮影された画像の解析から, リュウグウ全域の形状モデルが作られた.本研究では、形状モデル (SPC20190328_3M) を 用いて、77個のクレーターの深さ/直径比 (d/D)を計測した.リュウグウ表層のクレーターの 平均d/D = 0.086は、イトカワと同程度 (0.08; Hirata et al., 2009) であるが、d/Dが大きい (す なわち新鮮な) クレーターに限れば、Gaspra (0.14; Carr et al., 1994) やほかの岩石天体で見 られる新鮮なクレーターと同程度である.大クレーター内にみられる小クレーターのd/D は、大クレーターよりも大きい傾向がある (図左).d/Dが大きく異なることから、小クレー ターは大クレーターと同時に形成されたピットである可能性がある.小クレーターがピット である場合、すなわち小クレーター形成が地下の層構造に起因する場合、表層とは物性の異 なる構造が地下20-30 mに存在すると考えられる.西バルジ (160°E - 290°E) に分布する クレーターは他地域と比べて小さい (表) が、その効果を考慮に入れても西バルジにおけるd/ Dは他地域と比べて小さい (西バルジ: 0.080, 他地域: 0.089, 図右).これらのことから、 リュウグウの地質は鉛直・水平方向に不均質であると考えられる.本発表では、クレーター の深さ・直径の導出手法による差異も合わせて紹介する.



(左) 直径 vs. d/D (中央) 大・小クレーター (右) d/Dの経度依存性.

小惑星 Ryugu での宇宙衝突実験における クレーターからの放出物のその場観測

In-situ observation of ejecta curtain in space impact experiment on the asteroid Ryugu

○門野敏彦¹, 嶌生有理², 小川和律³, 白井慶², 石橋高⁴, 和田浩二⁴, 坂谷尚哉², 飯島祐一², 佐伯孝尚², 澤田弘崇², 杉田精司⁵, 本田理恵⁶, 荒川政彦³
 1. 産業医科大学, 2. JAXA, 3. 神戸大学, 4. 千葉工業大学, 5. 東京大学, 6. 高知大学

JAXAの「はやぶさ2」探査機は昨年6月に小惑星 Ryugu に到着し、今年4月5日、 Ryugu に対して「宇宙衝突実験」を行いました。DCAM3 と呼ばれる探査機本体か ら分離されたカメラを使って、衝突によって放出された物質をその場撮影すること に成功しました。DCAM3 で撮影された画像を詳細に解析した結果、衝突による放 出物は非等方的(離散的な方向)に様々なタイミングで飛び出していることがわか りました。また、それぞれの放出物の内部は一様でなく、フィラメント状に物質が 分布しているような構造が見つかりました。

探査機搭載カメラ ONC-T によって発見されたクレーター内部の状況をふまえて 考察した結果,放出物の非等方性は衝突点付近の数 m 以上の巨大ボルダーが放出の 方向やタイミングに影響したために生じたこと,また,~1 mのボルダーが多数, 放出物の中に見つかっていることや,サイズの違う粒子を混合したターゲットへの 室内衝突実験の結果から,放出物内部におけるフィラメント状の非一様性の原因は, 掘削流によって放出された物質のサイズに分布があり,大きな粒子と小さい粒子が お互いの運動に影響を与え,それぞれの流れに乱れが生じたことであると考えられ ます.

発表では、衝突体の大きさに対してどれくらいのサイズ・質量のボルダーが掘削 流に乗って小惑星を脱出できるのかについても議論する予定です。このことは小惑 星の衝突進化における物質の集積・散逸を考える上で重要な情報となるでしょう。

タイトル

Hayabusa2 人工衝突クレータ生成による岩石サイズ頻度分布への影響 Effect of impacts on boulder size distribution of Ryugu after Hayabusa2 SCI experiment.

著者

N. Sakatani, K. Ogawa, M. Arakawa, R. Honda, K. Wada, K. Shirai, T. Kadono, Y. Shimaki, K. Ishibashi, T. Saiki, H. Imamura, Y. Takagi, M. Hayakawa, H. Yano, C. Okamoto, S. Sugita, T. Morota, S. Kameda, E. Tatsumi, Y. Cho, K. Yoshioka, H. Sawada, Y. Yokota, M. Matsuoka, M. Yamada, T. Kouyama, H. Suzuki, C. Honda.

発表形式:ポスター

抄録 (日本語) [全角・半角計 250 文字以内]

2019 年 4 月、小惑星探査機 Hayabusa2 は人工衝突実験を行い、小惑星 Ryugu 表面での 人工クレーター生成に成功。光学航法カメラ ONC-T の画像を用いて、人工クレーター内 外の領域について表面のボルダサイズ頻度分布の計測を行ったところ、クレーター内部は 外側のそれとは異なることが分かった。また、クレーター内部でも領域ごとに分布が異なっ ていた。本発表では、これらの結果からクレーター形成による表面ボルダサイズ分布への影 響を議論する。

抄録 (英語) [半角計 1000 文字以内]

On April 2019, Hayabusa2 successfully carried out the artificial impact experiment, and an artificial crater formed on the Ryugu's surface. In optical images taken by Optical Navigation Camera (ONC-T), the grain/boulder size distribution inside the SCI crater differs from that in the outside region, and a regional variation was found even in the crater. In this presentation, we will discuss about influences of impacts to the grain/boulder size distribution on the Ryugu's surface.

Ryugu クレーターの熱物性 Thermo-physical properties of craters on Ryugu

〇嶌生有理¹, 千秋博紀², 坂谷尚哉¹, 岡田達明^{1,3}, 福原哲哉⁴, 田中智¹, 田口真⁴, 荒井武彦⁵, 出村裕英⁶, 小川佳子⁶, 須古健太郎⁶, 関口朋彦⁷, 神山徹⁸, 滝田隼⁹, 松永恒雄¹⁰, 和田武彦¹, 長谷川直¹

Y. Shimaki¹, H. Senshu², N. Sakatani¹, T. Okada^{1,3}, T. Fukuhara⁴, S. Tanaka¹, M. Taguchi⁴, T. Arai⁵, H. Demura⁶, Y. Ogawa⁶, K. Suko⁶, T. Sekiguchi⁷, T. Kouyama⁸, J. Takita⁹, T. Matsunaga¹⁰, T. Wada¹, S. Hasegawa¹

¹宇宙航空研究開発機構,²千葉工業大学,³東京大学,⁴立教大学,⁵足利大学,⁶会津大学, ⁷北海道教育大学,⁸産業技術総合研究所,⁹北海道北見北斗高校,¹⁰国立環境研究所

¹JAXA, ²Chiba Institute of Technology, ³University of Tokyo, ⁴Rikkyo University, ⁵Ashikaga University, ⁶University of Aizu, ⁷Hokkaido University of Education, ⁸AIST, ⁹Hokkaido Kitami Hokuto High School, ¹⁰NIES.

はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR は 2018 年 8 月の中高度観測運用において小惑星 Ryugu の高解像度一自転観測(~4.5 m/pixel)を実施した.その結果, Ryugu 表面は平坦な温度 履歴を示した.これは平坦な面と比較してラフネスがある場合は朝方および夕方でも太陽に面し た高温の斜面が TIR 視野に入ることに起因すると考えられる. そこで, ラフネスモデルを用い た熱計算による温度履歴[1]と観測温度履歴の比較を行い、全球の熱慣性分布およびラフネス分 布を調査した. ラフネスモデルを用いた熱計算では熱慣性を 10 から 800 J m⁻² K⁻¹ s^{-0.5} まで, ラ フネスの程度を0(平坦)から0.5(凹凸度大)まで変化させた。その結果, Ryugu 表面熱慣性は 緯度経度に対して均質な分布を示し、平均熱慣性 210±50 J m⁻² K⁻¹ s^{-0.5} が得られた. この値は地 上観測[2]および MASCOT 搭載熱放射計 MARA によるその場観測[3]と調和的である.一方, 全球平均ラフネスは十分な凹凸度に対応する 0.42±0.02 であった. 均質な平均ラフネスは数 m 級のボルダで埋め尽くされた Ryugu 表面と整合的と考えられる. さらに本研究では自然クレー タに着目し、クレータ内部および周囲に熱慣性を調査した.対象は Ryugu の自然クレータリス ト[4]のうち明瞭なクレータである Confidence level I, II のクレータとした. その結果, クレー タサイズと熱慣性の明瞭な相関は見られず、クレータ周囲のイジェクタ堆積層も検出されなかっ た. これらは Ryugu ではクレータ形成による表層の圧密やイジェクタ粒子の堆積では熱物性が 変化しないことを示唆している.本発表ではクレータの熱物性の地域性も合わせて議論する.

[1] Senshu H. et al. (2019) *LPSC 50th*, #2153. [2] Müller T.G. et al. (2017) *A&A*, 599:A103. [3] Grott et al. (2019) *Nature Ast*. DOI: 10.1038/s41550-019-0832-x. [4] Hirata N. *submitted to Icarus*.

はやぶさ2衝突装置によって生成された イジェクタカーテンの解析から推定される 小惑星リュウグウの表層物性

和田 浩二¹, 〇石橋 高¹, 木村 宏¹, 荒川 政彦², 澤田 弘崇³, 小川 和律², 白井 慶³, 本田 理恵⁴, 飯島 祐一³, 門野 敏彦⁵, 坂谷 尚哉³, 三桝 裕也³, 戸田 知朗³, 嶌生 有理³, 中澤 暁³, 早川 基³, 佐伯 孝尚³, 高木 靖彦⁶, 今村 裕志³, 岡本 千里⁷, 早川 雅彦³, 平田 成⁸, 矢野 創³ ¹千葉工業大学, ²神戸大学, ³宇宙航空研究開発機構, ⁴高知大学, ⁵産業医科大学, ⁶愛知東邦大学, ⁷法政大学, ⁸会津大学

2019 年 4 月 5 日に「はやぶさ2」衝突装置から射出された弾丸によって、小惑星リュウグ ウ上に直径 10m 以上の人工クレータが生成された。そのクレータ生成の際に放出された表層 地下物質は、イジェクタカーテンとして分離カメラ(Deployable Camera 3: DCAM3)によって 撮像された。本研究では、この DCAM3 撮像画像と理論モデルとの比較により、イジェクタカ ーテンを構成している粒子のサイズや物質情報を推定する。例えば、イジェクタ粒子の大き さは、等サイズ分布とすると数 cm 程度、冪分布とすると冪の値にもよるが最大数 10 cm 程 度と推定される結果となった。イジェクタ粒子はクレータ掘削深さである 1m 程度までの情 報を反映する。したがって、結果として得られた粒子サイズ分布は、リュウグウ表層の少な くとも深さ1m 程度の浅い領域におけるものと考えられ、表面のボルダサイズ分布などと比 較することで、リュウグウの表層が活発に流動している/していたといった表層進化過程を 論じることが可能となる。

Hayabusa2 ONC 画像のアーカイブ化と公開計画

Plans of archiving and public release of Hayabusa 2 ONC images

○¹本田理恵, ^{1,2} 横田康弘, ³山田学, ⁴諸田智克, ⁵ 巽瑛理, ² 松岡萌, ⁴ 長勇一郎, ⁶ 神山徹, ⁷ 鈴木秀彦, ⁸亀田真吾, ²坂谷尚哉, ⁹本田 親寿, ²澤田 弘崇, ⁴杉田 精司, ONCチーム

¹高知大学,²宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所,³千葉工業大学 惑星探査研究センター,⁴東 京大学,⁵カナリア天体物理研究所,⁶産業技術総合研究所,⁷明治大学,⁸立教大学,⁹会津大学

JAXA の小惑星探査機はやぶさ2の可視カメラ ONC-T、W1、W2 は、2018 年 6 月の小惑 星リュウグウ到着以降、小惑星の貴重な画像を取得している。小惑星到着後 ONC が取得し た画像は 2019 年 8 月末時点で計 8306 枚に及ぶ。特に ONC-T はフィルタホイールにより可 視の 7 バンド狭帯域(ul, b, v, na, w, x, p)の画像を取得できるため分光学的に有用である。す でに内外の共同研究者により多数の研究成果が報告されているが、本発表ではこのデータを より広い範囲の研究者へ提供するため実施中のアーカイブ作業の内容と公開計画を報告する。

特に空間解像度が高く科学的有用性の高い ONC-T の画像は、大きくは v バンド地形画像 と複数バンドで短時間に撮像したマルチバンド画像に分かれる。高度 20km ホームポジショ ンのグローバル観測として、前者は自転位相角度3度おき、後者は30度おきに異なる照明 条件で複数取得されている。他にも高度 5km、それ以下の低高度で取得されたローカル画像 など多彩な画像が存在する。柔軟な解析をより広い範囲の研究者が行うことを可能にし、ま た一方機械学習等による発見的解析を可能とするため、現在画素単位の撮像条件(緯度、経 度、幾何学的撮像条件、解像度など)を加えたデータセットを準備中である。また2度のタ ッチダウンと SCI 衝突により地表状態に時間変化が生じているため、時間の要素も加え、必 要な断面を柔軟に切り取って解析に提供できるアーカイブの構築を目指す。公開するプロダ クトは、初期は生画像、ラディオメトリック・歪曲補正画像、I/F 画像とし、その後反射ス ペクトル、地図などを追加することを予定している。公開は段階的に実施し、2019 年 9 月-10 月に到着直後の 2018 年 7 月 10 日と 12 日にホームポジションで撮影したグローバルな 地形画像と7バンド画像の I/F までを画素単位の緯度経度などの情報付きで公開する。その 後 2019 年 12 月に 2018 年 8 月 1 日高度 5km で撮影されたグローバル画像を、2020 年夏頃 にタッチダウンリハーサル1 までを、そして 2020 年の 12 月のはやぶさ2の地球帰還の時 期に小惑星近傍フェーズで取得されたすべてのデータを公開する予定である。

謝辞:本作業には Katherine Crombie 氏(Ingigo Information Service)、ISAS 山本幸生氏、村上真也氏、大嶽久志氏、 菊池紘氏、佐藤広幸氏、三浦昭氏、会津大平田成氏、神戸大平田直之氏の協力を頂いている。

小惑星 Ryugu のブライトスポットのスペクトル特徴と存在量の推定

○末満 雅徳¹、諸田 智克²、渡邊誠一郎¹、本田 理恵³、亀田 真吾⁴、巽 瑛理⁵、山田 学⁶、 坂谷 尚哉⁷、神山 徹⁸、横田 康弘³、長 勇一郎²、鈴木 秀彦⁹、早川 雅彦⁷、松岡 萌⁷、
 本田 親寿¹⁰、道上 達広¹¹、吉岡 和夫²、小川 和律¹²、澤田 弘崇⁷、杉田 精司²

¹名古屋大学、²東京大学、³高知大学、⁴立教大学、⁵Univ. of La Laguna、 ⁶千葉工業大学、⁷宇宙航空研究開発機構、⁸産業技術総合研究所、⁹明治大学、 ¹⁰会津大学、¹¹近畿大学、¹²神戸大学

昨年6月に小惑星探査機「はやぶさ2」は小惑星 Ryugu に到着し、現在までに様々な科学的観 測を行ってきた。「はやぶさ2」に搭載されている ONC-T(光学航法カメラ)によって Ryugu 全球 の撮像が行われており、Ryugu 表面の光学的特徴が明らかになっている。Sugita et al. (2019) によると、主な特徴として反射率が非常に低いこと、反射スペクトル形状が平らであること、全 球的に均質であることが報告されている。一方、Box-A(20km 距離)、中高度(5km 距離)から撮像 された画像から、周囲より明るく見える点(ブライトスポット)の存在が確認されている。このブ ライトスポットの正体は、① Ryugu の形成の元となった母天体起源、② 外来物質、という2つ の可能性が考えられる。本研究では、小惑星 Ryugu のブライトスポットの起源の制約と Ryugu 表 面上での地質進化履歴の復元を目標に、ブライトスポットの反射スペクトルの特徴を調べ、ブラ イトスポットと平均的な Ryugu 領域、Ryugu を構成しているボルダのスペクトルの比較をするこ とで、Ryugu 構成物質との類似性または差異を検証した。次に、この結果から得られたブライト スポットのスペクトル特徴を利用して、ブライトスポットの存在量、Ryugu 平均物質との混合の 程度の推定を試みた。

MASCOT 分離後の 3 km 高度ホバリング観測の画像データを使用し、Ryugu の平均放射輝度率の 1.5 倍以上の値を持つ領域を探索した結果、21 個のブライトスポットが発見された。それらのス ペクトル形状は 2 つのタイプに分類できることがわかった。1 つのタイプ(タイプ 1)は平均的な Ryugu 領域と比較すると反射率は高く、スペクトルの傾きはフラットであるが、スペクトルの形 状は類似していることから、Ryugu の主要構成物質の風化度や変成度の異なる物質であると予想 される。もう 1 つのタイプ(タイプ 2)は S 型小惑星のスペクトルと類似性が見られ、S 型小惑星 由来の外来物質である可能性が考えられる。加えて、両者を足し合わせたようなスペクトル形状 をもつブライトスポットも存在し、これらは外来の S 型物質と Ryugu 物質の混合物である可能性 がある。このことから、外来の S 型物質は Ryugu 物質との混合により反射率が低下することで、 発見が困難な状態なものが Ryugu 表面に多く存在している可能性が考えられる。そこで本研究で はさらに S 型物質と Ryugu 物質との線形混合スペクトルを作成し、ホバリング観測データにおい て混合した S 型物質の探索を行い、S 型物質の存在量の制約を試みた。

リュウグウでみられるリニアメントの空間的特性

○菊地 紘¹, 逸見 良道², 宮本 英昭², 小松 吾郎³, 平田 直之⁴, 平田 成⁵, 本田 親寿⁵, 道上 達広⁶, 諸田 智克², 長 勇一朗², 本田 理恵⁷, 亀田 真吾⁸, 巽 瑛理², 横田 康弘¹, 神山 徹⁹, 鈴木 秀彦¹⁰, 山田 学¹¹, 坂谷 尚哉¹, 早川 雅彦¹, 吉岡 和夫², 松岡 萌¹, 佐々木 晶¹², 平林 正稔¹³, 澤田 弘崇¹, 杉田 精司².

¹宇宙航空研究開発機構,²東京大学,³ダヌンツィオ大学,⁴神戸大学,⁵会津大学,⁶近畿大学,⁷高知大学,⁸立 教大学,⁹産業技術総合研究所,¹⁰明治大学,¹¹千葉工業大学,¹²大阪大学,¹³オーバーン大学.

私たちは小惑星リュウグウの表面の進化を理解する鍵になると考えられる線状の筋リニアメン トに注目している.ホームポジション(高度約 20 km)からは,解像度約 2 m/pix の画像が全域 的に得られ、この天体の詳細な姿が明らかになった(Watanabe et al., 2018).赤道には(1)一周に 渡って地形的な高なり(リュウジン尾根)がみられ、南半球には(2)細長い二つの陥没した構造 (ホウライ地溝、トコヨ地溝)が観測された(Sugita et al., 2018).私たちは光源方向に注意し ながらリュウグウの表面を精査すると周囲と比べてアルベドが異なるいくつかの筋のような特 徴を確認した.これらを詳しくみてみると(3)線状の光条と、(4)構造的に隆起あるいは陥没し ているようにみえるものが確認できた.このような特徴はイトカワでもみられている(Barnouin et al., 2008).さらに望遠の光学航法カメラ(ONC-T)で数 mm/pixの画像が撮像され、超高解 像度画像が何枚も得られた.こうした画像で上記の4つを再度観察したところ、(1)-(3)は確認 できたが、(4)に関してはむしろ確認が困難になった.いくつかボルダーが線状に並んでいたり 消失したりすることで結果的にこれらを線状の構造として認識したようである.

私たちはこうしたリニアメントの空間的特性を明らかにするために,数値形状モデル上にそれ らを投影し,点群の集合体としてデータ化した.大規模なリニアメントでは慣性モーメントを解 析して,線状構造を最適な平面の向きや扁長率,偏平率,共線性という点から評価した.小規模 のものはその伸長方向と傾斜方向を,自転速度を変化させながら関連性を調査した.その結果, (1)リュウジン尾根は大きく二つに分類でき,その一つの平面は現在の自転軸とほぼ垂直である ことがわかった.さらに(2)その分類された境界は二つの地溝の延長上にあることなどが明らか になった.(3)光条に関しては高い平面性があることがわかった.(4)の線状地形では点群の最適 平面(あるいは直線)と現在の傾斜方向が垂直になっているものが多くみられた.

以上の結果から、リュウグウはその形成の初期にリュウジン尾根が形成し、その後なんらかのイベントによって二つの地溝が形成され、その前後でリュウジン尾根の二分性が生じたと考えられ、これらが構造変化によって形成したという主張(Hirabayashi et al., 2018)と整合的である. また現在では、微小重力の影響を受けてレゴリスがグローバルな領域で大規模に移動することにより線状の構造が形成されていると考えられ、イトカワでも同様の説明が可能である.

はやぶさ2タッチダウンからあきらかになった 小惑星 Ryugu の表面の色変化と層序

諸田智克¹, 杉田精司¹, 長勇一郎¹, 金丸仁明², 本田理恵³, 巽瑛理^{4.5.1}, 坂谷尚哉⁶, 平田直之⁷, 亀田真吾⁸, 菊地紘⁶, 山田学⁹, 横田康弘⁶, 松岡萌⁶, 本田親寿¹⁰, 神山徹¹¹, 鈴木秀彦¹², 早川雅彦⁶, 吉岡和夫¹, 小川和律⁷, 道上達広¹³, 宮本英昭¹, 逸見良道¹, 平林正稔¹⁴, 平田成¹⁰, 廣井孝弘¹⁵, 澤田弘崇⁶, はやぶさ2チーム

¹東京大学,²大阪大学,³高知大学,⁴Univ. of La Laguna,⁵IAC,⁶宇宙航空研究開発機構,⁷神戸大学,⁸立教大学, ⁹千葉工業大学,¹⁰会津大学,¹¹産業技術総合研究所,¹²明治大学,¹³近畿大学,¹⁴Auburn Univ.,¹⁵Brown Univ.

2019 年 2 月 21 日に小惑星探査機はやぶさ 2 は世界初となる C 型小惑星への着陸に成功 した. その際に取得された Ryugu 表面の高解像度画像や着陸時の接触による Ryugu 表面 の応答は, Ryugu 表面の分光学的特徴や物理状態の理解に重要な情報を与える.

Ryugu 表面の反射スペクトルは極めて一様であるが (Watanabe et al. 2019; Kitazato et al., 2019; Sugita et al., 2019), スペクトル傾斜には空間的分布があることが知られている (Watanabe et al. 2019; Sugita et al., 2019). またクレータとの層序関係をみると, 層序学的に上位のクレータ内部は周囲よりも青いのに対して, 層序学的下位のクレータの内部は周囲と変わらず赤い傾向がある. このような Ryugu 表面の色分布がどのようにつくられたのかはまだよくわかっていない.

着陸運用において光学航法望遠カメラ(ONC-T)によって着陸地点付近の高解像度画像 が取得された.着陸点は赤道付近に位置し,Ryugu 平均と比較するとやや青い領域である. それらの画像をみると,赤い表面を持つ岩塊は,その一部の表面のみが赤いのに対して,表 面の大部分は青い.また多くの岩塊の表面は全体的に青い傾向がみられている.これらのこ とから,Ryugu の岩塊はもともと青いが,何らかの変成作用によって赤化していると推測 される.また岩塊表面全体が赤くなっているものが無いことから,表面赤化の後に岩塊の破 壊や表面削剥によって新鮮な岩塊表面の露出,表面流動による新鮮な岩塊の露出が起こって いることを示している.さらに青い表面が十分に赤化せずに残っていることは,それらの破 壊や流動による表面の更新の時間スケールに対して,現在の表面赤化の速度は十分に遅いこ とを示唆する.

着陸の直後に探査機上昇のためのスラスタ噴射によって Ryugu 表面の多くの岩塊と細粒 子が巻き上げられた. それらの岩塊は着陸前と比較して相対的に明るく変化したように見え る. また巻き上がった細粒子は着陸点周辺の半径約 5m の範囲に再堆積し, その結果として 着陸点周辺は赤暗く変化した. このことは赤暗い細粒子がもともと岩塊の表面や内部の隙間 に付着していたことを示唆し, この細粒子は, 赤化した岩塊表面が破壊や削剥を受けて細粒 化したものであると推測される.

以上の観測事実を踏まえて本発表では着陸運用と全球観測から明らかとなった Ryugu 表面の色変化や層序関係,地質進化シナリオについて報告する.

162173 リュウグウの大クレーターと赤道バルジの 地形

〇並木則行¹, 水野貴秀², 千秋博紀³, 野田寛大¹, 松本晃治¹, 阿部新助⁴, 増田陽介⁴, LIDAR サイエンスチーム

1国立天文台, 2宇宙科学研究所, 3千葉工業大学, 4日本大学

2018年10月30日と2019年7月25日に行われた高度5~6 kmでのスキャン観測により,小惑 星リュウグウの北緯20度から南緯40度までの赤道帯の詳細な地形データが得られた.この詳細 地形データにはウラシマ、コロボック、ブラボーの3つの大クレーターと赤道リッジが含まれて いる.ウラシマ、コロボック、ブラボークレーターについては、7-9月に取得された高度20 km からの高空間分解能の地形データもあるが、測線が東西方向のみであり、緯度範囲も限定的であ ったため、このスキャン観測によって、はじめて2次元的な地形データを取得する事ができた. クレーターの形状はボウル型ではなく円錐型に近い.また、クレーター斜面の傾度は岩塊を除け ば一定で、小惑星の推定重力場に対してウラシマが16-20度、コロボックが7-15度、ブラボー が16-18度傾いている.この傾斜は30-35度という一般的な安息角に比べて小さい.コロボック とブラボークレーターの平らな中央部と、緩やかな傾斜は一見、クレーターに地形緩和が進んで いる事を示唆しているように思われる.実際に、光学カメラ画像にはウラシマクレーター内部の 斜面で地すべりが起きている事が認められる.しかしながら、他の小惑星クレーターと同程度の 深さ/直径比率は、クレーター形成当時の地形が保存されている事を強く示唆する.従って、リ ュウグウ上のクレーター地形は20度以下の緩斜面の円錐形として形成され、安息角よりも緩や かだったために地形緩和による大きな変形が起きなかったと考えられる.

クレーターの東西断面は東側斜面と西側斜面に顕著な違いを示している.いずれのクレーターも 西側斜面が粗く,東側斜面が滑らかである.東西の相違はクレーターリムの形状に最も顕著に認 められる.西側のリムは細く急であるが,東側のリムは幅が広く緩やかである.東西の形状の非 対称は,放出物にはたらくコリオリカの影響と考えられる.火星衛星フォボスのスティックニー クレーターの東西非対称と同じように,東向きに飛び出した放出物は,北半球では南向きに,南 半球では北向きに進路を変えて,赤道付近に集まった可能性がある.

赤道バルジの南北地形断面形状はほぼ対照的である.しかし,クレーターと同じように,斜面の 粗さ,滑らかさには南北非対称がある.非対称の表れ方は経度によって異り,北側が滑らかで, 南側が粗い地域もあれば,逆に北側がわずかに粗い地域もある.中間熱赤外カメラからは赤道バ ルジの熱的特性に関して顕著な地域差は確認できておらず,南北非対称の原因が粒度や空隙率の 地域差によるとは想定し難く,南北非対称の原因は不明である.

Hera 搭載熱赤外カメラによる地球近傍小惑星の観測計画 Near Earth Asteroid Observations by Hera Thermal Infrared Imager

[•]岡田達明^{1,2}, 福原哲哉³, 田中 智¹, 千秋博紀⁴, 坂谷尚哉¹, 嶌生有理¹, 荒井武彦⁵, 神山 徹⁶, 出村裕英⁷, 関ロ朋彦⁸, Hera TIRI チーム

¹JAXA 宇宙科学研究所,²東京大学,³立教大学,⁴国立環境研究所,⁴千葉工業大学,⁵足利大学, ⁶産業技術総合研究所,⁷会津大学,⁸北海道教育大学

小惑星は太陽系の初期の状態を現在まで保持する始原的天体であり、太陽系の起源や初期進化過 程を解明するために必要不可欠な研究対象である。惑星形成過程では小惑星を含む太陽系小天体の 衝突現象が重要な役割を果たしてきた。その衝突現象は現在も継続しており、小天体の地球近傍通過 は頻繁に発生し、その一部は地球に衝突する。6600万年前のユカタン半島チチュルブ付近に落下した 隕石衝突の影響は甚大であり、恐竜を含む当時の地上の生態系の激変や大量絶滅に大きく影響したと される。近年でも1908年のツングースカ大爆発による半径30~50kmの範囲の森林が炎上し、2150km²の 範囲の樹木がなぎ倒され、1000km離れた家屋の窓ガラスが割れる被害が発生した。2013年のチェリャ ビンスク隕石は火球や隕石雲が撮影され、大気突入時の衝撃波によって4474棟の建物に損壊を及ぼし、 1491人が重軽傷を負うなど被害が発生した。これが都市に落下する場合の被害は甚大であり、人類や 文明社会への潜在的脅威であることが改めて認識された。

人類存亡の危機となり得る天体衝突の回避のための地球防衛方法(スペースガードまたはPlanetary Defense)が国際的枠組みで議論されてきた。このうち、探査機を衝突させることによって小惑星の軌道 を変化させ、地球衝突を回避させる効果をテストする計画が進行中である。NASAのDART (Double-Asteroid Re-direction Test)は、2021年に打ち上げ、2022年に小惑星65803 Didlymos (Xk型、直径約 780m)の衛星(直径約160m)に衝突させる。ESAのHeraは、2023年(または2024年)に打ち上げ、2027年 頃にDidymosにランデブーして、距離30kmから最終的には5km以下まで接近して、小惑星の軌道と軌道 進化の精密計測を実施するのに加えて、小惑星の素性と衝突痕の状態を詳細に観測する計画である (2019年11月に採否が決定される)。DARTとHeraを合わせてAIDA (Asteroid Impact and Deflection Assessment)と呼ぶ。小惑星衝突回避技術実験に加えて、Xk型小惑星(Didymos)の初の近傍観測、最 小規模の小惑星(衛星)の詳細観測、連星系の軌道進化の実測やBYORP効果の評価を行う。さらに、 DARTによる衝突痕の規模や形状、イジェクタやクレータ内部の圧密や変成の状態を調べる。

Heraにはマルチバンドカメラ、熱赤外カメラ、レーザ高度計、電波科学のほか、2機の子衛星を搭載し、 距離30kmから始めて最低高度5kmまで降下して観測する予定である。このうち、熱赤外カメラTIRIは日 本が提供する方向で調整が進められている。「はやぶさ2」による小惑星Ryuguの熱撮像の実績が評価 され、Didymosの観測にも有効と判断されたためである。TIRIは非冷却ボロメータ(1024x768画素)による 10 μ m帯の熱撮像を行う。さらに、複数の狭帯域バンドでChristensen Featureの特徴や結晶・アモルファ スの割合などの物質情報も取得することによって、Xk型小惑星の隕石タイプの制約、Didymosと衛星と の物質的差異、衝突痕内部と外部やイジェクタとの物質的差異についても調査する。本発表では、Hera 搭載TIRIについての検討状況について紹介する。

教師無し分類手法を用いた 小惑星ベスタの地質分類の試み

〇石原吉明¹・晴山慎²・大竹真紀子³ ¹国立環境研究所・²所聖マリアンナ医科大学・³宇宙航空研究開発機構

地質・構造・進化を読み解く上で、天体全球規模での地質マッピングは欠かすことが出来ない。しかしながら、近年の探査データは、空間解像度の向上やスペクトル情報の増大などにより、研究者が手動で全球をマッピングすることは非現実的であり、各種の機械分類手法によるマッピング試みられている。例えば著者らのグループでは、「かぐや」に搭載された「スペクトラルプロファイラ」により取得された可視・近赤外スペクトルデータから 0.5 度

メッシュで作成された吸収スペクトルキューブデータの機械分類を行い、月の分光学的分類 図を作成している(Hareyama et al., 2019)。

本研究では、米国の Dawn 探査機によって取得された小惑星ベスタのデータをもとに、教師無し分類手法を用いた地質分類を試みる。分類には、主として波長 400 – 1000 nm のマルチバンド(パンクロ+7 バンド)分光カメラである Framing Camera (FC)による FC HAMO カラーモザイクデータを用いた。また合わせて中性子分光計および地形データを補助的に使用した。なお 7 次元の FC HAMO データにおいて最も大きな情報量を持つものはアルベドの差異である。したがって単純にアルベド差で分類されることを避けるためには、何らかの前処理によりアルベドの重みを下げる必要がある。本研究では前処理として PCA を適用し、分類には各地点における主成分負荷量を入力データとして用いることとした。また、教師なし分類手法については、クラス数を与える必要のある K-means、GMM、最適クラス数もデータから推定可能な X-means、ISODATA、VGMM の 5 種類の分類手法を検討し、計算時間短縮の観点から低解像度で VGMM による分類を行いクラス数 16 と確定し、最終的にはオリジナル解像度で GMM による分類を実施した。

最終的な分類結果は、クラスの平均スペクトルは基本的には似通っているが、600 nm 付近 の弱い吸収・1µm 吸収帯の吸収中心/深さの違いが捉えられている。したがって分類結果 はベスタのアルベドおよび鉱物分布を反映したものとなっていると解釈できる。赤道域につ いては中性子分光計による水素パターンとクラス分布パターンは大局的には相関があるよう に見られる。また、地形との関係については、比較的大規模なクレータおよび周辺ではその 周囲と違うクラスが存在するため、クレータリングにより露出した表層とは異なる物質を捉 えている可能性があるが、各クラスの平均スペクトルと深度情報を合わせ慎重な解釈が必要 である。

炭素質地球近傍小惑星の宇宙風化トレンド

O櫻井祥, 岩本沙耶, 北里宏平, 平田成 会津大学

大気を纏っていない小惑星の表面は、太陽風や微小隕石の衝突に晒されることによって 時間の経過とともにその光学特性が変化することが知られている.この現象は宇宙風化作用 と呼ばれており、ケイ酸塩鉱物を多く含むS型小惑星については、「はやぶさ」探査機が持 ち帰ったイトカワ粒子のおかげでその理解が飛躍的に進んだ.一方、それとは対称的にC型 やB型などの炭素質小惑星については、「はやぶさ2」や「OSIRIS-Rex」による詳細な観測 が行われているにも関わらず、どのような変化が生じるのか未知な部分が多い.そこで本研 究では、地球近傍で発見されている炭素質小惑星 34 天体の軌道と光学特性の情報を用いて、 炭素質小惑星における宇宙風化作用のトレンドを調べることを目的とする.

地球近傍小惑星の中には過去に惑星との近接遭遇を経験したものとそうでないものが存 在する.前者は潮汐力による表面更新が起こることから、後者と比べて宇宙風化作用の影響 が小さいことが示唆されている[1].そこで我々は、炭素質小惑星34天体のそれぞれが過去 50万年の間に惑星と近接遭遇したかどうかを調べるために、N体シミュレーションコード swift_rmvs[2]を用いて軌道計算を行った.小惑星と惑星がどの程度接近したかを評価する 指標には最小交差距離 (Minimum Orbit intersection Distance, MOID)を使用した.これら の計算結果と観測から得られているアルベドやスペクトルの情報の関係性から宇宙風化作用 のトレンドについて議論する.

参考文献:

[1] Binzel, R.P. et al., 2010, Nature 463, 331.

[2] Levison, H.F. and Duncan, M.J., 1994, Icarus 108, 18.

近赤外線分光観測による 小惑星族母天体の内部構造探査計画

〇臼井 文彦¹、長谷川 直²、大坪 貴文²
 ¹神戸大学 CPS、²ISAS/JAXA

小惑星における水の存在を調べることは、太陽系の形成や進化の過程、特に熱的な変遷を知る 上で重要である。水とケイ酸塩鉱物から生成される含水鉱物は水氷の昇華温度以上でも安定であ り、水の存在を示す重要なトレーサーである。この含水鉱物は近赤外線(波長 2.7 µm 帯)の反射ス ペクトルに顕著な吸収フィーチャーを持つ。我々は赤外線天文衛星「あかり」を用いて小惑星の近赤 外線分光観測を行い、数多くの小惑星のスペクトルを得た^[1]。この含水鉱物のフィーチャーは天体形 成時の情報を現在まで保持している可能性が高い。

小惑星族は類似の固有軌道要素を持つ小惑星の集団である。その中でも、C型小惑星(24) Themis に関連した Themis 族^[2]は、現在知られている小惑星族の中でも最大規模のものである。こ の族に同定されている小惑星は 5000 個近く^[3]あり、太陽から 3-3.24 au の範囲に分布している。 これらは、直径 400 km の母天体から約 1 億年前の衝突破壊によって形成されたものだと考えら れている^[4,5]。最大破片である(24) Themis は直径 177 km^[6]の C型小惑星^[7]であり、その表層には 水氷^[8,9]や含水鉱物^[1]が検出されている。さらに Themis 族小惑星の中には氷の昇華によって彗星 活動を見せる天体も発見されている^[10,11]。これらから、Themis 族小惑星には広く水が保持されて いると考えられる。そこで、現在の Themis 族小惑星の近赤外線分光観測を行い、天体ごとのスペ クトルの違い、すなわち含水鉱物量から変成度を評価することによって、その母天体内部が一様で あったのか、あるいは層構造を持っていたのかの推定が可能になる。

現在計画中の地上・宇宙望遠鏡によって、今後 10 年間で Themis 族小惑星 70 天体の観測が 可能である。これは既知の Themis 族小惑星の総質量の 8 割に相当する。これによって、これまで わかっていなかった小惑星の内部構造について初めて情報が得られると期待される。

参考文献

[1] Usui, F. et al. 2019, PASJ 71, 1; [2] Hirayama, K. 1918, AJ 31, 185; [3] Nesvorny, D. 2015, NASA PDS, EAR-A-VARGBDET-5-NESVORNYFAM-V3.0; [4] Durda, D.D. et al. 2007, Icarus 186, 498; [5] Nesvorny, D. et al. 2003, ApJ 591, 486; [6] Usui, F. et al. 2011, PASJ 63, 1117; [7] Hasegawa, S. et al. 2017, PASJ 69, 99; [8] Campins, H., et al. 2010, Nature 464, 1320; [9] Rivkin, A.S. & Emery, J.P. 2010, Nature 464, 1322; [10] Hsieh, H.H. & Jewitt, D. 2006, Science 312, 561; [11] Hsieh, H.H. et al. 2018, AJ 155, 96
DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と サイエンス検討状況

平井 隆之¹, 小林 正規¹, O荒井 朋子¹, 木村 宏¹, Srama Ralf², Krüger Harald³, DESTINY+チーム

> ¹千葉工業大学惑星探査研究センター,²シュトゥットガルト大学, ³マックスプランク太陽系研究所

2022年打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証機 DESTINY+に搭載されるダストアナライザ (DDA)は、ダスト粒子の超高速衝突で発生する陰/陽イオンを質量分析することで、ダストの 化学組成を明らかにする観測装置である。DDAは、活動的小惑星(3200)Phaethonとのフライ バイ時に小惑星由来のダスト観測を試みることに加え、地球周回フェーズおよびPhaethon 遷移フェーズでは惑星間ダストと星間ダストを観測する。

現在、DESTINY+はプライム候補メーカーでのフィージビリティスタディを進めている。 DDA については電力や質量といった基本的なインターフェース項目に加え、ダスト観測に大 きく影響するセンサ部の探査機上搭載位置や指向方向などが特に重要な項目として挙げられ る。そこで DDA センサ部の搭載位置や指向方向の要求を設定するため、惑星間ダスト及び星 間ダストの分布モデルを用い、Phaethon 遷移フェーズ期間中(2 年間)の衝突フラックス、衝 突速度、到来方向の分布を予測した(Krüger et al., 2019, PSS 172, 22)。その結果、それ らの分布には探査機軌道の位相によって変動する偏りが見られ、より多くのダストを検出し DDA の科学成果を最大化するには、観測視野を広く確保する探査機構体端部への搭載と、任 意の方向にセンサを指向させる二軸ジンバルの採用が、強く推奨されることが示唆された。

DESTINY⁺搭載カメラの機上校正方法に ついての検討

○岡本 尚也¹, 石橋 高², 洪 鵬², 吉田 二美², 荒井 朋子², 石丸 貴博¹, 高島 健¹ ¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ²千葉工業大学惑星探査研究センター

深宇宙探查技術実証機 DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUst Science)は, 理学・工学 の連携ミッションであり、2022年にイプシロンロケットにより打ち上げが予定されてい る、打ち上げ後2年間、探査機はイオンエンジンによる加速を続けスパイラル状に軌道高度 を上昇し、月の重力圏に入ると月スイングバイを数回繰り返して太陽を公転する軌道に入 る、その後、約2年かけて目標天体の活動小惑星(3200)Phaethonの会合点へと向かう、 DESTINY⁺ではふたご座流星群の母天体とされるこの小惑星を高速フライバイし、搭載され るカメラにより地球飛来ダストの供給源である流星群母天体の実態解明を目指す。 この目的を達成するためにカメラ観測で目標とする項目は以下の5項目である: (1)Phaethon の自転周期. (2) Phaethon の輪郭. (3) Phaethon の3次元形状. (4) Phaethon の表層 地形, (5)Phaethon の表層物質分布。DESTINY⁺探査機には、 2種類のカメラが搭載され る. 1つは(1)-(4)を観測するために高空間分解できるモノクロ望遠カメラ TCAP (Telescopic Camera for Phaethon)である。Phaethon を遠方から数 km/pixel で観測し、(1) 自転周期、(2)輪郭の観測を行う。Phaethon に接近すると探査機は Phaethon に対し相対 速度 30–40 km s⁻¹で通過する。この状況下で Phaethon をカメラ視野内に収めるため。 TCAP では光学系の前方に駆動鏡を取り付けこれを回転させて撮像する。この時、100 m/pixel 以下で(3)3 次元形状を観測. また最接近時には~3.5 m/pixel での(4)表層地形観測 を目指す。もう1つのカメラは可視から近赤外に波長域を持つ(425 nm, 480nm, 550nm, *700 nm, 850 nm, *950nm. *はオプション)マルチバンドカメラ MCAP (Multiband Camera for Phaethon)である。紫外域のスペクトル、可視域のスペクトル、近赤外域のス ペクトルの傾きを調査するとともに、100 m/pixel 以下での画像取得を目指し、(5)表層物 質分布の観測を行う。それぞれの項目ごとに目標とする S/N 比は異なるが。低いものでは S/N比 (Signal-to-Noise Ratio)≥20, 高いものでは S/N 比≥50 での撮像が要求される. これらのカメラで得られる画像データから上記目標となる科学的データを正しく抽出する には両カメラの校正が必要であり、その特性を知っておくことが重要となる、そのため打ち 上げ前に地上で両カメラの校正試験を行うことは必須であり.現在は候補となる CMOS イ メージセンサのラジオメトリックな性能についての評価に着手している。一方で、打ち上げ 後の振動や宇宙線等によるカメラの性能変化・劣化により地上試験で得た特性が Phaethon 到着までの4年の間、一定に保たれている保証はない、そのため探査機打ち上げ後も機上で のカメラ校正を行い、その特性の変化・劣化の程度を評価する必要がある、この評価を行う には安定した光源が必要となる.しかし、両カメラは厳しい質量制約のため現在の設計では 内部に校正用の光源をもたない予定である。よって航行中に観測可能かつ適切に選択された 恒星・惑星・月を光源として用いた校正が必要となってくる。本発表ではこれまでのミッシ ョンや地球観測衛星で行われてきた天体を用いたカメラの機上校正方法を参考に, TCAP な らびに MCAP における航行中の校正方法の検討状況について報告する.

DESTINY⁺計画の理学ミッション検討状況

○荒井朋子¹、小林正規¹、石橋高¹、吉田二美¹、木村宏¹、平井隆之¹、洪鵬¹、 Ralf Srama², Harald Kruger³, 渡部潤一^{4,5}、岡本尚也⁵、豊田裕之⁵、西山和孝⁵、高島建⁵、 DESTINY⁺サイエンスチーム

> ¹千葉工大・惑星探査研、²University of Stuttgart、³Max Planck Institute、 ⁴国立天文台、⁵JAXA・ISAS

理工合同ミッションである深宇宙探査技術実証機 DESTINY+は概念設計フェーズをまもなく完 了し、2019 年度から基本設計を開始予定である。工学ミッションでは、イプシロンロケットを 利用した深宇宙探査実現のため、電気推進による宇宙航行技術を発展させ、フライバイ探査 技術を獲得し、小天体探査の機会拡大を目指す。理学ミッションでは、ふたご座流星群の母 天体である活動的小惑星(3200)Phaethon の高速フライバイ撮像を行うと共に、1au 付近の惑 星間ダスト・星間ダスト、Phaethon 周辺ダスト粒子毎の質量、軌道、化学組成をその場分 析する計画である. 高速追尾機能を有する望遠カメラ及び可視マルチバンドカメラは千葉工 大が中心となり開発し、ダストアナライザはドイツとの国際協力でシュツットガルト大が開 発する。2017 年 12 月には Phaethon の国際観測キャンペーン、2018 年 10 月には Phaethon からの分裂天体である小惑星 2005UD の国際観測キャンペーンが行われ、探査対象天体の物 理化学特性について理解が進んだ。また、2019年7月29日米国南西部で行われた Phaethon による恒星食観測は歴史的成功を収め、天体サイズに係る新たな情報が得られた。8月22 日に北海道渡島半島で行った Phaethon の恒星食観測は天候不良のため不成立に終わった。 本稿では理学ミッション検討状況を報告する.また、本講演会ではカメラの検討状況は石橋 他(0_12)、カメラの機上校正検討状況は岡本他(P_96)、ダストアナライザの検討状況は平井 他 (P_97)、Phaethon の恒星食観測については吉田他 (P_59) で発表する。

The current status of science mission study of DESTINY⁺

OTomoko Arai¹, Masanori Kobayashi¹, Ko Ishibashi¹, Fumi Yoshida¹, Hiroshi Kimura¹, Takayuki Hirai¹, Peng Hong¹, Ralf Srama², Harald Kruger³, Junichi Watanabe^{4,5}, Hiroyuki Toyota⁵, Kazutaka Nishiyama⁵, Takeshi Takashima⁵, DESTINY+ Science Team ¹PERC, Chiba Institute of Technology, ²University of Stuttgart, ³Max Planck Institute, ⁴National Astronomical Observation of Japan, ⁵JAXA, ISAS

DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUst Science) is a joint mission of technology demonstration and science observation. The science objective is twofold, first to conduct high-speed flyby imaging of Geminids-parent, active asteroid (3200) Phaethon and second, to perform in-situ dust analyses of interplanetary dust, interstellar dust around 1 au during cruising phase and dust around Phaethon upon flyby. The onboard payloads include panchromatic telescopic camera, visible-NIR multiband camera, and dust analyzer. The cameras are developed by PERC, Chiba Institute of Technology and dust analyzer by University of Stuttgart. International observation campaign for Phaethon in December 2017 and that for asteroid 2005UD, which is a breakup body from Phaethon, in October 2018 were conducted. As a result, understanding of both asteroids have been advanced. Observation for occultation of a star by Phaethon in the southwestern U.S. on July 29, 2019 was a huge success. That in Oshima peninsula in Hokkaido on August 22, 2019 was conducted with no joy due to cloudy weather. Here, we present the overview and the latest status of DESTINY⁺ science mission.

Design of an ion mass spectrometer for the Comet Interceptor mission

OS. Kasahara¹, S. Yokota², Y. Saito³, and K. Asamura³ ¹ The University of Tokyo, ²Osaka University, ³ISAS/JAXA

The Comet Interceptor mission aims at a dynamically-new comet or an interstellar object, in collaboration between ESA and JAXA. In this mission, Japan will provide a daughter spacecraft, whose closest approach will be about 1,000 km, allowing crossings of several kinds of plasma boundaries. Plasma suite onboard the Japanese daughter spacecraft consists of an ion mass spectrometer and a magnetometer to obtain details of plasma boundaries as well as neutral-plasma interaction around a comet. Relatively high mass resolution will provide important information on composition of a coma. Here we present the design of ion mass spectrometer onboard Japanese daughter spacecraft of Comet Interceptor.

Q型小惑星:風化した表層である可能性

〇長谷川直¹,廣井孝弘²,大塚勝仁³,石黒正晃⁴,

黒田大介⁵,伊藤孝士⁶,佐々木晶⁷

¹ ISAS/JAXA,² ブラウン大学,³東京流星ネットワーク,⁴ソウル大学校, ⁵京都大学,⁶国立天文台,³大阪大学

イトカワ粒子は、ハヤブサ探査機によって S-complex 近地球型小惑星 25143 イト カワ[1,2]から回収されたサンプルである。イトカワ粒子の分析結果から S-complex 小惑星が普通コンドライト隕石の母体であることを証明された[3,4,5]。それに加え て、イトカワ表面の宇宙風化年代は数千年程度であることを明らかにした[6,7]。伝 統的に、Q-type 小惑星は表面が新鮮であると考えられてきた[e.g.,8]が、イトカワ 粒子の計測から判明した宇宙風化のタイムスケールは、従来室内実験等から考えら れていた宇宙風化のタイムスケール[9,10]よりも約3桁小さいため、従来提案から 提案されている Q-type 小惑星の表層形成メカニズム[e.g., 11, 12, 13]では、Q-type 小惑星の表面の更新を説明できなくなった。本研究では、Q-type 小惑星の表面状態 に関する新しい仮説:Q-type 小惑星は、微粒子が不足した、新鮮でなく風化してい る表面である、ということを提案する。この仮説を検証するために、まず既知の Qtype 小惑星の軌道計算を行い、数千年程度では確率的に殆どの Q-type 小惑星は惑星 近接が無く、表層更新をすることは難しいことを確認した。次に、普通コンドライ ト隕石に対して、宇宙風化シミュレーション実験を行い、スペクトルの変化の観察 をおこなった。スペクトル分析の結果、宇宙風化された表層でも、大きな(100 µm) 以上の粒径)を持つ普通コンドライト隕石は、Q-type 小惑星と一致するスペクトル を示すことが分かった。このことから、Q-type 小惑星は新鮮でなく風化している表 面である可能性が高いことを示している[14]。

参考文献

[1] Hasegawa, S., et al. 2018, PASJ, 70, 114; [2] Binzel, R. P., et al. 2019, Icarus, 324, 41; [3] Nakamura, T., et al. 2011, Science, 333, 1113; [4] Tsuchiyama, A., et al. 2011, Science, 333, 1125; [5] Yurimoto, H., et al. 2011, Science, 333, 1116; [6] Nagao, K., et al. 2011, Science, 333, 1128; [7] Noguchi, T., et al. 2014, Meteorit. Planet. Sci., 49, 188; [8] McFadden, L. A., Gaffey, M. J., & McCord, T. 1985, Science, 229, 4709; [9] Vernazza, P., Binzel, R. P., Rossi, A., Fulchignoni, M., & Birlan, M. 2009, Nature, 458, 993; [10] Marchi, S., Paolicchi, P., & Richardson, D. C. 2012, MNRAS, 421, 2; [11] Binzel, R. P., et al. 2010, Nature, 463, 331; [12] Polishook, D., Moskovitz, N., Binzel, R. P., DeMeo, F. E., Vokrouhlicky, D., Zizka, J., & Oszkiewicz, D. 2014, Icarus, 233, 9; [13] Delbo, M., et al. 2014, Nature, 508, 233 [14] Haseagwa, S. et al. 2019, 71, in press.

木星トロヤ群、ヒルダ群、およびメインベルト 小惑星のサイズ頻度分布の比較研究:

太陽系初期の惑星移動への手がかり

A comparative study of size frequency distributions of Jupiter Trojans, Hildas and main belt asteroids: A clue to planet migration history

○吉田 二美¹, 寺居 剛², 伊藤 孝士², 大槻 圭史³, Lykawka S. Patryk⁴, 廣井 隆弘⁵, 高遠 徳尚²
 1千葉工業大学, ²国立天文台, ³神戸大学, ⁴近畿大学, ⁵ブラウン大学

我々は2002年以来、太陽系小天体のサイズ頻度分布(SFD)を調べるために、ハワ イ島マウナケアにある口径8.2mのすばる望遠鏡に広視野CCDカメラ:Suprime-Cam(SC)またはHyper Suprime-Cam(HSC)を取り付けて、太陽系小天体サーベイを 行ってきた。我々のサーベイは、すばる望遠鏡の大口径とSCやHSCの広い視野のお かげで、Rc=24.4 - 24.5等までの小さい移動天体を効率よく検出することができる。 この明るさはMBAsでは直径 sub-km、ヒルダ群小惑星と木星トロヤ群小惑星(JT)で は直径約2kmに相当する。我々のサーベイから得たSFDと他の調査から得られた SFDを組み合わせて小天体グループごとにsub-kmから1000kmの範囲のSFDを推定 し、太陽系小天体に影響を与えた巨大惑星移動の手がかりを得るために各小天体グ ループのSFDの比較研究を行った。

我々はRプロット上で波状構造をしているMBAsのSFDsが、メインベルトの内か ら外に行くにつれて徐々に平坦化することに気づいた。一方、ヒルダとJTのSFDは ほぼ平坦であることがわかった。太陽系外縁天体(TNO)のSFDは部分的にしかわかっ ていないが、New Horizons探査機により得られた冥王星のクレーターのSFDから推 定される直径1km一数10kmのTNOのSFDはRプロット上で平坦な形をしている。惑 星形成・進化モデルでは初期に巨大惑星の移動による小天体のかき混ぜが起こり、 現在のJTはもともと巨大惑星領域より外側の太陽系外縁部にあった微惑星が惑星移 動中に木星のトロヤ群軌道に捕獲されたと示唆している。したがって、我々が発見 したMBAからJTへのSFDの緩やかな平坦化は、TNO領域に由来する平坦なSFDを持 つ天体群がJT領域だけでなく、外側のメインベルトにまで供給されたという証拠で あるのかもしれない。この研究は以下の雑誌に掲載された。

Yoshida+ 2019 P&SS,169, 78 "A comparative study of size frequency distributions of Jupiter Trojans, Hildas and main belt asteroids: A clue to planet migration history".

表面凹凸のある小天体の Yarkovsky 効果 および YORP 効果の数値計算 Yarkovsky effect and YOPR effect on an asteroid with rough surface

〇千秋博紀¹,坂谷尚哉²,諸田智克³,横田康弘²,嶌生有理²,田中智²,岡田達明² ¹千葉工業大学惑星探査研究センター,²宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, ³東京大学理学系研究科

OHiroki Senshu¹, Naoya Sakatani², Tomokatsu Morota³, Yasuhiro Yokota², Yuri Shimaki², Satoshi Tanaka², and Tatsuaki Okada²

¹PlanetaryExploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³School of Science, The University of Tokyo

「はやぶさ2」中間赤外カメラ(TIR)の観測によれば、小惑星リュウグウ表面の輝度温 度は同じ場所でも観測方向によって大きく変化する.これは表面にある凹凸の影響によって 陽の当たり方の不均質があることと、観測者の方向によって観測できる場所が異なることに よると解釈できる.輝度温度が異なるという事は、熱輻射に強い異方性があり、Yarkovsky 効果やYORP効果が効率的に働いていることを示唆している.そこで我々は、リュウグウと 公転軌道・自転周期・自転軸方向が同じ天体からの熱輻射量を、表面の凹凸の程度の関数と して求めた.リュウグウの凹凸の程度は TIR データと数値計算との比較から求まっており、 ここからリュウグウの今後の軌道・自転進化を推定することができる.

One of the most important results from TIR on board Hayabusa2 is that the apparent temperature distribution on the surface of Ryugu changes with the observation direction. This phenomena can be explained as an effect of surface roughness: a rough surface is heterogeneous in terms of solar radiation heating and also heterogeneous in terms of observable area. This means that the orbit and spin rate of the asteroid can be changed by the thermal torque, which is known as Yarkovsky and YORP effects.

We numerically simulate the evolution of the surface temperature distribution of an asteroid with the same orbit, spin axis, and spin rate with Ryugu, and evaluate the effect of the surface roughness on the orbital and spin evolution of Ryugu.

彗星探査計画 Comet Interceptor

○新中善晴¹、船瀬龍²³、亀田真吾⁴、河北秀世¹、笠原慧³、尾崎直哉²、松岡彩子²、 宇佐美尚人³、吉岡和夫³、吉川一郎³、渡部潤一⁵、Geraint Jones⁶、Colin Snodgrass⁷、 Comet Interceptor Team

¹京都産業大学、²ISAS/JAXA、³東京大学、⁴立教大学、⁵国立天文台、⁶UCL (UK)、 ⁷Univ. of Edinburgh

2019 年 6 月 19 日、欧州・日本・米国を中心とする国際研究チームが提案した彗星探 査計画 "Comet Interceptor"が、欧州宇宙機関の新しい F クラス探査計画に選ばれた。 この探査計画では、2028 年にあらかじめ探査機を打ち上げ、力学的に安定な L2 ラグ ランジュ点に待機させる(最大 2~3年)。その後、観測対象となる天体が現れると、 その天体へ移動しフライバイ探査を行う予定である。従来の彗星の探査計画では、何度 も太陽の周りを回っていることで軌道が正確に決まっている彗星が探査対象だったのに 対し、この計画では、力学的に新しい彗星(Dynamically new comets; DNC)あるい は 2017 年に太陽へ接近した恒星間天体「オウムアムア」のような太陽系に一度しか接 近することのない希少な天体を観測対象としている。これらの天体は、原始太陽系円盤 で形成した後、太陽熱輻射の影響をほとんど受けずに過ごしてきた始原的な天体と考え られており、多くの太陽系の過去の情報を保持していると考えられている。本発表では、 Comet Interceptor 計画の概要や計画中のサイエンスについて紹介する。



土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の反発及び付着に関する実験的研究

神戸大学大学院理学研究科 〇豊田優佳里 保井みなみ 荒川政彦

はじめに:土星のリングは、サイズ数mまでの水氷の粒子で構成されており、その粒子は数cm/s以下 の速度で互いに衝突している。その相互衝突の結果、リング粒子は凝集・反発・破壊を起こし、土星 リングの力学的進化やその構造に影響を及ぼしている。また、土星リングが非常に薄い円盤状(厚さ 100-200m以下)を保っているのは、土星リングを構成する水氷粒子が非弾性衝突を起こし、その結 果、エネルギーを効果的に散逸しているためと考えられている。そのため、土星リングの起源や進化 過程を明らかにするためには、リング粒子の衝突特性を調べる必要がある。特に、非弾性衝突を特徴 付ける反発係数に対するリング粒子の構造や衝突速度依存性が重要となる。

これまでの地上望遠鏡や惑星探査などの観測から、土星リングの粒子構造は、多孔質な氷(雪)で ある可能性が示唆されている。先行研究では、均質な氷と表面が霜に覆われた氷の反発係数(ε)に ついては調べられているが、多孔質氷球(雪球)の反発係数については詳しく調べられていない。そこ で本研究では、土星リング粒子の空隙率に着目し、反発係数と衝突速度の関係に対する空隙率の依存 性及び付着開始速度を調べた。

実験方法:リング粒子の模擬物質には、空隙率を46、52、60%とした多孔質氷球(雪球)を用いた。直 径は3cmとした。この雪球を、表面をなめらかにした氷板、空隙率50%とした雪板に自由落下させ た。その際の落下速度は0.8cm/s~265cm/s である。板は球に比べて十分に大きいものを使用した。反 発係数の測定は二つの方法で行った。一つ目の方法では圧電素子センサーを板に設置し、球が板に衝 突する際に発生する弾性波を測定することで行った(AE法)。球が複数回板に衝突するとその度に弾 性波が発生するので、その弾性波の計測から球の衝突間隔を求めることができる。この時間間隔から 衝突前後の球の速度変化を調べることができる。二つ目の方法ではレーザー変位計を用いて、自由落 下させた球の高さ変化を測定することで行った。この方法でもAE法と同様に衝突の時間間隔から反 発係数を計算した。

実験結果:氷球の反発係数は、反発係数が0.8以上で一定となる準弾性領域と、衝突速度の増加に伴っ て反発係数が低下する非弾性領域の二つに分けられることがわかっている。一方、雪球の反発係数は 氷板・雪板ともに、衝突速度が大きくなるにつれて減少し続け、準弾性領域と非弾性領域の境界は今 回の速度範囲では確認できなかった。また、雪球の反発係数は空隙率が大きくなると全体的に下がる が、衝突速度が小さくなるにつれて収束することが分かった。これは空隙を潰すためにエネルギーが 使用されて反発係数が下がるためであり、強度の小さい空隙率の高い雪球の方がより塑性変形しやす いことが反映していると考えられる。更に、雪球の反発係数は氷板、雪板に衝突させたどちらの場合 においても、同様の振る舞いを示した。このことから、雪の介在する反発係数は雪球の空隙率によっ て支配されるということが分かった。この衝突速度と反発係数の関係は、ε=a*vi^b (a,bは定数)によ って説明できることがわかった。aの値は全ての空隙率において0.9-0.97であったが、bの値は空隙率依 存性がみられた。また、反発係数が0となる付着の開始速度は板によって異なることが分かった。こ れは、板の物性の違いにより、付着の起こりやすさが異なるためだと考えられる。

21P/Giacobini-Zinner 彗星の中間赤外線スペクト ルにおける複雑な有機分子の検出

〇河北 秀世¹、大坪 貴文²、新中善晴¹、本田 充彦³、渡部 潤一⁴
 ¹京都産業大学・神山天文台、²宇宙航空研究開発機構、³岡山理科大、⁴国立天文台

21P/Giacobini-Zinner 彗星は October Draconids(りゆう座流星群)の母天体として知ら れる木星族短周期彗星である。この彗星は、過去の可視・赤外線分光観測等により、揮発 性物質の組成比が非常に特殊であり、可視光分光サーベイの結果では"G-Z type"と呼ば れるサブグループを形成していることが知られている。近赤外線高分散分光によっても、揮 発性の高い有機分子が欠乏していることが明らかになっており、一般的な彗星とは一線を 画する。しかも、可視光偏光観測によれば、21P/Giacobini-Zinner 彗星のダストの直線偏 光度は波長が長くなるに従って低下するという、通常の彗星ダストとは逆の傾向を示してい る。Kiselev et al. (2000)は、こうした直線偏光度が複雑な有機物質の存在によって説明でき ると主張した。近赤外線で検出される有機分子は比較的単純なものであり、複雑な有機分 子が豊富であることとは矛盾はしない。そこでわれわれは、Subaru 望遠鏡に取り付けた COMICS を用いて、中間赤外線波長域における測光・分光観測を実施した。具体的には、 Nバンドおよび Q バンドによける複数波長(8.8、12.4、18.8 µm)での測光観測および N バ ンド低分散分光観測(波長分解能 R~250)を実施している。その結果、N バンドスペクトル に、彗星において通常見られる幅広なシリケイト 10μm ピークに加え、複数のサブピークを 検出している。彗星の中間赤外線スペクトルには、通常、結晶質シリケイトによるサブピー クが見られることがあるが、今回観測されたサブピークは結晶質シリケイトでは完全には説 明がつかず、PAH(多環芳香族炭化水素)および脂肪族炭化水素に起因する可能性が高 い。こうした複雑な有機分子が、どうして 21P/Giacobini-Zinner 彗星において豊富であった か?については、揮発性の高い分子が少なく、かつ、複雑な有機分子が豊富であることか ら、比較的温度の高い領域で形成された物質を多く含んでいるとわかる。しかし、同彗星の シリケイト鉱物の結晶質/アモルファス比は他の彗星と変わらないことから、原始太陽系円 盤における同彗星の形成領域は、太陽からの距離については他の彗星とあまり違わない と考えられる。この一見矛盾するように見える事実を説明するため、本研究では周惑星系 円盤中での氷小天体の形成を提唱する。

相対論カー・ニューマン解を利用した 太陽系惑星軌道ティティウス・ボーデ法則, 土星リング個数 および ファイン リング径 の導出 大山文孝 元 九州電力(株)火力部

太陽系惑星軌道のティティウス・ボーデ法則は約250年前に発見されたが、現代まで物理的な証明ができないため、これは力学的な必然ではなく偶然だという考え方が主流である。

惑星軌道は運動エネルギーと万有引力エネルギーを考慮したニュートン力学によって算出されること が多い。しかし、このニュートン力学に対してエネルギー的安定であるエネルギー最小原理を適用する と、安定軌道半径は唯一の値となり、多軌道存在の実現象と完全に食い違っている。この要因は惑星軌 道を支配する要素の抽出が不足している為である。

安定軌道を支配するその他のエネルギー要素として、一般相対性理論の厳密解であるカー・ニューマン 解(1965 年発見)から導かれる電荷エネルギーと回転エネルギーがある。

つまり、太陽などの中心核星の質量・電荷・回転要素 *m*, *e*, *a* を取り入れた複雑なエネルギー ε 式に対して、ニュートン力学の手法であるエネルギー最小原理を適用する。これによってティティウス・ボー デ法則や最大 31 個の土星リングやファインリング星が導出できる。

解法フローの概要は次の通りである。(詳細は web 参照)

- 1) 一般相対性理論アインシュタイン方程式の厳密解であるカー・ニューマン解から 時空のエネルギー式を算出する。 $f_1(\rho, \theta, d\rho/dt, d\theta/dt, d\phi/dt, \varepsilon) = 0$
- 2) エネルギー式を θ で偏微分し エネルギー最小の角度を算出すると $\theta=\pi/2$ となる。 以下 $\theta=\pi/2$ の赤道面について計算する。 $f_2(\rho, \pi/2, d\rho/dt, 0, d\varphi/dt, \varepsilon) = 0$
- 3) 変分原理のオイラー・ラグランジュ方程式をカー・ニューマン解に適用し *dφ/dt* を求めて、角運動量相当 *J* を導入する。
 ξ(ρ, *dφ/dt*, *J*) = 0
- 4) 軌道の遠日点距離・近日点距離 Rで 距離増分 dρ=0 であるので、以下 f2 を遠日
 点・近日点について計算する。
 f3(R, π/2, 0, 0, dφ/dt, ε) = 0
- 5) *f₃(R, π/2, 0, 0, dφ/dt, ε) = 0* の *dφ/dt* に ξ(ρ, dφ/dt, J) = 0 を代入し、惑星軌道 半径とエネルギーと角運動量相当の式を算出する。 *f₄(R, π/2, 0, 0, J, ε) = 0*
- 6) 軌道半径はエネルギーと角運動量相当の変数 $R = R(\varepsilon, J)$ なので、数学的テクニ ックとして、 f_4 の軌道半径をエネルギーで偏微分 $\partial R/\partial \varepsilon$ する。 $g(R, J, \varepsilon, \partial R/\partial \varepsilon) = 0$
- 7) f₄(R, π/2, 0, 0, J,ε) = 0 から角運動量相当 Jの式を導き、g(R, J, ε, ∂R/∂ε) = 0 に
 代入して、**解析解を導く**軌道半径とエルギーの重要な微分方程式にする。 h(R, ε, dε/dR) = 0

$$dS/dR = 2e^{2}(e^{2} + 2m^{2})/SR + (4a\delta m + S)/R + 6a\delta mS^{2}/R^{5} \qquad S = R\sqrt{2\varepsilon R^{2} + 2mR + e^{2}}$$

- 8) 軌道半径の微分方程式 hを解くと、積分定数 K が出てくる。(arctan, log, べき乗
 等の関数が出現) H(R, ɛ, K) = 0
- 9) 軌道半径のエネルギー的安定に対してエネルギー最小(極小)原理 dɛ/dR = 0 を 適用し微分方程式の解 Hとhを連立させる。 H(r, ɛmin, K) = 0 h(r, ɛmin, 0) = 0
- 10) 積分定数 *K*は全惑星に共通であることから、基準惑星・基準リングを定めると、 ティティウス・ボーデ法則および土星等のリングが物理的に証明される。 *I(r, K) = 0*

判別式 > 0
$$\xi = \left[1 - \frac{30a\delta m^2 E^4 \pi N_1}{r_1 [2E^4 - 4a^2 m^2]^3 2}\right] \cdot EXP\left[\frac{4am\pi(n-1)}{\sqrt{2E^4 - 4a^2 m^2}}\right] + \frac{30a\delta m^2 E^4 \pi N_1}{r_1 [2E^4 - 4a^2 m^2]^3 2}$$
, (1-0.4) $\cdot 2^{n-1} + 0.4$

判別式 < 0
$$Qr^2 (Pr^2 - Q[F(1 - \lambda)r^2 - 2E^4])^2 - 4a^2m^2P(2Qr^2 + 5P)^2 = 0$$
 $P:[r^{10} \mathcal{O}$ 多項式]

 $Q[r^9 の多項式]$ であるので、 $Qr^2 P^2 r^4$ は $[r^{35} の多項式]$ 。リング数は微小解4個を除いた最大31個

判別式 = 0 つまり *m, e, a が a² ~ e²*
$$\left(1 + \frac{e^2}{2m^2}\right)$$
の場合、ファインリング $r = \frac{9am^2}{2\sqrt{2}(E^2 - \sqrt{2}am)}$ を形成。

リュウグウ・イトカワの起源、小惑星帯の起源---分化は何時・何処で起きたのか?

私が惑星の起源,水星コアリッチの謎,ボーデの法則の謎をアブダクションで解明した。

Origin of Ryugu Itokawa, origin of Asteroid zone---when and where did differentiation occur? I solved the origin of the planet, the mystery of Mercury Core-rich, the mystery of Bode's law by Abduction. 種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2018-10月 人類が月着陸して50年,月の石を手にしても月の起源は謎のままです.地球に住んでいても地球の起源も 謎のままです.リュウグウ・イトカワの石を持ち帰っても、その石が分化したメカニズムも解明せずに、"小惑星は

隕石の母天体"では小惑星帯の起源の解明では無い.太陽系の形成メカニズム(起源)の解明は程遠い.

今までの理論は帰納と演繹から時間を遡る外想という推測であり、創造的推論で一度限りの進化の結果で 検証するという考えがなく、冥王代のミッシングリンクに対して画期的な仮説も無く、理論が進んで無かった.

新理論を支持する探査の必要性があります。理論が先行しないと、探査は闇雲になり、岩石採集に成って しまいます.小惑星帯の起源は「マルチインパクト仮説」で月の起源や地球の起源と同時にアブダクションで 統一的に解明できている.新理論は実証される必要があります.今がチャンスです.

今回は私が惑星の起源,水星コアリッチの謎,ボーデの法則の謎を解明した.この中で,小惑星に行って 理論を実証できる探査を検討すると、その起源を探究する手掛かりは其の特徴(岩石のラブパイル天体)以外 ありません.つまり,金属核や金属が無い事,鉄やニッケルなどのコア物質が欠除している分化したマントルの 集合という事なら実証できます.惑星の始源物質ならコンドライトと惑星の成分が一致しているので,私でも地 球のシミュレーションが簡単にできました.小惑星探査の目的に惑星始原物質の発見を云うのは間違いです.

小惑星の合体でも,始源物質の合体による惑星形成でも,衝突による合体には相対速度が略0km/sでなければ引 カだけで合体出来ない事は実験でも確認できます.何故,実験屋さんは無重カでの衝突合体実験をせずに,高速破壊 実験だけ行っているのでしょうか.太陽系では当然内側軌道を廻る微惑星ほど短周期で衝突頻度も大きく早く合体 成長し易い.更に同一軌道エネルギーを持つ微惑星は同一周期なので,理論上は衝突出来ない.

私の合体理論では,速度差が0km/sとなる可能性は,略同一軌道エネルギーを持つ円軌道と楕円軌道の 微惑星では其の楕円遠点での速度は略一致しているので,速度差がゼロであり合体する確率が高い.それ は,惑星のボーデの法則を比較している時に気づいた事で,合体衝突すると熱エネルギーと成った分だけ運 動エネルギーが減少し質量不変なら軌道エネルギー減少して内側軌道となる.しかも楕円軌道の近点側では 速度が最速となり,禁制帯付近には惑星が形成されると合体衝突出ないので太陽に吸収されてしまう.つまり,砂星位置に は惑星が形成出来ないはずである.逆に云えば,コアリッチの砂星が存在する事自体が矛盾している.これを解明出来た, 「マルチインパクト仮説」^[3]の凄いところでもある.取りあえず,フぃーディングゾーンは,惑星と其の外側の惑星の領域に遠点 を持つ禁制帯より外側に近点をもつ楕円軌道の微原始惑星が其の惑星に合体集積するという説明ができた.

次に,セレス位置に形成された火星サイズの原始惑星CERRAは,合体衝突エネルギーにより分化した惑星となる.

問題は、その外側に合体集積した巨大質量惑星(JUPITER)により、木星近点位置との会合周期毎にCERRAの 軌道から角運動量を奪い、CERRAの軌道を偏平化させて、木星と太陽の引力が釣り合う位置で惑星CERRAを断裂さ せて、シューメーカー・レビ第九彗星の様に、CERRA断裂マントル片が、トレーン断裂片として同一軌道を廻る、此の時、質 量が大きいCERRAコア+残りのマントルは、エネルギー等分配の法則により周速度が減少して内側軌道となり、禁制帯位 置に踏みとどまった、マントル減少分だけコア/マントル比は他の内惑星の約二倍と成った、この計算と、CERRA断裂のメカ ニズムは、ポスター発表時に示す、御討議と御鞭撻をお願い申し上げます。

[3]種子彰月形成仮説(マルチインパクト仮説) Sep.2014 P1-22既本惑星科学会秋季講演会

月の起源・太陽系の起源,理論仮説で検証できるのは

進化の複数の統一的な結果を利用した創造的推論(Abduction)だけである.

Origin of Moon, Origin of Solar System, and Theoretical Hypotheses can only be examined by Creative Reasoning (Abduction) using Multiple Unified Result s of Evolution. 種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2019-10月

帰納法や演繹法では、初期状態を仮定しても再現実験が出来ないので検証が不能である.シミュレーションは一項目だけの結果を現状の結果と確認しているが、進化の複数の結果の全てを統一的に検証できない.

具体的な一例として,ジャイアントインパクト仮説[2]のシミュレーションでは,火星サイズの分化した原 始惑星が地球に偶然と呼ぶほどの特別な角度と速度で衝突したと仮定しても、マントルだけの月が地球半 径Reの約三倍の位置に形成する事がやっとである.しかも衝突体は太陽系のフィーデング・ゾーンも示せず, その态意的な衝突速度と角度で必然衝突も示せていない.,現状の月位置エネルギー(60×Re)までの加速メ カニズムとシミュレーションも出来ていない.更に月の偏芯も常に地球に向く理由も,月の表側だけに月の 海が形成される理由も説明できない. (Re:地球半径≒6400km) [2] 1998 MONTEREY,LIFORNIA

一方、マルチインパクト仮説[3]では、小惑星帯位置に形成された分化した火星サイズの原始惑星CERRA が,其の後に形成された巨大質量惑星(Jupiter)の摂動により,約6億年かけでCERRA軌道が木星近点側に 偏平化して、木星と太陽の引力が一致する地点で潮汐断裂して、複数のトレーンマントル小惑星となり、同一 楕円軌道を一列に巡る. CERRAのコア+残りマントルは、質量が大きいのでエネルギー等分配の法則で、周 速が低下し内側軌道に移動して水星となった.因みに水星のコア/マントル比は,他の地球型惑星の約2倍で ある事も示せて、内惑星の同一成分比の起源も簡単に示せた.当然フィーデング・ゾーンも説明可能であり、 更には地球軌道との交点位置での必然衝突と相対角度36.45度と相対速度12.3km/sが理論仮説から計算で きた. 更には,月の軌道エネルギー(60×Re)も示せて地球マントルとマントル断裂片の衝突で地球コアの変 形も無く,地球マントルの射出による月の偏芯も説明できた,地球マントルの欠損はアイソスタシーによ る平均深度約4kmの深海洋底(表面積の約7割)の起源と環太平洋弧状列島と背弧海盆,弧状海溝の起源も 説明できた. 衝突でマントルに亀裂が形成され, 上部マントルが低粘性化しプレートが移動し易くなり, 海 洋プレートと陸プレートの慣性モーメントのアンバランスと地球自転による偶力で、プレートの移動とト ランスフォーム断層と環太平洋背弧凹海盆の下に海洋性凸プレートが潜り込み始めて、プレートテクトニ クスの起源となった. 巨大マントル断裂片の衝突の反対側には同時刻に衝撃波が伝達し, キンバーライト パイプとダイヤモンド鉱山が形成される.ティチス海を形成した高緯度(ドレイク海峡付近)への衝突は 地軸傾斜の原因と成り、ミルーヌイ鉱山の起源であり、プレート駆動方向の急変の原因と成った.熱対流駆 動力では説明不可能である. 地球マントルは内部程高密度なので、射出されたマントルだけの月は偏芯(約2 km)する. 溶融した地殻付近のマントルで球形に再カバーされても高密度玄武岩は月表面近くに残存し 表側に隕石が衝突すると内部の黒い玄武岩が溶融流出し月の海と兎の紋様を形成した. 偏芯した月は地球 と地球内部の共通重心の周りを巴回転し,重い部分が重心側に配置されて常に地球を向く原因となった.

進化(由一の実験)の複数結果を統一的に説明できる項目が多い程,アブダクションでは真実と云える. 月の起源だけでなく地球<深海洋底の起源,プレートテクトニクスの起源や環太平洋孤状列島と背弧海盆と 孤状海溝は,ティチス海の起源とジャワ島やヒマラヤ孤状山脈とチベット高原の起源,*リオデジャネイロ上 空のバンアレン帯の低下など*>,更には太陽系<小惑星帯の起源や,分化した隕石の起源,更にはラブパイル 地殻天体(イトカワ・リュウグウ分化した岩石の集合)の起源や,,冥王星の起源(最初のフライバイ)や水星コ アリッチの起源>など,約16項目に亘る検証により,進化の結果を利用したアブダクションにより,"マルチ インパクト仮説"[3]は検証できたと云える. [3] 種子彰月形成仮説Sep.2014 P1-22日本惑星科学会