日本惑星科学会

２０２０年秋季講演会プログラム

２０２０年１１月１２日（木）－１４日（土）

オンライン開催

主催：

日本惑星科学会

会津大学宇宙情報科学研究センター

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

株式会社ノビテック

●秋季講演会

日程：２０２０年１１月１２日（木）～１４日（土）

場所：オンライン会場

講演数：口頭発表数１１８件、最優秀発表賞選考１０件、最優秀研究者賞受賞講演１件、ポスター発表４８件

主催者: 惑星科学会，会津大学宇宙情報科学センター*

*会津大学宇宙情報科学研究センター（ARC-Space）は、日本惑星科学会を母体の学協会とし、地球惑星科学およびその関連分野を研究分野とした共同利用・共同研究拠点（月惑星探査アーカイブサイエンス拠点）です。文部科学省より特色ある共同研究拠点の整備の推進事業 JPMXP0619217839 の助成を受けています。日本惑星科学会 2020 年秋季講演会は、日本惑星科学会の定期学術講演会として、また会津大学宇宙情報科学研究センターの事業である研究集会として、共同主催により実施されます。また、会津大学グローバル推進本部国際戦略室より開催に関わる諸費用の助成を受けています。

11/12（木）		**Room A**	**Room B**
8:55-9:00		LOC委員長挨拶	LOC委員長挨拶
AM	9:00-11:45	機器開発・将来計画	衝突現象
PM1	12:30-15:00	最優秀発表者賞選考（オーラル）	
PM2	15:15-16:45	原始惑星系円盤	アーカイブサイエンス
PM3	17:00-18:00	擬似ポスター（フラッシュトーク）	
PM4	18:00-18:45	擬似ポスター（コアタイム：各講演者設定）	
11/13（金）		**Room A**	**Room B**
AM	9:00-11:45	月	小惑星
PM1	12:30-15:00	惑星大気・表層環境	小惑星・アストロバイオロジー
PM2	15:15-16:45	原始惑星系円盤	氷天体
PM3	17:00-18:00	擬似ポスター（フラッシュトーク）	
PM4	18:00-18:45	擬似ポスター（コアタイム：各講演者設定）	
11/14（土）		**Room A**	**Room B**
AM	9:00-11:45	惑星・衛星形成	隕石・彗星
PM1	12:30-13:30	日本惑星科学会総会（特別会場）	
	13:45-15:00	最優秀研究者賞受賞講演	
PM2	15:15-16:45	火星・火星衛星	系外惑星
PM3	17:00-18:00	擬似ポスター（コアタイム：各講演者設定）	
PM4	18:00-18:45	擬似ポスター（コアタイム：各講演者設定）	
19:00～		オンライン懇親会（特別会場）	

●オンライン会場

各会場部屋へのアクセス情報は、それぞれ以下のページに記載しています。いずれも日本惑星科学会へログインが必要です。

Room A／B、日本惑星科学会総会、発表練習部屋：

※接続情報は追ってお知らせします。Zoom 部屋で行う予定です。

オンライン懇親会会場：

※接続情報は追ってお知らせします。Spatialchat 部屋で行う予定です。

擬似ポスター会場：

https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2020/vposter.html

●口頭発表

最優秀発表賞選考及び、一般公演は１５分講演（３分間の質疑時間および交代時間を含む）です。時間厳守でお願いします。発表は LOC が用意する Zoom 部屋で、各発表者に画面を共有していただき、行います。練習用の部屋も前日から用意する予定ですので、ご活用ください。

●擬似ポスター

発表者が共有可能な資料を提示し、オンラインで参加者と議論を行う擬似ポスターセッション形式による発表です。また、短い発表内容紹介（最大２分）を行う、フラッシュトークセッションを初日と２日目に設けています。擬似ポスターの登録・閲覧方法等、詳細につきましては以下のページをご覧ください（ログイン後閲覧可能です）。

https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2020/vposter.html

●プログラム

講演番号（Oral/Poster-Day#-RoomA/B#）、開始時間、表題、講演者を掲載しています。各発表の著者リストは、発表申込受付時の著者リストフォーム入力内容に、追加入力された著者情報が存在する場合はそれを末尾に付け加えたものです。また、所属は筆頭著者のみ表記しています。いずれも申込受付時の入力内容そのままですが、著者名のうち英文表記が適切と判断したものは英文表記内容に置き換えています。

《１１月１２日（木）AM　口頭発表プログラム　Room A》

8:55　　LOC 委員長挨拶

機器開発・将来計画（座長：石橋　高・村上　豪）

O-D1-A1　9:00　　日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み　：ミッション概要
村上 豪（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系），Benkhoff Johannes

O-D1-A2　9:15　　日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み　：後期集積が水星に与える影響
兵頭 龍樹（宇宙航空研究開発機構（JAXA)），玄田 英典，Ramon Brasser

O-D1-A3　9:30　　日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み　：水星形成解明のための理論研究
鎌田 俊一（北海道大学理学研究院），兵頭 龍樹，高橋 太，吉崎 昂，石城 陽太，倉本 圭，村上 豪

O-D1-A4　9:45　　戦略的火星探査計画および国際協働探査 Ice Mapper 計画の検討状況
臼井 寛裕（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所），関華奈子・藤田和央・着陸機による火星環境探査リサーチグループ

O-D1-A5　10:00　　月・火星・小惑星地下探査レーダ試作機を用いた検証実験
熊本 篤志（東北大学大学院理学研究科），宮本 英昭，西堀 俊幸，土屋 史紀，石山 謙

O-D1-A6　10:15　　月の縦孔・地下空洞直接探査（UZUME）
春山 純一（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系），岩田 隆浩，岡田 達明，庄司 大悟，諸田 智克，清水 久芳，内藤 雅之，河野 功，西堀 敏幸，角 有司，安光 亮一郎，石上 玄也，本多 力

O-D1-A7　10:30　　月面の放射線環境と縦孔領域内での防護効果
内藤 雅之（量子科学技術研究開発機構），小平 聡，長谷部 信行，天野 嘉春，春山 純一

O-D1-A8　10:45　　DESTINY+計画の進展とサイエンス
荒井 朋子（千葉工業大学惑星探査研究センター），小林 正規，石橋 高，吉田 二美，木村 宏，平井 隆之，洪 鵬，千秋 博紀，和田 浩二，Srama Ralf, Kruger Harald，今村 裕志，豊田 裕之，西山 和孝，高島 健，佐々木晶，薮田ひかる，石黒正晃，渡部潤一，伊藤孝士，大坪貴文，大塚勝仁，阿部新助，中村智樹，小林詩歩，廣井孝弘，小松睦美，中村メッセンジャー圭子，関口朋彦，木下大輔，浦川聖太郎，橘省吾，三河内岳，諸田智克，野口高明，金田英宏，矢野創，吉川真，岡本尚也，中藤亜衣子，柳沢俊史，黒崎裕久，小松吾郎，山田学，出村裕英，平田成，伊藤元雄，松浦周二

O-D1-A9　11:00　　DESTINY+搭載用小惑星追尾望遠モノクロカメラ（TCAP）およびマルチバンドカメラ（MCAP）の検討状況
石橋 高（千葉工業大学惑星探査研究センター），洪 鵬，岡本 尚也，石丸 貴博，山田 学，奥平 修，荒井 朋子，吉田 二美，尾崎 直哉，佐藤 峻介，亀田 真吾，鍵谷 将人，宮原 剛，太田 方之，高島 健

O-D1-A10　11:15　始原天体サンプルリターンミッションの検討
嶌生 有理（宇宙航空研究開発機構），脇田 茂，浦川 聖太郎，洪 鵬，臼井 文彦，松岡 萌，坂谷 尚哉，田中 智，長谷川 直，黒田 大介

O-D1-A11　11:30　はやぶさ２拡張ミッション：微小で高速自転する小惑星へのランデブーする理学的意義
平林 正稔（Auburn University），三枡 裕也，坂谷 尚哉，渡邊 誠一郎，津田 雄一，佐伯 孝尚，菊地 翔太，神山 徹，吉川 真，田中 智，中澤 暁，藤井 淳，岩田 隆浩，津村 耕司，松浦 周二，嶌生 有理，浦川 聖太郎，石橋 之宏，長谷川 直，石黒 正晃，黒田 大介，奥村 真一郎

《１１月１２日（木）AM　口頭発表プログラム　Room B》

8:55　LOC 委員長挨拶

衝突現象（座長：寺田 健太郎・黒澤 耕介）

O-D1-B1　9:00　「かぐや」が明らかにした地球ー月システムを襲った小惑星シャワー
寺田 健太郎（大阪大学大学院理学研究科），諸田 智克，加藤 麻美

O-D1-B2　9:15　ラブルパイル天体に適用可能なクレータースケール則と衝突励起振動に関する実験的研究
山本 裕也（神戸大学理学研究科），荒川 政彦，保井 みなみ，長谷川 直，横田 優作，大川 初音，杉村 瞭

O-D1-B3　9:30　小惑星の起伏地形上に形成するクレーターに関する実験的研究
横田 優作（神戸大学理学研究科），荒川 政彦，保井 みなみ，山本 裕也，長谷川 直，大川 初音

O-D1-B4　9:45　クレーター形成時のエジェクタ放出過程におけるサイズごとの三次元粒子追跡
大川 初音（神戸大学大学院理学研究科），荒川 政彦，保井 みなみ，長谷川 直，横田 優作，山本 裕也

O-D1-B5　10:00　斜め衝突による高速度岩石エジェクタのサイズ－速度同時計測
野村 啓太（神戸大学理学研究科），中村 昭子，長谷川 直

O-D1-B6　10:15　多孔質氷天体を模擬したクレーター形成実験：衝突残留熱の計測
笹井 遥（神戸大学大学院理学研究科），保井 みなみ，荒川 政彦，白井 慶

O-D1-B7　10:30　低強度標的を用いた高速度衝突破壊実験：衝突破壊強度と引っ張り強度の関係
堀川 和洋（神戸大学大学院理学研究科），荒川 政彦，保井 みなみ

O-D1-B8　10:45　フラッシュX線による衝突破片の速度ー質量分布の計測：粘土を用いた延性標的の衝突破壊実験
長野 巧（神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻），荒川 政彦，保井 みなみ，堀川 和洋

O-D1-B9　11:00　衝突閃光のターゲット物性と発光メカニズムの関係
布施 綾太（日本大学），阿部 新助，柳澤 正久，福原 哲哉，坂谷 尚哉，

長谷川 直

O-D1-B10　11:15　3 次元衝撃回収実験によるコンドライト隕石の衝撃変成度の見直しに向けて
大野 遼（千葉工業大学惑星探査研究センター），黒澤 耕介，新原 隆史，三河内 岳，玄田 英典，鹿山 雅裕，小池 みずほ，富岡 尚敬，佐野 有司，佐竹 渉，松井 孝典

O-D1-B11　11:30　粉体衝突実験における衝突直下点物質の回収
黒澤 耕介（千葉工業大学惑星探査研究センター），大野 遼，佐藤 雅彦，新原 隆史，長谷川 直，佐竹 渉，松井 孝典

《１１月１２日（木）PM1　口頭発表プログラム　Room A》

最優秀発表賞選考（座長：諸田　知克）

O-D1-A12　12:30　原始惑星系円盤における N2H+, N2D+輝線観測データの解析
大和 義英（東京大学大学院理学系研究科天文学専攻），相川 祐理，Cataldi Gianni

O-D1-A13　12:45　原始惑星系円盤 HD 163296 の ALMA 連続波観測によるダストスケールハイトの制限
土井 聖明（国立天文台科学研究部），片岡 章雅

O-D1-A14　13:00　ダスト集合体の物質強度で探る太陽系小天体形成過程
辰馬 未沙子（東京大学，国立天文台），片岡 章雅，田中 秀和，Tristan Guillot

O-D1-A15　13:15　小惑星リュウグウ上の岩塊の形態・分光スペクトル的特徴
湯本 航生（東京大学），巽 瑛理，海老原 樹，諸田 智克，長 勇一郎，木 直史，杉本 知穂，本田 理恵，亀田 真吾，横田 康弘，坂谷 尚哉，神山 徹，澤田 弘崇，早川 雅彦，松岡 萌，　鈴木秀彦，山田学，小川和律，吉岡和夫，杉田精司

O-D1-A16　13:30　LIBS による月隕石の主要元素濃度予測 および月着陸探査を想定した LIBS 装置改良
小倉 暁乃丞（東京大学理学系研究科），湯本 航生，長 勇一郎，新原 隆史，亀田 真吾，杉田 精司

O-D1-A17　13:45　クレーターサイズ頻度分布が語るセレスと月の類似性
豊川 広晴（総合研究大学院大学），春山 純一，平田 直之，岩田 隆浩

O-D1-A18　14:00　タイタンの成層圏超回転へのヘイズ層の影響
墨 幹(東京工業大学大学院地球惑星科学系)，竹広 真一，大淵 済，野村 英子，藤井 友香

O-D1-A19　14:15　短周期 super-Earth の大気散逸に伴う軌道進化
藤田 菜穂（京都大学大学院理学研究科），堀 安範，佐々木 貴教

O-D1-A20　14:30　還元型原始地球大気の流体力学的散逸
吉田 辰哉（北海道大学 大学院理学院），倉本 圭

O-D1-A21　14:45　10 年間の WASP-33b の軌道歳差

渡辺 紀治（総合研究大学院大学天文科学専攻），成田 憲保, Marshall C. Johnson, 福井 暁彦, 日下部 展彦, 川内 紀代恵, John Livingston, Jerome de Leon, 森 万由子, 西海 拓, Enric Palle, Hannu Parviainen, Felipe Murgas, Pilar Montaes-Rodriguez

《１１月１２日（木）PM２　口頭発表プログラム　Room A》

原始惑星系円盤（座長：國友　正信・森　昇志）

O-D1-A22　15:15　ngVLA による原始惑星系円盤観測の展望
百瀬 宗武（茨城大学），伊王野 大介

O-D1-A23　15:30　次世代電波望遠鏡 ngVLA でスノーラインを観る
奥住 聡（東京工業大学），百瀬 宗武, 片岡 章雅

O-D1-A24　15:45　磁気的に降着する原始惑星系円盤におけるスノーラインの移動：地球型惑星の形成過程への示唆
森 昇志（東京大学天文学専攻），奥住 聡, 國友 正信, Bai Xuening

O-D1-A25　16:00　原始惑星系円盤の消失：磁気駆動円盤風と光蒸発の競合
國友 正信（久留米大学），鈴木 建, 犬塚 修一郎

O-D1-A26　16:15　円盤風によって散逸していく原始惑星系円盤における新しいダスト成長メカニズム
瀧 哲朗（国立天文台），桑原 滉, 小林 浩, 鈴木 建

O-D1-A27　16:30　原始惑星系円盤進化の中心星質量への依存性
中野 龍之介（東京大学），鈴木 建, 小久保 英一郎, 荻原 正博

《１１月１２日（木）PM２　口頭発表プログラム　Room B》

アーカイブサイエンス（座長：出村　裕英・平田　成）

O-D1-B12　15:15　月惑星探査アーカイブサイエンスの意義と大学共同利用・共同研究拠点 ARC-Space の取組
出村 裕英（会津大学宇宙情報科学研究センター）

O-D1-B13　15:30　ウェブ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可視化ツール dcwmt の開発
杉山 耕一朗（松江工業高等専門学校情報工学科），松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介

O-D1-B14　15:45　「たんぽぽ計画」捕集実験試料用データベース構築
奥平 恭子（会津大学），三田 肇, 佐々木 聰, 矢野 創, 山岸 明彦, 出村 裕英, 矢口 勇一, 石橋 之宏, 今仁 順也

O-D1-B15　16:00　小天体探査データ解析のための三次元地理情報システムと画素指向画像 DB の開発
平田 成（会津大学宇宙情報科学研究センター，会津大学コンピュータ理工学部），菊地 紘, 出村 裕英, 佐藤 広幸, 松本 晃治, 中里 直人, 河野 郁也, 古舘 拓真

O-D1-B16　16:15　月南極域カラーモザイクの作成
佐藤 広幸（宇宙航空研究開発機構），大竹 真紀子，嵩 由芙子，山本 光生

O-D1-B17　16:30　すばる望遠鏡 HSC データを用いた小惑星検出アプリ COIAS の開発
浦川 聖太郎（日本スペースガード協会）

《１１月１３日（金）AM　口頭発表プログラム　Room A》

月（座長：山本　聡・唐牛　譲）

O-D2-A28　9:00　三次元球殻プログラムによる月内部マントルの対流安定性についての計算実験
荷見 拓生（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻），小河 正基，亀山 正典

O-D2-A29　9:15　月面上のカンラン石と斜長石に富む露頭の共存領域のリモートセンシングによる地質的研究
山本 聡（産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門），大竹 真紀子，唐牛 譲，鹿山 雅裕，長岡 央，石原 吉明，春山 純一

O-D2-A30　9:30　機械学習を用いた新たに形成されたクレータの検出
森川 恵海（東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学部），小野寺 圭祐，山本 光生，田中智

O-D2-A31　9:45　月面のクレータ斜面におけるボルダー崩れの成因の検討：舌状衝上断層での月震と斜面上の少クレータ形成による震動の比較
池田 あやめ（名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻地球惑星物理学講座），熊谷 博之，諸田 智克

O-D2-A32　10:00　「かぐや」スペクトルプロファイラデータによる月極域の水氷探索
大竹 真紀子（会津大学コンピュータ理工学部），田中 智，仲内 悠祐，小野寺 圭祐，長岡 央

O-D2-A33　10:15　月極域探査計画による水資源利用可能性検討
唐牛 譲（宇宙航空研究開発機構国際宇宙探査センター），石原 吉明，野村 麗子，金森 洋史，白石 浩章，大竹 真紀子，水野 浩靖，星野 健，麻生 大

O-D2-A34　10:30　月極域探査 LUPEX に向けた水資源分析計-質量分析部 REIWA-TRITON の開発
齋藤 義文（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所），浅村 和史，横田 勝一郎，笠原 慧，齋藤 直昭，藤原 幸雄，浅川 大樹，西野 真木，柳瀬 菜穂，本 直輝，齋藤義文，浅村和史，横田勝一郎，笠原慧，齋藤直昭，藤原幸雄，浅川大樹，西野真木，柳瀬菜穂，本直輝

O-D2-A35　10:45　月着陸実証計画 SLIM および月氷探査計画 LUPEX における可視近赤外分光観測の戦略
佐伯 和人（大阪大学理学研究科）

O-D2-A36　11:00　月面に露出した深成岩の観測のための、焼結人工岩石の鉱物境界面の分光学的性質の研究

松井 俊樹（大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻），佐伯 和人

O-D2-A37　11:15　月極域氷探査に向けた、粒径と種類が異なる鉱物粉体に付着した氷の近赤外スペクトルによる定量
荒木 亮太郎（大阪大学 理学研究科），佐伯 和人

《１１月１３日（金）AM　口頭発表プログラム　Room B》

小惑星（座長：杉田 精司・金丸 仁明）

O-D2-B18　9:00　はやぶさ２のリュウグウ近傍観測の科学成果
渡邊 誠一郎(名古屋大学)，田中 智，吉川 真，杉田 精司，岡田 達明，北里 宏平，竝木 則行，荒川 政彦，橘 省吾，諸田 智克，杉浦 圭祐，嶌生 有理，平田 成，平田 直之，はやぶさ２ サイエンスチーム

O-D2-B19　9:15　小惑星リュウグウ上の明るい岩塊の高分解能観測
杉田 精司（東京大学大学院　理学系研究科地球惑星科学専攻），杉本 知穂，巽 瑛理，湯本 航生，青木 美波，諸田 智克，本田 理恵，亀田 真吾，長 勇一郎，田 康弘，坂谷 尚哉，神山 徹，澤田 弘崇，早川 雅彦，松岡 萌

O-D2-B20　9:30　「はやぶさ２」タッチダウン運用で得られた Ryugu 表面の詳細な熱物性構造
田中 智（宇宙航空研究開発機構），菊池 翔太，白井 慶，坂谷 尚哉，嶌生 有理，岡田 達明，福原 哲哉，千秋 博紀，荒井 武彦，神山 徹，出村 裕英，関口 朋彦

O-D2-B21　9:45　小惑星リュウグウ上の高空隙率で始原的な岩塊
坂谷 尚哉(立教大学理学部 物理学科)，田中 智，岡田 達明，福原 哲哉，Riu Lucie，杉田 精司，本田 理恵，諸田 智克，横田 康弘，巽 瑛理，湯本 航生，平田 成，三浦 昭，神山 徹，千秋 博紀，　嶌生 有理，荒井 武彦，滝田 隼，出村 裕英，関口 朋彦，Thomas Mueller, Axel Hagermann, Jens Biele, Matthias Grott, Maximilian Hamm, Marco Delbo, Wladimir Neumann

O-D2-B22　10:00　小惑星探査機はやぶさ２の低高度運用で観測された小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度変化分布解析
大杉 歩(東京大学理学系研究科化学専攻)，坂谷 直哉，嶌生 有理，千秋 博紀，荒井 武彦，出村 裕英，田中 智，福原 哲哉，岡田 達明

O-D2-B23　10:15　小惑星エロス、イトカワ、リュウグウのボルダーサイズ分布、形状分布の比較～重力場とボルダーの移動
道上 達広（近畿大学 工学部），Hagermann Axel

O-D2-B24　10:30　小惑星リュウグウにおける岩の分布と方位角の調査：表面進化への示唆
海老原 樹(東京大学)，湯本 航生，杉田 精司，本田 理恵，亀田 真吾，巽 瑛理，長 勇一郎，吉岡 和夫，澤田 弘崇，横田 康弘，坂谷 尚哉，早川 雅彦，松岡 萌，山田 学，神山 徹，　鈴木秀彦，本田親寿，小川和律，道上達広，諸田智克

O-D2-B25　10:45　小惑星の赤道リッジ形成へのエジェクタ堆積物の寄与
池谷 蓮（神戸大学理学研究科惑星学専攻），平田 直之

O-D2-B26　11:00　歪な天体表面上で生じたイジェクタの再衝突地点
菊地 紘（宇宙航空研究開発機構）

O-D2-B27　11:15　小惑星リュウグウ表面のボルダー上に観測された小クレーターの統計
高井 雄大(東京大学), 諸田 智克, 杉田 精司, 湯本 航生, 本田 理恵, 亀田 真吾, 巽 瑛理, 長 勇一郎, 吉岡 和夫, 澤田 弘崇, 横田 康弘, 坂谷 尚哉, 早川 雅彦, 松岡 萌, 山田 学, 神山 徹, 鈴木 秀彦, 小川 和律

O-D2-B28　11:30　小惑星 Ryugu に働く YORP 効果と自転進化史
金丸 仁明（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所）, 佐々木 晶, 諸田 智克, 長 勇一郎, 巽 瑛理, 平田 成, 千秋 博紀, 嶌生 有理, 坂谷 尚哉, 田中 智, 平林 正俊, 岡田 達明, 臼井 寛裕, 杉田 精司, 渡邊 誠一郎

《１１月１３日（金）PM１　口頭発表プログラム　Room A》

惑星大気・表層環境（座長：黒崎　健二・野津　翔太）

O-D2-A38　12:30　陸惑星におけるハビタブルゾーン
小玉 貴則（ボルドー大学）, 玄田 英典, 阿部 彩子

O-D2-A39　12:45　詳細な円盤化学進化計算を初期条件としたホットジュピター大気の平衡化学構造
野津 翔太（理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室）, 野村 英子, Christian Eistrup, Catherine Walsh

O-D2-A40　13:00　初期火星の高 EUV 放射下における酸素大気の形成可能性
小山 俊吾(東北大学), 寺田 直樹, 寺田 香織, 中川 広務, 黒田 剛史, 小河 正基

O-D2-A41　13:15　天体衝突に伴う水素大気散逸率における惑星大気量依存性
黒崎 健二（名古屋大学）, 犬塚 修一郎

O-D2-A42　13:30　初期金星における大気散逸と元素分配
櫻庭 遥（東京工業大学 地球惑星科学系）, 黒川 宏之

O-D2-A43　13:45　一酸化炭素に富んだ大気を持つ地球型惑星の表層環境
青木 紘介（東京工業大学）, 黒川 宏之, 藤井 友香

O-D2-A44　14:00　全球非静力学火星大気大循環モデルによる鉛直対流とダスト巻き上げ輸送の計算
樫村 博基(神戸大学), 八代 尚, 西澤 誠也, 富田 浩文, 小郷原 一智, 黒田 剛史, 中島 健介, 石渡 正樹, 高橋 芳幸, 林 祥介

O-D2-A45　14:15　星雲ガス中で集積する岩石惑星の希ガス同位体比
齊藤 大晶（北海道大学理学研究院）, 馬上 謙一, 山本 順司, 倉本 圭

O-D2-A46　14:30　月の起源仮説で何が説明できるのか? Multi-Impact Hypothesis, Giant Impact Hypothesis で何が示せたのか? Nature と何が一致出来たのか? 出来なかったのか?

種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ．銀河系・惑星・地球月起源研究室）

《１１月１３日（金）PM１　口頭発表プログラム　Room B》

小惑星・アストロバイオロジー（座長：荒川 政彦・黒川 宏之）

O-D2-B29　12:30　衝突残留熱と小惑星母天体の熱変成過程に関する実験的研究
保井 みなみ（神戸大学大学院理学研究科），田澤 拓，橋本 涼平，荒川 政彦，小川 和律

O-D2-B30　12:45　Jbilet Winselwan 炭素質 CM2 コンドライト中の酸不溶性有機物の元素・同位体・化学構造分析による母天体熱変成の評価
上出 奏海（広島大学），重中 美歩，池原 実，川上 紳一，薮田 ひかる

O-D2-B31　13:00　分子雲中での高分子態アミノ酸前駆体の生成とその宇宙安定性の検証
小林 憲正（横浜国立大学），倉本 想士，佐藤 智仁，横尾 拓哉，癸生川 陽子，三田 肇，中川 和道，吉田 聡，福田 一志，小栗 慶之，柴田 裕実，矢野 創，山岸 明彦，左近 樹

O-D2-B32　13:15　C 型小惑星の起源と炭素質コンドライト隕石との繋がり：水岩石反応と赤外スペクトルモデルからの示唆
黒川 宏之（東京工業大学地球生命研究所），渋谷 岳造，関根 康人，Ehlmann Bethany L.，臼井 文彦，菊池 早希子，依田 優大

O-D2-B33　13:30　原始惑星系円盤におけるダストの紫外線被曝と有機物形成： 乱流混合とアグリゲイト衝突破壊の重要性
本間 和明（東京工業大学 理学院 地球惑星科学系），奥住 聡

O-D2-B34　13:45　木曽広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen を用いた微小地球接近小惑星の探索
紅山 仁（東京大学天文学教育研究センター），酒向 重行，大澤 亮，諸隈 智貴，瀧田 怜，小林 尚人，奥村 真一郎，浦川 聖太郎，吉川 真，柳沢 俊史，黒崎 裕久，吉田 二美，佐藤 英貴

O-D2-B35　14:00　赤外線カメラデータを用いた局所地形モデルの作成と小惑星「リュウグウ」の熱慣性評価
伊藤 瑞生（東京大学），田中 智，坂谷 尚哉，千秋 博紀

O-D2-B36　14:15　はやぶさ 2SCI による人工クレーター形成に伴う小惑星リュウグウの再表面化過程
本田 理恵（高知大学），荒川 政彦，横田 康弘，嶌生 有理，白井 慶，門野 敏彦，和田 浩二，小川 和律，石橋 高，坂谷 尚哉，中澤 暁，保井 みなみ，諸田 智克，亀田 真吾，巽 瑛理， 山田 学，神山 徹，長勇一郎，松岡 萌，鈴木 秀彦，本田 親寿，早川 雅彦，吉岡 和夫，澤田 弘崇，杉田 精司，平田 成，平田直之

O-D2-B37　14:30　遠心力による砂山の形状変化および流動特性
入江 輝紀（名古屋大学大学院環境学研究科），山口 隆正，渡邊 誠一郎，桂木 洋光

O-D2-B38　14:45　行列表示を用いた有機物反応のモンテカルロ計算：星間粒子を模擬し

た糖合成実験の再現に向けて
竹原 仁（東京工業大学　理学院地球惑星科学系），庄司 大悟，井田 茂

《１１月１３日（土）PM２　口頭発表プログラム　Room A》

原始惑星系円盤（座長：冨永 遼佑・田中　佑希）

O-D2-A47　15:15　ダスト衝突成長過程が駆動する原始惑星系円盤の不安定性
冨永 遼佑（名古屋大学理学研究科），犬塚 修一郎，小林 浩

O-D2-A48　15:30　原始惑星系円盤における鉛直シア不安定性とダストの共進化
福原 優弥（東京工業大学），奥住 聡，小野 智弘

O-D2-A49　15:45　移動する惑星に追随するガス圧バンプにおける 微惑星形成
芝池 諭人（ベルン大学），Yann Alibert

O-D2-A50　16:00　超木星質量の巨大ガス惑星による原始惑星系円盤へのギャップ形成
田中 佑希（東北大学理学研究科），金川 和弘，谷川 享行，田中 秀和

O-D2-A51　16:15　すばる望遠鏡を用いた原始惑星系円盤 HD34700 の観測
鵜山 太智（カリフォルニア工科大学），Thayne Currie，Christiaens Valentin, Bae Jaehan，武藤 恭之，田村 元秀

O-D2-A52　16:30　高分解能多波長画像解析による TWHya の原始惑星系円盤のスペクトルインデックス動径分布の調査
塚越 崇(国立天文台)，武藤 恭之，野村 英子，川邊 良平，金川 和弘，奥住 聡，井田 茂，高橋 実道，橋本 淳，鵜山 太智，田村 元秀，Catherine Walsh, Tom J. Millar

《１１月１３日（金）PM２　口頭発表プログラム　Room B》

氷天体（座長；木村　淳・豊田　優佳里）

O-D2-B39　15:15　土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の非弾性衝突メカニズムに関する実験的研究
豊田 優佳里（神戸大学理学研究科），荒川 政彦，保井 みなみ

O-D2-B40　15:30　階層粉体の伝熱過程に基づく彗星表層の熱慣性の解釈
荒川 創太（国立天文台科学研究部），大野 和正

O-D2-B41　15:45　衛星の内部海のシミュレーションのための SPH 法のコード開発
村嶋 慶哉（京都大学大学院理学研究科　宇宙物理学教室），細野 七月，斎藤 貴之，佐々木 貴教

O-D2-B42　16:00　海王星衛星 Triton の窒素噴出現象における内部熱構造の寄与
今井田 奈波（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻佐々木研究室），木村 淳

O-D2-B43　16:15　木星衛星カリストの不完全な内部分化と地下海の維持を説明する長期進化モデル
松岡 夏季（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻佐々木研究

室），木村 淳

O-D2-B44　16:30　木星衛星エウロパに地下海が存在し金属核起源磁場が存在しないための内部構造条件
木村 淳（大阪大学）

《１１月１４日（土）AM　口頭発表プログラム　Room A》

惑星・衛星形成（座長：植田 高啓・小林 浩）

O-D3-A53　9:00　デッドゾーン内側境界での微惑星形成：太陽系地球型惑星形成への示唆
植田 高啓（国立天文台），奥住 聡, 荻原 正博, 小久保 英一郎

O-D3-A54　9:15　ダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成
高橋 実道（国立天文台科学研究部），小久保 英一郎

O-D3-A55　9:30　低質量周りのペブル集積を考慮した共鳴惑星系の形成
松本 侑士（中央研究院天文及天文物理研究所）， Yu-Chia Lin, Pin-Gao Gu

O-D3-A56　9:45　原始惑星系円盤内のダストリングの局所数値シミュレーション
関谷 実（九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門）

O-D3-A57　10:00　原始惑星重力による摂動を受けた原始惑星系円盤ガスの流れと小天体の集積率についての理論的研究
岡村 達弥（名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻理論宇宙物理学研究室），小林 浩

O-D3-A58　10:15　進化する円盤中での岩石惑星及びガス惑星の形成
荻原 正博（国立天文台），堀 安範, 國友 正信, 黒崎 健二

O-D3-A59　10:30　ダストから惑星まで直接合体成長を取り扱う統一シミュレーション
小林 浩（名古屋大学大学院理学研究科），田中 秀和

O-D3-A60　10:45　N 体計算コード GPLUM の開発: 惑星形成の展望
石城 陽太（東京大学, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所），兵頭 龍樹, 藤本 正樹, 牧野 淳一郎

O-D3-A61　11:00　散逸中の周惑星円盤における衛星系の形成について
藤井 悠里（名古屋大学高等研究院/理学研究科素粒子宇宙物理学専攻理論宇宙物理学研究室），荻原 正博

O-D3-A62　11:15　N 体計算を用いた巨大天体衝突に伴う衛星系形成のパラメータスタディ
長谷川 祐一（京都大学大学院理学研究科），細野 七月, 佐々木 貴教

O-D3-A63　11:30　衛星前駆天体の捕獲とその周火星領域での集積による火星衛星形成シナリオ
松岡 亮（北海道大学理学院宇宙理学専攻），倉本 圭

《１１月１４日（土）AM　口頭発表プログラム　Room B》

隕石・彗星・流星（座長：古川 善博・樋口 有理可）

O-D3-B45 9:00 形成過程から明らかにする長周期彗星分布の非等方性
樋口 有理可（産業医科大学）

O-D3-B46 9:15 地球に接近したパンスターズ彗星(P/2016 BA14)の彗星核の中間赤外線観測
大坪 貴文（国立天文台天文データセンター），河北 秀世，新中 善晴

O-D3-B47 9:30 レゴリス粒子の固着力：粒子の形状と塑性変形の効果
長足 友哉（神戸大学理学研究科），中村 昭子，青木 隆修

O-D3-B48 10:00 放出物カーテン内での粒子のクラスター形成：解析モデルと室内実験・数値計算との比較
中澤 風音（東京工業大学 地球惑星科学系），奥住 聡，黒澤 耕介，長谷川 直

O-D3-B59 10:15 石鉄隕石メソシデライトの形成シナリオ解明に向けたベスタへの巨大衝突の数値計算
杉浦 圭祐（東京工業大学 地球生命研究所），羽場 麻希子，玄田 英典

O-D3-B50 10:30 火星隕石 ALH 84001 の炭酸塩中の硫黄化学種解析に基づく初期火星表層環境の推定
梶谷 伊織（JAXA 宇宙科学研究所），中田 亮一，小池 みずほ，田辺 学，臼井 寛裕，松浦 史宏，福士 圭介，黒川 宏之，横山 哲也

O-D3-B51 10:45 隕石有機物の主要生成反応：炭素同位体組成からの制約
古川 善博（東北大学理学研究科 地学専攻），岩佐 義也，力石 嘉人

O-D3-B52 11:00 分光観測と数値シミュレーションによる 2017-2018 年ふたご座流星群 Na 変動量の調査
小川 巧覧（日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻），阿部 新助，新垣 志麻，宇田 天音，前田 幸治，荒井 朋子

O-D3-B53 11:15 東京大学木曽観測所広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen と京都大学生存圏研究所 MU レーダーを用いた微光流星の同時観測
森田 晃平（日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻），阿部 新助，大澤 亮，藤原 康徳，中村 卓司，西村 耕司，酒向 重行，渡部 潤一，Johan Kero，Daniel Kastinen

O-D3-B54 11:30 炭素含有鉱物による天体のシステム環境（流体・生命）研究
三浦 保範（山口大学海外の大学）

《１１月１４日（土）１２：３０－１３：３０ 特別会場》

日本惑星科学会総会

《１１月１４日（土）１３：４５－１５：００ Room A》

最優秀研究者賞受賞講演（座長：はしもと じょーじ）

O-D3-A70　13:45　分子雲から原始惑星系円盤に至るまでの化学組成進化
古家 健次（国立天文台科学研究部）

《１１月１４日（土）PM２　口頭発表プログラム　Room A》

火星・火星衛星（座長：倉本 圭・長 勇一郎）

O-D3-A64　15:15　火星内部進化の数値モデル
小河 正基（東京大学教養学部宇宙地球科学科）

O-D3-A65　15:30　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（東北大学大学院理学研究科），笠羽 康正，野口 里奈，熊本 篤志，石山 謙，臼井 寛裕，土屋 史紀，植村 千尋，木村 智樹

O-D3-A66　15:45　火星衛星探査計画 MMX の進捗 2020
倉本 圭（北海道大学），川勝康弘，藤本正樹，Maria Antonella Barucci，David J. Lawrence，玄田英典，平田 成，今村 剛，亀田真吾，小林正規，草野広樹，松本晃治，Patrick Michel，宮本英昭，中川広務，中村智樹，小川和律，大嶽久志，尾崎正伸，Sara Russel，佐々木 晶，澤田弘崇，千秋博紀，寺田直樹，Stephan Ulamec，臼井寛裕，和田浩二，横田勝一郎

O-D3-A67　16:00　MMX/MEGANE の元素組成データを用いた Phobos の起源の制約について
平田 佳織（東京大学），臼井 寛裕，兵頭 龍樹，玄田 英典

O-D3-A68　16:15　MMX ローバ搭載用ラマン分光計 RAX のエンジニアリングモデル開発状況
長 勇一郎（東京大学地球惑星科学専攻），亀田 真吾，臼井 寛裕，Boettger Ute，湯本 航生，小倉 暁乃丞，Ryan Conor，Buder Maximillian，Hagelschuer Till，Routley Selene，Dietz Enrico，Kopp Emanuel，Moral Andoni，Rull Fernando

O-D3-A69　16:30　モンテカルロシミュレーションによるフォボス表面のメートルスケール以下の起伏の予測
竹村 知洋（東京大学工学系研究科システム創成学専攻），逸見 良道，宮本 英昭

《１１月１４日（土）PM２　口頭発表プログラム　Room B》

系外惑星（座長；堀 安範・川島 由依）

O-D3-B55　15:15　すばる/IRD を用いた赤外ドップラー法による M 型星周りの系外惑星サーベイ
大宮 正士（アストロバイオロジーセンター）,佐藤文衛，田村元秀，小谷隆行，葛原昌幸，平野照幸，原川紘季，工藤智幸，日下部展彦，宝田拓也，高橋葵，笠木結，IRD-SSP チーム

O-D3-B56　15:30　中間赤外高分散分光による系外地球型惑星の大気組成の検出可能性
藤井 友香（国立天文台），松尾 太郎

O-D3-B57　15:45　低温度星周りの水惑星が持つ炭素循環の観測的制約：高層酸素大気による紫外線トランジット透過率の理論的検討

中山 陽史（東京大学）, 生駒 大洋, 亀田 真吾

O-D3-B58　16:00　系外惑星大気における非平衡化学の影響
川島 由依（オランダ宇宙研究所）, Michiel Min

O-D3-B59　16:15　磁場から探る系外巨大惑星の内部組成
堀 安範（自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター）

《擬似ポスター発表》

フラッシュトーク

Room A　１１月１２日（木）１７：００～　（座長：嵩　由芙子）

P-D1-A1　オールト雲起源新彗星の力学進化： 新彗星の最小近点距離分布
伊藤 孝士（大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台天文シミュレーションプロジェクト），樋口 有理可

P-D1-A2　MMX 搭載用イオンエネルギー質量分析器の性能評価
出口 雅樹（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻寺田研究室），横田 勝一郎，寺田 直樹，齋藤 義文，浅村 和史，笠原 慧，松岡 彩子

P-D1-A3　小惑星リュウグウ形状モデリングの現状
平田 成（会津大学コンピュータ理工学部），平田 直之，野口 里奈，嶌生 有理，杉田 精司，松本 晃治，千秋 博紀，山本 幸生，村上 真也，石原 吉明，津田 雄一，渡邊 誠一郎, Robert Gaskell, Eric Palmer

P-D1-A4　火星ポリゴンにおける、亀裂方向の定量化とアナログ実験
植村 千尋（総合研究大学院大学），中原 明生，岩田 隆浩，松尾 洋介，庄司 大悟，野口 里奈，臼井 寛裕

P-D1-A5　FDTD 法に基づいた小惑星内部探査の基礎研究
石山 謙（鶴岡工業高等専門学校創造工学科電気・電子コース），熊本 篤志

P-D1-A6　原始惑星系円盤内に埋没した原始惑星周りの 3 次元ガス流構造：その形態とペブル降着への影響
桑原 歩（東京工業大学理学院地球惑星科学系，地球生命研究所），黒川 広之

P-D1-A7　コンドリュール・リム形成時のダスト形態のモノマーサイズ依存性
金子 寛明（東京工業大学），荒川 創太，中本 泰史

P-D1-A8　リュウグウの宇宙風化から見た B 型小惑星と C 型小惑星の関連
巽 瑛理（カナリア天文物理学研究所，東京大学），坂谷 尚哉，杉田 精司，本田 理恵，諸田 智克，松岡 萌，亀田 真吾，長 勇一郎，吉岡 和夫，澤田 弘崇，横田 康弘，早川 雅彦，山田 学，神山 徹，鈴木 秀彦，本田親寿，小川和律

P-D1-A9　鉄コンクリーションから推測する地下水組成
城野 信一（名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻），柴田 拓真，吉田 英一，勝田 長貴

P-D1-A10　熱赤外カメラを用いた多孔質標的の衝突加熱に関する実験的研究
嶌生 有理（宇宙航空研究開発機構），長谷川 直，福原 哲哉

P-D1-A11　フォボスシミュラント（UTPS-TB）標的の衝突破壊実験
塩本 純平（神戸大学理学部），中村 昭子，長谷川 直，宮本 英昭，新原 隆史

P-D1-A12　太陽放射力の下での火星周辺の小さな塵の進化
Liang Yuying（宇宙科学研究所太陽系科学研究系），兵頭 龍樹

P-D1-A13 DESTINY+による小惑星フライバイ探査を模擬した地上撮像試験
洪 鵬(千葉工業大学惑星探査研究センター), 石橋 高, 岡本 尚也, 奥平 修, 山田 学

P-D1-A14 将来の惑星探査に向けた高エネルギー電子観測器の ASIC 技術による小型化
菅生 真 (東京大学), 笠原 慧, 池田 博一, 小嶋 浩嗣, 菊川 素如, 頭師 孝拓

P-D1-A15 月極域探査の質量分析に資するタンデム型イオン源の開発
柳瀬 菜穂(東京大学), 笠原 慧, 齋藤 義文, 横田 勝一郎, 平原 聖文, 川島 桜也

P-D1-A16 太陽系探査を目指した Orbitrap 型質量分析器の開発
川島 桜也 (東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻), 笠原 慧, 齋藤 義文, 横田 勝一郎, 平原 聖文, 杉田 精司

P-D1-A17 N 体計算を用いた近地球型小惑星の惑星による掩蔽の探索
櫻井 祥 (会津大学), 北里 宏平

P-D1-A18 簡易的な落下装置を用いた高速度クレーター形成実験：クレーターサイズの重力依存性
木内 真人 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所), 岡本 尚也, 長足 友哉, 長谷川 直, 中村 昭子

P-D1-A19 DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上較正計画 2020
平井 隆之 (千葉工業大学惑星探査研究センター), 小林 正規, 荒井 朋子, 木村 宏, 薮田 ひかる, 天野 翠, 小林 幸雄, 伊藤 元雄, 佐々木 晶, 矢野 創, Trieloff Mario, Hillier Jon, Khawaja Nozair, Eckart Lisa, Simolka Jonas, Harald Krueger, Ralf Srama

P-D1-A20 MMX 搭載赤外線分光計 MIRS の観測計画と開発状況
岩田 隆浩 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所), 中川 広務, 中村 智樹, Antonietta Barucci Maria, Reess Jean-Michel, Bernardi Pernelle, Doressoundiram Alain, Fornasier Sonia, Le Du Michel, Sawyer Eric

P-D1-A21 (162173) リュウグウ上の岩塊の割れ目の方向の分布と熱疲労効果
佐々木 晶 (大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻), 神田 志穂, 菊地 紘, 道上 達広, 諸田 智克, 本田 親寿, 宮本 英昭, 逸見 良道, 杉田 精司, 巽 瑛理, 渡邊 誠一郎, 竝木 則行, 平林 正稔, 平田 成, 中村 智樹, 野口高明, 廣井孝弘, 松本晃治, 野田寛大, 坂谷尚哉, 亀田真吾, 神山徹, 鈴木秀彦, 山田学, 本田理恵, 長勇一郎, 吉岡和夫, 早川雅彦, 松岡萌, 金丸仁明, 澤田弘崇, 横田康弘, 吉川真

P-D1-A22 月の溶岩洞探査用ローバー
梁 晨 (足利大学工学部システム情報分野荒井研究室)

P-D1-A23 中心核星と逆回転方向 太陽系外惑星の存在
犬山 文孝 (九電産業株式会社環境部)

P-D1-A24 ダークマターの宇宙年齢 約 1 億年を特殊相対論, 3 元時空 等によって推算
犬山 文孝 (九電産業株式会社環境部)

フラッシュトーク

Room A　１１月１３日（金）１７：００～（座長：嵩　由芙子）

P-D2-A25　「はやぶさ２」搭載分離カメラ DCAM3 により SCI 衝突実験時に観測された放出ボルダ
石橋 高(千葉工業大学), 白井 慶, 和田 浩二, 小川 和律, 坂谷 尚哉, 嶌生 有理, 横田 康弘, 本田 理恵, 門野 敏彦, 荒川 政彦

P-D2-A26　DCAM3D 画像を用いた小惑星 Ryugu の形状モデル
白井 慶 (神戸大学大学院理学研究科), 石橋 高, 小川 和律, 澤田 弘崇, 荒川 政彦, 門野 敏彦, 和田 浩二, 本田 理恵, 坂谷 尚哉, 嶌生 有理

P-D2-A27　すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam で検出された微小メインベルト小惑星のサイズ分布測定
前田 夏穂 (神戸大学), 寺居 剛, 大槻 圭史, 吉田 二美, 石原 昂将, 出山 拓門

P-D2-A28　超木星質量の惑星周囲における巨大衛星の形成可能性
山中 陽裕 (京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻宇宙物理学教室), 佐々木 貴教, 芝池 諭人

P-D2-A29　高 EUV 放射下における初期火星の膨張大気を考慮したフォボスの軌道進化計算
藤田 晃平 (東北大学理学研究科), 寺田 直樹, 堺 正太朗, 寺田 香織

P-D2-A30　弾丸形状が重力支配域クレータ形状に与える影響
嶌生 有理 (宇宙航空研究開発機構), 黒澤 耕介

P-D2-A31　機械学習による月地形の自動抽出
嵩 由芙子 (会津大学宇宙情報科学研究センター), 本田 親寿, 出村 裕英

P-D2-A32　小惑星探査機はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR のデータアーカイブ
荒井 武彦 (足利大学工学部創生工学科システム情報分野), 荒井 武彦, 岡田 達明, 田中 智, 福原 哲哉, 出村 裕英, 坂谷 尚哉, 嶌生 有理, 千秋 博紀, 神山 徹, 関口 朋彦

P-D2-A33　米欧火星探査機群観測データによる新大気リトリーバル技術の検証(2) ～欧 ExoMars Trace Gas Orbiter および 日 MMX への応用展開準備～
中川 広務 (東北大学理学研究科), 笠羽 康正, 青木 翔平, Mahiaux Arnaud, 小暮 李成, 岩渕 弘信, 出村 裕英

P-D2-A34　Comet Interceptor ミッション：WG から ISAS 所内検討チームに移行
笠原 慧 (東京大学), 吉岡 和夫, 坂谷 尚哉, 亀田 真吾, 松岡 彩子, 村田 直史, 船瀬 龍, 中島 晋太郎, 尾崎 直哉, 宇佐美 尚人, 河北 秀世, 新中 善晴

P-D2-A35　SCI クレーター周辺のブライトボルダーのスペクトル解析
青木 美波 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻杉田研究

室），杉本 知穂，湯本 航生，巽 瑛理，諸田 智克，横田 康弘，荒川 政彦，杉田 精司，ONC チーム

P-D2-A36 DESTINY+搭載カメラ TCAP と MCAP の機上校正計画
岡本 尚也（宇宙航空研究開発機構），石橋 高，山田 学，洪 鵬，吉田 二美，荒井 朋子，石丸 貴博，高島 健

P-D2-A37 火星表面探査に向けた生命兆候探査顕微鏡のブレッドボードモデル開発
吉村 義隆（玉川大学），山岸 明彦，宮川 厚夫，今井 栄一，佐々木 聰，塩谷 圭吾，三田 肇，小林 憲正，癸生川 陽子，佐藤 直人，佐藤 毅彦，薮田 ひかる，長沼 毅，藤田 和央，臼井 寛裕

P-D2-A38 21P/Giacobini-Zinner 彗星の形成環境
新中 善晴（京都産業大学），河北 秀世，大坪 貴文，田実 晃人

P-D2-A39 (3200)Phaethon の可視スペクトルとその自転位相への依存性
大塚 勝仁（東京流星観測網），伊藤 孝士，木下 大輔，阿部 新助，澤井 恭助，船橋 和博，加藤 遼，宮坂 正大，長谷川 直，中村 智樹，陳 文屏

P-D2-A40 月の縦孔下に想定される溶岩チューブの 探査項目とその探査精度
本多 力（NPO 法人火山洞窟学会），春山 純一

P-D2-A41 Hera 搭載熱赤外カメラ TIRI の開発
岡田 達明（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所，東京大学），福原 哲哉，田中 智，千秋 博紀，坂谷 尚哉，嶌生 有理，荒井 武彦，神山 徹，出村 裕英，関口 朋彦，Hera TIRI チーム

P-D2-A42 周白色矮星円盤モデルの構築: 光球面への重元素供給メカニズムの解明に向けて
奥谷 彩香（東京工業大学理学院 地球惑星科学系），井田 茂，兵頭 龍樹

P-D2-A43 Abducton with Evolution 理論で仮説は検証できるか？ 起源を探究する方法を提案した.
種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ. 銀河系・惑星・地球月起源研究室）

P-D2-A44 月の起源仮説で,何故プレートテクトニクスの起源が示せるのか？ 何故地球の海洋底の起源が示せるのか？ 何故環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源を示せるのか？ 何故マントル対流が無くてもプレート移動が示せるのか？何故プレートが相互に重なり始める事を示せたのか？ 何故太平洋プレートの移動方向が急変する事を示せたのか?何故地球自転軸が急に傾いた事を示せたのか?
種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ. 銀河系・惑星・地球月起源研究室）

P-D2-A45 銀河回転の謎を Abduction with Nature Structure で解明する.
種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ. 銀河系・惑星・地球月起源研究室）

P-D2-A46 夜空の星は何故星型★に見えるのか? 検証は如何に? パラダイムシフト， モデルの限界，発想の転換，自然との一致⇒真実に至る道.

種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ．銀河系・惑星・地球月起源研究室）

P-D2-A47　赤方偏移の謎，実証が出来ない宇宙仮説(論)，検証ができる宇宙仮説(論)
種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ．銀河系・惑星・地球月起源研究室）

P-D2-A48　月の海は何故表側だけに有るのか，Multi-Impact Hypothesis だけが検証できたその理由，月が常に地球を向く理由と同じ，月の偏芯形成メカニズムが起因であった．
種子 彰（ＳＥＥＤ ＳＣＩＥＮＣＥ Ｌａｂｏ．銀河系・惑星・地球月起源研究室）

日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み　：ミッション概要

Studies towards the ESA/JAXA-led BepiColombo Mission to Mercury: Mission Overview

○村上豪[1], Johannes Benkhoff[2]

[1]JAXA/ISAS, [2]ESA

BepiColombo は日欧共同の水星探査計画であり、水星表面探査機（Mercury Planetary Orbiter: MPO）および水星磁気圏探査機「みお」（Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO）の 2 機がそれぞれ高度の異なる周回軌道から水星を観測する。2018 年 10 月に打ち上げられた探査機は地球で 1 回、金星で 2 回、水星で 6 回のスイングバイを経て 2025 年 12 月に水星周回軌道へ投入される。MPO は表面地形や鉱物・化学組成、磁場、重力場などの観測を行い、「みお」は水星磁気圏におけるプラズマ環境や外圏大気、ダストなど周辺環境の観測を行う。BepiColombo は 2 機の同時探査により水星における未解決課題に総合的かつ徹底的に取り組むとともに、地球型惑星の形成、進化、環境への理解に新たな展開をもたらす。

水星は太陽系の最内縁に位置する最小の地球型惑星であり、直径の 85%にも及ぶ巨大な金属核やいまだに維持されているダイナモ磁場、表面に含まれる豊富な揮発性物質など、その起源および形成・進化過程には未解決課題が多く残されている。BepiColombo 計画では主に MPO がこうした課題に取り組み、先行する Messenger では観測できなかった南半球もカバーしつつ高度 480×1500 km の極軌道から観測を行う。MPO にはガンマ線～中間赤外分光・撮像装置、レーザー高度計、加速度計、磁力計などが搭載されている（表）。

本発表では BepiColombo 計画の全体概要および科学目標、特に惑星科学分野における観測概要について紹介する。

表. BepiColombo/MPO に搭載された観測装置の一覧と Messenger 搭載装置との比較

	BepiColombo/MPO				MESSENGER	
Plasma (SW, MS)	SERENA	ELENA	Low-energy neutral atoms	20eV-5keV	-	
		STROFIO	Neutral particles mass spectroscopy	0.01-50eV 1-64 amu, m/Δm = 60	-	
		MIPA	Ion mass spectroscopy	15eV-15keV 1-50 amu, m/Δm = 2-5	FIPS	50eV-13keV 1-40 amu/e
		PICAM	Ion mass spectroscopy	<100eV-3keV 1… ~132 amu, m/Δm = >50		
	SIXS		Solar X-ray/particles	0.33-30MeV (protons) 0.05-3MeV (electrons) 1-20keV (X-ray)	XRS	1-10keV (X-ray)
B-field	MPO-MAG		Magnetic field	0.5 - 128 Hz	MAG	DC - 20Hz
Exosphere	PHEBUS		UV spectroscopy	55-315, 404, 422nm, R ~ 200	MASCS	115-600nm (UVVS), R = 1000
Surface	MERTIS		Composition and temperature	7-14 um	-	
	MIXS		Composition by X-ray	0.5-7.5keV	XRS	1-10keV
	MGNS		Composition by Gamma-ray and neutron	Gamma-ray: 0.3-10MeV, reaol.: 26keV @660keV Neutron: 10^{-3}eV-15MeV	GRNS	GR: 0.1-10MeV, resol.: 3.5keV @1332keV NS: thermal-7MeV
	SIMBIO-SYS		Surface imaging	50m/pix @550/700/800nm (STC) 5m/pix @400-900nm(HRIC) 100m @400-2000nm (VIHI)	MDIS	5.1m @700-800nm (NAC) 35.8m @395-1040nm (WAC)
	BELA		Altimeter	Accuracy: <80cm	MLA	<1.0m
Interior	MORE		Gravity field	Accuracy: 15cm	RS	6.8m
	ISA		Accelerometer	Accuracy: 10^{-8} m/s	-	

日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み：後期集積が水星に与える影響

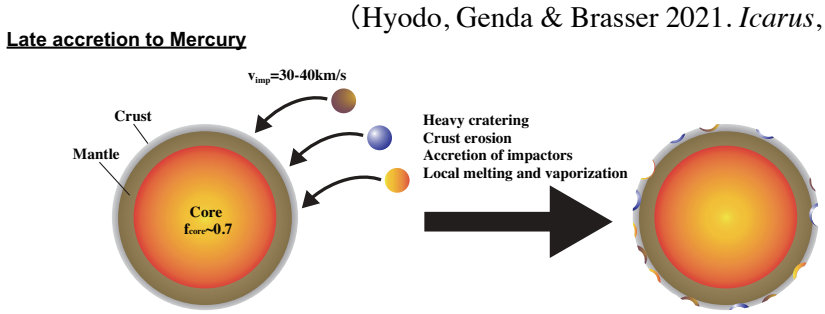
○兵頭龍樹[1], 玄田英典[2], Brasser Ramon[2]
[1]ISAS/JAXA, [2]ELSI/東工大

惑星は、小さな塵から時間をかけて成長・集積を繰り返すことで、惑星サイズまで成長したと考えられる。惑星の成長がほぼ完了してすぐの段階（約４５億年前までには太陽系の惑星は現在の大きさまで成長したと考えられている）では、惑星周囲に小さな天体が多数残っていて、それらが数億年をかけて地球型惑星に降り注いだと考えられている（i.e.,後期集積）。後期集積は、地球においては、水を供給したプロセスとしても有力であり、惑星表面環境を形作るものとして重要なプロセスである。本研究では、惑星形成過程の軌道計算と衝突計算を組み合わせたモンテカルロ法を用いて、後期集積が水星表面にもたらす影響を調べた。

モンテカルロ計算の結果、後期集積によって、統計的に、水星表面が全球的に約 50m～10km 程度削られることが分かった（惑星形成モデルに強く依存）。また、衝突天体の揮発性物質などは衝突時に溶融/蒸発するが、短時間で冷え固まることで水星表面に供給されうると見積もられた。後期集積により“水星全球が削られる”という結果は、これまで示唆されている最古の表面年代が約 40～41 億年前という観測結果と無矛盾である。また本研究の結果は、水星表面で発見された“一見不可思議な揮発性元素の存在”の起源にもなりうる。

現在、日欧共同ベピ・コロンボ探査機が水星に向かっている（2015 年打上げ済、2025 年到着予定）。NASA メッセンジャー機など、これまでの水星観測は、主に水星の　　北半球のみしか達成されていないが、ベピ・コロンボ探査機は、初めて水星表面の全球詳細観測を行う。本研究の結果は、ベピ・コロンボ探査計画に対して「後期集積の痕跡を探す」という新たな科学的価値を与えると同時に、水星観測に基づく後期集積過程の詳細な理解は、太陽系における惑星形成最終段階の描像をより深く理解することに繋がると期待される。

（Hyodo, Genda & Brasser 2021. *Icarus*, 354, 114064）



図：後期集積が水星へ与える影響の概念図。水星表面は全球的に削られるのと同時に、衝突天体由来の物質が供給される。後期集積は無数の多様な小天体衝突からなるプロセスであることから、水星表面に不均質な影響を与えると考えられる（図は Hyodo et al. 2021 を改変）。
本研究の詳細は、Hyodo, Genda & Brasser 2021. *Icarus*, 354, 114064 を参照。

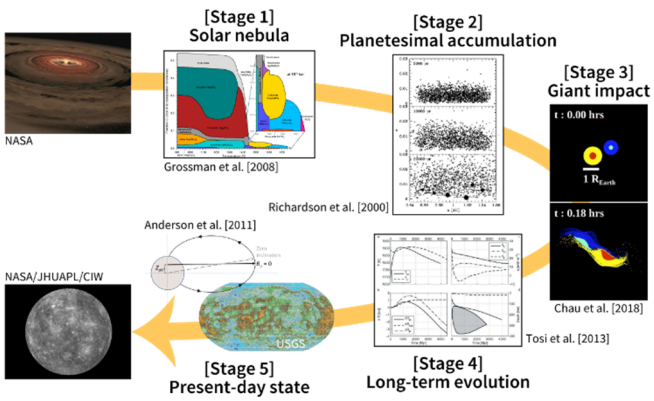
日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み：水星形成解明のための理論研究

○鎌田 俊一[1]、兵頭 龍樹[2]、高橋 太[3]、吉崎 昂[4]、石城 陽太[2]、倉本 圭[1]、村上 豪[2]
[1]北海道大学、[2]ISAS/JAXA、[3]九州大学、[4]東北大学

BepiColombo 水星探査計画は ESA-JAXA の国際共同ミッションである。本ミッションでは水星本体の探査を目的とする Mercury Planetary Orbiter (MPO) と水星周囲のプラズマ・磁場の探査を主目的とする「みお (Mio)」の 2 機による同時観測が行われる。これらの探査機は主要な開発元が異なり、前者は ESA、後者は JAXA である。そのため、日本側は主に「みお」関係者に限られており、これまで日本の惑星科学コミュニティは本格参入できていなかった。しかし 2019 年、同ミッションに新たに加わる学際研究者 (IDS) の公募が行われ、著者らはこれに応募、採択され、同ミッションに本格参入することとなった。著者らは、日本の惑星科学コミュニティが最も得意とする研究分野の一つである「惑星形成」をメインテーマに、理論研究と探査データの融合による研究を開始した。

水星は様々な点で特異な天体である。具体的には、衛星ガニメデよりも小さなサイズ、非常に大きな核/マントル比、非常に暗い表面、極めて還元的な表面化学組成といった特徴をもち、これらは水星の特異な形成・進化過程を反映している。しかし、太陽に最も近いゆえ、観測が難しいばかりでなく理論研究も他の地球型惑星と比較して困難であった。そのため、上記の特徴を統一的に説明する水星の形成・進化シナリオは確立していない。

我々は水星の形成・進化の統一シナリオの確立を目指して、地球物理・天体物理・地球化学・宇宙化学などの理論面から切り込む。具体的には、原始太陽系円盤内での凝縮、微惑星の集積とその段階における衝突、巨大衝突と後期集積、核・マントルの組成、長期熱・組成進化、磁場の変遷などを各人が得意する視点で水星の形成と進化の各過程を定量的に制約する。そして、観測される水星の地形、重力、表面組成、磁場などを説明可能な水星形成シナリオの抽出を目指す。本発表では研究アプローチの紹介、並びに進捗について報告する。



図：本プロジェクトの概要。水星の形成と進化の様々な段階について、複数のアプローチで研究を行う。

戦略的火星探査計画および国際協働探査 Ice Mapper 計画の検討状況

○臼井寛裕[1]・関華奈子[2]・藤田和央[1]・着陸機による火星環境探査リサーチグループ
[1]宇宙航空研究開発機構・[2]東京大学

According to the international trend for Mars exploration and potential significance for understanding the current and past surface/subsurface aqueous environments, JAXA plans a strategic Mars exploration program (JSMEP) (Fig. 1). JSMEP starts with a Martian moon's sample return mission (MMX: Martian Moons Explorer) in 2024-2029, followed by a Mars orbiter (MO) in later 2020s and a Mars lander/rover (ML/R) mission in the early 2030s. JSMEP's goals are 1) to address questions of water on Mars [origin and delivery (MMX), distribution and inventory (MO), and chemical evolution (ML/R)], 2) to ensure the expansion of the areas of human activities by exploring the habitable subsurface world, and 3) to acquires key technologies including EDL (entry-descent-landing) with aerodynamic control, drilling and sampling on the surface, deep space telecommunication, transportation to/from the Mars orbit, and planetary protection. This study presents the current status of JSPMEP and the NASA-CSA-JAXA-lead Ice Mapper orbiter (IMO) as a 2020s MO mission.

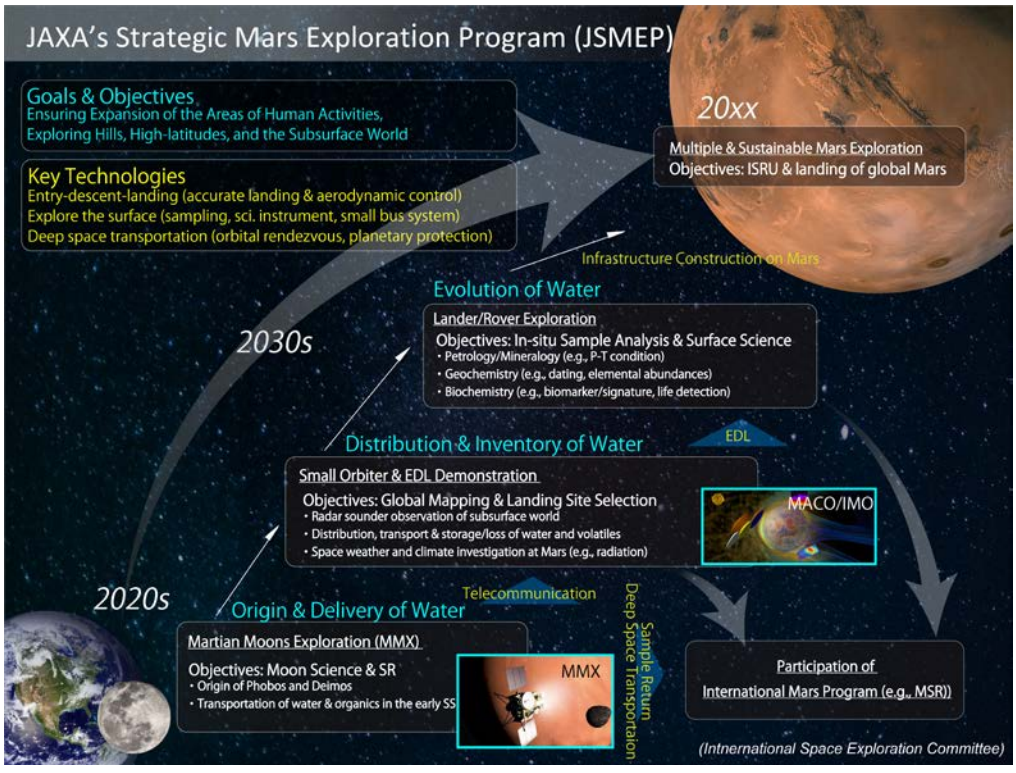


Fig. 1: Overview of JAXA's Strategic Mars Exploration Program

月・火星・小惑星地下探査レーダ試作機を用いた検証実験

○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, [2]東大, [3]JAXA, [4]鶴岡高専

将来の月・火星・小惑星探査ミッションにおいて実現可能なレーダによる地下探査計画の検討のため，レーダ試作機の製作とこれを用いた検証実験を進めている．地下探査レーダは，月・火星探査においては，地下氷や溶岩チューブの探索，小惑星探査においては，内部構造に基づく起源の議論に貢献することが期待される．レーダの周波数帯は，探査対象の空間スケールに合わせて，適切に設定する必要がある．本研究では，月・火星で，地下 10 m までを 0.1 m の分解能で計測するべく，試作機の周波数帯を 0.5～3 GHz に設定した．周回機による小惑星探査では数 100 m スケールの内部構造を探査対象とすることになるので，1/10 縮小スケールでの 50～300 MHz のレーダの検証実験，ともみなすことができる．

レーダ試作機は，0.5～3GHz の線形チャープ方式のレーダでパルス継続時間は 12.8ms とした．送信用のパワーアンプ，受信用のローノイズアンプはコスト圧縮のため一般工業用部品を利用したが，VCO を用いた 0.5-3GHz のチャープ信号生成部は航空宇宙用の部品の選択肢が狭いことから，この試作機で先行的に成立性を検証するべく，フライトモデルで想定しているのと同一設計とし，使用予定と同じ型番の一般工業部品を使用した．送受信アンテナとして１組のビバルディアンテナを使用した．現在までに送受信機の製作は完了し，送受信アンテナに代えて長さが既知のケーブルを接続することで，0.06m の分解能でエコーの遅延を計測できることを確認した．今後，アンテナと組み合わせた土壌計測実験に取り組む．

並行して，小惑星内部探査の模擬実験の準備として，比較・参照・評価のための計算機実験にも取り組んでいる．計算には有限差分時間領域法（FDTD）のシミュレーションコード（MEEP）を用いた．２次元のシミュレーション空間内に，直径１ｍの円筒の砂（比誘電率 2）を置き，複数の岩塊（比誘電率 4）を埋める．円筒の側面の１点から 0.5～3 GHz のチャープ波を送信し，側面の複数の地点でレーダパルスの波形を記録する．送信点の位置を変えて同様の計算を行い，得られたデータセットから誘電率の分布を推定し，最初に設定した分布と比較する．当初は，走時トモグラフィの手法を適用することを想定していたが，小惑星の bulk 密度から内部の誘電率の範囲を 2～4 と想定すると，小惑星内部を透過するパルスと小惑星外部を回折するパルスの到来時刻が接近して，透過成分の走時の読み取りが困難だったことから，回折パルスより到来時間が十分遅い小惑星内部で反射するエコー成分に Kirchhoff マイグレーションを適用して，内部構造を推定する手法を検討した．均等な間隔で 8～16 点の送信点を設置することで，内部の誘電率コントラストの分布が十分推定可能なことを確かめている．実際の小惑星探査では，レーダを搭載した周回機１機と，トランスポンダを搭載した複数の着陸機又は１機の小型周回機で，こうした内部構造探査が可能となるものと期待される．

月の縦孔・地下空洞直接探査（UZUME）

○春山純一[1]、岩田隆浩[1]、岡田達明[1]、庄司大悟[1]、諸田智克[2]、清水久芳[2]、内藤雅之[3]、
本多力[4]，河野功[1]，角有司[1]，安光亮一郎[1]、西堀敏幸[1]、大槻真嗣[1]、石上玄也[5]
月の縦孔・地下空洞直接探査ワーキンググループ

[1]宇宙航空研究開発機構、[2]東京大学、[3]量子科学技術研究開発機構、
[4]NPO 法人火山洞窟学会、[5]慶應大学

月火星に，地下空洞に開いたと思われる縦孔が発見されている．これらは，月の火成活動や内部活動などの情報を有し月惑星における生命生存圏の発現と維持を理解するための鍵であり，また，宇宙線や隕石防御の面で安全であり，その存在により人類の居住圏の拡大を大いに進められる可能性があることから，世界的にも注目を浴びており，月における最も重要な探査対象の一つである．

一方で，月・火星の地下空洞は，周回軌道からのリモートセンシングによってその存在の可能性が指摘されているのみであり，対象が地下にあることもあって，その詳細は不明である．そこで，月火星に関して「巨大な地下空洞が実際に存在するのか，またそれが溶岩チューブである可能性はどの程度有るのか」という基本情報の収集を，最も身近な対象である月において早期に確実に行う事が求められるが、それについては，これまでの JAXA が行ってきた探査のヘリテージ，具体的には，2022 年度打ち上げ予定の月ピンポイント着陸探査機 Smart Lander for Investigating the Moon (SLIM)を最大に活かすことで可能となる．

そこで、我々は，着陸機は SLIM をベースとし，搭載機器質量は数 kg レベルに限定した中で，本 WG で目指す月の縦孔・地下空洞直接探査のミッションを，以下の様に設定した探査計画を目指そうとしている．

①巨大地下空洞の存否（空洞三次元規模）
②縦孔・地下空洞構造情報（溶岩チューブ決定因子）
③月の火成活動，内部活動情報（溶岩流履歴，残留磁化履歴）
④月地下長期滞在適合性（放射線・温度・ダスト環境，磁場環境）

着陸機の打ち上げは，イプシロンまたはイプシロンＳで行うことを前提とし 2020 年代半ばのプロジェクト実現を目指す．

この計画の名前を，「古今未曾有の日本の月地下世界探査（Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration：UZUME）とし，現在（予稿投稿時），宇宙科学研究所のもと，ワーキンググループ（WG）を立ち上げた．この WG では，更にコミュニティを形成・拡充することも推進する．

なお，こうした縦孔，地下空洞は，月，地球，火星他，水星，木星や土星の衛星等にもあることが分かっている，もしくは推察されている．こうした天体の地下へのアプローチも，月の縦孔探査検討と平行して考えていく．UZUME の M は Moon 以外にも，Mars（火星），Mercury（水星），さらに Moons of outer planets（外惑星衛星），Minor body（小天体），そして Meiousei(冥王星）も意味する．

本講演では，UZUME 計画の現状について，紹介する．

DESTINY⁺計画の進捗とサイエンス

○荒井 朋子[1]，小林 正規[1]，石橋 高[1]，吉田 二美[2, 1]，木村 宏[1]，平井 隆之[1]，洪 鵬[1]，山田 学[1]，千秋 博紀[1]，和田 浩二[1]，Ralf Srama[3]，Harald Krüger[4]，今村 裕志[5]，豊田 裕之[5]，西山 和孝[5]，髙島 建[5]，佐々木晶[6]，薮田 ひかる[7]，石黒 正晃[8]，渡部 潤一[9]，伊藤 孝士[9]，大坪 貴文[9]，大塚 勝仁[10]，阿部 新助[11]，中村 智樹[12]，小林 詩歩[12]，廣井 孝弘[13]，中村メッセンジャー圭子[14]，小松 睦美[15]，関口 朋彦[16]，浦川 聖太郎[17]，木下 大輔[18]，橘 省吾[19]，三河内 岳[19]，諸田 智克[19]，野口 高明[20]，金田 英宏[21]，矢野 創[5]，吉川 真[5]，岡本 尚也[5]，中藤 亜衣子[5]，柳沢 俊史[5]，黒崎 裕久[5]，小松 吾郎[22, 1]，出村 裕英[23]，平田 成[23]，伊藤 元雄[24]，松浦 周二[25]

[1]千葉工大 惑星探査研究センター，[2]産業医科大学，[3]University of Stuttgart，[4]MPS，[5]JAXA，[6]大阪大学，[7]広島大学，[8]ソウル国立大学，[9]国立天文台，[10]東京流星観測網，[11]日本大学，[12]東北大学，[13]ブラウン大学，[14]NASA JSC，[15]総合研究大学院大学，[16]北海道教育大学，[17]日本スペースガード協会，[18]台湾国立中央大学，[19]東京大学，[20]九州大学，[21]名古屋大学，[22]ダヌンツィオ大学，[23]会津大学，[24]JAMSTEC，[25]関西学院大学

深宇宙探査技術実証機デスティニープラス DESTINY⁺は、開発中の小型ロケット「イプシロン S」を利用して打ち上げられる小惑星探査計画である。本計画の前身となる DESTINY は、ISAS の「2013 年度イプシロン搭載宇宙科学ミッション」の提案募集に応募し、最終審査で不採択となった。理学ミッションを加えた DESTINY⁺として ISAS の「2015 年度公募型小型計画宇宙科学ミッション」の提案募集に再応募し、2017 年 8 月に選定された。2020 年 6 月 1 日にプリプロジェクト（プロジェクトの前段階）となり、2024 年度の打上げを目指している。DESTINY⁺は Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science の略称で、名称の前半が工学ミッションの目的である「深宇宙探査技術の実証」、後半が理学ミッションの目的である「小惑星(3200) Phaethon のフライバイ及びダストサイエンス」を表す。工学と理学の連携により、小惑星の近傍を通過して観測を行う「フライバイ」という探査技術を獲得し、小天体探査の機会拡大を目指す。工学ミッションは ISAS が、理学ミッションは千葉工業大学が中心となり計画を進めている。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 Phaethon の高速フライバイ撮像を行うと共に、日心距離 1au 付近の惑星間ダスト・星間ダスト、Phaethon 周辺のダスト粒子の質量、軌道、化学組成をその場分析する計画である。また、エクストラミッションとして、Phaethon からの分裂天体と考えられている小惑星 2005UD のフライバイも計画している。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って開発を進めている（本講演会の石橋他、洪他、岡本他）。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学が開発を行っており、地上校正について日独共同で検討を進めている（本講演会の平井他）。

2017 年 12 月には Phaethon の国際観測キャンペーンが、また 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た。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。同年 8 月 22 日には北海道渡島半島で、また同年 10 月 26 日には宮城県及び山形県でも Phaethon による恒星食観測を行った。これらの地上観測により探査標的天体の物理化学特性について理解が進んだ。本講演では、DESTINY⁺計画の進捗及び地上観測結果に基づく小惑星 Phaethon の最新理解について報告する。

DESTINY+搭載用小惑星追尾望遠モノクロカメラ（TCAP）およびマルチバンドカメラ（MCAP）の検討状況

○石橋 高[1], 洪 鵬[1], 岡本 尚也[2], 石丸 貴博[2], 山田 学[1], 奥平 修[1], 荒井 朋子[1], 吉田 二美[1,3], 尾崎 直哉[2], 佐藤 峻介[2], 亀田 真吾[4], 鍵谷 将人[5], 宮原 剛[2], 太田 方之[2], 高島 健[2]

[1]千葉工業大学, [2]宇宙航空研究開発機構, [3]産業医科大学, [4]立教大学, [5]東北大学

2024年の打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証ミッションDESTINY+（Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUt Science）では，小惑星(3200) 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その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．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，小惑星追尾望遠カメラTCAPおよびマルチバンドカメラMCAPについて行ってきた概念設計の検討状況について，今回は特にTCAPによる高速フライバイ中の小惑星追尾撮像の実現性の検討を中心に報告する予定である．

フライバイ中にPhaethonを追尾しながら撮像するTCAPは，天体の地形観測に重要な幅広い太陽位相角での観測を実現でき，フライバイという非常に限られた観測時間の中でより多くの質の高い情報の取得を可能とする．相対速度（相対角速度）がそれほど大きくないフライバイ観測の場合は，探査機の姿勢制御による追尾が可能であり，これまでのほとんどのフライバイ追尾観測ではそのような手法がとられてきた．しかし，DESTINY+によるPhaethon高速フライバイ（相対速度30-36 km/s，最接近距離450-550 km）では探査機姿勢により追尾することが難しいため，その代わりに大きく視線方向を変えることのできる駆動鏡をTCAPに搭載し，最接近付近では探査機姿勢を慣性空間に固定して，TCAP駆動鏡により追尾を行う．このような，カメラ自身が天体追尾機能を持つ惑星探査用カメラは，軌道離心率や軌道傾斜角が大きく，相対速度が大きいためにランデブー探査は難しいがフライバイ探査であれば可能であるような小天体の探査において非常に有用であり，DESTINY+ミッションの先も見据えて開発を進めている．DESTINY+では，Phaethonを視野角の狭い望遠カメラTCAPの視野に常に収めながら，かつぶれずに撮像を行うことを目指している．さらに，このフライバイ追尾撮像には光学航法が必要なため，TCAPは望遠カメラであるが，航法カメラの役割を果たす必要もある．このような状況下で追尾撮像を実現するには，これまでの惑星探査用カメラには無かった厳しい要求が課せられる．TCAPにより小惑星追尾撮像を実現するための課題とその検討状況を報告する．

始原天体サンプルリターンミッションの検討

○嶌生有理[1]，脇田茂[2]，浦川聖太郎[3]，洪鵬[4]，臼井文彦[1]，
松岡萌[1]，坂谷尚哉[5]，田中智[1]，長谷川直[1]，黒田大介[6]
[1]宇宙航空研究開発機構，[2]パデュー大学，[3]日本スペースガード協会，
[4]千葉工業大学惑星探査研究センター，[5]立教大学，[6]京都大学

Primitive bodies as candidates for a sample return mission

○Yuri Shimaki[1], Shigeru Wakita[2], Seitaro Urakawa[3], Peng Hong[4], Fumihiko Usui[1],
Moe Matsuoka[1], Naoya Sakatani[5], Satoshi Tanaka[1], Sunao Hasegawa[1], Daisuke Kuroda[6]
[1]JAXA, [2]Purdue University, [3]Japan Spaceguard Association,
[4]PERC/Chitech, [5]Rikkyo University, [6]Kyoto University

Hayabusa2 and OSIRIS-REx missions have revealed that rocks on the surface of Ryugu and Bennu, classified as C- and B-type asteroids, are more porous than typical carbonaceous chondrites. Some chondrites contain organics. However, the cause of their high porosity is unclear, and more fragile materials, volatiles, have not been detected. Moreover, such porous meteorite samples have not been found so far on the Earth, and there can be a sampling bias of meteorites during atmospheric entry. Thus, our knowledge of the physical and chemical properties of fragile materials present at the surface of dark asteroids is still limited. Returned samples from various asteroids will be a key to understand the physical and chemical characteristics and variation depending on asteroid types. It is essential to estimate the evolution processes of primitive bodies in the early Solar System based on the combination of remote sensing observations and captured sample analyses. Here we report tentative target candidates of a primitive near-Earth object (NEO) and comets for a sample return (SR) mission in the 2030s.

To achieve SR with low delta-V, we extracted asteroids with a perihelion distance from 0.9 to 1.1 au and an inclination angle below 10° as the SR candidates. A tentative science evaluation of the target candidates was carried out based on the spectrum type, diameter, rotation period, and other properties of the asteroids.

We select two tentative target candidates for the SR mission. One is an asteroid 107P/ (4015) Wilson-Harrington (W-H), a B-type active asteroid [1], also known as a target of the JAXA's Hayabusa-Mk2 and ESA's Marco Polo missions. W-H is possibly an extinct comet enriched in volatiles in the past, and we expect the evidence of volatiles and organics on its surface [e.g., 2]. Also, the fly-by observation of another active asteroid (3200) Phaethon by the JAXA's DESTINY$^+$ mission will bring synergy to understand the active asteroid's nature.

Another SR candidate is a D/T-type asteroid (162998) 2001 SK162 with a slow rotation period of 68 hours. The D/T-type asteroids are abundant in the outer main belt and Jupiter's orbit and expected to be enriched in volatiles and organics. The JAXA's OKEANOS mission targets the Trojan asteroids, but will not operate SR. The MMX mission will acquire samples from the Martian moon Phobos, which is also categorized as D/T-type [3]. Since the Tagish Lake C2 carbonaceous chondrite is spectrally similar to D-type asteroids [4], its parent body might be D-type asteroids and originally located on the outer solar system [5]. Thus, returned samples from various D/T-type asteroids will confirm the relationship between the asteroid types and the meteorite classes.

[1] Jewitt, D. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 221 (Tucson: University of Arizona Press). [2] Tachibana, S. et al., 2013, *Yuseijin*, **22**(1), 4-13. [3] Fraeman, A.A. et al., 2012, *JGR*, **117**(E11). [4] Hiroi, T. et al., 2001, *Science*, **293**(5538), 2234-2236. [5] Fujiya, W. et al., 2019, *Nature Astronomy*, **3**(10), 910-915.

はやぶさ２拡張ミッション：微小で高速自転する小惑星へのランデブーする理学的意義

○M. Hirabayashi[1], Y. Mimasu[2], N. Sakatani[3], S. Watanabe[4], Y. Tsuda[2], T. Saiki[2], S. Kikuchi[2], T. Kouyama[5], M. Yoshikawa[2], S. Tanaka[2], S. Nakazawa[2], Y. Takei[2], F. Terui[2], A. Fujii[2], T. Iwata[2], K. Tsumura[6], S. Matsuura[7], Y. Shimaki[2], S. Urakawa[8], Y. Ishibashi[9], S. Hasegawa[2], M. Ishiguro[10], D. Kuroda[11], S. Okumura[8]
[1]Auburn University (thirabayashi@auburn.edu), [2]Japan Aerospace Exploration Agency, [3]Rikkyo University, [4]Nagoya University, [5]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, [6]Tokyo City University, [7]Kwansei Gakuin University, [8]Japan Spaceguard Association, [9]Hosei University, [10]Seoul National University, [11]Kyoto University.

The Hayabusa2 spacecraft successfully departed from Ryugu in November 2019 after completing key proximity operations with no critical issues. At present, the spacecraft is functioning nominally and back to Earth with materials sampled from Ryugu. It is planned to arrive at Earth and release the return capsule in December 2020. The nominal mission of Hayabusa2 will complete after the arrival at Earth and the return capsule release in December 2020. The Hayabusa2 spacecraft assessment revealed that the onboard systems do not have any major issues, and the fuel would remain enough for another mission. It gave us a possibility for us to use this spacecraft to visit other planetary bodies. Because the spacecraft is already flying in space, taking advantage of this opportunity can enable complex explorations to solve challenging and unsolved science questions for minor planetary bodies. This paper introduces the overview of the Hayabusa2 extended mission with the scientific merits.

We propose the Hayabusa2 extended mission as follows, “The Hayabusa2 spacecraft will cruise in space for multiple years and conduct multiple swing-by and fly-by operations, followed by a rendezvous with 1998 KY26.” By this, the extended mission will explore the following science issue: How does a small body less than 100 m in diameter that is rotating at extremely high spin exist? This question is closely related to key science questions: 1. Formation and evolution processes of small bodies and 2. Planetary defense.

We conducted a two-step selection process to define 1998 KY26 as the final rendezvous target. The first step was to search for objects that would be accessible based on the constraints on the current trajectory and fuel limitation of the Hayabusa2 spacecraft. This step found 14 accessible objects. The second step ranked preferable objects based on the mission criteria. This selection process gave us 1998 KY26 and 2001 AV43 as two potential target candidates. Based on the spacecraft constraints, we finally decided 1998 KY26 as the extended mission’s final rendezvous target.

In the extended mission, the spacecraft is planned to arrive at 1998 KY26 in 2031. After the departure from the Earth in December 2020, the spacecraft will continue its cruise operation. In middle 2026, the spacecraft may fly by 2001 CC21 if all engineering conditions are met. It will approach the asteroid with high speed (~ 5 km/sec) during the flyby and require sophisticated guidance, navigation, and control technologies. Note that the spacecraft was not designed to conduct high-speed flybys at small bodies. Further assessments will thus be necessary to perform the operation with the spacecraft’s limited capability. After two Earth swing-by operations in late 2027 and early 2028, the spacecraft will arrive at the target asteroid. The planned trajectory will need additional delta-V of 1.09 km/sec, given the 2,900 sec Isp.

1998 KY26 was observed by optical observations and ground radar (Ostro et al., 1999). The radar-driven shape model shows no prominent asymmetric features of this body, although the shape was constrained based on the Doppler-based model, and thus there may be some uncertainties (Ostro et al., 1999). The current spin period is 10.7 min, and the size is about 20 m – 40 m. The surface color is reported to be dark, implying potential taxonomic classes associated with a mixture of carbonaceous materials and mafic silicates (B, C, F, G, D, P) (Ostro et al., 1999). If this asteroid is indeed made of carbonaceous materials and mafic silicates, this asteroid’s bulk density may be relatively low. In this case, because the remote sensing instruments onboard the spacecraft were designed to observe Ryugu, we will be able to take advantage of their capability to observe 1998 KY26. This asteroid was also a target by NASA’s human spaceflight missions (Abell, personal communication, 2019).

The planned operations in the extended mission will be ~10 years long. We plan to maximize science findings during this long-term period. If the flyby operation at 2001 CC21 is found to be feasible, we will observe this 700-m-diameter asteroid by conducting remote sensing observations. We also plan long-term monitoring of the zodiacal light and exoplanets.

原始惑星系円盤における N_2H^+, N_2D^+ 輝線観測データの解析

◯ 大和義英[1], Gianni Cataldi[1,2], 相川祐理[1], ALMA MAPS Collaboration

[1] 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, [2] 国立天文台

近年の ALMA 望遠鏡による高空間分解能ダスト連続波観測により、多くの原始惑星系円盤において、円盤内に円環や空隙、渦状腕などの様々な構造がみられることが分かってきた。これらの構造が惑星との重力相互作用によるものであれば、分子ガスにも同様の構造がみられることが予想される。また分子輝線は、円盤の半径・鉛直方向温度分布や化学組成など豊富な情報を含む。しかしながら、円盤を空間分解した分子輝線の観測には長時間積分が必要なため、その重要性にもかかわらずこれまであまり行われてこなかった。

ALMA Cycle 6 の Large Program である MAPS (Molecules with ALMA on Planet-forming Scales) では、原始惑星系円盤 5 天体について 20 以上の分子輝線を 0″.1 に迫る空間分解能で観測し、円盤内のガスの分布を明らかにすることを目指している。我々はそのうち重水素化分子の解析を行っており、本講演では $N_2D^+(J = 3\text{-}2)$ 輝線の解析結果を報告する。N_2D^+ は電離度や重水素化の指標となる重要なイオン分子であり、その生成過程から 30 K を下回るような低温環境下で存在すると考えられている。従って、低温な円盤の中心面付近における電離度や重水素化の最良かつ唯一のトレーサーとなり得る。また、CO とのイオン分子反応によって破壊されるため、CO がダスト表面から昇華し気相として存在している領域では N_2D^+ の存在量は減少する。従って、中心面付近における CO のスノーラインの指標にもなり得る。本研究では、円盤内のガスのケプラー回転を利用した解析手法により、5 天体中 4 天体について $N_2D^+(J = 3\text{-}2)$ 輝線を確実に検出した。さらに、円盤の各半径において回転角方向にスタッキングを行い、輻射輸送モデルを用いて柱密度の動径方向分布を推定した。N_2D^+ 分子は半径 50 au 以遠にピークを持つリング状に分布しており、低温な円盤外縁部に存在するという理論的予測と整合的である。また、リングの内縁は、本プロジェクトメンバーにより構築された円盤の理論モデルおよび先行研究における観測結果から推定される CO のスノーラインの位置とよく合致しており、N_2D^+ 分子の CO スノーラインの指標としての有用性が観測的に初めて示された。また、得られた N_2D^+ 分子の柱密度は、ピーク位置において $10^{11}\,\mathrm{cm^{-2}}$ を上回る高い値を示しており、これは典型的な円盤モデルによれば $10^{-18}\,\mathrm{s^{-1}}$ を超える高い電離率を示唆する。

さらに、我々は $N_2H^+(J = 3\text{-}2)$ 輝線の ALMA アーカイブデータについても同様の解析を行い、N_2D^+ の柱密度と比較することで N_2D^+/N_2H^+ 比の動径方向の分布を初めて導出した。N_2D^+/N_2H^+ 比は 0.1 - 1 程度と、近傍宇宙の星間空間における元素存在比 ($D/H = 10^{-5}$) に比べ非常に高い。特に、円盤外縁部で N_2D^+/N_2H^+ 比が高くなる傾向にあり、その値は星なしコアや Class 0 の原始星周囲のエンベロープにおける N_2D^+/N_2H^+ 比と比べて同程度かまたは大きい。このことは、円盤内でのイオン分子反応による分子の重水素化が有効であることを示す。また、中心星が Herbig A 型星である 2 天体については特に N_2D^+/N_2H^+ 比が高く、低温領域での電離過程の違いを反映している可能性がある。

原始惑星系円盤 HD 163296 の ALMA 連続波観測によるダストスケールハイトの推定

◯ 土井 聖明 [1,2]、片岡 章雅 [2]

[1] 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻
[2] 国立天文台 科学研究部

惑星は、原始惑星系円盤内でダストが合体成長を繰り返すことで形成されると考えられている。そのため、原始惑星系円盤のダスト分布の解明は、惑星形成過程の解明の手がかりとなる。近年の ALMA 望遠鏡による高解像度ミリ波観測により、多くの原始惑星系円盤でダスト面密度はリング構造を持つことが明らかとなった (e.g., ALMA Partnership et al. 2015)。しかし、リングの形成機構や物理状態には未解明の部分が多く残されている。

本研究では、リングのダストスケールハイトに着目し、リングにおける物理状態を観測的に制限することを目指した。本研究では、傾いた原始惑星系円盤のリングに着目し、ダストスケールハイトの違いが特に短軸上での観測されるリング幅と輝度に影響することを解析的に明らかにした。そして、輝度の方位角依存性からダストスケールハイトを推定する手法を開発した。

実際の天体への応用として、HD 163296 の ALMA large program DSHARP (Andrews et al. 2018) によって観測された波長 1.25 mm での高解像度ダスト連続波画像と、RADMC-3D (Dullemond et al. 2012) を用いた輻射シミュレーション画像を比較することで、ダストスケールハイトの制限を行った。この天体は、半径 67 au と 100 au に二つのはっきりとしたリング構造を持つことが知られており、本研究ではこの二つのリングそれぞれのダストスケールハイトを決定した。結果、内側 (67 au) リングではダストスケールハイトはガススケールハイトと同程度に厚くなっているのに対し、外側 (100 au) リングでは、ガススケールハイトの半分以下に沈殿していることが明らかとなった。また、ダストスケールハイトをもとに、ガス乱流強度 (α) とストークス数 (St) の比を制限した。2σ の範囲では、内側 (67 au) リングでは $\alpha/St > 0.48$、外側 (100 au) リングでは $\alpha/St < 0.19$ と制限することができる (Youdin & Lithwick 2007)。この結果は、2 つのリングで物理状態が異なることを示唆しており、内側のリングはダストが小さい、あるいはガス乱流強度が大きい一方で、外側のリングはダストが大きい、あるいはガス乱流強度が小さいと考えられる。また、リングの物理状態の違いは惑星によるダスト集積のようなシンプルなリング形成モデルに疑問を呈するものである。

ダスト集合体の物質強度で探る 太陽系小天体形成過程

◯ 辰馬 未沙子 [1,2] 片岡 章雅 [2] 田中 秀和 [3] Tristan Guillot[4]

[1] 東京大学 [2] 国立天文台 [3] 東北大学 [4] コートダジュール天文台

太陽系小天体の形成過程は直接付着成長やペブル集積、不安定性など諸説ある。この形成過程を探るため、我々はその物質強度に着目した。数百メートルを超える天体の内部密度は自己重力と圧縮強度のつりあいで決まると考えられている。本研究ではミクロンサイズのダスト集合体の圧縮強度をダスト付着 N 体計算で求めた。その結果、氷ダスト集合体とシリケイトダスト集合体について、体積充填率 0.1 以下から高密度まで、圧縮強度を連続的に求めることに成功した。さらに、ダスト集合体の自己重力とつりあうと仮定して内部密度を求め、実際の天体の内部密度と比較した。その結果、図 1 に示す通り、太陽系外縁天体 (TNOs) は氷ダスト集合体 (青色が構成粒子半径 $r_0 = 0.1$ μm、緑色が $r_0 = 1.0$ μm) で、67P/Churyumov-Gerasimenko を含む彗星はシリケイトダスト集合体 (橙色が $r_0 = 0.1$ μm、赤色が $r_0 = 1.0$ μm) で説明できることがわかった。一方、小惑星リュウグウや小惑星ベンヌの密度は、本研究のようなダスト集合体では説明できないほど高密度であることがわかった。このような高密度な天体を形成するには、まず数十キロメートル程度の天体を形成する必要がある。すなわち、リュウグウやベンヌは破片の集合体であり、その母天体の大きさは数十キロメートル以上であることが理論的に示唆される。

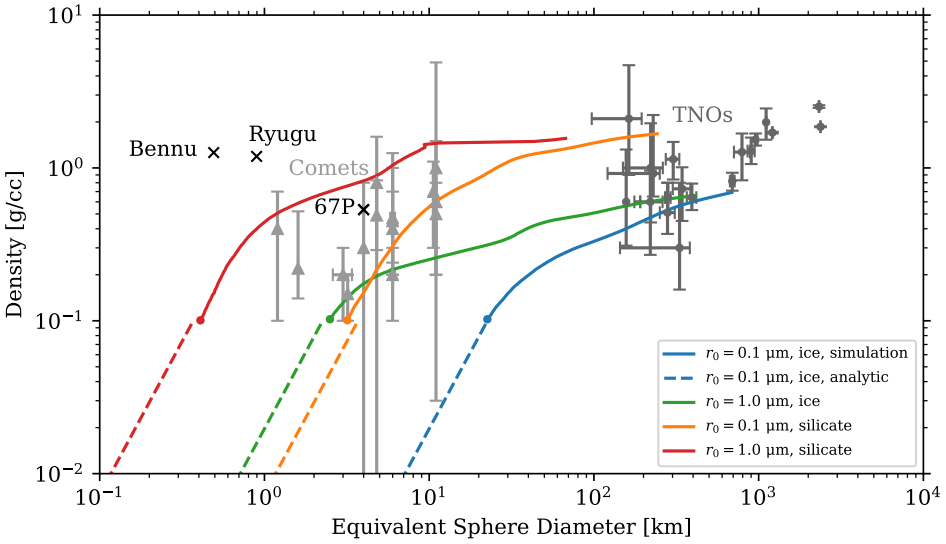


図 1: 観測や探査から見積もられた太陽系外縁天体 (TNOs) や彗星の直径-密度図に、数値計算から求められたダスト集合体の密度成長曲線を重ねたもの。青色、緑色の曲線は数値計算から求められた氷ダスト集合体の密度成長 (構成粒子半径 $r_0 = 0.1$ μm, 1.0 μm)、橙色、赤色の曲線はシリケイトダスト集合体 ($r_0 = 0.1$ μm, 1.0 μm) を示している。

小惑星リュウグウ上の岩塊の形態・分光スペクトル的特徴

○ 湯本航生[1], 巽瑛理[1,2], 海老原樹[1], 諸田智克[1], 長勇一郎[1], 髙木直史[1], 杉本知穂[1], 本田理恵[3], 亀田真吾[4], 横田康弘[3,5], 坂谷尚哉[4], 神山徹[6], 澤田弘崇[5], 早川雅彦[5], 松岡萌[5], 鈴木秀彦[9], 山田学[7], 本田親寿[8], 小川和律[10,11], 吉岡和夫[1], 杉田精司[1]

[1]東京大学, [2]Instituto de Astrofísica de Canarias, [3]高知大学, [4]立教大学, [5]JAXA/ISAS, [6]産業技術総合研究所, [7]千葉工業大学, [8]会津大学, [9]明治大学, [10]JAXA/JSEC, [11]神戸大学

研究目的：はやぶさ 2 光学航法カメラによる撮像から炭素質小惑星リュウグウの表面は岩塊に覆われていることが明らかとなった。リュウグウはその密度の小ささから母天体の破壊と再集積によって形成されたラブルパイル天体であると考えられている[1]ため、岩塊の形態的・分光スペクトル的な分布は母天体の熱化学的条件を記録している可能性が高い。これまでに全球から抽出された約 20 個の岩塊の形態やスペクトルが調査され、それらの特徴に基づいて 4 つのタイプに分類されることが提案された[2]。しかし、岩塊の特徴分布が独立したグループを示すのか、1 つの大きな連続的な変化を示すのかについては知られていない。さらに、小さく明るい岩塊はリュウグウの平均的なスペクトルと比較して強い多様性を示すことが明らかとなった[3]が、暗く大きな岩塊も含めた均質性については調査されていない。これらを解明し、リュウグウの材料物質となった母天体の温度・組成分布や加熱プロセスを推定するためには岩塊の網羅的な形態・スペクトルのカタログ化及び定量的な手法に基づく分布解析が必要である。

手法：本研究では北緯 20 度から南緯 30 度の赤道帯の画像(~0.3 m/pix)を用いて 7706 個の岩塊のスペクトル調査(7 バンド)を行ない、カタログを作成した。このうち複数の画像に映る 2316 個の岩塊を用いてスペクトル抽出手法や測光補正による反射率の誤差(1σ=1.3%)を導出した。これは画像の輝度値較正の精度と同程度であり、精度限界に近いことを示す[4]。また、岩塊の調査はD(直径)=4.7±0.7 m 以上において完全であることが個数頻度分布から示唆された[5]。

結果：全てのD>4.7 m の岩塊の反射率分布は 0.02±0.005(v-band; REFF 30,0,30 [6])である。この反射率の分布範囲は小惑星 Bennu 上の同程度の大きさの岩塊や炭素質コンドライトとその加熱/宇宙風化による反射率変化と比較しても小さく、均質性が示唆される[7, 8, 9, 10]。これは母天体内で比較的均質な温度分布となる放射壊変熱が主たる熱源であったことと整合的である。

分布解析の結果、均質な岩塊の中でも大きい岩塊ほど反射率が小さいという傾向が明らかとなった。D=4.7-8 m とD>8.7 m の岩塊の各反射率分布を比較した場合、後者の方が有意に小さい反射率である傾向を示す(Student のt検定, $t(1803)=4.5$, $p<.001$)。また、全岩塊の反射率分布は正規分布形を示さず(Anderson-Darling 検定, $A^2=3.9$, $p<.001$)、複数の正規分布形の重ね合わせで表現される可能性が示唆された。そこで、岩塊の反射率と b-x バンド色傾斜[2]の 2 次元分布において Gaussian mixture model (GMM)を用いたクラスター解析を行なった。GMM と情報基準量に基づくモデル選択から岩塊分布は平均と共分散の異なる 2 つの Gaussian 確率分布の重ね合わせで表現できることが示唆された。このような独立した分布の存在は母天体破壊後の再集積時に獲得された可能性がある。また、各分布の方向は母天体内での加熱過程やリュウグウ上での宇宙風化過程を記録している可能性が高い。

文献：[1] Watanabe *et al.*, 2019, *Science*, *364*(6437). [2] Sugita *et al.*, 2019, *Science*, *364*(6437). [3] Tatsumi *et al.*, 2020, *Nat Astron*, https://doi.org/10.1038/s41550-020-1179-z. [4] Tatsumi et al., 2019, *Icarus*, *325*. [5] Clauset *et al.*, 2009, *SIAM review*, *51*(4). [6] Tatsumi *et al.*, 2020, *A&A*, *639*. [7] DellaGiustina *et al.*,

LIBS による月隕石の主要元素濃度予測 および月着陸探査を想定した LIBS 装置改良

○ 小倉暁乃丞[1], 湯本航生[1], 長勇一郎[1], 新原隆史[2], 亀田真吾[3], 杉田精司[1]
[1]東京大学 理学系研究科, [2]東京大学 工学系研究科, [3]立教大学 理学研究科

これまでの月探査により、月は過去にマグマオーシャン（LMO）を経験したことがわかっている。さらにかぐやの観測で発見された（Ohtake et al., 2009）100%近く斜長石を含む岩石（Purest Anorthosite, PAN）や、マントル上部の組成を示す可能性がある SPA 盆地内の低カルシウム輝石（Melosh et al., 2017）などは LMO の結晶化時や分化時の元素組成を保持していることが期待される。月への着陸探査でこのような試料の主要元素組成を鉱物単位で調べることができれば、結晶分化作用の観点から LMO の分化、結晶化の際の温度や圧力の条件に制約を与えることができる。

こうした着陸探査における元素分析手法の一つにレーザー誘起プラズマ発光分光法（LIBS）がある。LIBS とはレーザーを照射することで試料をプラズマ化し、そのプラズマの脱励起による光を分光観測することで試料に含まれる元素を定量分析する手法である。LIBS 装置は現在火星で運用中の Curiosity（米）や、今年打ち上げられた二台の火星探査車 Perseverance（米）と天問１号（中）にも搭載されており、１m 以上遠方にある試料の数百ミクロンの領域を１分程度の短時間で分析できる特徴を持つ。LIBS は真空下において数 wt %の確度で主要元素濃度予測が行えるとの先行研究（Lasue et al., 2012）はあるものの、現在使用中の LIBS 装置とは分析を想定している元素濃度の幅や分光器の波長分解能などが大きく異なるため、月由来の試料に対して真空下で同様の元素濃度予測精度を持つか確かめる必要がある。

そこで本研究では LIBS スペクトルと多変量解析モデルを用いて月隕石 NWA 11474（高地由来）および NWA 479（海由来）の主要元素濃度予測を行った。多変量解析モデルはアメリカ地質調査所や産業技術総合研究所の地質標準試料および Al_2O_3、$Mg(OH)_2$、Fe_2O_3 といった化学試薬で較正を行なった。その結果、海由来の隕石では CaO、MgO、 Al_2O_3 の予測濃度が、高地由来の隕石では CaO と SiO_2 の予測濃度が他の手法で得られた濃度の参照値と誤差の範囲で一致した。さらに AIC の観点からスペクトルのノイズ除去に使用する離散ウェーブレット変換のウェーブレット関数と展開次数を適切に決定すればモデルの精度が向上し、同一サンプル内で予測値のばらつきが最大で３wt %減少することが確認された。

さらに LIBS 装置で着陸探査を行うことを想定し、レーザー照射位置を自動で変えられるスキャン（対象をなぞるように測定点を移動させる）機構および、画像の圧縮率をもとにしたオートフォーカシング機構を実装した。スキャン機構は１m 離れた距離で１mm 以下（LIBS 装置のレーザー径程度）のレーザー位置分解能を持ち、経度方向は０°から１８０°、仰角方向は＜９０°の半円領域内を照射することができる。これらの機構と LIBS 装置を統合することで、将来的にはカメラで撮影した画像から照射位置を決定すれば自動で LIBS 測定を行うことが可能になる。

クレーターサイズ頻度分布が語るセレスと月の類似性

○豊川広晴[1]、春山純一[2]、平田直之[3]、岩田隆浩[2]
[1]総合研究大学院大学、[2]宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構、[3]神戸大学

クレーターサイズ頻度分布（Crater Size Frequency Distribution, CSFD）は天体表面の進化や衝突体の情報を我々に伝えてくれる。クレーター生成関数は、その解析の中で天体の地下構造や年代を推定するために非常に重要である。メインベルト天体におけるクレーター生成関数として、月面での衝突体分布がメインベルト内でも同様であると仮定した Lunar Derived Model (LDM)が提唱され、広く使用されている[e.g., Schmedemann et al., 2014, Hiesinger et al., 2016]。だが実際には、月における直径 10km 以下の CSFD から予想される衝突体のサイズ頻度分布と、同じ直径範囲において観測されたメインベルト天体のサイズ頻度分布との間には相違がある。このことから、そのような小さなクレーター直径範囲においては LDM のクレーター生成関数の信頼性に疑問が残る。これまで Gaspra や Vesta など多くの小惑星においてクレーター分布の研究はされてきたが、クレーターの統計量不足やリサーフェイシング効果などの影響によって、月とメインベルト天体へのそれぞれの衝突体分布の比較を深く議論することができなかった。

そこで本研究では、メインベルト最大の天体であるセレスに着目し、直径 10km 以下の小さなクレーターサイズ頻度分布がどのような形状をしているのかを調べた。セレスは天体サイズが大きいだけでなく始原的な天体であるため、十分なクレーター統計量を稼ぐことができる。我々は、NASA の Dawn ミッションによって得られた高解像の Low Altitude Mapping Orbit データ（~35m/pixel）を用いることで、セレスにおける直径 1km 以上の全てのクレーターを全球的に調査した。

結果として、全球的な CSFD は、小さな直径範囲においても月のそれと非常によく一致することがわかった。この結果は、月とメインベルト内の天体における衝突源が一致していることを意味するだけでなく、観測データとの相違も明白に示す。また我々は、セレスにおける様々な衝突盆地のフロア領域において CSFD を調査した。その結果、各衝突盆地で月との一致が見られ、それらの年代による CSFD の大きな違いは見られなかった。このことから、メインベルト内におけるクレーター生成関数が少なくとも本研究で得た年代範囲の中では、ある程度一定であったことが示唆される。

本発表では、上記の結果を紹介し、また本結果と観測による天体サイズ頻度分布との相違の解釈についても議論する。

タイタンの成層圏超回転へのヘイズ層の影響

○墨 幹[1]、 竹広 真一[2]、 大淵 済[3]、 野村 英子[4]、 藤井 友香[4]
[1]東京工業大学、[2]京都大学数理解析研究所、[3]大阪物療大学/神戸大学惑星科学研究センター、[4]国立天文台科学研究部

タイタンの成層圏は惑星本体の東向きの自転より速く回転するスーパーローテーション（超回転）状態にあることが観測により明らかにされている。Huygens probe による赤道付近のその場観測では、高度 80km 付近の無風領域を除けば、東向きの風速は高度とともに増大し、高度 120km 付近では風速 100m/s にも及ぶことがわかった(Bird et al., 2005)。また、Cassini/CIRS による赤外分光観測では、高度 140km より上空においても全球規模で東向きの風の存在が判明している(Achterberg et al., 2008)。

一方、タイタンの大気のもう一つの特徴として、分厚いヘイズ層がある。このヘイズは太陽放射の約 90%を吸収し、大気上層の温度を増大させていることから大気循環への影響は大きいと考えられている。しかし、ヘイズが大気の状態にどう影響を与えているかはまだ明らかにされていない。このヘイズによる効果を理解することは、タイタンだけでなく地球型惑星の大気力学を理解する上で重要である。

本研究では、タイタンに存在するスーパーローテーションの発生機構の解明及びそれに伴う大気大循環を理解することを目的として、惑星大気大循環モデルによる数値実験を行った。この数値実験では、地球流体電脳倶楽部の開発する、プリミティブ方程式系を実装した惑星大気大循環モデル DCPAM を用い、放射過程については大気ガスによる温室効果とヘイズによる太陽光の減衰を複数のパラメーターで表現した McKay et al.(1999)の灰色大気モデルを導入した。放射場の構造の影響のみを純粋に議論するため、メタンの状態変化や季節変化は考慮していない。実験は、経度 32×緯度 16×鉛直層 55 グリッドの解像度で、無風の放射平衡温度を初期条件として統計的定常状態に達するまで（10 万地球日程度）行った。

タイタンの温度構造を再現する放射パラメータで計算すると、高度 120km 付近で風速 70m/s 以上の極大を持つ西風が得られた。また、放射モデルのパラメータを変化させたところ、西風が極大となる高度はヘイズ層の高度に伴って変化し、ヘイズ層による太陽光の減光率を上げるほど西風の強度は増大した。ヘイズ層での太陽光吸収をなくした実験の場合、スーパーローテーションの顕著な構造は得られなかった。スーパーローテーションが出現した大気構造を解析した結果、ヘイズにより大気が加熱されている大気層の最下面付近で赤道から極に向かう子午面循環が生じ、その上部では発達した波によって角運動量が極側から赤道方向へ輸送されることによって西風が維持されていることが示唆された。また、この循環による機構は高度 80km 付近の無風領域を同時に説明する。

短周期 super-Earth の大気散逸に伴う軌道進化

○藤田菜穂[1], 堀安範[2,3], 佐々木貴教[1]
[1]京都大学宇宙物理学教室, [2]アストロバイオロジーセンター, [3]国立天文台

近年 Kepler 宇宙望遠鏡などの活躍によって系外惑星探査が大きく進展し、4000 個以上の系外惑星が発見されている。とりわけ、super-Earth の発見数は飛躍的に増加しており、恒星の数十%は super-Earth を保有しているということも明らかになってきた。惑星の質量-半径の関係から推定される平均密度によると、super-Earth には、10wt%の分厚い大気を持つ低密度なものからほとんど大気を持たない岩石主体のものまで様々である。また、複数惑星系に属する super-Earth の質量-軌道分布においても、平均運動共鳴の有無や隣接する惑星の質量比は系によって様々である。このように super-Earth はその大気量や軌道において多様性に富んでいるが、その多様性の起源は明らかになっていない。

ただし、特に中心星近傍を回る短周期 super-Earth では、形成直後の大気状態や軌道を現在も維持しているとは考えにくい。短周期 super-Earth は、中心星からの強力な X 線、EUV 照射による大気の流体力学的散逸を経験して現在の大気量になっているはずである。このような惑星の大気散逸についてはこれまで多くの研究がなされている(e.g., Owen & Wu 2017)。ただし、過去の研究では、大気散逸を経験する惑星の軌道は変化しないと仮定されてきた。しかし、中心星-惑星系全体の軌道角運動量保存を考慮すると、Roche lobe overflow の場合(Trilling et al. 1998)と同様に、実際には大気散逸のみではなく、大気散逸による質量損失に伴って惑星が外側に移動するという軌道進化も起きると考えられる。

本研究では super-Earth 系の多様性の起源を探ることを目的とし、惑星の大気散逸に伴う軌道進化が最終的な惑星系の構造に与える影響を調べた。このため、中心星質量や惑星質量、大気量などを変えた様々な初期条件において、大気の流体力学的散逸に伴う惑星の軌道進化を見積もった。その際、MESA コード(Paxton et al. 2011)を用いて中心星の光度進化や惑星の熱進化なども考慮し、惑星の大気散逸と軌道進化についての数値計算を同時に行った。計算の結果、大気散逸する惑星は同じ場所にはとどまらず、外側へ移動することが分かり、このような軌道進化は軌道間隔の狭いコンパクトな super-Earth 系では特に重要になってくる。今後は観測によって M 型星周りの super-Earth 系が多数発見されることが期待される。本研究はそのような観測に先駆けた、低質量星周りの super-Earth 系の質量-軌道分布に対する理論的予測となる。将来的には観測データと計算結果を比較することで、惑星から流失した大気の振る舞いに関する理論モデルを再検証することが可能になる。本講演では今後の系外惑星探査との関連性についても議論したい。

還元型原始地球大気の流体力学的散逸

○吉田辰哉，倉本圭
北海道大学

集積期の地球は原始太陽系星雲ガスの重力的捕獲や微惑星の衝突脱ガスにより大気を獲得したと考えられる．従来，H_2 を主体とする星雲ガス成分は原始地球から急速に散逸し，現在の大気は H_2O-CO_2 を主体とする衝突脱ガス成分に由来すると想定されてきた (e.g. Matsui and Abe, 1986)．しかし，近年，地球の材料物質の大部分が還元的なエンスタタイトコンドライト様物質であることが示唆され (Dauphas, 2017)，この場合，衝突脱ガス成分も金属鉄によって還元され，H_2 や CH_4 に富むと考えられる (Kuramoto and Matsui, 1996; Zahnle et al., 2020)．炭素を含む還元的大気においては，光化学反応等を介して高分子有機物が効率よく生成されうる．従って，このような大気の持続期間を推定することは，原始地球表層における前生命的化学進化の理解に不可欠である．

H_2 に富んだ還元的原始大気は，若い太陽からの高フラックスの極紫外線により加熱を受け，流体力学的散逸を起こす．従来の星雲ガス大気を想定した流体力学的散逸のモデリング研究は，一海洋質量中の水素量と同等の水素大気がわずか ～10 Myr で全て散逸すること示してきた．しかし，これらの研究の大部分は一成分近似の下で散逸計算を行なっており，大気成分による放射冷却の効果はきちんと組み込まれていない．大気中に CH_4 が含まれる場合，赤外活性分子である CH_4 自身やその光化学生成物の CH や CH_3 の放射冷却によって，大気散逸が著しく抑制され，原始地球において還元的大気が長期間持続した可能性がある．

そこで，本研究では放射過程と光化学過程を考慮した多成分系における流体力学的散逸モデルを構築し，これを原始地球大気に適用し大気散逸率を求め，さらに現在の地球表層揮発性元素の貯蔵量と同位体組成を制約条件として原始地球大気の進化経路を推定した．散逸モデルでは，波長に依存した XUV ならびに赤外放射の放射伝達と光化学反応を考慮した球対称一次元流体方程式を時間積分し定常流を求める．XUV スペクトルと強度には 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与えた．XUV 強度は現在値の約 100 倍に相当する．放射冷却源として CH_4, CH, CH_3, H_3^+ を考慮し，光子の脱出確率を用いて放射の再吸収を表す．光化学過程については光分解反応や大気成分間の二体反応を含む 92 種の光化学反応を組み込んだ．下部大気組成はガス-マグマ-溶融金属鉄間の化学平衡計算の結果を参照し H_2 と CH_4 から成るとした．

計算領域の下端で与えた CH_4 濃度に拠らず，CH_4 は光分解やイオンとの衝突反応によって散逸流内で急速に分解され，これに伴い CH や CH_3 が生成される (図1)．CH や CH_3 の放射冷却によって大気の加熱効率は著しく減少し (図2)，下部境界の CH_4 混合比が 1% 以上の場合は炭素化合物を残し，H_2 のみが拡散律速的に散逸する．現在の地球表層炭素量と同等の CH_4 が残存し，さらに始原的隕石の炭素同位体組成から出発して現在の地球表層の同位体組成に到ると仮定して原始大気進化経路を推定すると，CH_4 の散逸量は最大でも数 bar 以下とほとんど散逸せず，水素のみが選択的に散逸する結果となった．そして集積期に獲得した水素は最大で数億年間保持され得る．このような長期間の還元的大気の持続は，現在の地球における水素や炭素の同位体比ならびに貯蔵量とも矛盾しない。この結果は，冥王代の大部分の期間水素に富んだ還元的環境が保たれ，当時の大気が有機物生成場として重要な役割を果たした可能性があることを示唆する．

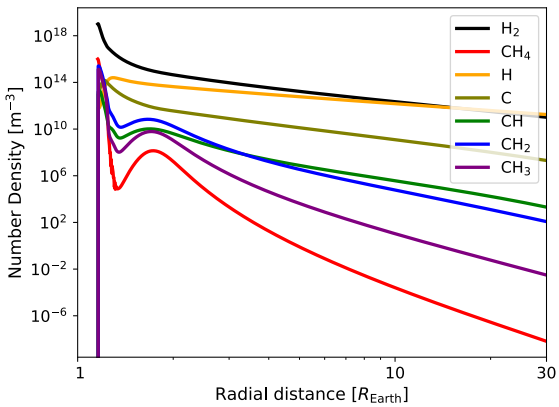


図1 下部境界 CH_4 混合比が 0.1% の場合の数密度分布

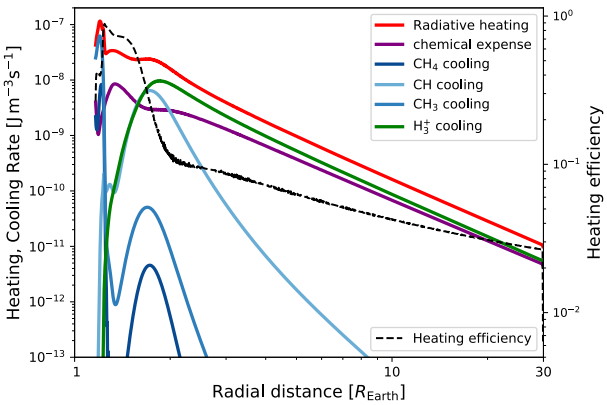


図2 下部境界 CH_4 混合比が 0.1% の場合の加熱・冷却率分布

10 年間の WASP-33b の軌道歳差

○渡辺紀治[1]、成田憲保[2]、Marshall C. Johnson[3]、福井暁彦[2]、日下部展彦[4]、川内紀代恵[2]
John Livingston[2]、Jerome de Leon[2]、森万由子[2]、西海拓[1]、Enric Palle[5]、
Hannu Parviainen[5]、Felipe Murgas[5]、Pilar Montañes-Rodriguez[5]

[1]総合研究大学院大学、 [2]東京大学、 [3]Las Cumbres Observatory、
[4]アストロバイオロジーセンター、 [5]Instituto de Astrofisica de Canarias

ホットジュピターはその場での惑星形成ができない。そのため、外側で形成された巨大ガス惑星を内側に運ぶ軌道進化モデルが提唱されてきた。現在、主に 3 つの理論が存在する。1 つ目は、原始惑星円盤との相互作用で主星方向に落下したという理論(Lin et al. 1996)がある。2 つ目は、近傍の惑星との重力散乱で楕円軌道に変わり、近星点で起こる潮汐作用によって主星の極近傍で円軌道になるという理論(Chatterjee et al. 2008)がある。3 つ目は、伴星の相互作用による古在振動で楕円軌道になり、潮汐作用で主星中心に近づく理論(Fabrycky & Tremaine 2007)がある。最初の理論では惑星軌道が主星自転軸に対して揃い、最後の 2 つの理論では傾くようになる。これより、ホットジュピターの軌道進化を辿るには、主星自転軸と惑星公転軸のなす角度(惑星軌道傾斜角)を測る必要がある。しかし、太陽型星の場合、恒星内部の厚い対流層によって、主星自転軸が再び揃うため、軌道進化の判別が難しくなる。一方、表面温度が 7000K よりも高い恒星(高温星)の場合、内部の対流層がほぼなく、公転角運動量による主星自転軸の変化がない(Albrecht et al. 2012)。よって、**高温星のホットジュピターの観測は、太陽系にとって特異な存在であるホットジュピターの軌道進化とその傾向を解明するという点で意義がある**。

高温星周辺のホットジュピターは、主に透過分光観測からドップラー・トモグラフィー法(DT 法)で測定されるが、1 度の観測だけでは天球面上に投影された見かけの惑星軌道傾斜角 λ しか測定できず、それで軌道進化が議論されてしまうという問題があった。しかし、軌道が傾いていれば、惑星公転軸が主星自転軸を中心に歳差運動する現象(軌道歳差)が起こるため、複数回の観測で λ とインパクトパラメーターb の時間変化から真の惑星軌道傾斜角 ϕ を算出できる。Iorio (2016)が Johnson et al. (2015)の透過分光データで A 型星周辺のホットジュピターWASP-33b の ϕ を求めたが、ϕ の精度が λ の精度より約 20 倍低かった。

そこで本研究では、WASP-33b の ϕ をさらに精度良く求めるために、軌道歳差観測を行った。まず、2008 年から 2019 年までにすばる望遠鏡の HDS や岡山 188cm 望遠鏡の HIDES などで取得した 5 つの透過分光データを使用して、DT 法で各年の λ と b を算出した。また、多色撮像カメラ MuSCAT(岡山 188cm 望遠鏡、2017 年取得)と MuSCAT2(TCS152cm 望遠鏡、2018 年取得)のトランジット測光データから、各年の b の値を求めた。軌道歳差による λ と b の時間変化の理論式を新たに作成し、MCMC 解析をした結果、ϕ の誤差が先行研究よりも約 3 倍小さくなり、精度が向上した。本研究で、λ の精度に近づけることができ、高精度な ϕ で軌道進化が議論できる一歩を踏み出した。

ngVLA による原始惑星系円盤観測の展望

○ 百瀬宗武 [1], 伊王野大介 [2]

[1] 茨城大学理工学研究科, [2] 国立天文台

次世代ミリ波センチ波干渉計 (ngVLA) は，米国国立電波天文台 (NRAO) が立案を主導する大型汎用電波望遠鏡計画である。2028 年に初期科学運用の開始，2034 年に本格科学運用の開始をそれぞれ目指しているが，日本国内でもこの計画の一翼を担うための準備活動を 2019 年度から開始した。ngVLA は波長 0.26 – 25cm において，既存の電波望遠鏡 (JVLA, ALMA) に比べて 1 桁以上高い感度と空間分解能の達成を目指す。本講演では原始惑星系円盤の研究に絞り，ALMA や 2030 年代の系外惑星観測・太陽系科学とのシナジーも含め，科学的意義を議論する。

波長 1mm 以下でのダスト熱放射観測により，ALMA は地球近傍に存在する円盤内部の詳細構造を 10au を切る解像度で明らかにした。この中には，円盤内に潜む惑星の公転運動により作られたとみられる同心円ギャップの発見や，周惑星円盤の候補となるダスト柱密度の極大領域の検出が含まれる。これらは，この波長帯での ALMA の高い能力がなければ得られなかった成果であるが，同時に，いわゆる “filled disk” 内域がこれらの放射に対して光学的に厚くなり，円盤赤道面まで見通した正確な質量分布測定が原理的に不可能である限界も明らかになった (図 1)。さらに円盤ダストは，星間ダストとは異なり，ミリ波・サブミリ波帯で高い散乱効率をもち得ることも，ALMA 偏光観測や SED 詳細解析によって示された。このことから，ダスト特性の完全な把握と物質分布の正確な導出には，より長波長側での情報が不可欠であると考えられる。ngVLA は，岩石惑星が作られる近傍円盤内域の物質分布を見通した撮像を，0.5au 程度の解像度で可能にする。円盤・惑星相互作用に伴う構造の時間変化やダストサイズの決定，さらには水やアンモニアのスノーラインの検出など，ALMA が提示した新たな未開拓領域を解明する決定的役割を果たすと考えられる。

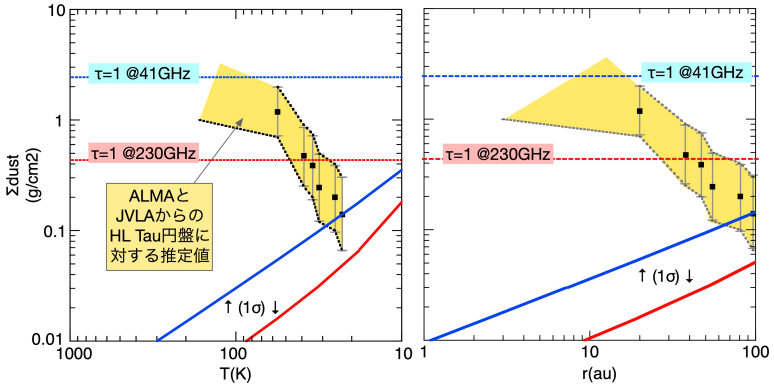


図 1: ALMA, 及び JVLA によるダスト連続波高解像度観測から温度分布 ($T(r)$) を推定した上で求めた HL Tau 円盤のダスト柱密度分布 ($\Sigma_{\rm dust}(r)$)。左は $T(r)$ の関数として，右は r の関数として，示した。また青と赤の実線は，10 ミリ秒角 (mas) のビームで 3 時間観測をしたときの rms レベルを，ngVLA 波長 7mm(41GHz) 観測と ALMA 波長 1.3mm(230GHz) 観測の場合で示した。ただし，ALMA は将来的に基線長が伸びた場合を想定した値である。

次世代電波望遠鏡 ngVLA でスノーラインを観る

◯奥住 聡[1], 百瀬 宗武[2], 片岡 章雅[3]

[1]東京工業大学, [2]茨城大学, [3]国立天文台

原始惑星系円盤において氷の昇華が起こる場所のことをスノーラインと呼ぶ。スノーラインは円盤で形成される天体の組成分布を決定づけるだけでなく、固体天体の素であるダスト粒子の成長にさまざまな影響を及ぼし、場合によって微惑星形成を引き起こす可能性もある (e.g., Saito & Sirono 2011; Schoonenberg & Ormel 2017; Sirono 2011)。スノーラインが円盤内の具体的にどの位置に存在し、その前後でダストがどのように進化するかを確実に理解することは、惑星形成の解明や円盤観測の解釈のために必須の課題である。

本講演では、次世代超大型干渉電波望遠鏡 ngVLA (the Next Generation Very Large Array) を利用して、スノーラインとその前後でのダストの進化を探る方法論を提案する。ngVLAは2030年代の本格稼働を目指して建設が計画されているミリ波・センチ波干渉計である。これを用いれば、スノーラインが存在しうる中心星から数 au以内の円盤領域の赤道面温度分布やダスト面密度分布を捉えることが可能になる。既存の電波干渉計ALMAを用いてより表面に近い部分も撮像すれば、同領域の温度の 2 次元 (動径・鉛直) 構造も復元できる可能性がある。我々は、ngVLAとALMAによるダスト熱放射観測を組み合わせることで、スノーライン付近の円盤温度 2 次元構造とダスト面密度構造を探ることが可能かどうかを調べた。その結果、地球から 100 pc 程度の距離にある円盤であれば、中心星から数 auの位置にあるスノーライン前後の温度構造・面密度構造を解像可能であることを明らかにした。

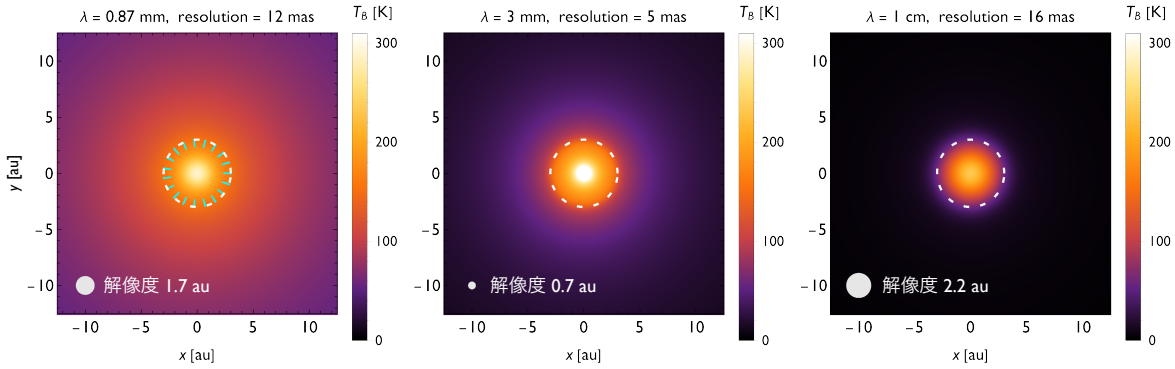


図:　スノーラインの前後でダスト面密度が異なる原始惑星系円盤のダスト放射光強度分布の理論予想。強度は輝度温度換算。円盤の温度は鉛直方向に等温とし、スノーライン (半径 3 au, 昇華温度 160 Kを仮定) の外側から内側に向かってダスト面密度が5倍だけ上昇する (Schoonenberg & Ormel 2017) と仮定している。波長 0.87 mm でのマップ (左パネル) はALMAの空間分解能で、波長 3 mm, 1 cm でのマップ (中央, 右パネル) はngVLAの空間分解能でそれぞれ粗視化してある。白色の破線はモデルにおけるスノーラインの位置 を示し、左パネルの水色の破線は波長 0.87 mm での輝度温度が 160 K と等しくなる位置を示す。0.87 mm での輝度温度分布からスノーラインの位置がわかり、3 mm, 1 mm の輝度温度分布からスノーラインでの面密度変化がわかる。

磁気的に降着する原始惑星系円盤におけるスノーラインの移動：地球型惑星の形成過程への示唆

◯森 昇志[1], 奥住 聡[2], 國友 正信[3], Xuening Bai[4]

[1] 東京大学, [2] 東京工業大学, [3] 久留米大学, [4] 清華大学

太陽系の地球型惑星は水に枯渇した惑星であるため、原始太陽系円盤の水スノーラインの内側で形成したと考えられる。スノーラインは氷の昇華境界であり、その半径より内側では氷は水蒸気として存在する。そのためスノーラインの位置とその時間進化を知ることで、地球型惑星の形成時期と場所を制約することができる。これまでスノーラインの位置は、円盤中の磁場を伴う乱流がガス降着と円盤加熱を駆動するという古典的な円盤モデルの下で研究されてきた。しかし近年の磁気流体シミュレーションを用いた研究によって、原始惑星系円盤のような弱電離環境では磁場が円盤降着を駆動するものの、磁気乱流は抑制されることが分かった。この磁気的に降着する層流円盤における惑星形成はまだ不明な点が多く、スノーラインがどのように進化するのかも未解明である。

本研究ではその磁気的に降着する原始惑星系円盤におけるスノーラインの移動を解明し、地球型惑星の形成過程を制約することを目的とする。これまで我々は、磁気流体力学シミュレーションを用いて、層流円盤ではガス降着時の加熱が著しく抑制されることを明らかにした。今回、我々はその磁気流体力学シミュレーションに基づいた円盤温度モデルを新たに提案し、磁気降着円盤におけるスノーラインの時間進化を示す。形成直後の原始太陽は光度が高いため、スノーラインははじめ遠方にある。しかし原始太陽の光度は時間とともに減少するため、1 Myr 以内には現在の地球軌道を内側に通過することが分かった (図 1)。このことは岩石原始惑星の形成が 1 Myr 以内に完了した、あるいは岩石原始惑星が原始太陽の近傍で形成された後、現在の地球型惑星の軌道まで外に移動したことを示唆する。

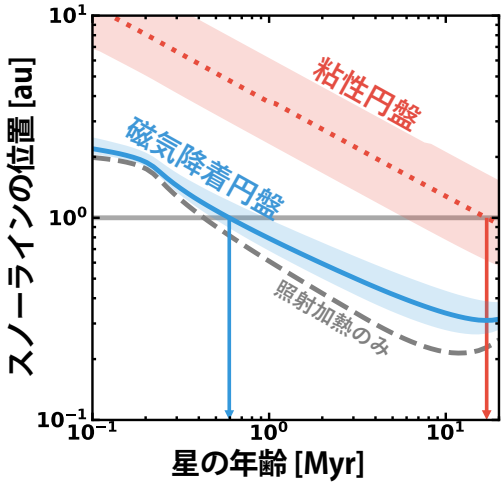


図 1: スノーライン位置の時間進化。赤線は従来の粘性加熱円盤、青線は今回の磁気降着円盤、灰色線は照射加熱のみの場合を表す。影領域で表されているスノーライン位置の不定性は、観測における質量降着率の分散に起因する。

原始惑星系円盤の消失：磁気駆動円盤風と光蒸発の競合

◯ 國友 正信[1]，鈴木 建[2]，犬塚 修一郎[3]

[1] 久留米大学，[2] 東京大学，[3] 名古屋大学

原始惑星系円盤の進化は惑星形成過程の理解にも必須である．従来の円盤進化についての研究では，主に粘性降着と光蒸発が考慮され，観測されている数百万年での円盤散逸を再現出来ると考えられていた．しかし従来のモデルには 2 つの問題点がある．まず，近年，磁気駆動円盤風が円盤進化に及ぼす影響が注目を集めているが，これまで光蒸発と磁気駆動円盤風を同時に考慮した円盤進化計算はなかった．さらに，従来の研究では乱流状態にあり活発に粘性降着する円盤が考慮されてきたが，近年理論的にも観測的にも円盤の乱流は弱いことが示唆されている．そこで本研究では，光蒸発と磁気駆動円盤風の両方を考慮し，特に粘性が小さい円盤に注目し 1 次元シミュレーションを行った．光蒸発については，中心星からの極端紫外線および X 線の照射によるものを考慮した．磁気駆動円盤風の質量損失率については，Suzuki et al. (2016) の磁気流体力学シミュレーションに基づくモデルを採用し，磁気制動の効果も考慮した．初期円盤質量は 0.1 太陽質量，中心星質量は 1 太陽質量を仮定した．結果，磁気駆動円盤風と光蒸発は，それぞれ異なる場所，異なる時期に効果的に働くことがわかった．前者は円盤進化初期に円盤内側で支配的であるのに対し，後者は後期に円盤外側で支配的になる．また円盤寿命は磁気駆動円盤風，光蒸発，粘性降着のすべての物理過程に依存することがわかった．粘性が小さい円盤でも，磁気駆動円盤風および光蒸発を考慮すれば数百万年で散逸することがわかった．

円盤風によって散逸していく原始惑星系円盤における新しいダスト成長メカニズム

◯ 瀧哲朗[1], 桑原 滉[2], 小林浩[3], 鈴木建[2]

[1] 国立天文台, [2] 東京大学, [3] 名古屋大学

惑星系の形成は原始惑星系円盤と呼ばれるガス円盤の内部での固体微粒子（ダスト）のサイズと軌道の進化の過程である．円盤内のダストはそのサイズ成長の途中で，ガスからの抵抗を受けて中心星方向へ落下することが知られている（e.g., Adachi et al, 1976）．進化の初期段階では成長の時間スケールが落下の時間スケールよりも短いため成長が卓越するが，成長に伴い両タイムスケールの差は縮まり，遂には落下が卓越するのでダストは惑星に成長することができない（e.g., Birnstiel et al., 2012）．

惑星形成領域において，このようなダスト進化の時間スケールは古典的な粘性降着円盤のガス進化の時間スケールよりも十分に短いので，従来はダスト進化を考える際には定常なガス円盤を仮定することが多かった．しかし，近年では非理想磁気流体計算と円盤観測の双方の進展により，ガス円盤進化の描像は古典的な乱流起源の粘性降着円盤から変わりつつある．そのため，ダストの進化の描像も再考する必要がある．

本研究では磁気駆動円盤風 (e.g., Suzuki et al., 2010; Bai 2013) と呼ばれるガス散逸機構に注目した．磁気駆動円盤風は，非理想磁気流体計算から示唆されている有力な円盤散逸過程のひとつである．磁気駆動円盤風が優勢なとき，原始惑星系円盤は中心星に近いところから外側に向かって徐々に晴れ上がっていくというような進化をする．

今回は磁気駆動円盤風を考慮した円盤の面密度進化と，円盤中でのダストのサイズおよび軌道の進化を同時に調べた．我々は，このような円盤進化の下では，中心星方向に落下する際のダストの平衡サイズが局所的に上昇することを示した．さらに落下するダストの平衡サイズがある臨界値を超えると不安定的なダスト成長が起こり，ダストは落下を回避して微惑星サイズまで急速に成長できるということを発見した．この臨界値はダスト・ガスの面密度比とガスの動径方向圧力分布の関係として極めて簡明に表現できる．また，このダスト成長メカニズムは，円盤風によって円盤が進化する場合に限らず，より一般的な円盤においても適用可能である．本講演では上記成長メカニズムの紹介に加え，惑星系形成過程とのつながりについても議論したい．

原始惑星系円盤進化の中心星質量への依存性

○中野龍之介[1] 鈴木建[1] 小久保英一郎[2] 荻原正博[2]
[1]東京大学 [2]国立天文台

現在観測が進んでいる多様な系外惑星が、どの様に誕生しさらに進化してきたのかは大きな不確定性要素がある。系外惑星の元となる原始惑星系円盤も赤外観測および電波観測によって詳細な構造が分かって来ているが、観測で分かるのは現時点での惑星の組成および、円盤の構造であり、具体的な円盤進化がどのようなメカニズムによって起きているかは不明な点が多く残っている。惑星系形成および進化を考える上で、初期段階にあたる原始惑星系円盤の時間進化の理解は本質的に重要である。

原始惑星系円盤は固体成分であるダストと気体成分であるガスの二流体が中心星への重力によってケプラー回転する降着円盤だと考えられているが、近年のガス観測(Dent, et al. 2013)による寿命の推定(数 Myr)から単純な粘性降着のみでは説明できないと考えられる。円盤の散逸は中心星からの放射による光蒸発や磁気駆動円盤風に担われるが、これらが時間とともにどの様に寄与し、更に中心星質量の違いにより異なるのかは分かっていない。

本研究では X 線による光蒸発(Owen et al. 2012)と磁気駆動円盤風(Suzuki & Inutsuka I. 2009)を考慮した、原始惑星系円盤のガス成分の動径方向 1 次元のシミュレーションを行い、中心星質量の違いにより円盤進化がどの様に異なるかを調査した。粘性による質量降着、円盤風、光蒸発の効果をそれぞれ考慮したシミュレーションをした上で、散逸機構の組み合わせの中心星質量依存性に着目した。

観測での円盤寿命の傾向と比較するため、エネルギースペクトル分布を求め、その傾きの進化から観測との整合性を確認した。観測と合う組み合わせの場合、中心星質量が大きいほど内側が消失が早くなる事が分かった（図 1)。

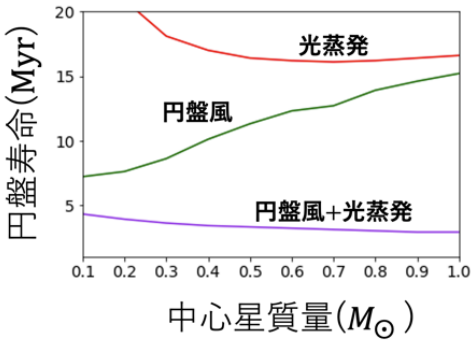


図1:円盤寿命の中心星質量依存性

三次元球殻プログラムによる月内部マントルの対流安定性についての数値実験
Numerical studies of convective stability of lunar mantle convection by three dimensional spherical calculation

〇荷見拓生[1]
〇小河正基[1,2]
〇亀山真典[3,4]

[1]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
[2]東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系自然体系学講座
[3]愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター
[4]愛媛大学理学部地球科学科

本研究では月内部マントル対流の進化についての三次元球殻熱対流計算を行い月の熱進化における対流の効果を再評価する。

[1]導入

従来のジャイアントインパクト説から導かれる高温の初期温度分布を採用した月のマントル進化モデル(e.g..Lanouville.et.al,,2013:Zhang et al,,2015)には、観測結果と比較すると3.8Gaに頃の海の火山活動のピークや初期時代における数km程度の月体積膨張を説明できないという課題が存在する。多くのモデルでは初期時代から対流が発生するため火山活動のピークは4.0Gaより前に存在し、初期膨張はほとんど見られない。こうしたモデルと観測結果の不整合は月内部の熱移動様式について再考する必要があることを示している。

三次元球殻熱対流計算の線形安定性解析と従来のモデルで仮定されている諸パラメーターの値の比較から、これらのモデルでは、対流の効果を過剰に見積もっている可能性が示された。さらにこのモデルで推定される現在の月内部の熱的状態は、Khan(2006)など観測から推定される現在の月の状態と整合的ではない。これらの課題を解決するためには月の進化における対流の効果を再評価しなけれならない。

月面上のカンラン石と斜長石に富む露頭の共存領域のリモートセンシングによる地質的研究

A geological study of co-existence areas of olivine-rich and plagioclase-rich materials on the lunar surface based on remote-sensing data

○山本聡[1], 大竹真紀子[2], 唐牛譲[3], 鹿山雅裕[4], 長岡央[5], 石原吉明[3], 春山純一[3,5]

1) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 2) 会津大学 コンピューター理工学部
3) JAXA 国際宇宙探査センター 4) 東京大学 総合文化研究科 5) JAXA 宇宙科学研究所

月の主要鉱物の一つであるカンラン石に富む場所（カンラン石サイト）は、月面全体において３４箇所で見つかっている[1]。各サイトの大きさは数100m～数km四方の露頭に過ぎず、カンラン石に富む露頭は月表面上では極めて稀有な存在である。殆どのカンラン石サイトは巨大衝突盆地の周囲で見つかることから、衝突盆地形成に伴う月の上部マントル物質の掘削により、これらのカンラン石サイトが形成された可能性が高い[1]。一方、シュレディンガー盆地の中央ピークに位置する約10kmサイズの衝突クレーターやティオフィラスクレーターの中央丘では、カンラン石に富む領域とほぼ斜長石からなる斜長岩（PAN[2]）に富む領域が1～2kmに渡って隣接（共存）していることが観測から分かっている[3,4]。これら共存状態を説明するものとして、いくつかの仮説が提案されている。例えば、衝突盆地形成により上部マントルのカンラン石が掘削および盆地周辺に堆積する過程でPANに富む地殻物質と機械的に混合した説、下部地殻においてカンラン石とPANが共存したものが巨大衝突盆地形成時に掘削された説、地殻とマントル物質が衝突溶融した後、冷却過程における結晶分化で生成した説等が提案されている。いずれの仮説が妥当であるのかを議論する上では、各カンラン石サイトについて共存状態の有無の関する全球分布と、各共存サイトにおける層状関係等の詳細情報が重要な制約要因となる。一方、上記のシュレディンガー盆地とティオフラスクレーター以外では、カンラン石とPANの共存状態についての詳細な調査は行われていないことから、他のカンラン石サイトでどの程度の割合で共存状態が見つかるのか、またその全球分布についてはよく分かっていないのが現状である。そこで本研究では、カンラン石とPANの共存領域について、かぐや/SELENE搭載のマルチバンドイメージャ(MI)を使って、[1]で見つかっているカンラン石サイト周囲の分光学的解析を行い、PAN露頭の有無の調査を行った。本発表では、カンラン石とPANの共存サイトの全球分布と、各共存サイトにおける層状関係等について報告を行い、それを基にカンラン石とPANの共存サイトの起源についての議論を行う。

[1] Yamamoto et al., Nature Geoscience, 3, 533-536, 2010.
[2] Ohtake et al., Nature, 461, 236-240, 2009.
[3] Yamamoto et al., Icarus, 218, 331-344, 2012.
[4] Dhingra et al., GRL, 38, L11201, 2011.

機械学習を用いた新しいクレーター検出手法の開発

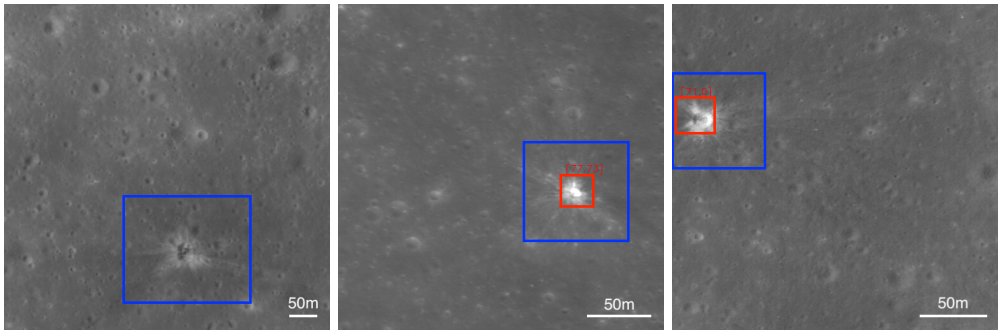
◯ 森川恵海 [1], 小野寺圭祐 [2,3], 山本光生 [4], 田中智 [4]

[1] 東京大学 新領域創成科学研究科 複雑理工学部,[2] 総合研究大学院大学, [3] パリ大学,
[4] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

近年，月への小天体の衝突に伴う発光現象などが定常的に観測されるようになっており，さらに月周回探査衛星による高分解能画像から，その際に生成されたクレータを特定することにも成功している．これにより衝突現象の物理メカニズムやエネルギー分配の理解が進みつつある．また新しいクレータの数やその規模を調べることにより，現在太陽系の物質分布を推定することができるなど科学的意義が大きい．

従来，新しく形成されたクレータを発見するのには，異なる時期に同じ箇所を撮影した月表面の画像のペア (Temporal Pair) を用いて，その差分から新しいクレータを検出する手法が用いられてきた (e.g. Speyerer et al., 2016)．しかし，この手法では捜索対象は Temporal Pair を作ることが可能な時期や範囲に絞られる．本研究では，Temporal Pair を作成することが困難な地域でも新しいクレーターを探索可能にするため，機械学習技術を用いた新しいクレータの検出手法の開発をおこなった．

本研究では，まず従来手法と同様に Temporal Pair を作成して，数年以内に形成された新しいクレータ画像を収集し，それらを教師データとして物体検出アルゴリズムの一種である SSD: Single Shot MultiBox Detector(Liu et al., 2016) を用いて学習させた．検証した結果例を図 1 に示す．(a)(c) は人工クレータ，(b) は自然クレータで比較的最近形成されていることが確認できており，Lunar Reconnaissance Orbiter Camera(LROC) Narrow Angle Camera (NAC) によって撮影された画像である．検出するべき新しいクレータは青枠で，新しいクレータと判断された箇所は赤枠で示されている．Confidence threshold を 0.65 に設定した時，(a) は検出に失敗しているが，(b)(c) は正しく検出された．この時，Precision は 100.0%，Rcall は 66.6%である．



(a) M183689432L　(b) M108971316L　(c) M153014430L

図 1: 新クレーター検出アルゴリズムを用いた解析結果例．図下の番号は LROC NAC の PRODUCT ID を示す．青枠が検出するべき新しいクレータ，赤枠が検出結果を示す

さらに本研究ではアポロミッションの際に月震観測で捉えられた衝突月震に対応するクレータを探索する試みをおこなっている．これらを発見することができれば，インパクトと地震規模の関係を明らかにできるだけでなく震源位置を正確に特定できるため，月の内部構造推定精度の向上も期待できる．過去に推定された比較的大きなイベントの位置情報 (Oberst, 1989) に基づいて適切な NAC 画像を抽出して解析を進めており，本講演ではその結果についても報告する．

月面のクレータ斜面におけるボルダー崩れの成因の検討：舌状衝上断層での月震と斜面上の小クレータ形成による震動の比較

◯池田あやめ[1]・熊谷博之[1]・諸田智克[2]
[1]名古屋大学, [2]東京大学

月の最近の表面活動を理解するうえで地形の崩壊過程やその時間スケールを調べることは重要である. NASA の月周回衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter に搭載されたカメラによって, 0.5 m/pixel の高分解能で月面の地形が詳細に観測され, 舌状衝上断層が全球に分布することや，ボルダーが斜面を転がっているボルダー崩れが見つかった．先行研究（Kumar et al., JGR, 2016; GRL, 2019）では，ボルダー崩れが舌状衝上断層での月震によって発生した可能性が指摘されているが，舌状衝上断層が月震を起こす活断層であるかは不明である．そこで本研究ではボルダー崩れの成因について，斜面周辺で発生する月震だけでなく，斜面上に存在する小クレータ形成時の揺れについても検討を行った．

本研究では， Kumar et al. (2016)により調べられた Schrödinger 盆地のリム南端の領域の一部において，小クレータの分布と斜面のボルダー崩れの様子を調べた．次にクレータ直径とモーメントマグニチュード（M_w）の関係式（Teanby & Wookey, PEPI, 2011）から領域内に存在するクレータ形成時の M_w を推定し，Kanno et al. (BSSA, 2006)による距離減衰式から領域内の加速度の空間分布を推定した．領域内のクレータごとに領域内各点で加速度の空間分布を求め，領域が経験した加速度の最大値とボルダーが崩れ始めた位置との分布を比較した．

領域内の直径 5 m 以上のクレータを用いたクレータ年代学から，斜面は約 3.5 Ma と地質学的に非常に新しい年代が推定された．さらにボルダーが崩れた跡（トレイル）をクレータが切ったものが多数存在することが分かり，これは多くのボルダー崩れが過去 350 万年の中で最近発生したものではないことを示唆している．斜面内に存在するクレータが形成されたときの揺れの加速度の空間分布とボルダートレイルの始点の数を比較したところ，両者には相関係数が 0.68 という比較的高い相関がみられた．一方，斜面近傍にある舌状衝上断層上での月震を仮定した場合, M_w 4–5 クラスで斜面上の加速度が月の重力加速度の 1–2 倍と推定された．このような大きな加速度では斜面で大規模な崩壊が起こると考えられるため，これが斜面の年代である 350 万年前に起こったとすると，より小さな M_w 2–3 の月震でボルダー崩れが発生したことになる．古いボルダー崩れが斜面に存在することからボルダー崩れが頻繁に起こったとは考えにくいため，この規模の月震が 350 万年の間に数回程度発生したことになる．このような小規模で低頻度な月震よりも，ボルダー崩れと相関がみられたクレータ形成時の揺れが，ボルダー崩れの成因を合理的に説明すると考えられる．

「かぐや」スペクトルプロファイラデータによる月極域の水氷探索

Water Ice investigation by using SELENE (Kaguya) Spectral Profiler data

◯大竹真紀子（会津大），田中智（宇宙研），仲内悠祐（宇宙研），
小野寺圭祐（総研大/宇宙研），長岡央（宇宙研）

近年のリモートセンシング手法による複数の観測データから，月極域に水氷が存在することが報告されている．これらの水氷は高緯度ほど濃度が高いとの観測事実から，月面上で低温領域への水分子の輸送による濃集があったと推定され，それら水の起源として主には彗星など衝突天体により供給，または太陽風により水素として供給された外来性の水であると考えられている．ただし，これまでの観測手法では中性子観測による水素量の測定であり，直接水氷を同定できていない，分光観測により水酸基と水との識別ができていない，などそれぞれ課題があり水氷の存在有無については現在も議論が続けられている．

我々はこれまで月周回衛星「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ（SP）による分光観測データを用いて（SP は可視から近赤外波長域において高い S/N を有しており，水氷の探索に適した観測データである）月極域の水氷の探索を行い，成果として複数の領域において明確な水および他の揮発性成分の吸収を同定・報告した．今回は，同定した水の吸収を持つ観測データの月面上での分布位置や水濃度の推定，分布位置と既存の表面温度や永久影領域（長期間太陽光が直達せず，低温環境が保たれる領域）との対比，観測された信号の光源や水吸収の起源推定に関する解析結果について紹介する．特に水の吸収が明確に，かつ多数連続的に同定された領域は南北合わせて 3 箇所あり，これらは永久影領域を含むものの，それ以外の領域にも分布している．このような分布となる原因の１つとして考えられるのは，永久影のような長期的な低温領域だけでなく，その周辺部で日照条件により表層（および表層下の浅部）の温度が真空下での水氷の昇華温度を超える時間帯において，月面に保持された水氷が昇華により放出される機構である(Schorghofer and Aharonson, 2014)．分布領域や信号継続時間など条件から，我々が今回同定した信号は，このような昇華現象に由来する可能性があると考えられる．

月極域探査計画による水資源利用可能性検討

○唐牛譲[1]，石原吉明[1]，野村麗子[1]，金森洋史[1]，白石浩章[1]，大竹真紀子[1, 2]，水野浩靖[1]，
星野健[1]，麻生大[1]
[1]宇宙航空研究開発機構，[2]会津大学

近年行われた複数の月探査機による観測データの解析により、月高緯度領域（極域）に水が、氷（もしくは霜）として存在する可能性が示唆されている。しかしながら、従来の観測データはリモートセンシング手法による（水分子ではなく）水素原子の観測や、衝突物を月面に衝突させて放出された気体を観測したなど、間接的もしくは局所的な情報である。また、近赤外波長域の分光観測においては、水に起因する反射スペクトルの吸収が存在するという報告があるものの、極域では太陽高度が低いために信号強度が弱く、ノイズの影響により吸収の判別が困難である点で、観測上の難易度の高さも指摘されている。さらに、一部のデータの解釈に疑問を持つ報告もされている。これらの理由から、月極域の水の存在有無、また存在した場合にはその量や存在形態（水素/水酸基/水分子等、または吸着水/構造水等の形態）、さらにその垂直・水平分布（濃集層が極表層もしくは地下に存在するか、およびその空間的広がり）、などの観点で、多くの研究者が納得する直接的・確定的な情報は得られていない。

月に外部由来の水が存在しているとすれば、その起源（太陽風プロトンと月面鉱物の酸素原子が反応して生成いるのか、または彗星/小惑星などの天体から持ち込まれたのか）や量から、地球・月近傍への水の供給起源や量の推定に繋がり、太陽系内における水を含む物質の輸送過程や、地球の水の起源を理解する上で、科学的な意義が大きい。一方、もし月極域に本当に水が分布し、かつそれが利用しやすい形で存在するならば、将来の月探査やその先の火星などへの探査を行う上で、燃料資源として利用できる可能性がある。そのような観点から、現在、複数の国において、独自および国際協力・協働によって、月極域の水や揮発性成分の探査を実施する検討が行われている [1]。このような状況を受け、JAXA では現在、月極域探査をインド宇宙研究機関（ISRO）との協働ミッションとして行うことを検討しており、2020 年 1 月に JAXA は月極域探査機プリプロジェクトチームを新設した。

本探査の主目的は、月極域における水の存在有無、また存在した場合に将来の探査において資源としての利用可能性を評価するためのデータを取得することである。水の資源利用可能性を判断するためにひつような観測項目を達成するために、2020 年 2 月に JAXA 月極域探査機プリプロジェクトチームは「月極域探査ミッションのための観測機器提案」を募集した。募集は同年 3 月に締め切られ、応募の総数は 11 件 10 機器であり、大学や民間企業を含む多くからの提案を得た。その後 JAXA 内外の専門家からなる評価委員会による評価・選定が行われ、3 件の提案が選定された。さらに JAXA インハウス検討機器、ISRO、NASA および ESA が開発する機器を組み合わせ、搭載候補観測機器を決定した。報告では，水の資源利用可能性を評価するための水観測方法に関する検討状況、搭載候補観測機器の機能・性能について報告する。

月極域探査 LUPEX に向けた水資源分析計-質量分析部 REIWA-TRITON の開発

齋藤義文（宇宙科学研究所）浅村和史（宇宙科学研究所）横田勝一郎（大阪大学）笠原慧（東京大学）齋藤直昭（産業技術総合研究所）藤原幸雄（産業技術総合研究所）浅川大樹（産業技術総合研究所）西野真木（宇宙科学研究所）柳瀬菜穂（東京大学）　山本直輝（宇宙科学研究所）

月極域に存在する水の分布や量を明らかにし、資源利用可能性の調査を行うことを目的とした月極域探査（LUPEX）のローバーには水資源分析計（REIWA: Resource Investigation Water Analyzer）の搭載が予定されている。水資源分析計は、ローバーに搭載される試料掘削・移送装置で取得された月レゴリス試料を加熱し、発生した揮発性物質の重量を測定する熱重量測定装置と、発生した揮発性物質の化学種や量を測定する質量分析器・微量水分分析計が一体となった分析装置である。この水資源分析計を構成する分析器の一つである質量分析器（TRITON:Triple-reflection Reflectron）は、水分子の量を計測することを主目的とした中性粒子質量分析器である。TRITON は、中性粒子をイオン化するイオン源、イオン化した粒子を加速する加速部、イオンが自由飛行するドリフト部、イオンを電場で反射させるリフレクトロン部とイオンを検出する検出器で構成される TOF 質量分析器であり、加速開始から検出器に至るまでのイオンの飛行時間（TOF：Time Of Flight）を計測することで質量を測定することができる。リソースが限られるローバーに搭載するため、小型軽量と中程度の質量分解能（$m/\Delta m$~120）を両立すべく、TRITON は従来型のリフレクトロンを拡張した 3 回反射型リフレクトロンを採用している。従来型のリフレクトロンは加速されたイオンを分析器内で一往復飛行させたのち検出するが、3 回反射型リフレクトロンではイオンを二往復飛行させてから検出する。これにより、装置のサイズを大きく変えることなく、イオンの飛行距離を増加（倍増）させて質量分解能を上げることができる。現在、TRITON のテストモデルを試作した後、性能試験の結果を基に性能向上のための改良を進めているところである。TRITON のこれまでの開発状況と今後の計画について報告する。

月着陸実証計画 SLIM および月氷探査計画 LUPEX における可視近赤外分光観測の戦略

Strategy for visible and near-infrared spectroscopic observation in Smart Lander for Investigating Moon (SLIM) and Lunar Polar Exploration Mission (LUPEX)

○佐伯和人、MBC 開発チーム、ALIS 開発チーム
（大阪大学理学研究科）

近い将来に JAXA が月に探査機を送る計画として、2022 年度打ち上げ予定の月着陸実証計画 SLIM および 2023 年度以降に打ち上げを目指している日本とインドとの共同計画である月極域探査計画 LUPEX がある。双方に発表者が開発リーダーを務めている可視光・近赤外線を観測する分光カメラが搭載されている。両計画の分光カメラの共通点として、撮像素子が可視光にも近赤外線にも感度があることや、可動ミラーを使って視野を変更するなどがあるが、その物質同定の戦略は大きく異なっている。前者のカメラをマルチバンドカメラ（Multi-Band Camera (MBC)）、後者のカメラをアリス（Advanced Lunar Imaging Spectrometer (ALIS)）と呼ぶ。

MBC が搭載される 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。そして 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、および、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#(=Mg/(Mg+Fe) atomic ratio) の推定である。着陸機周辺にある岩石分布を早急に把握し、少ないデータ量で岩石を構成する鉱物の同定や、カンラン石の化学組成を推定するために、MBC はバンドパスフィルターを切り替えて 10 バンドの画像データを取得する。そして、その離散的なバンドデータをスプライン関数を使って連続スペクトルに変換し、カンラン石の吸収ピーク波長の Mg#の違いによるシフトを検出するという戦略をとっている。複数種の鉱物の混合スペクトルの分析は苦手であるため、光学系を望遠化して単一種鉱物が十分なピクセル数で撮像できるような仕様とした。10 バンドの画像データが取得されると、直ちに吸収ピーク位置の違いを可視化するソフトウェアを準備している。

一方、ALIS はローバに搭載され、月極域で 0.5wt%といった微量な水氷を検出することが使命である。省電力の観点から、永久影領域でも短い照明時間の間に微小な水氷の近赤外吸収ピークを発見せねばならないことから、1 ライン空間領域分の連続スペクトルが 1 ショットで観測できるタイプの分光カメラとし、観測対象領域を、まばらな測線で疎観測した後、水氷が検出された場所に関しては、測線間隔を狭めて密に観測するという運用を想定している。そのために、測線上の水氷の吸収ピーク深さを可視化するソフトウェアを準備している。

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19H01953 の助成を受けたものです。

月面に露出した深成岩の観測のための、焼結人工岩石の鉱物境界面の分光学的性質の研究

○松井俊樹[1]、佐伯和人[1]
[1]大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

２０２２年度打ち上げ予定の月探査機「SLIM」は神酒の海でマントル物質が露出していると考えられる地点にピンポイント着陸し、搭載されたマルチバンドカメラ（ＭＢＣ）でカンラン石を含んだ岩石をその場観測する。可視・近赤外波長領域の分光データ解釈のための現在の光学モデルは、地表がレゴリスで覆われていることを前提としているので、岩石の構成鉱物比や鉱物粒径の見積もりは精度が低い。そこで、ＭＢＣでは高い空間分解能で単一鉱物の場所を分解して化学組成を推定する戦略をとっている。さらに深成岩における鉱物間の境界の光学的性質を明らかにすることで、密に結合した岩石組織に対応した分光データ解析モデルを構築できれば、ＭＢＣが取得した近赤外分光データから岩石の構成鉱物比や鉱物粒径を見積もることができる可能性もある。

一般に、粒子が疎に集まったカンラン石の粉体では、粒子間の空隙で光が散乱されることで粒子内部を通過する光路が生じ 1000nm 付近に吸収ピークを示す。一方で、粒子が密に結合した岩石では透過光路が長くなり赤外吸収が飽和する結果、吸収ピークの観測が困難になる傾向がある。しかし、吸収ピークを示す岩石や岩石内部の場所は確かに存在する。

本研究では、吸収ピークを示す岩石・場所と示さない岩石・場所の間の分光学的な違いを明らかにするために、その違いが鉱物境界面における光の散乱層としての空隙の有無による違いであるという仮定のもとに、２つのカンラン石結晶が結合した２層モデルの反射スペクトルから鉱物境界面に光の散乱層としての空隙が存在するかどうか評価することを目標としている。まず、光学的異方体を２層重ねたモデルについて、光の屈折・反射・吸収シミュレーションを行った。結晶光学の関係式を用いてカンラン石の１層目と２層目それぞれの結晶方位や厚みを考慮して２層モデルにおける反射スペクトルを計算した。そのシミュレーション結果からは、光が十分に吸収されるほど厚い結晶を２層目に採用すると、空隙がある場合はカンラン石特有の吸収スペクトルを示すが、密着している場合は吸収が飽和するということが確認された。また、シミュレーション結果をもとに、外形から結晶方位を推定することができるカンラン石の自形単結晶から結晶方位や厚さを制御して結晶破片を切り出した。そのようにして切り出された結晶を１枚のみの場合と２枚を重ね合わせた場合で近赤外分光観測を行った。その結果、１枚のみで測定された反射スペクトルはシミュレーション結果と同様のスペクトル形状の特徴を示し、２枚重ね合わせた場合の反射スペクトルについても、薄い結晶の方が厚い結晶よりも大きい反射スペクトルとなりシミュレーションと同様の結果を示した。さらに、２枚重ねたカンラン石を焼結させて作った人工岩石や天然岩石の近赤外分光観測データをシミュレーション結果と比較する作業を続けている。

月極域氷探査に向けた、粒径と種類が異なる鉱物粉体に付着した氷の近赤外スペクトルによる定量

Quantitative evaluation of minute ice attached to mineral powders with different diameters and types using NIR spectra for Lunar polar ice exploration mission.

○荒木亮太郎[1], 佐伯和人[1]
[1]大阪大学 理学研究科

1990 年代末に Lunar Prospector が月面の極域に水素の農集を確認して（Feldman et al., 1998）以降、さまざまなアプローチで月面に水氷が存在する可能性が指摘されてきた。Li et al. (2018）の研究では、Chandrayaan-1 の近赤外分光観測結果と Lunar Reconnaissance Orbiter が計測した表面温度の分布などの情報から、月極域の表面に水氷が分布している可能性が示唆された。しかし、水氷の具体的な分布形態や量についてはまだ不明点が多いため、宇宙航空研究開発機構（JAXA）とインド宇宙研究機関（ISRO）は合同で月極域の水資源探査を行うことを決定した。この探査計画においては、我々を含む ALIS グループが提案した近赤外分光手法を用いて水氷をその場観測する装置がローバ搭載機器として採択されている。

この探査のために、我々は実験室で月レゴリスを模した粉体に水氷を微量着氷させる装置を開発した。これは月極域の永久影に水分子がコールドトラップされて氷粒として分布していることを想定したものである。この装置を用いて着氷した鉱物粉体に対し、開発した近赤外分光装置（LPSC, 2019）で波長範囲 850 nm～1650 nm の範囲にて近赤外分光観測を行った。波長 1500 nm 付近に現れる水分子の吸収ピークの吸収深さを定量的に計測することで、より正確に鉱物試料の着氷率を推測することを目指した。

これまでは装置を用いて粒径 125～250 um のかんらん石および斜長石粉体の着氷スペクトル（2019 年惑星科学会）、および粒径 75～125 um と 180～250 um のかんらん石粉体の着氷スペクトルの比較（2020 年日本地球惑星連合大会）を行っている。今回の発表では、種類（かんらん石および斜長石）と粒径（75～125 um および 180～250 um）を変化させた 4 通りの鉱物粉体を対象に比較し、微量着氷の吸収スペクトルについて挙動の違いを観測した。また、Hapke（1993）の粉体スペクトルモデルを用いて、かんらん石あるいは斜長石の粉体（粒径 100 um ないし 200 um）と水氷粉体（粒径 10 um）を～数 wt% 混合させた場合に予想されるスペクトルを計算した。着氷鉱物試料スペクトルについて、実験で得られた値およびモデルで得られた計算値を比較した。

結果、機器の SNR に対する水氷の検出限界量は、かんらん石より斜長石の方が、また同じ鉱物であれば粒径が大きいほど、より微量の水氷を検出することが可能であることが確認された。

陸惑星におけるハビタブルゾーン

○小玉 貴則[1,2], 玄田 英典[3], 阿部 彩子[4]
[1]ボルドー大学,[2]東京大学先進科学研究機構,[3]東京工業大学 ELSI,[4]東京大学大気海洋研究所

これまで数多くの系外惑星が検出され、その中には海洋を保持する可能性のある地球型惑星(ハビタブル惑星)も含まれている。多くの先行研究では、ハビタブルゾーンの境界を決めることを目的に、気候検討されてきた。ハビタブルゾーンとは、液体の水が惑星表面に安定に維持できる恒星からの軌道距離である。ハビタブルゾーンの内側境界は、暴走温室効果が発生する中心星放射(暴走温室限界)で定義され、外側境界は、全球凍結状態に陥るときの中心星放射(完全凍結限界)で定義されている。

Kodama et al.(2019)にて、惑星表面の水分布が暴走温室限界に大きく影響することがわかった。保持する水量の少ない陸惑星は、雲・雪分布が狭く、惑星アルベドが低いため、同じ中心星放射の場合でも、海惑星に比べ温暖な環境を維持することができる特徴を持っている[Abe et al., 2011]。よって、我々は、3 次元大気大循環モデル(AGCM5.4g)を用いて、表層水分布が完全凍結限界に与える影響を系統的に検討した。地球サイズの惑星に対して、３種類の水分布を仮定した:1)東西均一、2)南北均一、3)地球・火星・金星地形を考慮した水分布。また、背景大気は地球大気　　1bar を仮定し、簡単のため、自転軸傾斜は 0 度で、円軌道を仮定し、季節変化を除いた。

先行研究の結果と本研究の結果より、陸惑星のハビタブルゾーンと水分布の関係を明らかにした。完全凍結限界は約 90% S_0(海惑星の値)から約 77% S_0(陸惑星の値)まで、水分布の減少に伴い連続的に変化することがわかった。ここで、S_0 は、現在の地球が受け取っている中心星放射である。先行研究の結果から、暴走温室限界も約 130%S_0(海惑星)から約 180%S_0(陸惑星)まで変化し、ハドレー循環によって気候の境界が決まっていたが、完全凍結限界においては、明確な海惑星と陸惑星の気候境界が見られなかった。我々の結果は、ハビタブルゾーンの境界は中心星光度だけに依存する恒常的な境界ではなく、惑星の表層環境により大きく変化しうることを示している。

“詳細な円盤化学進化計算を初期条件としたホットジュピター大気の平衡化学構造”

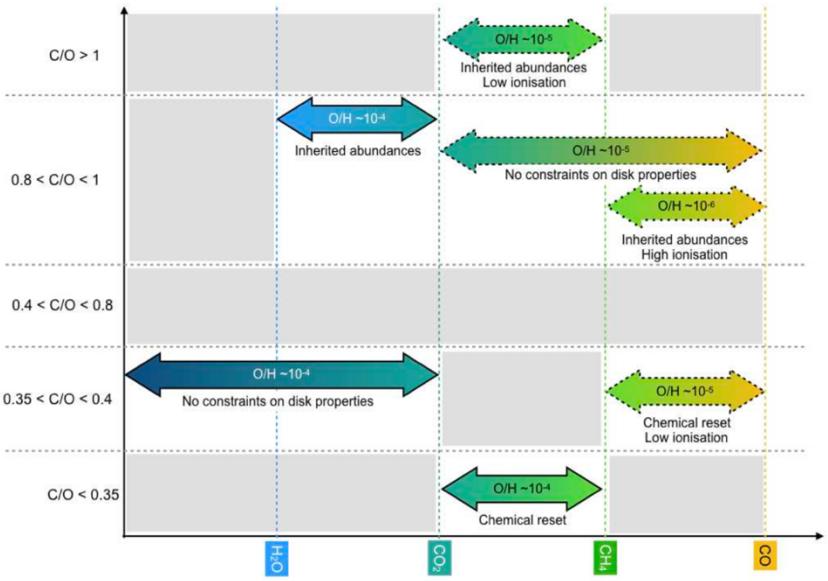
“The composition of hot Jupiter atmospheres assembled within chemically evolved protoplanetary disks”

○野津 翔太 (Shota Notsu)[1], 野村 英子 (Hideko Nomura)[2], Christian Eistrup[3], Catherine Walsh[4]

[1] 理化学研究所 坂井星・惑星形成研究室 (Star and Planet Formation Laboratory, RIKEN), [2] 国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan), [3] University of Virginia, USA, [4] University of Leeds, UK

惑星大気の元素組成は、大気形成時の原始惑星系円盤ガス元素組成を反映すると考えられる。円盤ガス中の炭素–酸素元素組成比(C/O 比)は、H_2O などの主要な分子種のスノーライン(雪線)前後で値が大きく変化する。その為円盤内とホットジュピター(短周期巨大ガス惑星)などの大気の C/O 比の比較を通じ、惑星大気獲得・移動の過程に制限を与える研究がなされてきた。一方で近年の詳細な円盤化学進化計算の結果(Eistrup, C., et al. 2016, A&A, 595, A83)によると、スノーラインの影響に加え円盤内の電離状態や初期化学組成等を変えた場合にも、円盤内の C/O 比分布が大きく変化する事が示されている。

本研究では太陽系外巨大ガス惑星の大気化学構造と惑星形成環境の関係をより詳細に探る事を目的とし、Eistrup et al. (2016)で得られた円盤内元素組成分布の結果を初期条件としてホットジュピター大気の化学平衡計算を行い、円盤の詳細な化学進化過程がガス惑星大気の分子組成分布に及ぼす影響を調べた。(Notsu, S., et al. 2020, MNRAS, in press., arXiv:2009.09444) その結果、まず先行研究と同様、C/O 比増加と共にホットジュピター大気下部で CH_4 の組成が、大気上部で C_2H_2 や HCN の組成が増加する一方、H_2O などの組成は減少することなどが示された。また惑星大気中の C/O 比が 1 を超えるホットジュピターは、CO_2 スノーラインと CH_4 スノーラインの間でのみ形成可能であることが分かった。さらにそれらのホットジュピターの形成は、炭化水素に富んだ氷のペブル降着に伴うガス供給の有無などに関わらず、電離度が小さくまた初期化学組成として分子雲の組成を保持している円盤内のみに限られると考えられる。講演では、円盤内化学進化の程度や惑星形成領域の制限が可能と考えられるホットジュピター大気の C/O 比・元素組成比の組み合わせ (下図参照) についても議論する。



図：円盤化学進化モデルの元でホットジュピター大気が保持しうる C/O 比、O/H 比の組み合わせ。各矢印の位置・矢印下の説明は、それぞれ円盤内の惑星形成領域(スノーラインが指標)・及び化学進化の程度との関係を示す。(Notsu, S., et al. 2020, MNRAS, in press., arXiv:2009.09444 より引用)

The possibility of O_2-dominated Atmosphere Formation under High EUV Flux on Early Mars

初期火星の高 EUV 放射下における酸素大気の形成可能性

○小山俊吾 [1], 寺田直樹 [1], 寺田香織 [1], 中川広務 [1], 黒田剛史 [1], 小河正基 [2]

1.東北大学

2.東京大学

Abstract:

Atmospheric redox states are strongly related to habitable environments on early Mars. Meanwhile reducing atmospheres are suitable for prebiotic organic synthesis, oxidizing atmospheres are preferred for availability of redox disequilibrium energy for life (e.g., Russell et al., 2014). Thus, the atmospheric redox and its time evolution on early Mars are fundamental in astrobiology.

Atmospheric escapes of H, O and C play an important role in determining the redox states. The solar Extreme Ultraviolet (EUV) flux associated with the magnetic activity in the solar upper atmosphere has diminished over time (Ribas et al., 2005). The thermal escape of C with high EUV could have made a great impact on the atmospheric composition at ~ 4 Ga (Tian et al., 2009). The volcanic outgassing could have also modified the atmospheric composition at the early stage of the Martian history (e.g. Batalha et al., 2015; Sholes et al., 2017). It is suggested that volcanic eruptions were highly episodic on early Mars (Carr & Head 2010; Ogawa & Yanagisawa, 2012). The volcanic activity was the most efficient in the pre-Noachian (up to 4.1 Ga) and ceased around 3.5-2 Ga (Grott et al., 2011). The Martian upper mantle is thought to have an oxygen fugacity, fO_2, lower than Earth's, near IW+1 (Grott et al., 2011). Therefore, a large amount of reduced gases, such as H_2 and CO, is thought to be outgassed on early Mars (Batalha et al. 2015).

Here we investigate the effect of H, O, and C thermal escapes under the strong EUV and volcanic outgassing on atmospheric compositions of early Mars. We use a 1D time-dependent photochemical model to calculate time variation of atmospheric composition (redox states).

We find that volcanic outgassing rate may play an important role in forming the highly oxidized atmosphere under the strong EUV. H escape flux alternatively decreases in the condition that C escape rate is fast. It implies that C escape would help to reduce water loss from the planet under the strong EUV flux. Episodic volcanic outgassing of H_2 and CO is also considered in thick and thin CO_2 atmospheres. In the assumption that a short-term H_2 outgassing occurs in a 1-bar CO_2 atmosphere, a mixing ratio of > a few percentages is maintained for ~10^5 years. In a thin CO_2 atmosphere similar to the present-day Mars, the H_2 episodic outgassing generates a fluctuation of atmospheric redox states between oxidizing and reducing. The possibility of O_2-dominated atmosphere will also be discussed. Finally, we discuss the implication to the habitability of early Mars in terms of the time variation of the atmospheric redox states.

天体衝突に伴う水素大気散逸率における惑星大気量依存性

◯ 黒崎健二[1]，犬塚修一郎[1]

[1] 名古屋大学

現在観測された系外惑星の中には地球質量の数倍から数十倍程度ある一方で，惑星半径が地球半径よりも大きな天体も多く確認されている．これら惑星半径が大きな天体は惑星大気を多く持っている天体であることを示唆し，その大気量は惑星質量の 1 %から 30 %程度と多様性に富んでいることがわかっている．このような惑星大気量の多様性は原始惑星系円盤内における形成過程での大気獲得量の違いによるものだけでなく，円盤が消失したあとの形成後期過程における衝突合体や惑星の進化プロセスにも影響を受けている．惑星形成過程の後期段階において，惑星の衝突合体は必ず発生する現象である．このとき，天体が原始惑星系円盤由来の大気を持っていた場合，天体衝突に伴いその原始大気を失うことが予想される．

本研究では大気を持った惑星に対する衝突計算に伴う水素大気損失量を定量的に評価するために，天体衝突現象の Smoothed Particle Hydrodynamics 法による数値流体計算を行った．ターゲット天体の大気量は 10-30 %とし，インパクターの大気量も 0-30 %として衝突における大気量や衝突天体との質量比に主に注目した．衝突速度は脱出速度の 3 倍以下で正面衝突のみ計算した．

計算の結果，衝突に伴う大気流出の傾向には大きく分けて二種類の傾向が存在することがわかった．ターゲットとインパクターの質量比に差がある場合は衝突点付近からしか大気は流出しなかったが，衝突天体の質量比が近く大規模に大気を流出する場合は衝突点と反対側からも水素大気が流出することが確認できた．このとき大気の流出が大規模な状況においても，岩石成分の流出量は 1 %程度であり，衝突によるエネルギーの大部分はまず大気の流出に使われる．このとき，水素大気量が多いほど全て流出させるのに必要な運動エネルギーが多いため衝突エネルギーが同程度であれば大気量が多いほど流出量の割合は少なくなっている．衝突エネルギーと大気流出量の相関からスケール則を求めてみると，大規模な大気流出と小規模な大気流出の場合で冪乗が変化することが示唆された．ここで衝突エネルギーを大気の流出に必要なエネルギーで規格化することにより，ターゲットおよびインパクターの水素大気量によらず同様なスケール則の傾向を持っていることがわかった．本研究の成果は，天体衝突における大気流出の物理的な理解の解明だけでなく，惑星形成過程においての大気流出をモデル化し，惑星の合体成長を通して大気がどれだけ維持されるかを議論する上で有益である．

初期金星における大気散逸と元素分配
Atmospheric escape and element partitioning on early Venus

○櫻庭 遥[1], 黒川 宏之[2]
[1]東京工業大学 地球惑星科学系, [2]東京工業大学 地球生命研究所 (ELSI)

現在の金星には海はなく灼熱乾燥の世界が広がっていることが知られているが、初期金星の表層環境については議論が分かれている。地球よりも太陽に近い軌道を廻る金星は強い放射を受けて形成当初から暴走温室状態にあり、厚い水蒸気大気から水が散逸していったというシナリオが提唱されている [e.g., Hamano et al., 2013, Goldblatt et al., 2013] 一方、金星も過去には海洋を伴うハビタブル環境を経験したのではないかという主張もある [e.g., Way & Del Genio, 2020]。惑星サイズなど地球と類似点の多い金星のような惑星がハビタブル環境を保持し得たのかどうかを明らかにすることは金星の形成進化過程の理解を深めるだけではなく、今後のハビタブル系外地球型惑星探索においても非常に重要な課題である。

惑星の表層環境を特徴づける大気や海洋の主要構成成分である揮発性元素の集積・分配過程に着目する。惑星材料天体に含まれる揮発性元素は集積後、脱ガスして大気を形成する他、マグマオーシャンへの溶融とメタル–シリケイト分配、太陽放射および衝突に伴う大気散逸、表層での元素循環等の過程を経て惑星内部および表層へ分配される。惑星は受ける放射量などの違いによって異なる表層環境の進化をたどる。それによって経験する元素分配の描像も惑星ごとに異なると考えられる。例えば、暴走温室状態にある惑星ではマグマオーシャンが厚い水蒸気大気に覆われ長く保持される。一方、海洋が形成されたハビタブル環境にある惑星では表層に水や炭素が固定される。本研究では暴走温室状態とハビタブル環境にある地球型惑星がそれぞれ惑星集積中にどのような元素分配を経験するのかを調べ、現在分かっている金星大気の情報から初期表層環境や金星形成シナリオへ制約を与えることを目指す。

計算には地球型惑星集積中のコア形成と衝突および太陽放射による大気散逸を考慮した元素分配モデルを用いる。暴走温室状態・ハビタブル環境それぞれの表層環境下で大気や惑星内部へ分配される主要揮発性元素量を見積もった。炭素と窒素の相対量に着目したところ、金星の低い C/N 比を説明するためには初期金星表層は暴走温室状態だったことを示唆する結果が得られた。発表ではマグマオーシャンの寿命や円盤ガスが散逸するタイミングなどに着目し金星形成シナリオについて議論したい。

一酸化炭素に富んだ大気を持つ地球型惑星の表層環境

Surface environments of terrestrial planets with CO-rich atmospheres

◯青木紘介[1], 黒川宏之[2], 藤井友香[3]

1. 東京工業大学 , 2. 東京工業大学 地球生命研究所 , 3. 国立天文台

地球型惑星の表層環境は、生命の誕生・居住可能性を左右する。惑星の大気組成は表面温度を決定するとともに、水素の大気散逸を通じて表層水の保持にも影響を及ぼす。昨今の地球化学的研究から、初期地球マントルは還元的 (e.g. Aulbach and Stagno 2016) であり、大気中には CO が豊富に存在していた可能性が示唆されている (Endo et al. 2016)。また、現在でも CO に富んだ大気を持つ系外地球型惑星が存在するかもしれない。しかしながら、CO に富んだ大気が表面温度や水素散逸に及ぼす影響はよくわかっていない。

本研究では、大気中の CO の存在が、地球をはじめとする地球型惑星の表層環境にどのような影響を及ぼすかを明らかにすべく研究を行った。様々な CO2, CO 分圧に対し大気の放射対流平衡計算を実行することで表面温度・水混合比を求めた。計算には大気構造・光化学計算コード Atmos の大気構造計算モジュールである CLIMA (Kasting et al. 1984) を改変して使用した。水素散逸はエネルギー律速または拡散律速によって決定されると仮定し、後者の場合は大気構造計算によって得られた成層圏 H2O 混合比から散逸率を見積もった。

放射対流平衡計算を行った結果、CO2 分圧が 1bar 未満では CO が多い大気ほど表面温度は低くなった。これは、CO が増えることで惑星のアルベドが上昇するためである。一方、CO2 分圧が 1bar 以上では CO が多いほど表面温度が上昇することがわかった。これは、全圧が上昇することで CO2 の温室効果が促進されるため（pressure broadening）である。また、講演では CO 自身のオパシティの効果についても紹介する予定である。また、CO の存在は成層圏 H2O 混合比を低下させるため、水素散逸率を下げることで表層水を維持する効果があることも明らかになった。

地球は現在に至るまでの約 40 億年間、表面に海洋が存在していたことがわかっている。このことは、地球の平均表面温度が 0 ℃以上であったことを示唆する。この条件と本計算の結果を比較することで、過去の地球の大気組成を議論する。

全球非静力学火星大気大循環モデルによる鉛直対流とダスト巻き上げ輸送の計算

◯樫村 博基[1]・八代 尚[2]・西澤 誠也[3]・富田 浩文[3]・小郷原一智[4]
黒田剛史[5]・中島 健介[6]・石渡 正樹[7]・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] 京都産業大学
[5] 東北大学, [6] 九州大学, [7] 北海道大学

火星では、小規模なダストデビル (塵旋風) から、全球を覆うグローバルダストストームに至るまで、大小様々な規模の大気現象がダストによって可視化されているが、これらの相互の位置づけはよく理解されていない。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や大気へのダスト供給における鉛直対流の役割は解明されていない。

我々は、観測されている水平数 km 規模の鉛直対流を全球的に再現し、その気象・気候学的役割を調べるために、非静力学全球火星大気モデルを開発している。開発は、正二十面体準一様格子上で 3 次元運動方程式を有限体積法で解く力学コア「SCALE-GM」に、既存の汎惑星大気大循環モデル「DCPAM」の火星大気物理モジュールを移植する形で進めてきた。これまでに火星大気放射や地表面過程を導入し、全球で水平格子間隔 1.9 km の高解像度計算を実現した。

現在、これにダストの巻き上げパラメタリゼーションとダストの重力沈降過程を導入して、ダストの巻き上げ・輸送・沈降過程を計算できるように開発を進めている。図 1 はダストの上方輸送に対する鉛直対流の寄与と解像度による違いを調べるために、地表付近に一定量のダストを配置した実験の結果である。解像度による大きな差が見られる。発表ではこれらの差異が生じた原因などを議論したい。

謝辞：本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」及びポスト「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。数値計算には、HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp160254、hp170225、hp180199、hp190170、hp120286）のもと、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」及び「富岳」、最先端共同 HPC 基盤施設の Oakforest-PACS、九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システム（ITO）を使用しました。

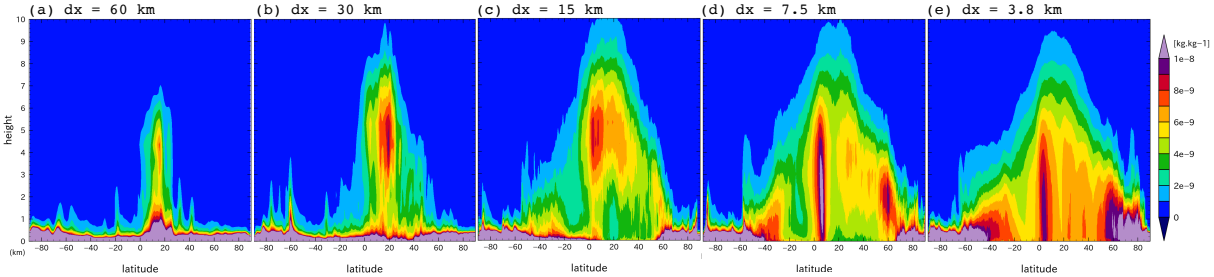


図 1: 鉛直対流によるダスト上方輸送の解像度依存性。北半球の春分における等温静止大気から 30 日間のスピンアップ計算の後、大気最下層（高度約 3 m）に水平一様に混合比 10^{-5} [kg kg^{-1}] の光学不活性なダストを配置して計算を実施。その 1 日後の混合比の東西平均子午面分布。ただし、ダストの地面からの巻き上げ過程は含まない計算である。水平格子間隔 dx = (a) 60 km、(b) 30 km、(c) 15 km、(d) 7.5 km、(e) 3.8 km の場合。

星雲ガス中で集積する岩石惑星の希ガス同位体比

○齊藤 大晶[1], 馬上 謙一[1], 山本 順司[2], 倉本 圭[1]
[1]北大 理, [2]北大 総合博物館

現在, 地球表層の D/H 比, $^{20}Ne/^{22}Ne$ 比の典型的な値はそれぞれ ~1.6×10^{-4}, ~9.8 である. 一方, 地球深部マントル由来と思われる火成岩サンプルの一部から, 原始太陽系星雲ガスの取り込みを示唆する D/H 比 (~1.2×10^{-4}) および $^{20}Ne/^{22}Ne$ 比 (~13.8) が報告されている (e.g., Hallis et al., 2015; Harrison et al., 1999). これを説明するシナリオの 1 つに, 星雲ガス中で惑星が集積する際に星雲ガスが取り込まれた可能性が指摘されている. 我々はこれまでに火星隕石の年代学が示唆する原始惑星の急速な集積成長の可能性に着目し, 大気上層に星雲ガス成分, 下層に微惑星衝突由来の脱ガス成分が占める混成型原始大気が形成する可能性を提示した (Saito & Kuramoto, 2018). 惑星質量が火星程度までは混成型原始大気が維持されるものの, 成長が進行するにつれ星雲ガスを重力的に束縛する量が増えることで大気全体が光学的に厚くなることから, 星雲ガス大気層内で対流が起きるようになる. つまり上層の星雲ガス成分と下層を占める脱ガス成分が互いに混合し始める (Saito & Kuramoto, 2020). 惑星材料物質中の揮発性成分濃度が 0.1 wt% (地球海洋質量に相当) 以上あれば, 対流混合が起き, D/H 比が星雲ガスを取り込む可能性があることはわかったが, $^{20}Ne/^{22}Ne$ 比がどの程度変化し得るかについては未解析である. また, 原始惑星の形成位置により原始惑星系円盤の温度・圧力は異なるが, これまで火星軌道付近の場合のみしか考慮しておらず, 形成位置の違いにより原始大気構造がどう変化するかについては未知である.

そこで本研究では, 星雲ガス中で集積する際に形成する原始大気構造の惑星質量・円盤温度・圧力依存性について調べた. 具体的には, 均質集積を仮定し, 炭素質コンドライト様の H/C 比を惑星材料物質に与え, 衝突時の高温高圧下における金属相と酸化鉄成分との化学平衡で決まる気体組成を脱ガス成分の組成として与えた. また, 集積時間には隕石年代学と矛盾のない 1.5 – 5 Myr, 揮発性成分濃度はパラメタとして与えた. 集積熱で支えられる原始大気の熱的構造を解析し, 様々な条件下での対流圏界面の位置を決定し, 両成分の混合大気質量を求めることで D/H 比, $^{20}Ne/^{22}Ne$ 比を評価した. 全体の傾向として, 円盤温度が高温, もしくは集積時間が短いほど, 混成型原始大気構造が保持されやすいことがわかった. つまり, 対流混合は起きず, 材料物質由来の同位体比を保持する可能性があることを意味する. これは, 大気全体が高温になることにより, 脱ガス成分が主成分の下層大気が膨張し, 大気全体を占める脱ガス成分の割合が大きくなるためであると理解できる. 結果の一部として, 地球軌道付近に相当する円盤温度・圧力, 集積時間に 3 Myr, 材料物質中に 0.1 wt% の揮発性成分を与えた場合, 火星質量の 1.5 倍程度に達した時点で, 火山岩試料が示す D/H 比に近い値 (~1.0×10^{-4}) をもつようになる. また, $^{20}Ne/^{22}Ne$ 比は星雲ガスの値にほぼ等しい ~13.8 となることがわかった. 星雲ガスの取り込みを示唆する岩石学的証拠と矛盾しない結果が得られた.

ダスト衝突成長過程が駆動する原始惑星系円盤の不安定性

◯ 冨永遼佑 [1]，犬塚修一郎 [1]，小林浩 [1]

[1] 名古屋大学理学研究科

未解明である微惑星形成を探る上で，原始惑星系円盤の動力学とダストの成長過程を包括的に理解することが本質的に重要である．これまで微惑星形成過程を説明する理論として，高空隙ダストの付着合体 (e.g., Okuzumi et al. 2012) や円盤で起こるダスト-ガス不安定性 (e.g., Youdin & Goodman 2005; Youdin 2005) が考えられてきた．前者は円盤内側ほど短い時間スケールで起こり，後者は成長条件を満たせば外側でも Kepler 周期の数十倍程度で成長できる．特に太陽系外縁天体など外側の微惑星・小天体は後者の不安定性で形成され得ることが議論されている (e.g., Nesvorný et al. 2019)．

これまでに提案されたダスト-ガス不安定性は，大きいダストが多い環境で起こることがわかっている．例えばストリーミング不安定性 (Youdin & Goodman 2005) は，Kepler 角速度で規格化したダストの制動時間 $t_{\rm stop}\Omega$ が 0.1 のダストに対してダスト-ガス面密度比が 0.02 以上でなければならない (e.g., Carrera et al. 2015; Yang et al. 2017)．これは最小質量円盤のガス面密度に対して，数 mm から数 cm 程度のダストの面密度が数%となる環境に相当する．永年重力不安定性の場合には乱流強度等のパラメータにも依存するものの，やはり $t_{\rm stop}\Omega$ が 0.1 以上のダストがガスに対して数%以上の面密度を持っている状況が好ましい (Takahashi & Inutsuka 2014; Tominaga et al. 2019)．ところが，サブミクロンサイズから起こるダスト合体成長を考えた場合，$t_{\rm stop}\Omega$ が 0.1 になるダストは円盤内側に向かって落下するため枯渇し，ダスト-ガス比が 0.1%のオーダーまで減少してしまうことがわかっている (e.g., Brauer et al. 2008)．つまり円盤内でダスト-ガス不安定性が起こるためには，枯渇しつつある大きいダストを再集積する必要がある．

本研究では，上記の再集積機構となり得る円盤の新しい不安定性を提唱する．本研究で提唱する不安定性はダストの合体成長自体が駆動する現象であり，ダスト成長を含まない従来のダスト-ガス不安定性とは全く異なる．質量を担うダストのサイズ成長方程式をもとに線形解析を行った結果，今回の不安定性は短波長ほど不安定であり，ダスト成長時間よりも十倍以上短い時間で成長し得ることがわかった．ダストの乱流拡散による安定化を考慮した場合，乱流強度 α (Shakura & Sunyaev 1973) が 10^{-4} 程度であれば，ダスト-ガス比が 0.1%程度であっても Kepler 周期の数十倍程度の時間で成長できる．またこの不安定性は，ガススケールハイト程度の幅で局所的にダストを濃集する作用があり，非摂動状態で 0.1%程度だったダストガス比を非線形成長を通して数%まで上げることができる．つまり初期の合体成長過程と従来のダスト-ガス不安定性による微惑星形成の橋渡しとなる重要な現象である．

原始惑星系円盤における 鉛直シア不安定性とダストの共進化

◯ 福原優弥 [1], 奥住聡 [1], 小野智弘 [1]

[1] 東京工業大学

原始惑星系円盤にどの程度の強さの乱流が存在しうるのかを明らかにすることは、円盤理論モデルの構築や円盤観測の解釈を行う上で重要な課題である。近年では円盤乱流の駆動源としていくつかの流体不安定性が注目されており、そのうちの 1 つが鉛直シア不安定性 (Vertical Shear Instability: VSI) と呼ばれるものである。VSI は円盤内の角速度の鉛直勾配が引き起こす不安定性 (Urpin & Brandenburg 1998) であり、ダストを強く巻き上げるような乱流を駆動する (Flock et al. 2017, 2020)。したがって VSI は、円盤のダスト分布や微惑星形成に大きな影響を与えると考えられる。また、この不安定性は特に光学的に薄い円盤の外側の領域に現れやすく、ALMA などによる円盤ダストの撮像観測の解釈 (e.g., Pinte et al. 2016) において重要となることが期待される。

本研究では、VSI に対してダストが与える役割に注目し、ダストと VSI がどのように共進化しうるかを調べた。VSI が不安定化するには、冷却の時間スケールが円盤の回転周期に比べて短いことが必要である。円盤の冷却は主にダストが担い、ダスト密度やオパシティの低下は冷却時間の増加を引き起こす。そこで我々は、円盤の冷却時間をダストの最大サイズとダストの鉛直分布を決めるガスの鉛直拡散係数をパラメータとし、ダストの成長・沈殿に応じて VSI の作用する領域とそこでの VSI の成長率がどのように変化するかを、線形解析 (Nelson et al. 2013) に基づいて推定した。

その結果、ダストの成長・沈殿が進行すると、円盤の表面に近い領域での冷却時間が円盤の回転周期を超え、その領域で VSI が安定化することを明らかにした。これは、ダストが成長・沈殿することにより、ダスト密度が低下し冷却時間が増加したことに起因する。また、ダストの成長・沈殿が進むと成長率が小さくなることを示した。このことは、円盤の主要な乱流駆動メカニズムが VSI であるとすると、ダストが成長・沈殿するにつれ円盤の乱流が弱くなる可能性を示唆する。一般に乱流がダストの合体成長の阻害要因であることを踏まえると、ダストと乱流の共進化はダストの成長を促進する方向に作用すると考えられる。

移動する惑星に追随するガス圧バンプにおける微惑星形成
Planetesimal formation at the gas pressure bump following a migrating planet

○芝池諭人 [1], Yann Alibert[1]
1.ベルン大学

微惑星落下問題を回避する多くのシナリオがこれまでに提案されてきたが、これらは基本的に円盤の特定の場所でしか微惑星を作ることができない。一方で、ポピュレーションシンセシスの多くのモデルでは、微惑星が幅広い領域に隙間なく分布することが仮定されている。そこで、我々は円盤に幅広く微惑星を形成できる新たなシナリオを提案する。すなわち、例えばペブル集積などにより形成された惑星が一つでもあれば、その惑星が作るガス圧バンプで微惑星が形成され、さらにその形成領域が惑星の移動とともに円盤内側に拡大する。我々は、１次元のシンプルなラグランジアン粒子計算モデルを用いて、移動する惑星により構造の変化したガス円盤において、ドリフトと拡散によって決まるペブルの動径方向分布を計算した。そして、円盤赤道面でのペブル/ガス密度比が１を超え、ストリーミング不安定により微惑星ができるか検証した。この時、ペブルのストークス数を簡単のため固定した上で、ガス円盤モデル、ペブルフラックス、惑星の移動速度、そして乱流の強さなどをパラメーターとして変化させた。結果、十分な量のペブルフラックスがあり、かつ乱流がそれほど強くない場合には、円盤の広い範囲で隙間なく微惑星が形成されるとわかった。形成される微惑星の面密度は、ペブルフラックスと惑星の移動速度に依存した。また、微惑星の総質量と形成される領域は、ペブルフラックスに強く依存した。そして、形成される微惑星の面密度分布とその傾きを、とても簡単な式で推定できることを発見した。このように、我々の新たなシナリオは、円盤の幅広い領域での微惑星形成を説明できる。また、導出したシンプルな推定式は、今後のポピュレーションシンセシス計算の初期条件としても使うことができるだろう(Shibaike & Alibert revised)。

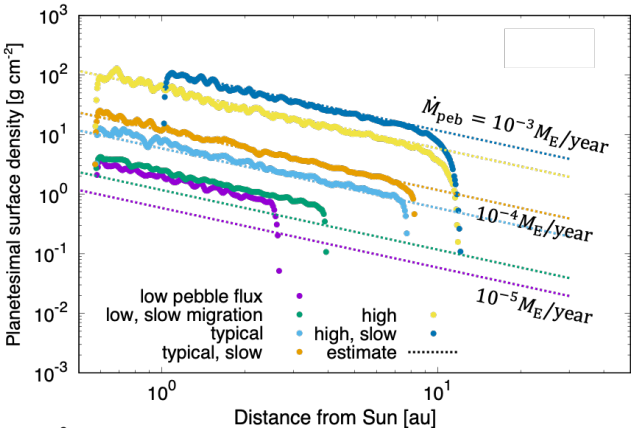


図１．形成される微惑星の面密度。ペブルフラックスと惑星の Type I 移動速度（等倍と 0.5 倍）を変化させた。点線は得られた推定式。(Shibaike & Alibert revised)

超木星質量の巨大ガス惑星による原始惑星系円盤へのギャップ形成

◯田中佑希[1]，金川和弘[2]，谷川享行[3]，田中秀和[1]
[1]東北大学，[2]東京大学，[3]一関高専

原始惑星系円盤内に存在する巨大ガス惑星は，周囲の物質と重力的に相互作用することによって，自身の軌道に沿った領域にギャップ構造を形成する．どのようなギャップが形成されるかは，惑星質量や円盤の粘性，スケールハイトなどのパラメータに依存し，それに伴ってギャップを介した惑星への質量降着や惑星の軌道移動に影響を及ぼす．そのため，この過程は惑星系の形成と進化を考える上で重要である．

これまでに数値流体計算を用いたギャップ形成の研究が活発に行われており，ギャップの幅や深さ，惑星への質量降着率などが詳細に調べられている．しかしそれらは木星質量程度やそれ未満の軽い惑星に注目したものがほとんどである．また，木星を超える質量を持つ惑星に着目した研究も少数存在するが，惑星への質量降着率の予測が数桁食い違うなど，超木星質量惑星によるギャップ形成に関しては理解が十分に進んでいるとは言い難い状況にある．木星より重い系外惑星は多数発見されており，これらの形成及び進化の過程を理解することは，惑星形成理論全体としても重要である．

我々は，数値流体計算コードFARGOを用いて，1-10木星質量の重い巨大ガス惑星によるギャップの形成とその特徴のパラメータ依存性について調査した．FARGOは回転するガス円盤の移流を高速に解くことに特化したコードであり，円盤と惑星の相互作用の研究において多く用いられている．本研究では，惑星質量，円盤の粘性，およびスケールハイトを変化させ，形成されるギャップの特性を調査した．

その結果，惑星質量を大きくすると形成されるギャップは深くなっていくが，典型的な円盤のパラメータの場合，3木星質量を超えるとギャップ構造が非定常となり，ギャップ領域の低密度ガスが周囲のガスと撹拌されることでギャップ内のガス面密度が上昇する効果があることが分かった．これにより，過去の研究で得られているギャップ内の面密度の経験式から予測される値よりもギャップが浅くなることが判明した．したがって，重いガス惑星に対しては経験式が予測するよりも惑星への質量降着率は大きくなることが予想される．さらに，円盤の粘性やスケールハイトを変化させた場合は，ギャップが非定常を起こすのに必要な惑星質量も変化することが分かった．一連の計算から得られたギャップ構造を元に，惑星への質量降着率や惑星に働くトルクのパラメータ依存性について，先行研究と比較しながら議論する．

高分解能多波長画像解析によるTWHyaの原始惑星系円盤のスペクトルインデックス動径分布の調査

◯ 塚越崇[1], 武藤恭之[2], 野村英子[1], 川邊良平[1], 金川和弘[3], 奥住聡[4], 井田茂[4], Catherine Walsh[5], Tom J. Millar[6], 高橋実道[1], 橋本淳[7], 鵜山太智[8], 田村元秀[3]

[1] 国立天文台, [2] 工学院大学, [3] 東京大学, [4] 東京工業大学, [5]University of Leeds, [6]Queen's University Belfast, [7] アストロバイオロジーセンター, [8]California Institute of Technology

原始惑星系円盤における惑星形成はダストの成長を伴って進行すると考えられており、円盤のダストサイズ分布を観測的に明らかにすることは重要である。円盤におけるダストサイズ分布の知見を得る一つの方法として、光学的に薄いミリ波・サブミリ波放射のスペクトル指数αを観測的に調べることが挙げられる。αはダスト吸収係数κ_νの周波数依存性である$\beta(\kappa_\nu \propto \nu^\beta)$と$\beta \sim \alpha - 2$の関係があり、また$\beta$はダストサイズによっておよそ0–2で変化すると考えられていることから、円盤内のα分布を調べることでダストサイズ分布に対する知見を得ることができる。

TW Hyaは中心星質量0.8 $M_\odot$のTタウリ型星で、最も近傍の原始惑星系円盤のサンプルである($d = 59.5$ pc)。ALMAの高分解能観測により、複数のギャップ構造を持つ円盤の姿が明らかになっている[1,2]他、我々が推進した高分解能2周波観測により、円盤の詳細なスペクトル指数分布が明らかにされており、円盤内側に向かうにつれて指数が減少する様子やギャップ構造に付随するαの増大を検出した([3]Tsukagoshi et al. 2016; 以下、先行研究)。一方、このデータはアンテナ配列が最適化されていない時期に取得されており、不定性の大きい結果となっている。

そこで本研究では、円盤ダストサイズ分布をより正確に把握するため、新たに取得したBand 4および6の長基線観測データの他、Band 7を含めた複数のアーカイブデータを使用し、3バンドの高分解能データを用いて円盤のスペクトル指数分布を詳細かつ高感度に導出した。UVカバレッジは十分にサンプリングされており、先行研究に比べおよそ三倍の感度を達成した。

得られた円盤のスペクトル指数αの分布は円盤外側から内側に向かって3から1.5に減少していた。これは先行研究を支持する結果である。一方、25 auにあるギャップ構造に付随するスペクトル指数の増加も確認されたが、先行研究より低い値が得られていた(∼2.5)。βの分布を計算すると、ギャップ周辺では先行研究で予想されたものより平坦となっていた。この結果から、円盤30 au以遠においては内側に向かうにつれて徐々にダストサイズが大きくなっており、また25 auギャップの周辺においては過去の想定よりダストサイズが変化していないことが示唆される。半径15 auの円盤内側領域においては、スペクトル指数の値が2を下回っており、これは光学的厚みが無視できない領域におけるミリ波散乱の影響で解釈することができる。

さらに今回、高い感度の輝度分布が得られたことで、[2]によって見出されている、半径52 auの局所的ミリ波源に付随する新しい構造を検出した。この構造はミリ波源からおよそ30 auに渡って方位角方向に伸びており、∼0.1 au deg^{-1}ほどのピッチアングルを持つ。成因については不明だが、ケプラーシアーにより引き延ばされたミリ波源を起因とするダスト流の可能性が考えられる。

参考文献 [1]Andrews, S. M. et al. 2016, ApJ, 820, L40, [2]Tsukagoshi, T. et al. 2016, ApJL, 829, L35, [3]Tsukagoshi, T. et al., 2019, ApJL, 878, L8

デッドゾーン内側境界での微惑星形成：太陽系地球型惑星形成への示唆

○植田高啓[1]，奥住聡[2]，荻原正博[1]，小久保英一郎[1]
[1]国立天文台，[2]東京工業大学

太陽系の地球型惑星の質量・軌道分布は、その材料物質である微惑星が 1 au 付近に局所的に存在していた可能性を示唆する。このような局所的な岩石微惑星の分布を説明する 1 つのアイデアとして、デッドゾーン内側境界でのダスト濃集が挙げられる。デッドゾーン内側境界は、円盤ガスの熱電離によって乱流強度が大きく変化する領域である。この領域では、乱流強度の変化に伴う円盤ガス密度構造の変化によって、岩石ダストが局所濃集し、ダストの落下や破壊の問題を乗り越えて重力集積により岩石微惑星が形成されると期待されている。

本研究では、デッドゾーン内側境界で形成される岩石微惑星の量・位置が、円盤の乱流強度や質量といった円盤の性質にどのように依存するか、動径方向 1 次元の原始惑星系円盤ガス・ダスト進化計算を用いて調べた。計算では、デッドゾーンで乱流強度が低いために、主に磁気駆動円盤風によって進化する円盤モデルを考えた。計算の結果、デッドゾーンでの乱流強度が 10^{-4} から 10^{-3} 程度の場合、微惑星の形成量は乱流強度に非常に強く依存することがわかった。さらに、初期円盤がより重くコンパクトであるほど、降着加熱が効率的に働くことで、微惑星が外側に形成されることがわかった。特に、デッドゾーンでの乱流強度が 2.3×10^{-4} で、初期に円盤質量が 0.1 太陽質量、円盤半径が 20 au 程度のときに、1 au 近傍に 2 地球質量程度の微惑星が形成された。これは太陽系地球型惑星を形成するのにちょうどいい質量・軌道分布(Hansen 2009)に非常によく似ている(図 1)。

さらに、この微惑星分布および円盤進化の結果に基づいて、形成された微惑星がその後どのような進化をするか、N 体計算を用いて調べた。計算の結果、磁気駆動円盤風によって Type I 軌道進化が抑制されるため、得られた微惑星分布から太陽系地球型惑星に近い質量・軌道の惑星系が形成されうることがわかった。

本発表では、以上の結果を述べたうえで、太陽系地球型惑星がデッドゾーン内側境界で形成された可能性について議論する。

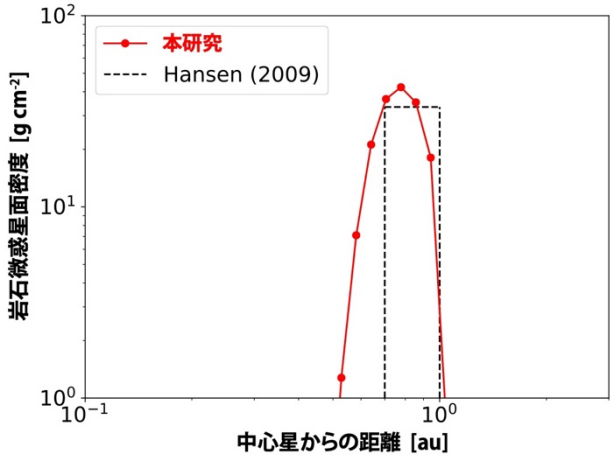


図 1. 本研究で得られた岩石微惑星分布

ダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成

◯ 高橋実道 [1], 小久保英一郎 [1]

[1] 国立天文台

近年の ALMA による観測で、原始惑星系円盤にダストのリング構造が形成されているのが発見されている (cf. Andrews et al. 2018)。リング構造の形成メカニズムは明らかになっていないが、リング構造がダストの濃集で形成されていた場合、リング構造中は微惑星形成が起こりやすい環境となる。特に、HL Tau などの明るい天体に形成されているダストのリング構造は、質量が大きく自己重力が重要になる可能性がある。また、リング構造形成メカニズムの候補の一つである永年重力不安定性によってリング構造が形成された場合 (Takahashi and Inutsuka 2014, 2016)、ダストが自己重力によってリング状に濃集するため、必然的に重いリング構造が形成されると期待される。大質量のリング構造は、回転方向の自己重力的な収縮に対して不安定となる場合がある。ダストのリング構造でこの重力不安定性が成長した場合、重力崩壊による微惑星形成につながることが期待される。

本研究では、リング構造が永年重力不安定性によって形成された場合に、リング構造の重力崩壊で形成される微惑星の質量を推定する。まず、初期条件となる円盤モデルを与え、永年重力不安定性の最大成長波長と面密度から、各半径に形成されるダストリングの線密度を評価する。次に、それぞれのダストリングに対して重力不安定性についての線形解析を行い、不安定となる波長とダストリングの線密度から、重力崩壊で形成される微惑星質量を求める。ここでは、リングの重力不安定性の最大成長波長で微惑星質量の下限値、不安定となる最大波長で微惑星質量の上限値を見積もる。

リング構造の安定性解析の結果、円盤の広い範囲で不安定が成長するためには、リングの幅や厚みが半径の 1%以下の非常に小さい値を取る必要があることが明らかになった。リングが細いほど円盤の内側のリングでの重力崩壊が可能となり、最大成長波長から見積もられる質量の下限値はリングが細いほど小さくなる。一方、不安定となる最大波長はリングの幅や厚みには強く依存せず、質量の上限値はリングの細さに対する依存性は弱いことが分かった。また、重力崩壊するダスト質量は非常に大きく、遠方 ($r \gtrsim 100$ au) では地球質量以上のダストが直接重力崩壊することが可能であることが明らかになった。

永年重力不安定性の非線形成長についてのシミュレーション (Tominaga et al. 2020) では、形成されるリング幅は半径の 1%程度になることが示唆されており、形成されたリング構造が重力的に不安定になることは十分期待できる。一方、シミュレーションでは、形成されるのリング幅や厚みに影響を与えるダスト成長やダスト同士の衝突、散乱などの過程が取り入れられておらず、リング構造の現実的な幅、厚みの評価については、今後の課題である。

低質量周りのペブル集積を考慮した共鳴惑星系の形成

Yu-Chia Lin[1,2,3], ○ 松本 侑士[2], Pin-Gao, Gu[2]

[1] 台湾大学, [2] 中央研究院天文及天文物理研究所, [3] ニューメキシコ大学

近年の観測は 0.1 太陽質量程度の低質量星周りに地球質量程度の惑星からなる複数惑星系を発見してきている (TRAPPIST-1; YZ Ceti; Teegarden's star; GJ 1061)．これらの惑星の多くは，共鳴軌道にある，あるいは共鳴軌道に近い軌道にある．低質量星周りの複数惑星系はまだ観測例が少ないが，現在までに知られている低質量星周りでは 1 太陽質量程度の恒星周りよりも共鳴軌道に惑星がある/近い系 (共鳴惑星系) の割合が多い．これは共鳴惑星系の形成が低質量星周りでより一般的である可能性を示唆している．

低質量星周りの複数惑星系の形成は Ormel et al. (2017) により TRAPPIST-1 系の形成モデルが提示されている．この形成モデルは以下のステージから成立している: ダストのペブルサイズまでの成長; 雪線付近でのペブルの濃集; ストリーミング不安定による微惑星の形成; ペブル集積による微惑星の成長; 原始惑星の軌道落下と共鳴捕獲. Ormel et al. (2017) ではそれぞれのステージにおける進化過程は議論されている一方で，この一連の過程の時間進化は考えられていない．また近年ストリーミング不安定による微惑星形成のタイムスケールが円盤乱流 (e.g., Chen & Lin 2020) やダスト分布 (e.g., Krapp et al. 2019) によって変化することが明らかになってきている．例えば微惑星形成のタイムスケールがより長い場合，以下の 2 つの効果が想定される: 1. 先に形成した原始惑星との距離がより開くことで，より遠くの共鳴軌道 (2:1, 3:2 など) に捕獲される．; 2. 微惑星形成の継続期間中に形成する微惑星が少なくなるので，少ない数の惑星が形成する．軌道間隔の広い共鳴軌道に少数の惑星がある場合に惑星の軌道が安定化しやすいことが知られているため (e.g., Matsumoto et al., 2012)，恒星質量及び微惑星形成のタイムスケールと形成する共鳴惑星系の関係が明らかになれば，低質量星周りで共鳴惑星系が形成しやすいのかどうかについても明らかにすることができる．

我々は Ormel et al. (2017) を拡張した複数惑星系の形成についての一連の時間進化の計算を行い，また解析的に共鳴惑星系が形成する条件についても導出した．TRAPPIST-1 と同程度の 0.08 太陽質量星周りでは，雪線における微惑星形成のタイムスケールがおおよそ雪線の 10^5 軌道周期よりも長い場合，共鳴軌道に形成する惑星数が 10 個を切るようになる．またこの微惑星形成のタイムスケールでは，多くの場合 3:2 あるいは 2:1 の共鳴に惑星は捕獲される．10 個程度以下の惑星が 3:2 あるいは 2:1 の共鳴軌道にある場合，ガス散逸後も軌道が安定しているため，惑星系は共鳴惑星系となる．一方より短いタイムスケールでの微惑星形成の場合には，10 個を超える惑星が 4:3 や 5:4, あるいはそれよりも軌道間隔の狭い共鳴軌道に形成する．これらの惑星系はガス散逸後に軌道不安定を起こし，非共鳴惑星系が形成する．観測された共鳴惑星系は主に 3:2 や 2:1 の共鳴で構成されているおり，10^5 軌道周期よりも長い微惑星形成による惑星形成と調和的である．

この惑星形成過程では恒星質量が大きくなるにつれて微惑星形成の継続期間が短くなる．これは以下の 2 つの効果を惑星形成に及ぼす: 1. 恒星質量が大きくなるに連れ，共鳴惑星系を形成する微惑星形成のタイムスケールは短くなる．2. 恒星質量が 0.4 太陽質量以上になると，ストリーミング不安定での微惑星の形成そのものが起きない．これらは共鳴惑星系が低質量星周りでより多く形成しやすい理由であると考えられる．

原始惑星系円盤内のダストリングの局所数値シミュレーション

○ 関谷　実[1]
[1]九州大学・名誉教授

原始惑星系円盤内での微惑星形成を促進するプロセスとしてストリーミング不安定性(Youdin and Goodman 2005)がある。これはガスとダストの摩擦相互作用に関係した不安定性であり、これによってダストの体積密度がガス密度の100倍以上濃集することがあり、このような場合は重力不安定性による微惑星形成が起こると考えられている。Sekiya and Onishi(2018)は、原始惑星円盤内でストリーミング不安定性によるダスト濃集が進むのは、無次元ダスト面密度が１を超える場合であることを示した。ここで無次元ダスト面密度は、（ダスト面密度）/[(ガス密度)×(ηr)]で定義され、ηは円盤ガスの公転速度の、ケプラー速度からの遅れの割合、r は軌道半径である。標準的な円盤モデルだとηは千分の１のオーダーの量である。

本研究では初期に動径方向に濃集したダストが、その後どのような時間進化をするのかについて三次元数値シミュレーションを行った。計算にはAthena 4.2コード(Bai and Stone 2010)を用いた。軌道半径 r におけるケプラー角速度で回転し、曲率を無視したデカルト座標系（Shearing box モデル）を用いた。この座標系で x 軸は動径方向、y 軸は公転方向、z 軸は原始惑星系円盤に垂直な方向である。この座標系では、ダストリングは、ダスト・バーとなる。ダスト・バーとして y 軸方向に一様で x 軸及び z 軸方向にガウス分布し、ダストの体積密度の最大値がガス密度よりも十分に大きくなるような初期分布を与えた。ただし、正規乱数を用いて粒子を分布させたのでダストの初期体積密度には揺らぎがある。ストークス数（ダストとガスの摩擦が効くタイムスケールをケプラー角速度で無次元化した量）が1/10および1/100の場合を調べた。結果としては、平均無次元ダスト面密度（無次元ダスト面密度を計算領域で平均した量）が１以上だと方位角方向に分裂し、さらに濃集が進むが、１より小さいと一様なダスト面密度分布に近づいていくことが分かった。

本研究はJSPS科研費JP15K05268の助成を受けたものです。数値シミュレーションは国立天文台天文シミュレーションプロジェクト xc50 を用いて行いました。

(参考文献)

Bai, X.-N. and Stone, J.M. (2010) ApJS, 190, 297.
Sekiya, M. and Onishi, I. K. (2018) ApJ, 860, 140.
Youdin, A.N. and Goodman, J. (2005) ApJ, 620, 459.

原始惑星重力による摂動を受けた原始惑星系円盤ガスの流れと小天体の集積率についての理論的研究

◯ 岡村 達弥 [1], 小林 浩 [1]

[1] 名古屋大学理学研究科

近年の惑星形成理論では km サイズの微惑星に加えて、微惑星よりも小さい cm-m サイズ粒子 (ペブル) の降着による惑星形成が盛んに議論されている (e.g., Ormel & Klahr 2010 , Lambrechts & Johansen 2012 , Kuwahara & Kurokawa 2020a)。これら固体小天体は原始惑星系円盤や惑星大気中をガス抵抗を受けながら運動しており、ガス抵抗により原始惑星と小天体の衝突断面積が決まる。そのため惑星形成を議論するにあたり原始惑星系円盤ガス・原始惑星大気を考慮することが必要不可欠である。

本研究では、まず原始惑星重力により摂動を受けた原始惑星系円盤ガスの流れを Athena++(White et al. 2016 , Stone et al. 2020) を用いた 3 次元流体計算で求めた。流体計算の結果、原始惑星は周りに閉じた流れをつくり、原始惑星は惑星大気を持つ。大気周りの流れも原始惑星の重力を受けた特徴的な構造になる。惑星の進行方向前後には馬蹄形流が形成される。

次に、この流れ中の小天体の軌道を計算した。ガスとの結合を表す無次元制動時間 (St) は小天体のサイズに依存するため、流れの影響は小天体のサイズに応じて変わる。軌道計算の結果をもとに、St の小天体の原始惑星への衝突率 $P_{\rm col}$ を求めた (図 1)。サイズの大きな小天体 (図 1 中の St $\gtrsim 0.1$) では小天体は惑星重力により超音速になる。その結果、密度の大きい惑星大気から強く影響を受ける。衝突率も大気により決まる。サイズの小さな小天体 (図 1 中の $10^{-2} <$ St < 0.1) では、原始惑星系円盤ガス流と小天体はよく結合しており惑星近傍を通過するときに受ける重力による速度変化によって衝突断面積は決まる。それよりもサイズの小さな小天体 (図 1 中の St $< 10^{-2}$) では馬蹄形流により衝突軌道が狭められる。また、ボンディ半径あたりの外向きの流れがさらに小さな天体 (St $< 10^{-3}$) の衝突を阻害する。

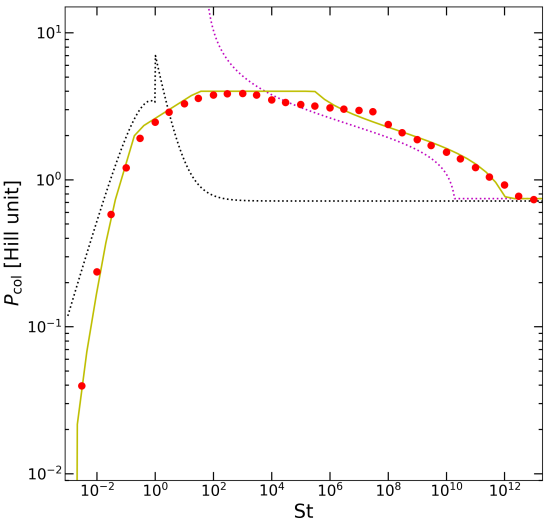


図 1: 惑星質量 $1.2M_{\oplus}$ での結果。赤丸:数値計算結果、黄線:解析解、黒点線:Ormel & Klahr 2010 による解析解、桃色点線:Inaba & Ikoma 2003 による解析解。

これらの効果を考慮して、小天体の原始惑星への衝突効率を求めた。その結果、惑星大気の効果やペブル降着の過去の研究を包括的に理解することが可能になり、過去の研究を改善する新たな解析解を導出した。

進化する円盤中での岩石惑星及びガス惑星の形成

○荻原 正博[1]，堀 安範[1,2]，國友 正信[3]，黒崎 健二[4]
[1]国立天文台，[2]アストロバイオロジーセンター，[3]久留米大学，[4]名古屋大学

原始惑星系円盤の進化は様々な側面から惑星形成に影響を及ぼすことが知られている。従って、惑星形成の解明の為には現実的な原始惑星系円盤モデルの構築が必要となる。実際に過去10年において、最新の流体計算の結果を取り入れることでより現実的な原始惑星系円盤進化モデルが提案されてきた。我々は、最新の円盤モデルを用いた上での惑星集積及び大気量進化を、惑星形成シミュレーションの実行によって明らかにすることを目的としている。

本研究では具体的な問題として、系外惑星の多くは大量の水素大気を保持していないという点に着目する。系外惑星の大部分を占めるスーパーアースや一部の巨大惑星は惑星質量に対する大気質量の割合が小さいことが指摘されているが、これは従来の惑星形成理論では説明することができない。また別の問題として、一部の巨大惑星は大量の重元素を保持しているという点にも着目する。これらの巨大惑星が保持している重元素量は、コアが成長できる理論的な限界質量（孤立質量）を超えていることから、この特徴の起源を説明することも困難である。本講演では、最新の惑星形成シミュレーションによって、これらの系外惑星の特徴の起源を説明することが可能であるかを議論する。

ダストから惑星まで直接合体成長を取り扱う統一シミュレーション

◯ 小林 浩[1]、田中秀和[2]

[1] 名古屋大学、[2] 東北大学

ミクロンサイズにも満たないダストが集積して惑星は形成される。つまり、ダストから惑星までの質量変化は 40 桁以上にもなる。このような大きな質量成長の数値計算は非常に難しく、これまで取扱うことができなかった。そのため、100 km サイズの微惑星から 1000 km サイズの惑星までのような限られた質量範囲での「部分問題」として惑星形成は取り扱われてきた。このように「部分問題」として取り扱えるのは、原始惑星系円盤の中で動径方向に局所的であり、成長する天体のサイズも限られている場合にのみ有効である。近年の惑星形成では、円盤の外縁部で形成された小石サイズの天体が動径移動し、円盤内側で惑星形成に影響をもたらす可能性が指摘されている。つまり、円盤全体で様々なサイズの天体を取り扱った惑星形成のシミュレーションが必要である。

本研究では、原始惑星系円盤全体でのダストから惑星までの衝突進化を一貫して取り扱う統一シミュレーションを開発した。統一シミュレーションの結果でも、多くのサイズの天体の衝突成長は、これまで「部分問題」の過去の研究の様に起こる。ダストの衝突進化による微惑星形成過程において、小石サイズの天体まで成長するとガス抵抗による動径移動時間が衝突成長時間よりも短いため成長が阻害されるという、動径移動バリアが長年大問題であった。「部分問題」の研究でも指摘されていた様に、ダストの空隙率進化を正当に考慮した結果、10AU より内側では動径移動バリアを乗り越えて微惑星が形成される。その後、微惑星は乱流の摂動をふりきり、相互重力相互作用により暴走成長を開始し、原始惑星を形成し、原始惑星は微惑星を集積しさらに成長していく。本研究の統一シミュレーションで新しく見えてきたものは、円盤外縁部で形成された小石の流入による内側円盤の固体面密度上昇である。10 AU よりも外側で小石サイズの天体は動径移動バリアを超えられず、動径移動により 10 AU 以内に移動する。その結果、10 AU 以内の円盤で固体面密度が上昇する。近年は小石サイズの天体の原始惑星への集積が盛んに議論されているが、原始惑星の小石サイズの天体の集積効率は ∼ 10%に満たないため、現実的な中心星の 1%程度の質量の円盤では固体材料が足りなくなる。しかし、本研究では全てのサイズの天体の衝突進化も正当に評価しているため、小石サイズの天体同士の衝突も起こり、小石サイズの天体はさらに大きく衝突成長し微惑星へと成長していく。その過程で度重なる衝突をくりかえすため、衝突ダンピングにより微惑星のランダム運動が小さく抑えられる。このようなランダム運動の小さい微惑星は、従来の微惑星集積時間に比べ、集積時間が非常に短くなる。**本研究の結果、軌道長半径が 5 AU の原始惑星が 40 万年程度で 10 倍地球質量に到達することがわかった。**

10 倍地球質量程度まで成長した原始惑星が固体核となり周りの円盤ガスを急速に集積し、木星のような巨大ガス惑星になる。従来の微惑星から惑星形成では固体核の形成に時間がかかりすぎ、原始惑星系円盤の寿命である数百万年以内に巨大ガス惑星が形成できないこと指摘されていた。しかし、今回の統一シミュレーションの結果、たった 40 万年でガス惑星の固体核が 5 AU の位置で形成されることが示された。つまり、統一的描像により巨大ガス惑星形成は可能になる。

N 体計算コード GPLUM の開発: 惑星形成の展望

○石城陽太[1,2]，兵頭龍樹[2]，藤本正樹[2]，牧野淳一郎[3,4]
[1] 東京大学，[2] 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所，[3] 神戸大学，
[4] 理化学研究所 計算科学研究機構

一般に，惑星系は，中心星を取り巻く原始惑星系円盤から形成したと考えられている．固体惑星やガス惑星のコアは，原始惑星系円盤内で km サイズの天体(微惑星)の集積により形成したとされている．微惑星の集積過程は，主に微惑星系の重力多体計算(*N* 体計算)によって議論されている．

本研究では，微惑星系 *N* 体計算を大規模に行っていくため，Particle-particle Particle-tree 法(P^3T 法)を用いた新しい *N* 体計算コード GPLUM を開発した．P^3T 法では，カットオフ半径より近距離の粒子間の重力相互作用を 4 次エルミート法で計算し，それより遠距離の粒子間重力相互作用をツリー法を用いて計算する． GPLUM では，より効率的な新たなアルゴリズムを実装することで，従来の P^3T 法コードより数倍程度高速な計算を実現した．また，大規模並列粒子法シミュレーションのための汎用高性能ライブラリ FDPS や相互作用計算カーネルジェネレータ PIKG を用いて，大規模なスーパーコンピューターでも高い性能を実現した．現在，スーパーコンピュータ富岳を用いた大規模計算に向けて，チューニングと計算性能の評価を進めている．

GPLUM の性能は，従来の P^3T 法コードと比較して，大きな質量比のついた質量分布を持つ粒子系のシミュレーションに対しては大幅に改善される． GPLUM によって，これまで N 体計算で扱うことができなかった広範囲，高解像度の *N* 体計算を行うことができる．さらに，計算コストが向上することで，*N* 体計算によるパラメータサーベイなど，新たな議論も可能となることが期待される．

本研究では，GPLUM を用いて，主に地球型領域の惑星系形成過程のシミュレーションを行う．近年，Nice モデルや Early Instability モデルのように，巨大惑星が地球型惑星領域に影響を与える惑星形成モデルが考察されているが，そのように巨大惑星を含む系での惑星形成過程について考察する．そのようなシミュレーションを行うにあたって，巨大惑星を含む系に対する GPLUM の性能を評価する．

散逸中の周惑星円盤における衛星系の形成について

Formation of satellite systems in dissipating 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. Fujii[1], Masahiro Ogihara[2]

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

巨大衛星と呼ばれる比較的大きな衛星は、周惑星円盤の中で形成されたと考えられている。円盤の中で成長する衛星の軌道は円盤との相互作用により時々刻々と変化するため、その時間進化を決めるためには、円盤の進化と衛星の軌道進化を同時に計算しなければならない。

周惑星円盤の具体的な性質は理論的にも観測的にも詳細が明らかにされていないため、従来の衛星の軌道進化に関する研究では、周惑星円盤の面密度や温度が単一べき分布で与えられることが多かった。しかし、衛星の軌道移動においては、円盤の粘性や温度、面密度などの値だけでなく、面密度・温度の半径依存性が重要であることが知られている。よって、面密度と温度を同時に解き、より現実に近い周惑星円盤のモデルを構築する必要がある。

衛星の軌道が大きく変化するのは惑星の周りに十分なガスが存在する間のみと考えられるため、本研究では、原始惑星系円盤の散逸等に伴い周惑星円盤への質量流入量が減少し、やがて質量流入が無くなる様子をモデル化し、周惑星円盤が散逸するまでの温度・面密度分布の時間進化を計算した。その際に、粘性定数や原始惑星系円盤からの質量流入の減衰率などをパラメータに取り、様々な周惑星円盤モデルを検討した。

得られる衛星系の軌道配置や質量分布は、円盤構造の他に微衛星の分布にも依存する。よって、我々は異なる初期条件に対してN体シミュレーションを行い、複数の巨大衛星を持つ衛星系の形成についての傾向を分析した。本講演では、その結果を紹介し、ガリレオ衛星の特徴の起源についても議論する。

衛星前駆天体の捕獲とその周火星領域での集積による火星衛星形成シナリオ
Martian moon formation scenario with capture of moon precursors and their accretion in the circum-Mars region

松岡 亮[1]・倉本 圭[1]
[1]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）は低アルベドかつ D 型小惑星に類似した反射スペクトルを有している．これらの特徴は，両衛星が微惑星を捕獲したものであるとする捕獲説を支持するものである．火星の重力圏外から飛来する物体は脱出速度を上回って進入するため，捕獲を達成するためにはエネルギー散逸の媒体が必要である．火星の衛星の捕獲説では，その候補として原始太陽系星雲ガスを重力束縛して生じる原始火星大気が提唱されてきた[1, 2]．この大気の速度構造は，捕獲後にも衛星の軌道進化に大きく影響する．例えば，静止軌道内で火星と共回転し，その外側でも連続的な速度場を有する大気ならば，静止軌道付近で衛星が長寿命となる．このような軌道進化は衛星軌道の静止軌道付近への局在化をもたらし，静止軌道付近にあったとされる潮汐軌道進化から推定された火星の衛星の初期位置[3]を自然に説明する．

本研究は，捕獲プロセスを通じて火星周回軌道上にもたらされた小衛星の集積を通じた衛星形成を検証するものである．これは，小さな天体ほど捕獲されやすいことと，上記の大気の下で，複数の衛星が存在しているとき，静止軌道付近で衛星同士の合体が観察されるためである．このような大気の下では，順行衛星は速やかに（~数万年）赤道面へ軌道進化する一方で，逆行衛星は赤道面から徐々に離れていくような軌道進化をするため，順行衛星同士の衝突合体イベントが支配的となる．そこで，本研究では，捕獲直後の楕円軌道にある小さな順行衛星が集積して現在の火星衛星を形成するシナリオを検討するため，衝突率に関する解析的計算と数値軌道計算を組み合わせたシミュレーションを実施した．本発表では，衛星の最終的な軌道・質量に着目し，シミュレーション結果を議論する．

[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.

火星内部進化の数値モデル
Numerical models of mantle evolution in Mars

小河正基　（東京大学総合文化研究科）
Masaki Ogawa (University of Tokyo at Komaba)

The history of Mars is characterized by presence of magnetic field for the first several hundred million years; the active volcanism in and around the Tharsis region and the contemporaneous clement surface environment at around 3.7 Gyr; the rapid decline of magmatism after that. I applied a numerical model of coupled magmatism-mantle convection system to Mars to understand these features. Mantle convection occurs as a convection of Newtonian wet fluid with a strongly temperature-dependent rheology in an internally heated two-dimensional rectangular box. Magmatism is modeled by an upward permeable flow of basaltic magma generated by decompression melting through the coexisting matrix. I found that the mantle evolves in a manner consistent with the observed features of Mars, when the mantle was initially hot in its shallower part but cold in its deeper part 4.5 Gyr ago: (1) After the initial extensive magmatism (a model of the magma ocean), the mantle becomes compositionally stratified, and magmatism stops for several hundred million years. Convection, however, continues for the first 2-3 hundred million years in the deep mantle to keep the heat flow at the core-mantle boundary above the level required to drive core-dynamo. (2) Plumes, then, begin to develop and ascend to the surface, as the deep mantle is heated up by internal heating. These plumes cause magmatism and the resulting degassing of water. The amount of degassed water is sufficient to induce a clement environment on the surface. (3) Plume magmatism, however, extracts heat-producing elements from the deep mantle, and wanes in 1-2 billion years.

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 for subsurface structures in Chryse and Acidalia Planitiae on Mars

○大浦愛菜[1], 笠羽康正[1], 野口里奈[2], 熊本篤志[1], 石山謙[3],
臼井寛裕[2], 土屋史紀[1], 植村千尋[4], 木村智樹[1]
[1]東北大学, [2]宇宙科学研究所/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

本研究では, Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)に搭載されている Mars Shallow RADar sounder (SHARAD)によって得られたデータを使い, クリュセおよびアキダリア平原(CAP)の地下構造を探索した. CAP を選定した理由に, Recurring Slope Lineae (RSL)の密集と, outflow channel の痕跡が挙げられる. RSL の形成過程には dry 説と wet 説があり, wet 説を仮定すると CAP には地下氷や凍土層があると想定される. また, outflow channel は大規模な洪水地形であり, 形成要因に土石流や氷河, 溶岩流が挙げられている. 本発表ではこれらの地質的背景と結びつくような地下構造の有無を調査した結果を紹介する.

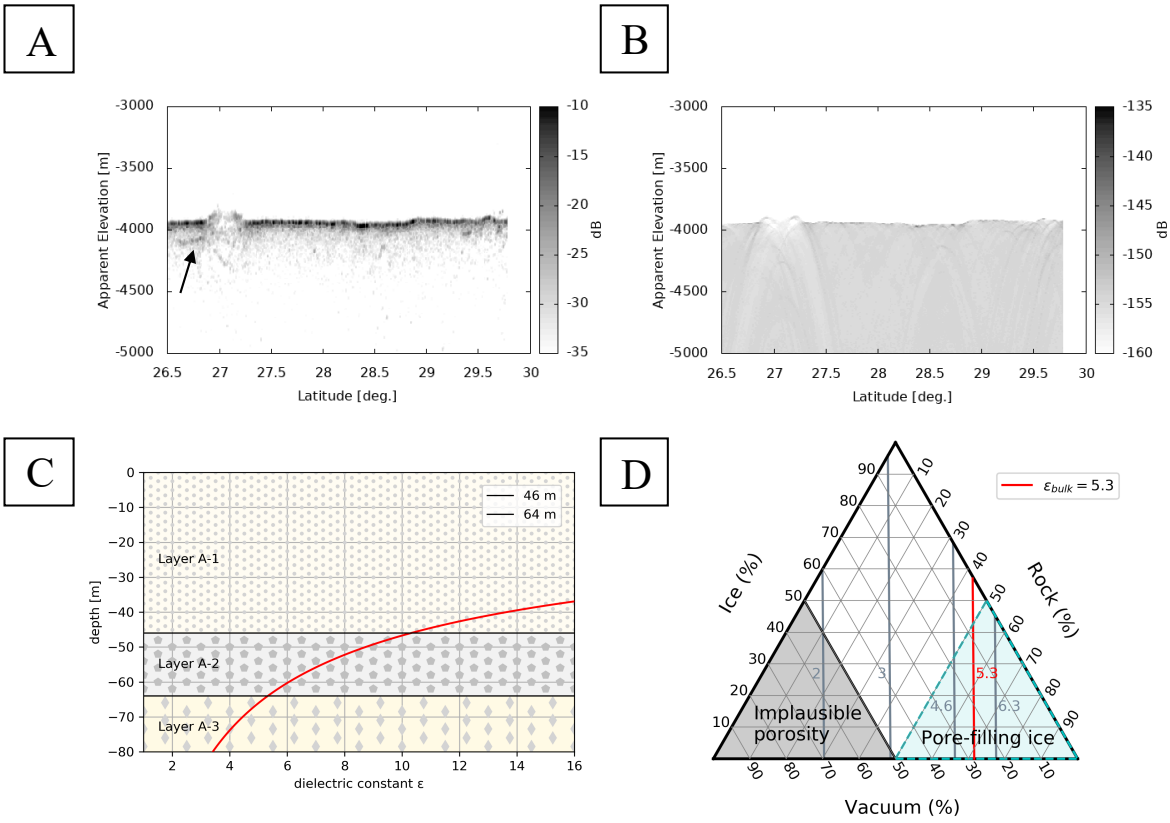


Fig.1 (A)SHARAD レーダーグラム, (B)シミュレーションレーダーグラム, (C)近傍クレーターの層序の厚さと誘電率の算出, (D)空隙率と含氷率の算出

火星衛星探査計画 MMX の進捗

○倉本 圭[1,2], 川勝康弘[2], 藤本正樹[2], Maria Antonella Barucci[3], David J. Lawrence[4], 玄田英典[5], 平田 成[6], 今村 剛[7], 亀田真吾[8], 小林正規[9], , 草野広樹[10], 松本晃治[11], Patrick Michel[12], 宮本英昭[7], 中川広務[13], 中村智樹[13], 小川和律[2,14], 大嶽久志[2], 尾崎正伸[2], Sara Russel[15], 佐々木 晶[16], 澤田弘崇[2], 千秋博紀[9], 寺田直樹[13], Stephan Ulamec[17], 臼井寛裕[2], 和田浩二[9], 横田勝一郎[16]
1.北海道大学, 2.JAXA, 3.Paris Observatory, 4.ジョンホプキンス大学, 5.東京工業大学, 6.会津大学, 7.東京大学, 8.立教大学, 9.千葉工業大学, 10.量子科学技術研究開発機構, 11.国立天文台, 12.Côte d'Azur Observatory, 13.東北大学, 14.神戸大学, 15. Natural History Museum, 16.大阪大学, 17.Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

火星衛星探査計画 MMX（Martian Moons eXploration）は，Phobos と Deimos の近接観測と，Phobos 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，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．2024 年の打ち上げと約 5 年の往還期間の設定の下，概念検討段階を経て，2020 年 2 月に JAXA プロジェクトに移行した．現在，探査機の基本設計が進行している．以下では，主に MMX の科学面に関する進捗について報告する．なお，今後の検討で変更が加わる可能性があることには留意されたい．

MMX の搭載観測機器群は，望遠カメラ（TENGOO），広角分光カメラ（OROCHI），近赤外分光計（MIRS；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．近赤外分光装置は，機構が見直され，設計が一新された．科学観測機器には，CNES と DLR が開発提供するローバも加わった．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，Phobos 表層の物理状態と鉱物組成をその場計測する．以上に加え,将来の火星有人探査に向けた基礎データを獲得する放射線計測装置 IREM と，アウトリーチ用の高精細カメラ SHV が搭載される．

火星圏に到着後，火星を周回しつつ，実質的に探査機が Phobos を定常周回する疑似衛星軌道(QSO)へ軌道を遷移させる．この火星周回軌道投入直後の軌道遷移の際，Deimos に接近できる機会があり，ここで Deimos の科学撮像を行う可能性が検討されている．Phobos 固定座標系から見た QSO は，楕円を描き，短軸長軸比は 1:2 に近い．ただし長軸を小さく取ると，Phobos の重力の効果で，QSO は円に近づく．着陸点選定に向けた高空間解像度観測や有意なγ線中性子線観測のためには，低高度 QSO 運用（例えば長半径 24 km×短半径 20 km）を用いる．このとき望遠カメラの空間解像度は 10 cm 程度，分光撮像のそれも 10 m 程度に迫る．新鮮な基盤岩露出面の分光データから，Phobos の基盤岩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．

Phobos 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・秋分を跨ぐ期間には，探査機が火星や Phobos の日陰に入った際，日照の得られない時間が，特に低高度 QSO では伸びる．そこで，これらの時期には，長時間日陰を避けるため高高度（長半径 200 km×短半径 100 km）あるいは中高度の QSO を取る．また，QSO に傾斜をもたせ，極域の観測も狙う．QSO からは，Phobos 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・分光観測を行う．また特に低高度 QSO での撮像，LIDAR データの後解析から，探査機の飛行経路を精密に求めることにより，Phobos の重力場の推定を目指す．

2027 年 3 月は火星が地球に接近し，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．着陸点付近の撮像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レゴリスに貫入させ，コアラー内の試料容器部を引き抜いて帰還カプセル内へ移送する．また，着陸脚の一つにガス噴射式の採取機構（NASA 提供）を取り付け，表層試料の採取を試行する．

離陸後に探査機は QSO に戻るが，その後，2028 年 8 月に火星圏を離脱するまでに，探査機の軌道を膨張させ Deimos のフライバイ観測を複数回実施し，Deimos と Phobos の成因関係を明らかにするデータを取得する．また Deimos 軌道付近からの方が，火星大気全球の撮像が容易なため，この時期に火星観測を重点的に実施することを検討している．MMX は 2029 年 7 月に地球に帰還する．目標 10 g 超の試料に，キュレーションを経た後，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．

MMX ではサイエンスボードの下に，サイエンスワーキングチームを置き，それぞれ「Phobos と Deimos の起源」「初期太陽系進化」「衛星表層進化」「火星圏の科学」「衛星測地学」に関する国際サブサイエンスチームに分かれて，ミッション運用やデータ処理，サンプル分析等のワーキングチームと連携しつつ，ミッション目的の達成に向けたサイエンス活動を進めている．

MMX/MEGANE の元素組成データを用いた Phobos の起源の制約について

○平田佳織 1, 2, 臼井寛裕 2, 兵頭龍樹 2, 玄田英典 3
1 東京大学, 2 JAXA 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 Phobos の起源において，近接遭遇した小天体を火星が重力的に捕獲することを起源とする捕獲説，火星での巨大衝突により発生した破片が集積することを起源とする巨大衝突説といった仮説が提案されている．しかし，表面のスペクトル特性や軌道要素などの観測結果からは現在のところ形成過程の特定に至っていない[1].

2024 年に打上予定の火星衛星探査計画 MMX では，リモート観測やサンプル収集を通じて Phobos の形成過程を特定することを科学目標の 1 つとして掲げており，ガンマ線中性子線分光計(MEGANE)を用いた Phobos の周回軌道上からのバルク元素組成の測定が予定されている[2]. Phobos のバルク組成は形成過程や捕獲・衝突天体の種類により異なると示唆されており[3], MEGANE の観測によりこれまで解明されてこなかった Phobos の形成過程を読み解くことが可能になると期待される.

本研究では，捕獲説の場合は捕獲天体，衝突説の場合は火星と衝突天体の混合物のバルク組成を Phobos のバルク組成と仮定する混合モデルを用いて，MEGANE の観測データによりどの程度形成過程が特定可能であるかを検証した．火星の組成として BSM (Bulk Silicate Mars)[4]，捕獲・衝突天体の組成として 13 種類のコンドライト隕石[5,6]を仮定した．MEGANE で測定可能な元素のうち，天体衝突による変動が小さいと考えられる難揮発性元素（Fe, O, Si, Ca, Mg）の存在度を用いて，衝突・捕獲説により説明可能な Phobos 組成を計算した．MEGANE の観測精度の形成過程の特定への影響を比較するため，観測誤差を 20, 10, 0 %と変化させた（図 1a, b, c).

形成過程の特定のために最低限必要と推定されていた 20 %の観測誤差を仮定した場合[2]，MEGANE の観測データのみで，最低でも 30 %程度の領域で捕獲説と衝突説の区別が可能になることを示した（図 1d)．さらに観測精度の向上により，10 %の観測誤差で測定を行った場合，50 %以上の領域で形成仮説が特定できると考えられる．
MEGANE の観測誤差は，観測対象との距離と観測時間に依存する．観測誤差と形成過程の判別領域との関係を定量化した本結果は， MEGANE 観測計画に反映される.

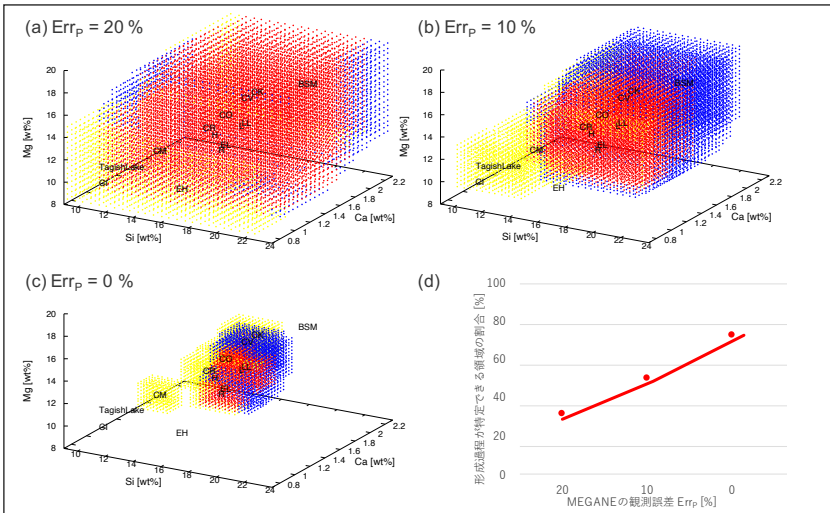


図1. (a-c) Si, Ca, Mg存在度の3次元空間内の各点が捕獲説と衝突説により説明可能であるかを計算した結果．Fe 23 wt%, O 37 wt%の例．黄色：捕獲説のみで説明可能，青：衝突説のみで説明可能，赤：捕獲説・衝突説の両方で説明可能．(d) MEGANEの観測誤差と形成過程が特定できる領域の割合の関係.

[1] Usui *et al*. (2020), *Space Sci. Rev* **216**, 49. [2] Lawrence *et al*. (2019), *Earth and Space Science* **6**, 2605-2623. [3] Pignatale *et al*. (2018), *The Astrophysical Journal* **853**, 118. [4] Visscher & Fegley (2013), *The Astrophysical Journal Letters* **767**, L12. [5] Alexander (2019), *Geochimica et Cosmochimica Acta* **254**, 277-309. [6] Alexander (2019), *Geochimica et Cosmochimica Acta* **254**, 246-276.

MMX ローバ搭載用ラマン分光計 RAX のエンジニアリングモデル開発状況

○長 勇一郎[1], 湯本航生[1], 小倉暁乃丞[1], 亀田真吾[2], 臼井寛裕[3], Ute Böttger[4], Conor Ryan[4], Maximilian Buder[4], Till Hagelschuer[4], Selene Routley[4], Enrico Dietz[4], Emanuel Kopp[4], Heinz-W. Hübers[4], Andoni Moral[5], Fernando Rull[6]

[1]東京大学, [2]立教大学, [3]ISAS/JAXA, [4]Institute of Optical Sensor Systems/DLR, [5]Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, [6]Universidad 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。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決定し、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目指す。

RAX はラマン散乱光励起用の CW レーザ(波長 532 nm)、分光計(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 全体の大きさは 85×125×100 mm である。重量は 1.4 kg である。RAX は日本、ドイツ DLR、およびスペイン INTA が分担して開発しており、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広く使用されることが見込まれる基礎技術である。

AFS は小型のステッピングモータとリードネジ、ギア、ナットおよびリニアガイドを組み合わせた直進機構である。ここに 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 はレーザの焦点位置を 13 mm の範囲において 50 μm の精度で微調整することを目指す。一方の 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。このように長い作動距離を持ちつつも、微弱なラマン散乱光を広く集めるために高い開口数(NA=0.22)を持つ光学系となっている。

2020 年 10 月現在、同装置のエンジニアリングモデルの製造が行われている。LSO 光学系は完成し、測定波長帯全域で 96%以上の透過率を持つことや、軸上および軸外(0.5 度)光束に対する RMS 波面収差が 0.1λ 以下であることなど、高い光学性能を持つことが確認された。今後はレンズと駆動部を結合させ、振動衝撃試験や熱真空試験などの環境試験を行う。ドイツ DLR での RAX の EM 統合試験は 2021 年の 1 月に開始する予定である。

モンテカルロシミュレーションによる
フォボス表面のメートルスケール以下の起伏の予測

○竹村知洋[1], 逸見良道[2], 宮本英昭[1]

[1]東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

[2]東京大学総合研究博物館

MMX（Martian Moons eXploration）は 2024 年の打ち上げに向け、開発が進んでいる。フォボス表面に接触することを前提としたこの探査を成功させるためには、着陸時の探査機の安全性やサンプル取得の確実性を十分に検討する必要があるが、これに関連して対象天体の表面起伏に関する検討が必要となっている。とくに表面の起伏に起因する探査機の転倒や機器トラブルの発生は重大な懸念材料と考えられる。既に探査済の天体であれば、取得した高解像度画像を基に探査予定地周辺のボルダーやクレーターの直径・高さや空間分布を直接計測することで解決できるのだが、未探査の天体では、はやぶさ 2 のリュウグウ探査と同様に慎重な検討が必要となる。フォボスの場合はリュウグウと異なり、ある程度は過去の観測データが存在するが、それでも撮像されたフォボス表層の画像は現時点では高々1.5m/pixel 程度の解像度にとどまっており[Thomas et al., 2000; Karachevtseva et al., 2014]、探査機着陸・サンプル取得において問題になる数 10cm 程度の起伏を評価することは困難である。そのため本研究では、メートルスケール以下でボルダーやクレーターの大きさ、分布、形状を予測し、数値計算によりフォボス表面の起伏を定量的に評価した。

観測出来ていないフォボス表面の詳細部分を予測するためには、現時点での観測データを駆使しフォボス表層の形態的特徴を把握する必要がある。本研究では、Mars Orbiter Camera 等によって得られた高解像度画像、地形データを用いてクレーターのアスペクト比[Thomas et al., 2000]や、リムの形状、クレーター個数を再現し、またボルダーの多い地域や少ない地域の観測データから、ボルダーのサイズ頻度分布として可能性のあるものを求めた。これらのボルダーやクレーターの情報を用いてモンテカルロシミュレーションを行い、フォボス表層の詳細部分の起伏を予測した。この結果、探査機が安定して降り立つことのできる起伏 40cm 以下の 4m×4m の領域は Phobos 表面全体の 50%程度であることが算出できた。

今回は、上記のシミュレーションを用いて、フォボス表層に着陸する際に重要な表面の高低差や傾き、またサンプル採取時に重要な細かな部分の起伏の予測を行い、探査の安全性や可能性について報告する。

References: Thomas P. C. et al., (2000) *J. Geophys. Res.* **105**(E6), 15091– 15106.

Karachevtseva I.P. et al., (2014) *Planet. Space Sci.* **102**, 74–85.

分子雲から原始惑星系円盤に至るまでの化学組成進化

○古家健次[1]
[1]国立天文台

我々の太陽系をはじめとする星・惑星系は銀河系に普遍的に存在し、現在も活発に形成されている。星は分子雲と呼ばれるガスの塊の中で誕生する。生まれたばかりの星には原始惑星系円盤が付随し、惑星系は円盤の中で形成される。天文観測により、分子雲には水や有機分子を含む様々な分子が、ガス中や氷として存在することが分かっている。宇宙において分子はどのように生成されるのだろうか？分子雲から原始惑星系円盤、そして惑星が形成される過程において分子組成はどのように進化するのだろうか？我々の太陽系に存在する水や有機物は、太陽系の母体となった分子雲をそもそもの起源とするのだろうか？

本講演では、分子雲から原始惑星系円盤までの化学組成進化についての現状の理解を、講演者が関わった研究を中心に理論・観測の両面から紹介する。特に水が分子雲で生成されてから原始惑星系円盤に輸送されるまでの過程や同位体分別過程について詳しく紹介したい。最後に、星・惑星系形成領域の化学の研究の今後の展望について述べる。

ラブルパイル天体に適用可能なクレータースケール則と衝突励起振動に関する実験的研究

○山本 裕也[1], 荒川 政彦[1], 保井みなみ[1], 長谷川直[2], 横田優作[1], 大川初音[1], 杉村瞭[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】ラブルパイル天体とされる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く、そのため力学的強度が小さい(200 kPa-280 kPa)と言われている(Grott et al.,2019)。天体表層を構成する粒子の強度が小さい場合、衝突時に粒子自体の破壊が起こり、クレーター形成過程に影響を与えると考えられる。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、ボルダー表層に適用できるクレータースケール則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のクレーターは、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が、ラブルパイル天体表層では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成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、粒子の圧壊強度はそれぞれ約 60,13kPa 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】標的の受けた最大加速度とクレーターリム半径で規格化した衝突点距離の関係を調べた結果、クレーターリムにおける最大加速度は細粒標的の場合は 67.1 m/s^2、大玉標的の場合は 55.3 m/s^2 となり、標的粒径による最大加速度に大きな違いは見られなかった。また、ガラスビーズ標的や石英砂標的の先行研究と比較すると、リムにおける最大加速度が約 1/3～1/4 倍になっており、距離減衰率はガラスビーズ標的と似ていることがわかった(図 1)。さらに、加速度計のデータから衝突励起振動の持続時間は、細粒標的の方が系統的に長いことがわかった(図 2)。一方、先行研究の砂やガラスビーズの場合と比べて、持続時間が、細粒標的では砂の約 1.5～2 倍、ガラスビーズの約 4～5 倍長く、大玉標的では砂とほぼ同程度、ガラスビーズの約 3 倍長いことがわかった。これら衝突励起振動の結果とクレーターサイズ・スケール則の結果から、クレーター形成効率は、クレーターリムにおける最大加速度とその加速度の持続時間の積でほぼ説明できることがわかった。

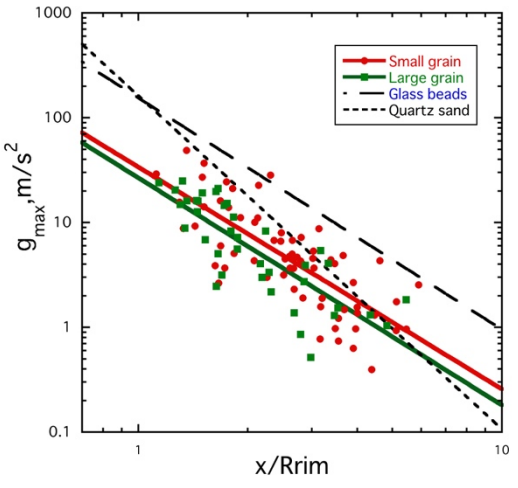


図 1:最大加速度と規格化衝突点距離の関係

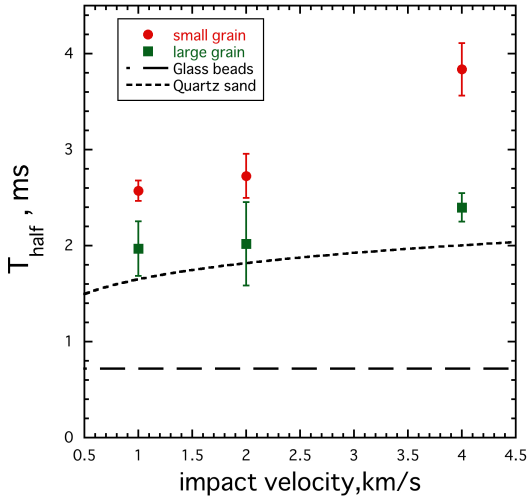


図 2:加速度の持続時間と衝突速度の関係

小惑星の起伏地形における
クレーター形成過程に関する実験的研究

○横田優作[1]、荒川政彦[1]、保井みなみ[1]、山本裕也[1]、長谷川直[2]、大川初音[1]
[1]神戸大学、[2]宇宙科学研究所

衝突クレーターは、小惑星や衛星などの固体天体において主要な地質学的特徴であり、その形状は衝突条件や表面状態によって変化する。平面に形成されるクレーターは円形である一方、斜面に形成されたクレーターは楕円形であることがわかっており、地形がクレーター形状に影響を及ぼすことは自明である。また、はやぶさ 2 や OSIRIS-REx などの探査機によって、小惑星リュウグウやベンヌは赤道域にバルジ地形を持つことが明らかになった。そこで、本研究では、クレーター形成実験の実施によって、クレーター形成過程における起伏地形の影響を調べ、リュウグウのウラシマクレーターのような起伏地形上に形成された非対称なクレーターの形成メカニズムを解明することを目的とした。

実験では、バルジ地形を模擬するために、直径 100μm の石英砂を用いて山脈型と円錐型の標的を作成した。クレーター形成実験は、神戸大及び宇宙科学研究所の縦型軽ガス銃を用いて行った。山脈型標的では、衝突点から山頂までの水平距離 d を変化させ、円錐型標的では、すそ野の幅 w を変化させた。また、クレーターの写真を多方向から撮影して、その画像を元に専用プログラムによりクレーターの３次元形状を再構築した。その形状モデルを用いて詳細にクレーターを調べた。

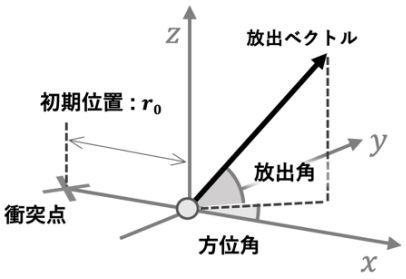
山脈型標的では、クレーターの長径が平面に形成されるクレーターの直径よりも大きくなった。また、クレーター形状については、3D モデルの断面図から、稜線方向にはクレーターリムが見られたが、斜面方向には見られなかった。さらに、クレーター形状は水平距離 d に強く依存しており、山頂付近に形成されたクレーターは楕円形であり、短径に対する長径のアスペクト比は、d が増加するにつれて減少し、同じ d では衝突速度の増加に伴って増加した。また、衝突点側の斜面に形成されるエジェクタカーテンは、エジェクタカーテンの角度が小さくなり、加えて、d が小さい時はエジェクタカーテンの非対称性が大きくなることがわかった。円錐型標的では、衝突前後の標的の高さの比を調べた。弾丸の運動量を標的の質量で割ったものを特性速度 v*と定義すると、v*が小さいときは高さ比があまり変化せず、v*が大きくなると、その増加に伴って高さ比が減少するという結果になった。このように、衝突前後の高さ比は、速度帯にかかわらず、弾丸の運動量で整理できた。

クレーター形成時のエジェクタ放出過程における サイズごとの三次元粒子追跡

○大川 初音[1]　荒川 政彦[1]　保井 みなみ[1]　長谷川 直[2]　横田 優作[1]　山本 裕也[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

太陽系天体の多くはその表面に衝突クレーターをもっているため，太陽系における天体の形成・進化の過程において，天体同士の衝突は普遍的に起こった現象であると言える．すなわち，固体天体の表面は，衝突クレーターの形成やそれにより生じたエジェクタが降り積もる事によって進化してきたと考えられ，これらの詳細な研究は天体の形成・進化に関する知見を得るため重要である．エジェクタに関する過去の研究では，重力支配域における衝突クレーター形成時のエジェクタ放出速度分布は簡単な指数関数で近似できることなどが調べられている．しかし，その多くの研究は天体表面が均一な粒径のレゴリスに覆われていることを想定している一方で，近年の小惑星探査の発展により，小惑星表面を覆うレゴリスはサイズが一様ではないことがわかってきた．そこで本研究では，サイズ分布を持つレゴリス層に対する衝突現象でのエジェクタの振る舞いに関して実験的研究を行ない，エジェクタ速度分布へのエジェクタ粒子サイズが及ぼす影響について考察した．

実験には，標的として，0.1，1，3，10 mm のガラスビーズを等質量で混合したもの(以下 4 種混合)と，0.1 mm のガラスビーズのみ の 2 種を用意し，この表面に比較的大きなガラスビーズ（3，5，10 mm）を 20-50 粒程度並べて使用した．これを真空引きしたチャンバーの中に設置し，低速（～200 m/s）と高速（1-4 km/s）に加速した弾丸を衝突させてクレーター形成実験を行なった．いずれの実験でもエジェクタが成長する様子を複数台の高速ビデオカメラを用いて撮影することで，エジェクタ粒子の三次元放出軌道を得ることができた．軌道から三次元放出ベクトルを解析し，放出位置に対する放出速度に加えて放出角・方位角も調べることができた．



本研究で測定したエジェクタ速度分布は，いずれの標的においても指数関数で近似できるものの、4 種混合標的の方が明らかに大きくばらついた。放出ベクトルにおいても，100μm 標的では方位角が 0-13°,放出角が 51-60° でばらついているのに対し，4 種混合標的ではそれぞれ 0-65°，30-62°と範囲が大きい．また，100μm 標的表面に並べた 5 mm，10 mm の粒子の放出速度は，同様に高速ビデオカメラを用いた粒子追跡法にて 500μm の石英砂の速度分布を調べた Tsujido et al,(2015)の結果と比較して，全体的に遅いという結果が得られた．これらはサイズの異なるビーズが衝突する際の運動量輸送によって説明できると考えている。

斜め衝突による高速度岩石エジェクタのサイズ－速度同時計測

○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

火星衛星フォボスからのサンプルリターンを行う MMX ミッションの科学的結果を最大化するには，フォボスの表面物質の詳細な調査が必要となる．火星への衝突によって放出されるエジェクタのサイズと速度の関係は，火星での衝突クレーター形成にともなって火星から脱出し，衛星に到達するエジェクタ量の推定に制約を与えるために重要である．衝突エジェクタのサイズと速度に関する研究として，天体表面の二次クレーター解析や室内実験などが行われており，エジェクタのサイズと速度の関係には傾向があることが示されている．しかし，二次クレーター解析では原理的に天体の脱出速度未満のエジェクタについてしか調べることができない．また室内実験においても 1 km/s 以上のエジェクタのサイズ－速度の情報は限定的であり，火星からフォボスに到達するのに必要なエジェクタ速度の 4 km/s を上回る高速なエジェクタに関する情報を標的から放出されるエジェクタの高速度カメラ画像から導出することは困難である．そこで我々は，玄武岩標的に弾丸を垂直衝突させ，二次標的面へのエジェクタ衝突を高速度カメラで撮影する新しい方法により，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を得た（野村他，惑星科学会 2019 年秋季講演会）．

本研究では，斜め衝突によって放出される高速度エジェクタのサイズと速度を調べ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標的への衝突実験を行った．弾丸には直径 3 mm のアルミニウム球を用い，衝突速度約 7 km/s で標的に対し入射角 45° で衝突させた．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，エジェクタの二次標的への飛行時間と飛行距離からエジェクタの速度，エジェクタによってガラス板に形成されたクレーターの直径から π 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．

斜め衝突で放出されるエジェクタの特徴として，非一様に放射状に伸びるレイのような模様がはっきりと見られ，5〜12 km/s の速度を持つ，弾丸直径の 1/300〜1/40 の大きさのエジェクタを捉えることができた．またエジェクタ速度別の破片サイズについて調べた結果，速度に依らず破片サイズ分布は似た形状となり，高速なものほど破片は小さくなる傾向が見られた．

多孔質氷天体を模擬したクレーター形成実験：衝突残留熱の計測

笹井遥，保井みなみ，荒川政彦，白井慶（神戸大学大学院理学研究科）

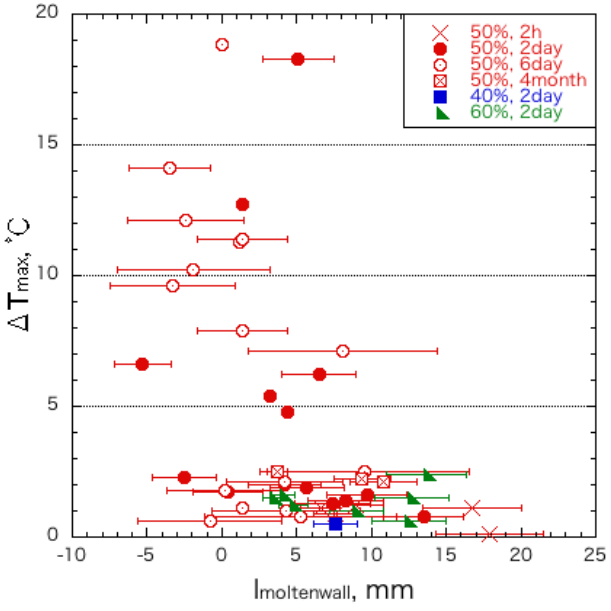
■ **はじめに**：彗星などの多孔質氷天体は、高速度衝突によるクレーター形成に伴ってクレーター孔付近に衝突残留熱が発生し，その結果、溶融池等が形成されると考えられる。この衝突残留熱は天体の熱進化において重要であり，また溶融池は有機物などの物質進化の場としても重要である．そこで本研究では，多孔質氷標的内部の衝突残留温度分布と溶融の有無を確認することを目的とし，多孔質氷天体を模擬した標的に対するクレーター形成実験を行った．

■ **実験方法**：多孔質氷天体を模擬した標的は，粒径数 100μm(＜710um)の氷粒子集合体をピストンで圧縮して作成した．標的の空隙率は 40~60 %で変化させ，-25℃の冷凍庫での保管期間を 2 時間から 4 ヶ月で変化させ焼結させた．衝突実験は直径 2 mm のアルミ球を弾丸に用いて，衝突速度 2.95~5.80 km/s で行なった．実験時の真空度は<240 Pa 以下，温度は-15℃である．温度測定は K 熱電対，データロガーを用いて，サンプリング間隔 10ms で行なった．実験後に標的内部の溶融物および溶融したエジェクタを回収した．

■ **実験結果**：クレーターの形状はスポール領域を伴うピット型クレーターで，クレーター壁は溶融した粒子状の溶融物に覆われていた．溶融物からの距離 $l_{moltenwall}$ と最大温度上昇 ΔT_{max} の関係を右図に示す．

凡例は標的の(空隙率，焼結期間)であり，また 0mm は溶融壁にあたる．0~5mm の溶融壁付近では距離が小さくなると温度上昇は指数関数的に大きくなった．また 5mm~20mm の範囲で焼結期間の異なる空隙率 50%の標的を比較すると，焼結期間とともに温度上昇は大きくなり 6 日間で最大を示した。さらに焼結期間を延ばすと 4 ヶ月では温度上昇は小さくなった．一方、空隙率の変化による顕著な違いは見られなかった．

溶融壁からの距離と最大温度上昇の関係
(vi = 4 km/s)



低強度標的を用いた高速度衝突破壊実験：衝突破壊強度と引っ張り強度の関係

*堀川和洋　　荒川政彦　　保井みなみ
神戸大学大学院理学研究科

背景：小惑星は、隕石母天体の研究により、さまざまな鉱物で構成されていると考えられている。 S 型及び C 型小惑星は、これらを母天体とするコンドライト隕石の構成物であるサブ mm サイズのコンドリュールと μm サイズのマトリックスからなると予測される。小惑星は、内部に空隙を持っているものが多く、C 型及び S 型小惑星の両方で多孔質天体が数多く見つかっている。天体の衝突破壊強度は小惑星のサイズに依存し、100m より小さいサイズでは天体の物質強度が衝突破壊強度を支配する。そこで本研究では、微小惑星の衝突破壊強度を調べるために、コンドリュールとマトリックス、それに空隙で構成される小惑星を模擬した標的を用いて衝突破壊実験を行なった。標的のマトリックス量や空隙率といった標的の内部構造を変化させることで、引張強度を 2 桁近く変化させて内部構造と衝突破壊強度の関係、サイズによる違いを調べた。

実験方法：衝突実験は、神戸大学の二段式軽ガス銃を使用して行った。弾丸は直径 4.7mm、2mm のポリカーボネート球、標的は小サイズと大サイズの 2 種類を用意した。なお、小サイズは、直径 30mm、40mm の球標的、大サイズは 60mm、80mm の球標的である。引っ張り強度を変化させるために粒径 100μm の石英砂と多孔質石膏の質量混合比を 2:1,4:1,8:1,20:1 と変化させた。衝突速度は 0.9km/s～ 5.7km/s とし、すべて正面衝突とした。引っ張り強度（Yt）はブラジリアン試験を行って測定した。

結果と議論：ブラジリアン試験の結果、標的の引張強度は石膏質量比の減少に伴い 800kPa から 10kPa に減少した。衝突実験後の破片質量分布を計測して、エネルギー密度 Q(=弾丸の運動エネルギー/元の標的質量)と最大破片質量(ml/Mt)の関係を調べた結果、衝突破壊強度（Q*）は、石膏質量比の減少とともに小サイズでは 2100J / kg から 180J / kg、大サイズでは 1900J / kg から 100J / kg に減少した。このことから、Q*は引張強度に比例することがわかった。一方、高速ビデオの撮影から解析した反対点速度（Va）は、引張強度や標的サイズに関係なく、エネルギー密度 Q と一つのベキ乗関係で記述できた。これらの実験結果を利用して破壊のスケーリング則を検証・改良するために、石英砂・石膏混合標的の規格化最大破片質量と無次元衝突応力(PI)の関係を調べた。その結果、PI と最大破片質量の関係は、無次元衝突応力により極めて良

フラッシュ X 線による衝突破片の速度ー質量分布の計測：粘土を用いた延性標的の衝突破壊実験

○長野 巧[1]、荒川 政彦[1]、保井 みなみ[1]、堀川 和洋[1]、長谷川 直[2]
[1]神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻、[2]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

微惑星の成長と進化において微惑星間の衝突破壊現象についての理解は重要である。衝突破壊現象を理解する上で必要となる物理量がエネルギー密度 Q（衝突体の運動エネルギーを標的の質量で割った値）と衝突破壊強度 Q^*（衝突後、最大破片が元の天体の半分の質量の時に必要なエネルギー密度）である。この衝突破壊強度 Q^*は天体サイズが 100m 以下であれば物理強度がこの衝突破壊強度を決定する（強度支配域における衝突破壊強度: Q^*_s）が、100m を超えると重力により破片が再集積し、ラブルパイル天体を形成するため最大破片が破壊直後の最大破片とは異なる。この時の Q^*を重力支配域における衝突破壊強度 Q^*_d と呼ぶ。この Q^*_dはこれまでスケールが大きいため室内実験ではなく数値シミュレーションでのみ求められてきたが数値モデルや計算コード、計算解像度などによって大きく結果が異なるという問題点があり、室内実験による検証が必要だった。一方、衝突破壊後の破片のうち天体の脱出速度以下で飛散するものは、再集積してラブルパイルを形成する。つまり室内実験においてすべての衝突破片の速度分布を測定すれば Q^*_d を決定することができる。しかしながら実験で破片の速度を測定する研究というのは少ない。我々は、これまで凍結粘土や多孔質石膏試料を用いて、速度分布に対する強度や圧密の効果を調べてきた。この研究では、延性試料を用いることで、速度分布に対する内部摩擦の影響を調べることにした。

そこで本研究ではフラッシュ X 線を用いて標的内部に設置してあるトレーサー粒子を衝突後間もなく撮像することによって標的内部の速度分布を測定し、標的試料全体の速度分布と Q の関係を調べた。実験は宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を使用した。弾丸は直径 7 mm, 228mg のポリカーボネート球を使用した。延性標的における速度分布を調べるために、標的試料は直径 60mm のベントナイト粉末とジェチルシリコンオイル(10,000cSt)を混合した粘土球を使用した。標的試料内に 12 のトレーサー鉄球粒子（直径 3mm）を単一平面上に配置し、その粒子の移動をフラッシュ X 線で撮像した。衝突速度は 2〜4.5km/s と変化させて、試料はすべてカタストロフィック破壊させた。トレーサー粒子を４本のフラッシュ X 線を用いて衝突後 100μs から 1ms の間で撮影し、鉄球の移動量を調べた。標的は、高速デジタルビデオカメラでも 10 万コマ毎秒と 20 万コマ毎秒で撮影することで、反対点速度と衝突点緯度を決定した。実験チャンバーは 2Pa 程度まで真空引きして実験した。実験の結果、標的は脆性的なクラックの発生や圧縮剪断破壊を起こさず、剪断変形と引っ張り破壊により、カタストロフィック破壊を起こすことが分かった。さらに、変形する標的内部の速度分布の計測にも成功した。衝突点近傍のトレーサー粒子は弾丸進行方向とは逆向きに、衝突点から遠いトレーサー粒子は弾丸進行方向に飛散することがわかった。また、X 線撮像するタイミングを一実験に 2 つ設けることにより、より詳細にトレーサー粒子の飛散の様子を観測した。衝

衝突閃光のターゲット物性と発光メカニズムの関係

○布施綾太[1]，阿部新助[1]，柳澤正久[2]，福原哲哉[3]，坂谷尚哉[3]，長谷川直[4]
[1]日本大学，[2]電気通信大学，[3]立教大学，[4]JAXA/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 観測では地球上での火球観測に比べて，地球月周辺のメテオロイドのサイズ頻度分布を効率的に明らかにすることができる(Liakos et al., 2019)．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が発光エネルギーに変換される割合)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，未だ十分に理解されていない．これまでの研究で「衝突閃光の主要な発光源はターゲットからの黒体放射」であり「衝突閃光は数 10Pa 以下の実験環境でも十分にLIF(月面：真空)と比較可能」であることが明らかになっている(Fuse et al., 2020).

[目的・手法] 本研究の目的は「衝突閃光の発光メカニズムの解明とモデル化」であり，特に本講演では衝突閃光と熱の関係に着目する．まず，石英砂，玄武岩，ガラスビーズ，アルミ板をターゲットとした衝突実験を行い，衝突閃光のライトカーブを得る．このとき，撮像と分光によるデータを取得し，プランクの式を分光データにフィッティングすることで，閃光の温度履歴を導出する．次に衝突閃光の主発光源は黒体放射であることから，ターゲット表層の熱伝導方程式を解き，ターゲット物性の依存性を調査する．ここで，真空下でのレゴリスの熱伝導率をモデル化した「モデル値(Sakatani et al., 2017)」と，ターゲットの石英砂，玄武岩の熱伝導率を測定した「実測値」を熱伝導方程式に代入して両者を比較する．

[結果] 衝突実験の結果，発光継続時間は石英砂が最も長く，玄武岩，ガラスビーズ，アルミ板の順で短くなった．例えば，表面温度が 1400K に達する時間で比較すると，石英砂は~0.4 秒に対して，玄武岩は~0.08 秒である．どちらも衝突初期の推定温度は~2000K である．また，発光効率も発光継続時間に従って変化し，石英砂は~5×10^{-4}，玄武岩は~0.7×10^{-4} となった．続いて，モデル値と実測値を代入した熱伝導方程式を解き，各ターゲットの温度履歴を再現可能か比較した結果，実測値では温度履歴を再現できず，モデル値では再現が可能であった．この考察として，ターゲットの空隙率の違いが要因であると考えられる．熱伝導率は空隙率ϕに依存することが分かっており，実測値ではϕ=34, 56%だった一方で，衝突閃光のターゲット表層はϕ=90%以上になり，モデルではϕ=90%以上で温度履歴をよく再現できた．また，石英砂と玄武岩の温度履歴の違いは粒子(真空)間距離の違いで再現ができた．熱伝導率は粒子間距離が長いほど大きくなり，SEM 画像から，石英砂は粒径(平均 345μm)に対して粒子間距離が短く，玄武岩はアグリゲイトを形成していたことから粒径(180μm 以下)に対して粒子間距離が長くなっており，このモデル値と衝突実験の温度履歴は整合的と言える．

3 次元衝撃回収実験によるコンドライト隕石の衝撃変成度の見直しに向けて

○大野遼[1]・黒澤耕介[1]・新原隆史[2]・三河内岳[3]・玄田英典[4]・鹿山雅裕[5]・小池みずほ[6]・富岡尚敬[7]・佐野有司[8]・佐竹渉[1]・松井孝典[1]

[1]千葉工業大学惑星探査研究センター，[2]東京大学工学系研究科，[3]東京大学総合研究博物館，[4]東京工業大学地球生命研究所，[5]東京大学大学院総合文化研究科，[6]広島大学大学院先進理工科学研究科，[7]海洋研究開発機構高知コア研究所，[8]東京大学大気海洋研究所

コンドライト隕石の衝撃変成の度合いは、岩石・鉱物組織を用いて分類（ショックステージ）されている。各ショックステージにおける隕石が経験した衝撃圧力・温度が目安として与えられている [e.g., Stöffler et al., 2018]。これは Stöffler table として知られ、頻繁に利用されている。この目安は、1 次元平板衝撃実験による変成鉱物組織観察と、静的高温高圧実験で求められた溶融条件を元に見積もられたものである。しかし、衝撃圧力と比較して衝撃温度の実測には融点温度以下の領域で不確かさを伴うため、Rankine–Hugoniot 関係式を用いた計算により経験温度を概算している。最近、Kurosawa & Genda (2018)は数値衝突計算により、衝撃圧縮後の減圧過程で岩石物質の塑性変形により、熱力学的推定より過剰な加熱が起こる可能性を指摘した。塑性変形加熱は、溶融組織だけでなく、鉱物中の元素拡散や揮発性成分の脱ガスといった、地球惑星科学で広く用いられる手法で検出可能な痕跡を残す可能性は高い。天然の衝突現象でもこのような過剰加熱が生じ、衝撃変成組織を形成した可能性がある。そのため、Stöffler table では特に 1,000 K 以下で経験温度を過小評価している可能性が高い。塑性変形加熱度は体積歪の関数として決定されるため、衝撃波伝播の幾何学条件が天然衝突と同様であることが肝要である。従来の 1 次元平板衝撃実験は塑性変形加熱度の実証的評価には適さない。そこで我々は 3 次元衝撃回収実験の手法開発を開始した。衝撃前後の回収試料の組織比較と数値計算による到達温度圧力の推定値をもとに、隕石変成組織の新たなショックステージ分類を提案することを目的する。

3 次元衝突回収実験は、千葉工業大学に設置されている二段式水素ガス衝撃銃を用いて行う。実際の隕石を標的として使用する前に、大理石および玄武岩を用いて実験手法の開発を行った。実験試料は直径 30 ㎜、高さ 24 mm の円柱状に加工し、チタン製のコンテナ（外径 50 ㎜）に収納する。これにポリカーボネイト製の球状飛翔体を、衝突速度~7 km/s で衝突させる。回収試料を観察したところ、衝突直下点近傍では、いずれの岩石においても主要構成鉱物（大理石はカルサイト、玄武岩は輝石および斜長石）が実験前試料よりも強い波状消光を示していた。大理石においては、カルサイト双晶が実験前試料と比べて増加している様子も観察された。玄武岩では、衝突直下点近傍に溶融脈が形成されていることが確認された。iSALE による数値計算では、大理石は最大で~6 GPa 程度、玄武岩では 10–20 GPa 程度の圧力を経験したという結果が得られている。カルサイト双晶は 110~480 MPa の衝撃圧で形成される[Lindgren et al., 2013]。玄武岩に含まれる輝石及び斜長石の波状消光は数 GPa〜十数 GPa の衝撃圧力が与えられたときに生じる。また衝撃圧力が 20 GPa を超えると斜長石は Planar deformation feature やモザイク化といった著しい変成組織を生じること、また衝撃を受けた鉱物の一部がガラス化することが知られているがそのような組織は観察されなかった。偏光顕微鏡による鉱物組織観察と数値計算結果に整合的であるといえる。玄武岩試料中では溶融組織が観察された。これは Stöffler table の分類とは異なる。Stöffler table では、玄武岩に局所的な溶融脈が形成を開始する衝撃圧力閾値は 20 GPa である。ところが、岩石全体が経験した衝撃圧は、組織観察と数値計算双方において 20 GPa 以下であるという結果であった。このことは従来の 1 軸衝撃圧縮実験よりも高温領域が生じたことを示しており、３次元的な衝撃波伝播時に塑性変形加熱が起きたことを示唆する。

粉体衝突実験における衝突直下点物質の回収

黒澤耕介[1]，大野遼[1]，佐藤雅彦[2]，新原隆史[2]，長谷川直[3]，佐竹渉[1]，松井孝典[1]
[1]千葉工業大学, [2]東京大学, [3]宇宙航空研究開発機構

太陽系の大気を持たない固体の惑星や衛星表面を支配する地形は衝突クレータである．このことは太陽系天体がその歴史を通じて天体衝突にさらされてきたことを物語る．衝突速度が秒速数 km を超えると衝撃波が発生し，顕著な加熱も起こるようになる．衝突直下点において衝突天体が持ち込んだ運動エネルギーがどのように熱エネルギーに変換されるのかを理解することは太陽系天体の熱史や隕石中に刻まれている衝撃変成過程を理解する上で重要であろう．理想的な物質であれば熱力学的演算によって衝撃で発生する圧力や昇温度を算出することが可能であるが，実在物質のように粒界や様々なサイズの空隙がある場合にどうなるかは自明ではなく，モデルによる不定性が大きい．近年ではコンドリュールやマトリックスのように異なる組織が混在していたり，マクロポロシティが存在する場合には衝撃波伝播時に著しい温度圧力の不均質を生じるという報告もされている [Bland et al. 2014, *Nature Communications* **5**, 5461]．

我々はこのような問題意識を持って千葉工業大学惑星探査研究センターと宇宙科学研究所に設置された二段式水素ガス衝撃銃を用いて粉体への衝突実験を行った．我々は粉体標的としてジルコニア，ステンレスなどの真密度が大きい物質を用いると衝突後にお椀状に凝結した物質(以下，お椀形状物質と呼ぶ)が残されることを見出した．宇宙科学研究所の縦型衝撃銃を用いた実験ではお椀形状物質がクレータ中央に残されていることを確認した．さらに高速ビデオカメラを用いて標的上空からの撮像計測を実施し，この物質が衝突後 ~100 μs の段階で衝突点近傍に形成されており，自発光を放っていること，つまり温度が上がっていることを確かめた．このような観察事実から回収されたお椀形状物質は衝突直下点の物質が凝集し固結したものである可能性が高い．したがってこの組織は衝突直下点の情報を持っているだろう．回収したお椀形状物質を樹脂埋めした後に厚片を作成し光学顕微鏡，電子顕微鏡で観察したところ，衝突点からの距離に応じて異なる組織を示すことがわかった．衝突点遠方では標的物質そのものがゆるく結合し，中間点では標的物質が砕かれて結合していた．衝突点ごく近傍では熔融固化を経験した物質に見られるような樹枝状組織が観察された．すなわちジルコニア，ステンレスが熔融するほどの温度にさらされたことを示唆している．この方法を用いれば超高速度衝突の直下点，すなわち高圧，高温，高歪速度を経験した物質を回収して詳細に分析することができ，幅広い応用を期待できる．温度や圧力変化に対して結晶構造や残留磁化が変化するような物質をトレーサとして標的に混合すれば，衝突直下点の諸情報を直接調べることが可能になるだろう．実際に硫化鉄や月土壌シミュラントを混合した粉体標的への衝突実験も実施したところ，固結したジルコニアビーズ中に硫化鉄組織が取り込まれて回収することができた．講演ではお椀形状物質の組織観察結果について報告し，惑星科学応用について議論する．

月惑星探査アーカイブサイエンスの意義と 大学共同利用・共同研究拠点 ARC-Space の取組

○出村裕英[1]　　[1]会津大学宇宙情報科学研究センター

アポロ計画以来半世紀、各国宇宙機関の月惑星探査ミッションの公開データや知見が蓄積されてきている。各国宇宙機関は有期のプロジェクトで月惑星探査を実施して成果を公表し、学術コミュニティがそれら公開データを蓄積管理しつつ ICT 技術と歩調を合わせてアップデートしていくのが世界の潮流である。米国 Planetary Data System はその一例で、NASA の財政的人的支援を受けたデータの質保証や拠点ノードからの配信、SPICE Toolkit などのツール配布が有名である。着実な科学成果を挙げるために、データキュレーション（新たなデータプロダクトの整備やデータベース構築）、可視化、機械学習など最新の ICT 技術の重要性が増してきている。日本においても、JAXA や海外宇宙機関の公開データとソフトウエアを一体で扱って ICT サービスを提供することを目的とした文部科学省の大学共同利用・共同研究拠点が令和元年度に認定された。「月惑星探査アーカイブサイエンス拠点」会津大学宇宙情報科学研究センター(ARC-Space)である。

ARC-Space の目的は、宇宙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し、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である。拠点の情報基盤を用いて開発ソフトウエアや作成データプロダクトの配信および ICT サービスを学術コミュニティに提供し（ https://arcspace.jp ）、探査データ解析実習会など解析ノウハウを共有する各種集会や出展を実施し、母体学協会である惑星科学会と密に連携した公募審議・選定委員会および拠点運営委員会が採否を決める公募型共同研究を行っている。この公募制度は研究試作から実用水準への引き上げまで段階を追った発掘育成を行うという特色があり、月惑星探査データの高付加価値化や、解析ツールの開発・整備、サービスの提供などを通じた月惑星探査アーカイブサイエンスを推進する課題が選ばれている。研究開発の前段階としての萌芽研究、産業界との連携等も含めた本格的な研究開発を行う実用研究、2 種類のカテゴリがある。昨年度は萌芽8件と実用3件、今年度は萌芽6件と実用2件がそれぞれ採択された。コミュニティと共にアーカイブサイエンスを推進すべく、令和3年度の公募にも是非ご応募頂ければ幸いである。

年度カテゴリ	研究代表者（所属機関）	採択課題名
令和 1 萌芽	野口　克行（奈良女子大学）	火星探査機による大気観測データの解析環境整備
令和 1 萌芽	渡部　潤一（国立天文台）	アマチュア流星観測ネットワークによって取得されたデータアーカイブ公開
令和 1 萌芽	笠羽　康正（東北大学）	米欧火星探査機群観測データによる新大気リトリーバル技術の検証 ～欧 ExoMars Trace Gas Orbiter および日 MMX への応用展開準備～
令和 1 萌芽	杉山　耕一朗（松江高専）	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ツールの開発
令和 1 萌芽	阿部　新助（日本大学）	探査機搭載レーザー高度計 LIDAR を用いた小惑星ラフネス・マップの構築
令和 1 萌芽	林　洋平（国立天文台）	地図オブジェクト絞り込みが可能なウェブ API ベースの動的ベクトルタイルの実現 ～かぐや/スペクトラルプロファイラの極域データを用いたケーススタディー～
令和 1 萌芽	山本　幸生（JAXA）	SPICE を用いた Python 版視野シミュレータの開発
令和 1 萌芽	本田　理恵（高知大学）	はやぶさ2ONC による小惑星リュウグウのマルチスケール画像アーカイブ構築
令和 1 実用	林　洋平（国立天文台）	月極域探査データの利活用を促進するための月面 3D Web-GIS 開発・サービス展開
令和 1 実用	三田　肇（福岡工業大）	たんぽぽ計画データベースのフロントエンド機能拡張および成果の一般公開
令和 1 実用	平田　成（会津大学）	不規則形状小天体探査アーカイブデータ解析のための三次元地理情報システム Web アプリと探査画像 DB の開発
令和 2 萌芽	安藤　享平（郡山市ふれあい科学館）	月惑星探査データの研究初学者および教育現場での活用に向けたデータキュレーション
令和 2 萌芽	笠羽　康正（東北大学）	米欧火星探査機群観測データによる新 大気リトリーバル技術の検証(2) ~欧 ExoMars Trace Gas Orbiter お よび 日 MMX への応用展開準備~
令和 2 萌芽	吉村　義隆（玉川大学）	火星での生命兆候探査のための、機械学習を用いた画像解析による、有機物と鉱物粒子の識別法開発
令和 2 萌芽	杉山　耕一朗（松江高専）	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ツールの開発
令和 2 萌芽	松本　晃治（国立天文台）	小天体重力場計算の並列処理による高速化とその応用
令和 2 萌芽	林　洋平（国立天文台）	Planetary Data System (PDS) でアーカイブされた惑星探査データをウェブ上で利活用するための データリポジトリシステムに関する研究
令和 2 実用	春山　純一（JAXA）	SELENE(かぐや)画像データを利用しての月面クレータ自動抽出 GUI ツールの研究開発
令和 2 実用	佐々木　聰（東京工科大学）	たんぽぽ計画用データベースの新規機能追加および研究者向け・一般向けウェブサイトの改訂

ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気シミュレーションデータ可視化ツール dcwmt の開発

○杉山耕一朗[1], 松村和樹[1], 森脇大智[1], 村橋究理基[2], 石渡正樹[2], 林祥介[3]
[1]松江高専・情報, [2]北海道大学・宇宙理学, [3]神戸大学・惑星/CPS

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な惑星大気の数値シミュレーションデータが次々に生成されている．一般に数値シミュレーションデータの可視化においては全体構造を把握するための低解像度の画像と個別の現象に注目した高解像度のクローズアップ画像を別々に作成するが，このような可視化手法を大規模な数値シミュレーションデータに対して適用することには困難が伴う．巨大な計算領域の中に無数に存在する小スケールの現象をピックアップし，そのクローズアップ画像を個別的に作成することは困難だからである．そこで本研究は，図の重ね合わせ・画像の色調変更・アニメーション表示などの惑星大気分野でよく用いられる操作に加えて，大規模数値シミュレーションデータのスムーズな拡大縮小ならびにスクロールが可能な可視化ツールを開発し，それをユーザにとって使いやすい形に整備して公開することを目的とする．

開発した可視化ツールは dcwmt(Dennou Club Web Map Tool)と名付けて公開した[1]．dcwmt はウェブ地図技術を用いており，従来の惑星大気分野の可視化ツールの主要機能を実装するために独自の拡張を行っている．それは，各ピクセルの RGB 値に対応する実数値を格子点データとして格納する数値データタイルの定義(惑星科学会 2019 年秋季大会 P20)，ウェブ地図ライブラリ Leaflet[2]の拡張クラスの定義とそれを用いた数値データタイルの描画，時空間の 4 次元データのディレクトリツリーの定義である．dcwmt はウェブブラウザ上で数値シミュレーションデータを表示するものとしたため，ユーザは自分の PC のブラウザから Web サーバ上の HTML ファイルにアクセスするだけで dcwmt を使うことができる．ユーザが自分の数値シミュレーションデータを dcwmt で可視化する際は，Web サーバ上の適当なディレクトリに dcwmt の提供する HTML ファイル，CSS ファイル，JavaScript ファイルに加えて，数値データタイルのディレクトリツリーを設置するだけで済むようにした．

dcwmt にはまた，チュートリアル資料や数値シミュレーションデータから数値データタイルのディレクトリツリーを作成するために必要なスクリプト群などを同梱した．検証として 2020 年 3 月に北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻の学生を対象とした dcwmt のチュートリアルセミナーを実施したところ，学生がマニュアルを見ながら dcwmt を用いた可視化を直感的に行えることを確認することができた．

[1] dcwmt (Dennou Club Web Map Tool), http://www.gfd-dennou.org/library/dcwmt/
[2] Leaflet - a JavaScript library for interactive maps, https://leafletjs.com/

「たんぽぽ計画」捕集実験試料用データベース構築

Database construction for collected samples of "TANPOPO mission"

○奥平 恭子[1]　三田 肇[2]　佐々木 聰[3]　矢野 創[4]　山岸 明彦[5]　出村 裕英[1]
矢口 勇一[1]　石橋 之宏[6]　今仁 順也[7]
[1]会津大学　[2]福岡工業大学　[3]東京工科大学　[4]JAXA　[5]東京薬科大学　[6]法政大学　[7](株)由紀精密

●たんぽぽ計画の概要と科学的意義　たんぽぽは、国際宇宙ステーション・日本実験棟を利用したアストロバイオロジー実験である。地球上の微生物等がどの程度宇宙空間で生存可能かを調べる「曝露実験」と、地球と宇宙空間の微生物と有機物の双方向伝播の可能性を検証するための「捕集実験」からなる。本研究では、宇宙由来および地球由来の微小な塵をエアロゲル（超低密度ガラス）パネルで採集した後、帰還試料を地上で分析する「捕集実験」のデータを扱う。たんぽぽは複数の科学的テーマを掲げる日本初のアストロバイオロジー実験シリーズであり、仮に地球由来の微生物を含む塵をステーション軌道上で捕集できれば、地球の生命や関連物質が宇宙空間へと運搬されている可能性を示唆することになる。

●初期分析のフローと生成されるデータ　地球帰還した各パネルは、たんぽぽチームが独自に開発した初期分析システム（CLOXS）を用いて、次の様に取り扱う。1）パネル表面の顕微画像の自動撮像・統合・マッピング、2）貫入孔候補や表面付着物等の検出・ID 付与、3）貫入孔候補への再訪問と拡大・三次元撮像、4）研究者による貫入孔の判定・分類・掘削用立体形状の決定、5）試料配分委員会による詳細分析チームへの配分決定、6）貫入孔画像や付随する各種データをデータベースへ格納。この過程で生成されるデータは主として画像が多いが、後述する各種情報も重要なデータである。

●求められるデータベースの役割・機能　現在はたんぽぽ１の 1-4 年目全ての捕集パネルが帰還しており、近々たんぽぽ２の試料帰還を予定している。微粒子衝突痕や表面付着物を含めると、優に 1000 を超える試料が確認されている。それらデータの適切な管理、ユーザや管理者にとっての使い勝手の良さ、成果物（論文）の可視化・DOI による容易な検索、強固なセキュリティ、等がデータベースに要求される。研究チーム内でのニーズ調査の後、クラウドサーバを用いた多様な形式のデータでの試験運用およびヒアリングを行い、現在のデータベースの仕様が決定された。

●現在までの開発状況　その後は会津大学にてバックエンド側の基礎的開発から始まり（https://arcspace.jp/tanpopo1/index_ja.html）、昨年度は地元ベンチャー企業と協力し、捕集実験試料のデータを扱うより実用性の高いデータベースを構築した。各パネルの衝突痕について、固有 ID、光学顕微鏡画像、衝突痕（貫入孔）形状によるタイプ分類、貫入孔サイズ、分配された分析チーム等の紐づけられたデータが格納・管理されており、試料の全件（一覧）表示や、ユーザがプルダウンメニューや選択ボタンで複数条件を選択する簡易検索によって、各試料の画像とテキストデータ表示が可能となっている。

●今後の開発予定と期待できる波及効果　今年度は、研究チームからのフィードバックを受け、より複雑な検索機能を追加し、画像のスケール表示やデータのアップロード方法を改良中である。プロジェクト終了時までに、世界のアストロバイオロジー研究者に向けてデータベースを公開予定である。過去の類似ミッション（彗星塵サンプルリターンである NASA の STARDUST 計画など）との比較や今後の後継ミッションでの成果を組み合わせることにより、アーカイブ・サイエンスの発展への寄与を目指している。

（謝辞）本研究は文部科学省特色ある共同研究拠点の整備の推進事業の助成を受けたものです。また、本研究は文科省共同利用・共同研究機関の会津大学宇宙情報科学研究センターの協力を得て遂行されました。
採択いただいたのは以下の研究です。
・令和 1 年度 実用研究（代表・三田 肇）
・令和 2 年度 実用研究（代表・佐々木 聰）

小天体探査データ解析のための三次元地理情報システムと画素指向画像 DB の開発

○平田 成[1,2]，菊地 紘[3]，出村 裕英[1,2]，佐藤 広幸[3]，
松本 晃治[4]，中里 直人[2,5]，河野 郁也[2,5]，古舘 拓真[2]
[1]会津大学先端情報科学研究センター（ARC-Space），[2]会津大学コンピュータ理工学部，
[3]宇宙航空研究開発機構月惑星探査データ解析グループ（JLPEDA/JAXA），
[4]国立天文台 RISE 月惑星探査プロジェクト，
[5]会津大学先端情報科学研究センター（CAIST）

地理情報システム（GIS）は，電子データ化された画像や地形図，さらに種々の主題図などを，それぞれのデータが持つ地理空間座標情報（通常は地理座標が用いられる）を用いて統合的に管理し，地理情報として統合的な可視化や解析を行うことが可能なシステムである．惑星科学分野でも月や火星などのリモートセンシングデータが豊富に得られている天体では GIS を利用した解析が一般化しており，多くのソフトウェアが利用可能となっている．本研究グループでは，不規則形状天体の形状をポリゴンモデルで表現し，個々のポリゴンに付与した ID を地理座標に代わる地理空間座標情報として用いることを提案し，天体の形状と地理情報を三次元 CG で可視化する三次元地理情報システム（3D-GIS）の AiGIS ファミリー（AiGIS および WebAiGIS）を開発した．スタンドアロン版の AiGIS は，はやぶさ 2 などのミッションの現場で活用されている．

3D-GIS でハンドリング可能な地理情報の種類が増えれば，より多様な視点からの解析を行うことができるようになる．本研究グループでは，3D-GIS 本体の開発に加えて新たな地理情報を生成する基盤の開発にも取り組んでいる．画素志向画像 DB と GPU により高速化された重力場計算方法の開発もその一環である．画素志向画像 DB は，画像の画素一つ一つに個別の地理空間座標情報を与え，DB 管理を行うというコンセプトで開発された．これにより，任意の条件（例えば天体表面上の特定点を観測したデータや，入射角・出射角・位相角が一定範囲のデータなど）を満たす画素を，横断的に検索可能となる．各画素は自身の地理空間座標を持っているので，検索結果は簡単に 3D-GIS で表示可能となる．

天体形状を表現するポリゴン形状モデルのポリゴン単位で計算でき，3D-GIS で可視化可能な物理量の一例としてとして重力ポテンシャルがある．重力ポテンシャルの計算量は形状モデルのポリゴン数が増加すると非常に大きくなることが知られているが，天体力学の N 体計算などと同様，並列計算で高速化することができる．今回，GPGPU 技術の一種である CUDA を活用することで，従来の計算方法より 2 桁以上高速に重力場計算を行うことに成功したので，その結果を報告する．

月南極域カラーモザイクの作成

○佐藤広幸[1]、大竹真紀子[2]、嵩由芙子[2]、山本光生[1]
[1]JAXA 宇宙科学研究所、[2]会津大学

JAXA の月周回衛星 SELENE（かぐや）は 2007 年 9 月に打ち上げられ、2009 年 6 月までに極軌道を約 7600 周し、観測を行った[1]。かぐや搭載のマルチバンドイメージャ（MI）は、可視域 5 バンド（415, 750, 900, 950, 1000nm; 約 20m/pixel)、近赤外 4 バンド（1000, 1050, 1250, 1550nm; 約 62m/pixel）のラインスキャナーであり、実質 18.7 ヶ月の観測期間中にほぼ全球の撮像を完了した[2]。極軌道上からの観測により、極域周辺では様々な入射角における重複観測が実現した一方で、軌道精度が MI の高い解像度に追いつかず、画像同士の位置ずれが極域周辺で多く確認された。

本研究では、MI の極域周辺における位置ずれを改善し、重複観測をできる限り使用する事により、従来より高精細なカラーモザイクの作成を目的とする。まずかぐやの軌道精度を改善するため、MI と Lunar Reconnaissance Orbiter（LRO）搭載のレーザー高度計（LOLA）[3]による高解像度極域地形モデルとの３次元マッチングを行った。マッチングにより得られたずれ量を軌道情報へ反映した後、各 MI 画像の正しい位置情報と LOLA の地形モデルから、MI 画像の各ピクセルにおける正確な入射角（$\boldsymbol{i}$）、出射角（$\boldsymbol{e}$）、および位相角（$\boldsymbol{g}$）を計算した。次に、測光補正係数を Hapke モデル[4]を用いて算出した。可能な限り $\boldsymbol{i},\boldsymbol{e},\boldsymbol{g}$ の値幅を広げ、測光補正係数の精度を高めるため、MI の重複観測数が比較的多く、かつアルベドの変化が少ない平坦な地域である Idel’son L クレータの南（緯度 85.8-86.5° S, 経度 120-142° E）をサンプリング領域として設定し、測光補正係数を算出した。

算出された係数、$\boldsymbol{i},\boldsymbol{e},\boldsymbol{g}$、および正確な位置情報を用いて、緯度 85° S 以南の全 MI 画像の測光補正を行い、ピクセル単位での重複観測から中央値を算出してマップ化した結果、地形による陰影が取り除かれ、影領域が最小化されたカラーモザイクが作成された。今後モザイク作成領域を広げ、月南極域での地質解析、宇宙風化の緯度依存性、高地地殻組成の地域差、などを検証する予定である。

【参考文献】

[1] Kato, et al. (2010). Space Science Reviews, 154(1-4), 3-19. [2] Kodama, et al. (2010) Space Science Reviews, 154(1-4), 79-102. [3] Smith, et al. (2010) Space Science Reviews, 150(1-4), 209-241. [4] Hapke, B. (2012) Theory of reflectance and emittance spectroscopy. Cambridge University Press.

すばる望遠鏡HSCデータを用いた小惑星検出アプリCOIASの開発

◯浦川　聖太郎[1]

[1]日本スペースガード協会

すばる望遠鏡 HSC 用の小惑星検出アプリケーション COIAS(コイアス。Come On! Impacting ASteroids) の開発について報告する。これまで 100 万個に迫る小惑星が発見されている。これらの小惑星の軌道分布を調べることで、同じような軌道要素をもつ「小惑星の族」や「小惑星の群」のサイズ分布や軌道の広がりが分かってきた。一方、小惑星の直径は 1km 以下になると「ヤルコフスキー効果」と呼ばれる非重力効果の影響を受け、その軌道長半径が増減する。これまで発見されたおよそ 100 万個の小惑星の多くは直径 1km 以上のメインベルト小惑星である。つまり「ヤルコフキー効果」を受けるような小さな小惑星までを含んだ真の小惑星の軌道分布はいまだに分かっていない。本研究では、すばる望遠鏡 HSC のデータを用いて、直径 300m クラス小惑星の軌道情報のカタログ化を行う。これまでもすばる望遠鏡を用いた小惑星研究はなされてきた。しかし、位置情報については、軌道情報を一元的に管理する MPC（Minor Planet Center）に効率よく報告されていなかった。そこで、GUI(Graphical User Interface) を用いて視覚的に小惑星の検出、位置測定、測光、報告を行うアプリケーション COIAS を開発した。試験的なデータ解析の結果、COIAS を用いることで黄道面付近を観測した HSC の約 16 平方度のデータから、約 4100 個の新小惑星候補天体を検出した。HSC の戦略枠データに適応させれば、発見数は数万に及ぶ。2023 年頃には LSST(Large Synoptic Survey Telescope) の運用が開始される。HSC で発見された小惑星と LSST で検出した小惑星の軌道データがつながれば、直径 300m クラス小惑星の軌道精度が格段に上昇し、後世の太陽系天文学のレガシーとなるデータの創出が行われる。また、視覚的な操作が可能な COIAS を用いることで、研究者以外も小惑星の発見体験を得られる。学生に対する教育的効果や市民天文学への波及効果も期待できる。

はやぶさ 2 のリュウグウ近傍観測の科学成果

○渡邊誠一郎[1], 田中智[2], 吉川真[2], 杉田精司[3], 岡田達明[2], 北里宏平[4], 竝木則行[5], 荒川 政彦[6], 橘省吾[3,2], 諸田智克[3], 杉浦圭祐[7], 嶌生有理[2], 平田成[4], 平田直之[6], はやぶさ２サイエンスチーム[8]
[1]名古屋大,[2]JAXA/ISAS,[3]東京大,[4]会津大,[5]国立天文台,[6]神戸大,[7]東京工業大,[8]はやぶさ 2 プロジェクト

探査機はやぶさ 2 は Cb 型小惑星リュウグウの近傍探査を終え、2020 年 12 月 5 日 UTC のリュウグウ試料の入ったカプセルの地球への投下に向けて最終段階の飛行をしている。これまでにリュウグウ近傍観測の成果は次々と公表されており、本発表ではその総括を行う。

リュウグウは空隙率>50%のラブルパイル天体であり、形状は顕著な赤道リッジを持つコマ型をしており、過去の高速自転によって形成された可能性が高い[1]。赤道／極の半径比は 0.87 と 1 に近く、中緯度で最も半径が小さいという特徴は回転不安定による内部変形では説明が難しい。一方で母天体破片再集積時に形状がほぼ完成したとすると、SCI 衝突実験によるクレータースケーリング則から求められた約 1000 万年前後という若い表面年代[2,3]と、母天体候補である内部小惑星帯の衝突族の形成年代[3]とは整合しない。このため、リュウグウ形成後に YORP 熱効果による自転加速で表面地滑りが励起され、その結果コマ型形状形成され、その際に既存のクレーターがかき消されて表面年代が若返った可能性が浮かび上がる。形状形成に関する SPH シミュレーションの結果[4]を紹介しつつ、問題点を整理する。

リュウグウの物質強度の理解は難しい。大きな SCI クレーターが生成されたことから、表層の凝集力はきわめて弱いと考えられる[2]。一方でその形状は半円状であり、クレーター内に大きな岩塊が破壊されずに残ったことから[2]、少なくとも一部の領域や岩塊は比較的大きな強度を持つらしい。ただし、MASCOT 搭載の熱放射計 MARA[4]や TIR[5]の観測から得られた熱伝導率から推定される岩塊の空隙率は高く、強度は弱いとも考えられる。天体史を考えると天体衝突や近接遭遇時の惑星潮汐による変形を受けたはずで、そうした際の振る舞いは天体強度に強く依存する。つまり、天体強度は小惑星帯から地球への物質輸送過程に強い影響を持つ。また、回転不安定に伴い一時的に衛星を持った可能性もあり、それが失われた過程も調べる必要がある。太陽放射や宇宙風化による表面スペクトルの変化[6]などから。この問題についても議論したい。なお、リュウグウの特異な熱放射特性[5,7]についても述べたい。

リュウグウの極めて低い反射率[3,8]は有機物の存在と粒径効果を示唆する。NIRS3 による水（MgOH）の弱い吸収が全球に広がること[8]や、岩塊中に見られた炭素質コンドライトの CAI 様構造[9]などの理解も含めて、2 ヶ所から採取された表層試料の地上分析が待たれる。

[1] Watanabe+(2019), *Sci.* **364**,268; [2] Arakawa+(2020), *Sci.* **368**,67; [3] Sugita+(2019), *Sci.* **364**,eaaw0422; [4] Sugiura+(2020), *Icarus* submitted; [4] Grott+(2019), *Nat.Astron.* **3**, 971; [5] Okada+(2020), *Nat.* **578**,529; [6] Morota+(2020), *Sci.* 368,654; [7] Shimaki+(2020), *Icarus* **348**, 113835; [8] Kitazato+(2019), *Sci.* **364**,272; [9] Jaumann+(2019), *Sci.* **365**,817.

リュウグウ上の明るい岩塊の詳細解析

〇杉田精司[1]，杉本知穂[1]，巽瑛理[2,1]，湯本航生[1]，青木美波[1]，諸田智克[1]，本田理恵[3]，亀田真吾[4]，長勇一郎[1]，横田康弘[5]，坂谷尚哉[4]，神山徹[6]，澤田弘崇[5]，早川雅彦[5]，松岡萌[5]，鈴木秀彦[7]，本田親寿[8]，小川和律[5]，吉岡和夫[1]
[1]東京大，[2]カナリア天体物理研，[3]高知大，[4]立教大，[5]JAXA，[6]産総研，[7]明治大，[8]会津大

探査機はやぶさ 2 の初期全球観測で、小惑星リュウグウの平均的な表面が極めて低い反射率（<2%,入射光角 30 度、出射光角 0 度の標準条件）を持つことが明らかになった[1]．そのため、平均的物質と異なる物質が存在すれば、明るい物質として浮かび上がる可能性が高い．実際，低高度での詳細観測で高反射率地域を探索したところ，高い反射率を持つ「明るい岩塊」（Bright boulder, BB）が数多く発見された[2]。さらに，BB のスペクトル解析からは，BB が S 型と C 型に分類でき、前者はリュウグウ母天体に衝突した別の小惑星の破片である一方で、後者は母天体の外層部に由来する可能性があることが分かってきた。また，小惑星ベヌーにも BB が見つかったため[3]，両小惑星の起源と進化を比較する上で重要な情報を与えてくれることが期待される．しかし，タッチダウン１(TD1)後の画像は手つかずであった．そこで本研究では，これらの画像を解析することで，BB のデータ数を増やし、BB の特性とリュウグウ母天体の進化を議論する。具体的には、人工クレーター探索のために行われた高解像度（17cm/pix）広域観測（CRA1, CRA2）と TD1 後の低高度観測を解析した[4].

解析結果からは、リュウグウの進化にとって重要な情報が得られた。まず，S 型 BB はサイズ分布($N(\geq D) = D^{-a}$)のベキ指数 a が 1.6±1.2 と小さいのに対して、C 型 BB の a は-3.1±0.7 と大きい。そのベキ乗則に基づくと，S 型と C 型の BB がリュウグウ全体に占める体積比はそれぞれ$3^{+3}_{-1} \times 10^{-6}$と$4^{+23}_{-3.2} \times 10^{-5}$と推定され，サンプラーで取得が期待される mm スケールの破片に占める C 型 BB の面積比は≥0.2%と推定される．C 型 BB の a は平均的ボルダーの a（約 2）より大きいため，小さい直径ほど C 型 BB の比率が高くなる．そのため，μm スケールの試料には，C 型 BB と同様の物質が見つかる可能性は高いと期待される.

79 個の BB のスペクトル解析からは，C 型 BB のスペクトル分布が１つの連続したトレンドを形成することが分かった．さらにそのトレンド曲線は，アエンデ隕石(CV3)の加熱トレンドとは不調和な一方で Murchison 隕石(CM2)や Ivuna 隕石(CI)の加熱トレンドと調和的であることも分かった。この観察事実は，リュウグウが熱変成を受けたことを示唆する.

さらに主成分解析からは，S 型 BB のスペクトルが初期物質を異にする２つの宇宙風化軌道に沿って分布することが判明した。これは，小惑星リュウグウの母天体に２つの異なる天体が衝突したことを示唆する.

引用文献：[1] Sugita et al. (2020) *Science*, *364*, eaaw0422. [2] Tatsumi et al. (2020) *Nature Astron*. *4*, doi:10.1038/s41550-020-1179-z [3] DellaGiustina et al. (2020) *Nature Astron*., *4*, doi:10.1038/s41550-020-1195-z [4] Sugimoto et al. (2020ab) to be submitted.

「はやぶさ２」タッチダウン運用で得られたRyugu表面の詳細な熱物性構造

Detailed thermal structure on the surface of Ryugu using the highest resolution images of TIR data

◯田中智[1]，菊地翔太[1]，白井慶[2]，坂谷尚哉[3]，嶌生有理[1]，岡田達明[1]，
福原哲哉[3]，千秋博紀[4]，荒井武彦[5]，神山徹[6]，出村裕英[7]，関口朋彦[8]
[1]宇宙航空研究開発機構，[2]神戸大，[3]立教大，[4]千葉工大，
[5]足利大，[6]産総研，[7]会津大，[8]北海道教育大

「はやぶさ２」は２度にわたるタッチダウンを成功させた．中間赤外カメラ（TIR）は最終降下運用の直前まで撮像を高頻度で行い，最高分解能(0.9cm/pix)の撮像に成功した．さらに１回目のタッチダウン運用(2019 年 2 月 21 日)では最終降下直前のホバリング時（高度約 8.5m）に探査機を 10 度程度傾斜させたために太陽電池パドル（SAP）の影が TIR の視野内に入り、太陽光が遮蔽されることに伴う表面温度変化が約 256 秒間（9 ショット分）観測された．

取得した画像を特徴点抽出法によって同一座標になるように合成し，各ピクセルの温度変化をトレースした．また，SAP によって影になった部分の判定は TIR 画像で温度変化が確認される境界と探査機の姿勢情報からシミュレーションした SAP 位置との整合性を検討して１秒毎の画像座標上の影位置を決定した．日陰になっていない状態での温度を推定して表面初期温度とし，深さ方向に対して温度および熱物性が均一と仮定したときの一次元熱伝導計算と観測結果がフィットする熱慣性値をピクセル毎に決定した．この解析で得られた面積はおよそ $2m^2$ 程度である．得られた範囲の平均的な熱慣性は $270\pm120(Jm^{-2}s^{-0.5}K^{-1})$となり、グローバルな解析で得られた結果（Shimaki et el（2020）:225±45）やマスコット着陸地点(Grott et al.,(2019):282^{+93}_{-35})と調和的な値となり、スキンデプス 1mm 程度までの最表層部分においてもそれよりも 10 倍程度のスキンデプスである日周変化で得られた熱物性と調和的であることがわかった。また、分解能 1cm 程度の詳細な熱物性構造には岩石塊やそれを埋めるマトリックス（レゴリス）部分の特徴的な熱的な構造が見出された ONC が得られた分光学的な知見（Morota et al.,（2020））との比較も含めて議論する．

Ref:1)Shimaki et al.,(2020) Icarus 348, doi.org/10.1016/j-icarus2020.113835, 2)Grott et al.,(2020) Nature Astro., info:doi/10.1038/s41550-019-0832-x, 3)Morota et al,(2020) Science, 368, DOI: 10.1126/science.aaz6306

Anomalously porous, dark, and primitive boulders on asteroid Ryugu

○N. Sakatani[1,*], S. Tanaka[2], T. Okada[2], T. Fukuhara[1], L. Riu[2], S. Sugita[3], R. Honda[4], T. Morota[3], S. Kameda[1], Y. Yokota[2], E. Tatsumi[5], K. Yumoto[3], N. Hirata[6], A. Miura[2], T. Kouyama[7], H. Senshu[8], Y. Shimaki[2], T. Arai[9], J. Takita[10], H. Demura[6], T. Sekiguchi[11], T. G. Müller[12], A. Hagermann[13], J. Biele[14], M. Grott[14], M. Hamm[15], M. Delbo[16], W. Neumann[17], Hayabusa2 ONC and SCI team. [1]Rikkyo University. [2]ISAS/JAXA. [3]University of Tokyo, Japan. [4]Kochi University. [5]Instituto de Astrofisica de Canarias, University of La Laguna. [6]University of Aizu. [7]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. [8]Chiba Institute of Technology. [9]Ashikaga University. [10]Hokkaido Kitami Hokuto High School. [11]Hokkaido University of Education. [12]Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics. [13]University of Stirling. [14]German Aerospace Center (DLR). [15]University of Potsdam. [16]Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS. [17]Universität Heidelberg.

惑星形成の出発点である微惑星は空隙率の高いダストの集合体であると考えられており、その後の熱的作用によって隕石のような高密度の物質へと進化すると考えられている (Neumann et al., 2014)。すなわち、岩石の空隙率は始原的物質の一つの指標である。はやぶさ 2 中間赤外カメラおよび MASCOT ランダー搭載の赤外放射計による小惑星 Ryugu の観測で、Ryugu 上の岩塊は熱慣性 200-400 $Jm^{-2}K^{-1}s^{-0.5}$ 程度であることが明らかになり、空隙率 30-50% に対応する (Grott et al., 2019; Okada et al., 2020; Shimaki et al., 2020)。本研究の目的は、より高空隙率で始原的な岩塊を発見することである。

高空隙率物質は熱慣性が低く、はやぶさ 2 による日中の観測では温度が高い領域として観測される。タッチダウン等のリハーサルを含む降下運用で得られた高解像度画像 (空間解像度 < 45 cm/pix) を網羅的に調査し、温度が高い領域を抽出した。その結果、comet と同程度の空隙率 70%以上に対応する領域を 2 箇所発見した。両者はいずれも小さなクレーターの中心部に位置し、周囲に比べて暗い。一方で、人工衝突実験によって生成された SCI クレーターにはそのような低熱慣性領域は見られない。したがって、高空隙率の始原的な物質は、Ryugu の地下に空間的には不均質に存在しており、クレータリングにより表面に露出すると機械的強度が弱いため比較的短いタイムスケールで細粒化すると考えられる。また、熱慣性と反射率およびスペクトル傾斜の関係は、この破片がレゴリスに混入していることを示唆しており、タッチダウンで収集した物質にも含まれている可能性も高い。

小惑星探査機はやぶさ 2 の低高度運用で観測された小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度変化分布解析

○大杉 歩[1,2], 坂谷 尚哉[3], 嶌生 有理[2], 千秋 博紀[4], 荒井 武彦[5],
出村 裕英[6], 田中 智[1,2], 福原 哲哉[3], 岡田 達明[1,2]

[1] 東京大学, [2] 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, [3] 立教大学,[4] 千葉工業大学, [5] 足利大学, [6] 会津大学

研究背景: 小惑星探査機はやぶさ 2 に搭載されているリモートセンシング機器ある中間赤外カメラ (Thermal Infrared Imager: TIR) [1] は, リュウグウの熱画像を観測し, 表層の熱的な物理状態を把握することができる [1] [2]. 最新の研究では, リュウグウ表面は多孔質な岩塊で覆われており, 希に地球で採取された炭素質コンドライトと同様の圧密の岩塊が存在していることが判明している [3].

目的と観測条件: リュウグウ表面に存在する岩塊について詳細な情報を得るため, 特定の地域における岩石の温度変化とその物理状態を調査した. 本研究では, 高度 500 m 未満で実施されたオペレーション (2018 年 9 月 21 日の MINERVA rover の投下時の降下運用, 2018 年 10 月 3 日の MASCOT lander の投下時の降下運用) の際に撮像した高解像度の熱画像を使用してこれらのエリアに点在する岩塊を解析した. 岩塊の温度変化やその大きさ等の分布については TIR のスペック通りのデータが取得されており, セルは 328×248 ピクセルで空間解像度は 1 ピクセルあたり約 0.051°である [1]. 今回は各画像内において 100 ピクセル超で撮像されている岩塊について解析を行った.

結果と考察: 検出した岩塊の総数は MINERVA rover のリリースパス(MNRV)で 355 個, MASCOT lander のリリースパス (MSCT) で 312 個であった. また, 岩塊の温度分布範囲は MNRV で 294-333 K, MSCT では 298-327 K で, 検出された岩塊の平均温度はそれぞれ 314 K と 313 K であった.横軸を温度, 縦軸を検出値が正規分布に従う場合の期待値をとり,正規確率プロット (正規 Q-Q プロット) を作成したところ, プロットが直線に沿っており, 2 つの領域で観測された岩塊の温度分布は正規分布に近いことが判明した. このときの標準偏差は σ =5.64 K (MNRV), σ =5.53 K (MSCT) であり, 2σ の範囲外に存在する岩塊の個数 $T < T_{ave} - 2\sigma$ では 8 個(MNRV) と 8 個(MSCT), $T > T_{ave} + 2\sigma$ では 5 個 (MNRV) と3 個 (MSCT) であった. また,検出した岩塊の温度に対する岩塊のサイズのプロットから両領域ともに分布に特徴的な偏りが無いことが示唆された.さらに,検出された岩塊の撮影平均高度に応じて岩塊のサイズ頻度分布 (Size-Frequency Distributions :SFD) を作成し,SFD の傾きの値を平均高度ごとに計算した.結果,傾きの値は MNRV では-0.36±0.04 から-3.8±0.2, MSCT では-0.40±0.03 から-3.3±0.2 となった.傾きの値は Michikami *et al.,* (2019) で調査された岩塊分布と調和的であり,観測領域にはリュウグウの母天体が破壊された際に形成された岩塊が存在していること,レゴリス層に埋もれている岩塊が存在していることが示唆される [4].本発表では今回得られた結果に対して, より多くの地域との比較検討や他機器等で得られた情報との整合性等を鑑み議論する.

謝辞: 小惑星探査機はやぶさ 2 の LIDAR 補正軌道を提供して頂いた国立天文台の松本晃治博士,山本圭香博士に感謝いたします. また,本研究は,日本学術振興会の新学術領域研究「水惑星の創成」(No. JP17H06459)および研究拠点形成事業「惑星科学国際研究ネットワークの構築」の一部支援を受けております.

参考文献: [1] Okada, T. *et al.,* Space Sci. Rev., 208, 255-286 (2017), [2] Watanabe S. *et al.,* Science 464, 268-272 (2019), [3] Okada, T. *et al.,* Nature 579, 518-522 (2020). [4] Michikami *et al.,* Icarus 331, 179-191 (2019).

小惑星エロス、イトカワ、リュウグウのボルダーサイズ分布、形状分布の比較　　～重力場とボルダーの移動

○道上達広（近大）、ハガーマン・アクセル（スターリング大）

過去の研究において、小惑星エロス、イトカワ、リュウグウのボルダーのサイズ分布の調査は行われているが、ボルダーの定義、測定方法などが、研究者によって異なるため、定量的な比較は困難であった。本研究では、妥当なボルダーの定義を示し、Small Body Mapping Tool (SBMT)を用いて同一の測定者が測定することで、小惑星エロス、イトカワのボルダーを統一的に再調査した。そして、それらの結果と同様の手法で解析したMichikami et al. (2019)の結果を定量的に比較した。

小惑星エロスにおいて、SBMT を用いて直径 9m 以上のボルダーを約 2300 個測定し、直径 30m 以上のボルダーは 750 個であった。この個数は、Dombard et al.(2010)の結果とほぼ一致する。小惑星イトカワにおいて、SBMT を用いて直径 1.6m 以上のボルダーを約 1500 個測定し、直径 5m 以上のボルダーは約 490 個であった。この個数は DS9 を用いて測定した Michikami et al.(2008)の結果と類似しているものの、同じ SBMT を用いて測定した Mazrouei et al.(2014)と比べ、半数程度しかない。この原因として、Mazrouei et al.(2014)の生データを調査したところ、彼女らの測定は、１つ１つのボルダーをかなり大きく測定しており、これが全体の個数（サイズ分布）に影響していることが分かった。画像解像度が低いと、ボルダーを大きく測定する傾向があることから、Mazrouei et al.(2014)では、我々のデータよりも解像度の低い画像データを用いて測定したことが考えられる。

再測定した小惑星エロス、イトカワのデータを小惑星リュウグウと比較したところ、5m 以上のボルダーにおいて、単位面積当たりの数密度が最も大きいのはリュウグウであることが初めて分かった（以前の Mazrouei et al.(2014)のデータを用いると、5m 以上ではイトカワが最も大きかった）。全球におけるボルダーサイズ分布のべき指数は、エロスで-3.25 ± 0.14、イトカワで-3.05 ± 0.14、リュウグウで-2.65 ± 0.05 である。

ボルダーの形状分布は３つの小惑星で異なることが分かった。ボルダーの中間軸/長軸(b/a)の平均値は、エロスで 0.72（この値は室内実験の衝突破片に近い形状）,リュウグウで 0.68、イトカワで 0.63 となり、天体重力が小さくなるにつれて値が低くなる、つまり見かけ上、細長いボルダーが増えることが分かった。また、同じ小惑星表面でも重力ポテンシャルの高いところ（表面重力は低い）では、見かけ上、細長いボルダーが増える。Michikami et al. (2019)によれば、実際のボルダーは室内衝突破片と同じ形状となる。これが正しいとすると、見かけ上、細長いボルダーは、ボルダー自身が小惑星表面に対して回転していることが予想される（短軸 c の方向が小惑星表面に対して垂直でなく、大きく傾いている）。ボ

小惑星リュウグウにおける岩の分布と方位角の調査
：表面進化への示唆

海老原樹[1], 湯本航生[1], 杉田精司[1], 本田理恵[2], 亀田真吾[3], 巽瑛理[1,4], 長勇一郎[1], 吉岡和夫[1], 澤田弘崇[5], 横田康弘[2,5], 坂谷尚哉[3], 早川雅彦[5], 松岡萌[5], 山田学[6], 神山徹[7], 鈴木秀彦[8], 本田親寿[9], 小川和律[10,11], 道上達広[12], 諸田智克[1]

[1]東京大学, [2]高知大学, [3]立教大学, [4]Instituto de Astrofísica de Canarias, [5]JAXA/ISAS, [6]千葉工業大学, [7]産業技術総合研究所, [8]明治大学, [9]会津大学, [10]JAXA/JSEC, [11]神戸大学,[12]近畿大学

研究目的:小惑星探査機はやぶさ2は2018年6月に小惑星リュウグウに到着した。はやぶさ 2 による詳細な観測によって、リュウグウ表面には多数の岩が存在しバルク密度が比較的低いことが明らかになり、ラブルパイル構造であることが示唆された[1]。また、表面反射スペクトルの観測と層序関係から、赤道から中緯度に向かって表面の物質が移動したと考えられている [2, 3]。しかし表面流動の地形的証拠は十分ではなく、流動が起こっていた場合に、その規模や時間スケールはよくわかっていない。本研究の目的は、リュウグウ表面に存在する岩の形状解析から表面流動を含む表層進化を制約することである。

手法： MASCOT 分離運用時に高度約 3 km から取得した画像（解像度 0.3 m/pixel）を用いて赤道帯にある直径 1 m 以上の岩の網羅的なカタログを作成した。このカタログには岩の形状を楕円でフィッティングした時の大きさ、長軸単軸比、長軸の方位角が含まれる。リュウグウと同じラブルパイル構造を持つと考えられている小惑星イトカワでは、岩の長軸が重力斜面の方向に対し垂直に配列する傾向があることがわかっている[4]。これを踏まえ、岩の形状および長軸方位角と重力斜面傾斜方向との関連性の調査を行った。

結果：直径 4 m 以上の大きな岩について、長軸方位角が重力斜面の傾斜方向に対し直交する傾向が見られた。特に北半球側ではこの傾向が強く、傾斜方向に対する岩の偏向性は斜度が大きくなるほど強くなること、また岩の直径が大きくなるほど強くなることが確認された。後者は地球上での礫の移動方法の一つである転石に見られる傾向と類似している[5]。

文献：[1] Watanabe *et al.*, 2019, *Science*, *364* (6437). [2] Sugita *et al.*, 2019, *Science*, *364* (6437). [3] Morota *et al*. 2020, *Science*, 368 (6491). [4] Miyamoto, *et al*., 2007, *Science 316* (5827). [5] 山本憲志郎, 1996, *地理学評論 Ser. A 69* (3).

小惑星の赤道リッジ形成へのエジェクタ堆積物の寄与

○池谷蓮[1], 平田直之[1]
[1]神戸大学

JAXA の探査機はやぶさ 2 が訪れた小惑星 Ryugu はコマ型の形状をし. 赤道が尾根状に高まっている特徴(以下, 赤道リッジ)をもつ. Ryugu 以外にも NASA の探査機 OSIRIS-REx が訪れている小惑星 Bennu など, コマ型の小惑星は複数発見されている. 赤道リッジは Ryugu がかなり速く自転していた時代に変形したことで形成されたと考えられている[1]. その形成モデルとして, (i)YORP 効果によって自転が加速された結果,内部から変形したことで形成[2], (ii)母天体の崩壊から再集積した際に形成された[3]というモデルが提案されている. 本研究では, 小惑星に天体が衝突した際に放出されるエジェクタ堆積物に着目し, コマ型小惑星にが有する赤道リッジの新しい形成モデルを提案する.

本発表で提案する赤道リッジ形成モデルは, 小惑星の自転が速い状態で複数の衝突イベントが起こり, エジェクタが赤道域に集中して堆積することで, 赤道リッジが形成されるというモデルである. Ryugu には数十のクレーターが確認されている[4]ことから, 赤道リッジはエジェクタ堆積物が赤道域に濃集して形成されたのではないかと考えた. 検証として, 50 m から 300 m のクレーターを 50 個作り, 生じたエジェクタ堆積物の高さを調べた(図 1). この計算では, Ryugu の平均半径である 448.2 m の球をある速度で自転させ, 球面一様乱数を用いて複数のクレーターの位置及び直径を決めた. 各エジェクタ粒子の飛ぶ軌道を計算し, 球表面に衝突した場所を堆積地点として高さに変換した. その結果, 球の自転速度が速いとき(図 1a), 赤道域にエジェクタが濃集することがわかった. 次に, どれくらいの高さのリッジが形成されうるかを, 自転時間は 3.0 時間で一定な状態で, 直径が 70 m から 300 m なクレーターを 55 個(MBA でのクレーター年代で 10 Myr に相当[5])形成した結果, 5m〜7m ほどの赤道リッジが形成されうることがわかった. これらの数値計算の結果より, 赤道リッジ形成にエジェクタ堆積物が寄与していることが示唆される.

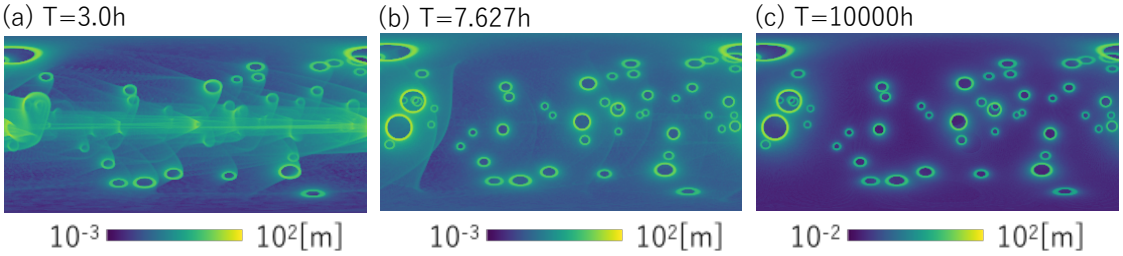


図 1 自転によるエジェクタ堆積物の分布の変化. クレーターは直径 50m ~300m で 50 個.

[1] Watanabe et al., 2019, Science. [2] Scheeres et al., 2019, Nat. Astron. [3] Michel et al., 2020, Nat. Commun. [4] Hirata et al., 2020, Icarus. [5] Morota et al., 2020, Science.

歪な天体表面上で生じたイジェクタの再衝突地点

○菊地 紘[1]

[1]宇宙航空研究開発機構

天体表面で衝突が生じたとき，どこにイジェクタが再衝突するのかを調べることは，その天体のレゴリスの形成や天体の進化過程を探る上で重要である．小さい衛星や小惑星，彗星に注目すると天体全体が歪な形状をしていることが多く，それゆえそれらの表面で衝突が生じたとき，イジェクタがどこに堆積するのかを精度よく調査することは困難である．またイジェクタの初期条件や諸条件が研究によって異なっているため，明確な基準はなかった．

そこで本研究では，イジェクタ粒子の再衝突地点を解析するために，まず粒子の初期位置をクレーターのリムのある平面上に置いた．初速度は乱数を用いて与え，イジェクタ速度分布のスケーリング則を満たすように定めた．放出角度はリム上の平面とのなす角度として固定した．発射された粒子を追跡するために天体の重力を考慮し，粒子の質量は無視した．さらに詳細に粒子と天体の衝突地点を解析するために形状モデルの頂点法線ベクトルとその解像度を考慮した衝突判定条件を定めた．発表ではフォボス（図 1）や小惑星でみられる比較的大きなクレーターに注目した計算結果を報告する．

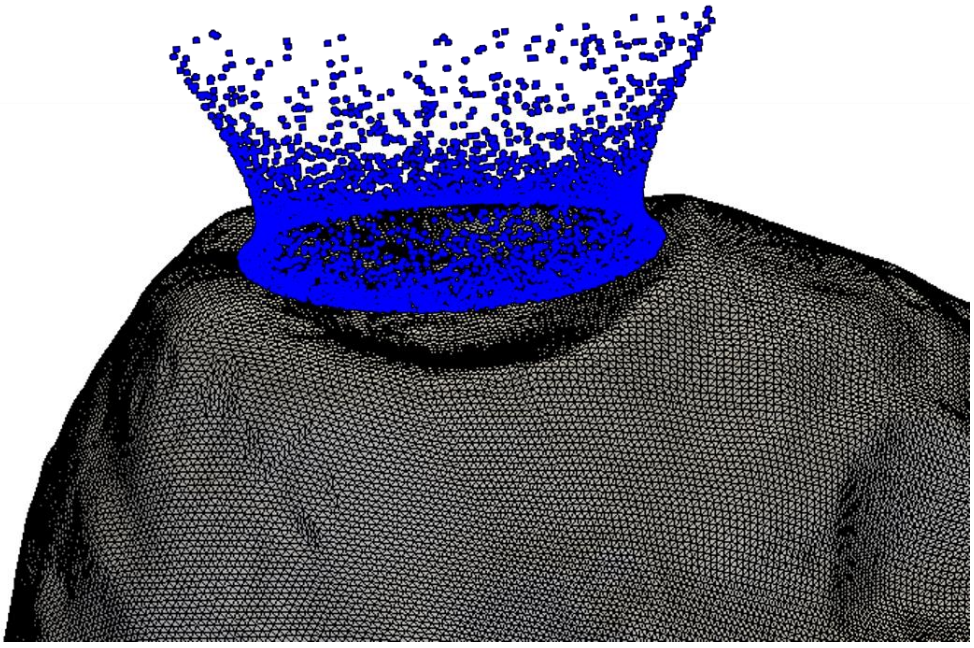


図 1:　フォボスのスティックニークレーターから放出されたイジェクタ粒子

小惑星リュウグウ表面のボルダー上に観測された小クレーターの統計

Statistics of small craters observed on boulder surface of asteroid Ryugu

○高井 雄大[1]、諸田 智克[1]、杉田 精司[1]、湯本 航生[1]、本田 理恵[2]、亀田 真吾[3]、
巽 瑛理[1,4]、長 勇一郎[1]、吉岡 和夫[1]、澤田 弘崇[5]、横田 康弘[2,5]、坂谷 尚哉[3]、
早川 雅彦[5]、松岡 萌[5]、山田 学[6]、神山 徹[7]、鈴木 秀彦[8]、本田 親寿[9]、小川 和律[10,11]

1. 東京大学、2. 高知大学、3. 立教大学、4. Instituto de Astrofísica de Canarias、
5. JAXA/ISAS、6. 千葉工業大学、7. 産業技術総合研究所、8. 明治大学、9. 会津大学
10. JAXA/JSEC、11. 神戸大学

研究目的：小惑星探査機はやぶさ 2 は 2018 年 6 月 27 日に小惑星 Ryugu に到着し、搭載されている光学航法カメラ (ONC) によって Ryugu 表面の詳細な観測が行われ、多数のボルダー(岩) によって覆われていることが明らかになった [Watanabe et al., 2019]。2019 年 2 月 22 日、同年 7 月 11 日 (日本時間) の 2 度のタッチダウン運用では、0.1 cm/pixel に迫る高解像度の連続した画像が複数枚撮影され、数 cm スケールの地形的特徴まで明らかになった。Ryugu のボルダーの特徴的なサイズは 3 m であり [Sugita et al., 2019]、タッチダウン時の低高度撮像画像によってボルダー表面の凹凸 (クレーター) の様子まで観察することが可能となった。本研究の目的は、未だ研究されていなかったボルダー表面の小クレーターの統計から、Ryugu ボルダーの表層進化プロセスと破壊の時間スケールを制約することである。

手法：第 2 回タッチダウン時に撮影された高解像度の Ryugu 表面の画像を用い、ボルダー表面に形成された数 cm から数十 cm スケールの小クレーターの候補となる窪みを 16 個同定した。小型着陸機 MASCOT 搭載の熱放射計 MARA のデータをもとに推定されたボルダーの強度 (200~280kPa) [Grott et al., 2019] を用いて、強度支配条件下でのクレータースケーリング則 [Holsapple, 1993] から、Ryugu ボルダー上の小クレーターの形成頻度モデルを構築した。これと観測された小クレーター統計よりボルダーの表面年代を概算した。

結果：Ryugu ボルダーの表面年代は、10^4～10^6 年と見積もられた。この値は熱疲労の実験研究から見積もられた数十 cm サイズの炭素質隕石の破壊時間と同程度である[Delbo et al., 2014; Mir et al., 2019]。本発表では、見積もられたボルダー表面年代を、ボルダーの衝突破壊や熱疲労破壊、微小なインパクターの衝突によるクレーター緩和などの時間スケールと比較することにより、表層進化プロセスについて議論する。

小惑星 Ryugu に働く YORP 効果と自転進化史

◯金丸仁明[1]、佐々木晶[2]、諸田智克[3]、長勇一郎[3]、巽瑛理[4]、平田成[5]、千秋博紀[6]、嶌生有理[1]、坂谷尚哉[7]、田中智[1]、平林正俊[8]、岡田達明[1]、臼井寛裕[1]、杉田精司[3]、渡邊誠一郎[9]

[1]JAXA/ISAS、[2]大阪大学、[3]東京大学、[4]カナリア天体物理研究所、

[5]会津大学、[6]千葉工業大学、[7]立教大学、[8]Auburn 大学、[9]名古屋大学

小惑星探査機「はやぶさ２」は、2019 年 11 月に小惑星 Ryugu での近傍観測を終え、2020 年 12 月に地球帰還予定である。Ryugu からもたらされる帰還試料の分析と合わせて、試料の地質学的産状を理解する必要性がますます高まっている。我々は、コマ型天体の形成メカニズムとも関わりの深い、小惑星 Ryugu の自転進化に着目して、Ryugu が経験してきた進化過程の理解を目指している。

太陽光に熱された小惑星の表面は、主に中赤外線～遠赤外線の波長域で熱放射を起こす。不規則な形状をもつ小惑星では、熱放射の異方性によって生じる微小なトルクが天体の角運動量を変化させることが知られている（＝YORP 効果）。本研究では、Ryugu の現在の軌道・３次元形状・自転パラメータを用いることで、天体表面からの熱放射をモデル化し、それに伴う自転速度の変化率を計算した。一般に YORP 効果の数値計算は、入力する天体形状の細かな違いに強く依存することが知られている（*e.g.* Statler, 2009）。そこで本研究では、はやぶさ２プロジェクトで作成された異なるバージョンの形状モデル（5 万メッシュの形状モデル 20 種類）を用いて、網羅的に数値計算を行なった。

本研究から得られた Ryugu の自転速度の変化率は、-0.42×10^{-6} ～ -6.3×10^{-6} [deg/day^2]の値をとった*。1 桁程度の不確定性があるものの、いずれの場合においても小惑星 Ryugu の自転が減速していることが示唆された。コマ型小惑星の形成メカニズムとして、高速自転による天体の変形が有力視されている（Watanabe et al., 2019）。上記の減速率が一定であると仮定すると、3.5 時間周期の高速自転から 7.6 時間周期の現在の自転状態まで減速するのにかかる時間は、58～870 万年と見積もられる。この時間スケールは、Ryugu が地球近傍へ軌道進化したタイミングや western bulge が形成した年代と同程度である（Morota et al., 2020; Cho et al., under review）。こうした地質イベントを経て、Ryugu の自転は減速に転じたと考えられる。

---

*計算コスト削減のため、本研究では表面物質の熱慣性をゼロと仮定した。Takita et al. (2017)の熱物理計算モデルと比較して、本研究で用いた計算モデルの妥当性を確認した。低熱慣性・低速自転の Ryugu では、上記の仮定は十分に有効であると結論づけた。

衝突残留熱と小惑星母天体の熱変成過程に関する実験的研究

○保井みなみ[1]，田澤拓[1]，橋本涼平[2]，荒川政彦[1]，小川和律[3]

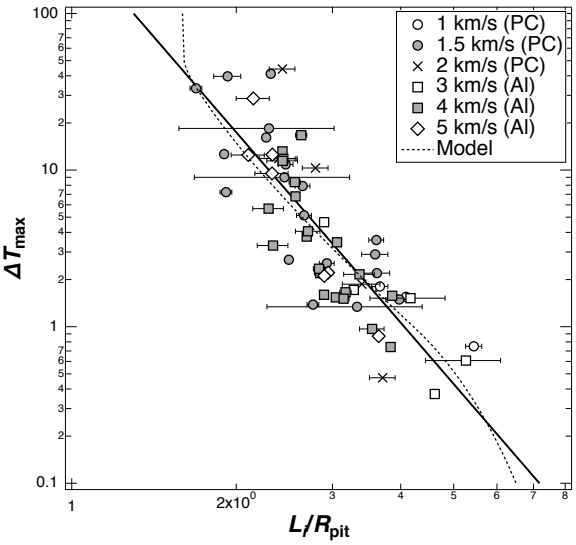
1: 神戸大学大学院理学研究科　2: 神戸大学理学部　3: JAXA 国際宇宙探査センター

背景：小惑星母天体の進化を制約する重要な要素の１つが熱源であり，それによって岩石の水質変成や，有機物生成に重要な化学反応を引き起こす．C 型小惑星由来の炭素質コンドライト隕石の熱源は，短寿命放射性同位体 ^{26}Al が有力な候補である[e.g., Urey, 1955]が，近年，もう１つの候補として衝突加熱が提唱された[Rubin, 2005]．衝突加熱は小天体同士の高速度衝突によって発生する高い衝撃圧によって引き起こされ，衝突クレーター周囲を瞬時に高温度に加熱しうる．そのため，^{26}Al 消滅後の小惑星母天体の熱源の候補として有力である．さらに小惑星母天体は高空隙天体であるため，効率的に衝突クレーター周囲を加熱しうる．そのため，多孔質天体に対する衝突加熱の影響が多くの数値実験で検証されたが，室内実験による研究例はない．そこで本研究では，小惑星母天体模擬物質を用いた衝突実験を行い，クレーター形成に伴う衝突残留熱（温度上昇）をその場観測することを試みた．

実験方法：実験は，神戸大学の縦型二段式軽ガス銃を用いた．標的は空隙率 50%の石膏を用いた．温度を測定するため，石膏標的中にアルメル・クロメル熱電対を，予想される衝突点からの距離を変えて，３～５本挿入した．実験後に標的を回収し，標的表面をヤスリで削ることで衝突点からの距離を計測した．その衝突点からの距離は，8.5～17.8mm である．弾丸には直径２mm のアルミ球と直径 4.8mm のポリカーボネート球を用いた．衝突速度は 1.7～5.0km/s とした．

結果：右図は，衝突点からの距離（クレーター半径で規格化）と最大温度の関係を示したものである．最大温度は，衝突前の温度との差で示している．本実験では，全てのショットにおいて最も高くて +110℃以上の温度上昇が確認された．また，衝突条件によらず，規格化距離と最大温度はベキ乗関係にあることがわかった．また，最大温度は，同衝突条件における一次元熱伝導方程式から導かれる計算値（Model と表記）ともよく一致した．

この実験結果に加え，温度上昇継続時間の結果を用いて，小惑星母天体上で衝突クレーター形成に伴う衝突残留温度分布を推定し，水質変成及び有機物生成が可能かどうかを推定した．その結果，太陽からの距離が 2AU 以内では，水質変成は直径 20km 以上，有機物生成（0℃）は直径 1km 以上で起こりうることがわかった．



クレーター半径で規格化した衝突点距離と最大温度の関係

Jbilet Winselwan 炭素質 CM2 コンドライト中の酸不溶性有機物の元素・同位体・化学構造分析による母天体熱変成の評価

○上出奏海[1]，重中美歩[1]，池原実[2]，川上紳一[3]，薮田ひかる[1]
[1]広島大学，[2]高知大学，[3]岐阜聖徳学園大学

【序論】　「はやぶさ２」の観測によって，小惑星リュウグウ表層の反射スペクトルは熱変成を経験した炭素質 CM/CI コンドライトのものと類似することが明らかとなった(Sugita et al. 2019)。したがって，CM コンドライトの熱史を理解することは，リュウグウ表層または母天体でのプロセスを解明するために重要である。これまでに種々のコンドライト中の酸不溶性有機物(IOM)の組成から長期的な(数百万年スケール)母天体熱変成の条件が決定されてきたが(e.g., Busemann et al. 2007, Cody et al. 2008)，始原的な炭素質コンドライトが経験したとされる短期的な熱変成については十分に評価されていない。本研究では，小惑星リュウグウの熱史を理解するため，熱変成を経験した炭素質 CM コンドライトである Jbilet Winselwan 隕石中の IOM の元素・同位体組成と化学構造を明らかにした。

【実験】　Jbilet Winselwan 隕石(CM2)，Murray 隕石(CM2)，Murchison 隕石(CM2)，Allende 隕石(CV3)の 4 種類の炭素質コンドライトを用いた。各隕石粉末から IOM を HCl/HF および CsF/HF 処理により精製した。IOM の CHN 元素組成を元素分析装置(Flash EA 1112, Thermo Fisher Scientific，高知大学海洋コア総合研究センター)，炭素同位体組成を元素分析オンライン質量分析計(DELTA plus Advantage, Thermo Fisher Scientific，高知大学海洋コア総合研究センター)，化学構造を顕微ラマン分光装置(T64000, Horiba-JY，広島大学)を用いて分析した。

【結果と考察】　Jbilet Winselwan 隕石中の IOM の H/C は 0.405 ±0.039，N/C は 0.0368 ±0.0018，炭素同位体比は $\delta^{13}C$ = -10.41 ±0.49‰であった。これらの値は典型的な CM，CV コンドライトの IOM の値(Alexander et al. 2007)とは異なっていた。それに対して，熱変成を経験したいくつかの CM コンドライトや Tagish Lake C2 コンドライトの IOM の値と類似し，特に WIS 91600 隕石の値に最も近いことが判明した。WIS 91600 隕石は，Tagish Lake 隕石と同様の条件の水質変成を受けた後，400-500℃で短期加熱されたと報告されており(Yabuta et al. 2010)，Jbilet Winselwan 隕石もまた類似のプロセスを経験した可能性が考えられる。一方で，Jbilet Winselwan 隕石の IOM のラマンスペクトルは，Allende 隕石の IOM に見られるような長期的熱変成によるグラファイト化の痕跡は見られず，Murchison，Murray 隕石の IOM と類似したが，その G バンドの半値幅は始原的な CM コンドライトよりわずかに狭かった。この結果は，Jbilet Winselwan 隕石母天体の穏やかな熱変成において，IOM の芳香族環縮合よりむしろ，熱分解やビフェニル構造の形成が進行したことを示唆する。

分子雲中での高分子態アミノ酸前駆体の生成とその宇宙安定性の検証

○小林憲正[1]，倉本想士[1]，佐藤智仁[1]，横尾拓哉[1]，癸生川陽子[1]，三田肇[2]，中川和道[3]，吉田聡[4]，福田一志[5]，小栗慶之[5]，柴田裕実[3]，矢野創[6]，山岸明彦[6,7]，左近樹[8]
[1]横浜国大，[2]福岡工大，[3]大阪大，[4]量研，[5]東工大，[6]JAXA 宇宙研，[7]東薬大，[8]東大

緒言　隕石（炭素質コンドライト）や彗星中にアミノ酸を含む多様な有機物が含まれていることから，それらの地球上での生命の誕生に対する役割が議論されている。隕石中のアミノ酸濃度は加水分解により増えることからアミノ酸前駆体を含んでおり，その前駆体候補としてアミノニトリル類，ヒダントイン類などが候補とされているが，その構造や起源には諸説がある。また，隕石や彗星から生じたとされる惑星間塵 (IDPs) は地球圏外有機炭素の主要なキャリアーと考えられている[1]。本研究では，分子雲中を模した実験で生じるアミノ酸前駆体のキャラクタリゼーションを行った。また，アミノ酸・アミノ酸前駆体の宇宙環境での安定性について室内実験・宇宙実験により検証した。

実験　分子雲中の星間塵環境を模して，メタノール（または一酸化炭素）・アンモニア・水混合物に高エネルギー粒子線（陽子線・炭素線）を照射した。生成物は加水分解後に HPLC, GC/MS により定量した。また，加水分解前の生成物を種々の HPLC や限外ろ過法により分画し，各画分を加水分解後にアミノ酸分析することにより，アミノ酸前駆体のキャラクタリゼーションを行った。安定性評価は，重粒子線照射（HIMAC），γ線照射（^{60}Co 線源），軟 X 線照射（NewSUBARU），紫外線照射（Xe ランプ）などを行い，加水分解後のアミノ酸回収量で評価した。また実際の宇宙環境での安定性評価のため，国際宇宙ステーション JEM 曝露部に1～3年曝露し，地球帰還後に回収量を調べた（たんぽぽ計画）[2]。

結果と考察　粒子線照射生成物は加水分解後にアミノ酸濃度が大幅に増え，遊離ではなく前駆体として生成することが示された。逆相・イオン交換 HPLC によりヒダントインやアミノニトリルが主要な前駆体でないこと，ゲルろ過 HPLC や限外ろ過法により，分子量数百～数千の高分子態前駆体が多く生じたことがわかった。以後，CO, NH_3, H_2O への陽子線照射生成物を CAW と呼ぶ。

グリシン（遊離），アミノアセトニトリル，ヒダントイン，CAW の種々の放射線・紫外線に対する安定性を比較すると，γ線，X 線，重粒子線などに対しては CAW が最も安定であったが，Xe ランプを用いた紫外線（主として近紫外線）照射では CAW の回収率が最も低かった。たんぽぽ計画においては，グリシン，ヒダントイン，CAW の安定性を比較したところ，グリシンの回収率がヒダントインよりも高かった。たんぽぽ計画においては揮散防止のためにヘキサトリアコンタン(HTC)膜で覆ったため，160 nm 以下の真空紫外線の影響が限定的だったためと考えられる。CAW は 160 nm 以上の光に対する吸収が他よりも強いにもかかわらずグリシンとほぼ同じ回収率を示した。たんぽぽ2計画(2019～20)では光学窓や HTC を用いない照射を行っており，より実際の宇宙環境での安定性を調べる予定である。

[1] C. Chyba and C. Sagan, Nature, **355**, 125-132 (1992).
[2] A. Yamagishi *et al*., *ISTS Web Paper Archive*, **2013-k-49**, 1-7 (2013).

C 型小惑星の起源と炭素質コンドライト隕石との繋がり：水岩石反応と赤外スペクトルモデルからの示唆

○黒川 宏之[1], 渋谷 岳造[2], 関根 康人[1],
Bethany L. Ehlmann[3], 臼井 文彦[4], 菊池 早希子[1], 依田 優大[1,5]
[1]東京工業大学 地球生命研究所, [2]海洋研究開発機構,
[3]カリフォルニア工科大学/ジェット推進研究所, [4]宇宙科学研究所, [5]東京大学

含水鉱物による 2.7 μm 吸収帯の存在や低いアルベドといった反射スペクトルの類似性から、C 型惑星は炭素質コンドライト隕石の母天体であると考えられてきた。しかし、セレスをはじめとする一部の大型 C 型小惑星の赤外スペクトルには、隕石には見られないアンモニアを含む層状ケイ酸塩の存在を示す 3.1 μm 吸収帯や、隕石では存在度の小さい炭酸塩の存在を示す 3.4 μm 吸収帯が存在する。小惑星帯質量の 30%以上を占めるこれらの小惑星に対応する隕石が存在しないことは、太陽系科学における大きな謎とされてきた。

本研究では、氷微惑星内部の水岩石反応の熱力学モデル(Shibuya et al. in prep.)と、生成物の赤外スペクトルモデル(Kurokawa et al. submitted)を組み合わせることで、様々なバルク組成・水岩石比(W/R)・温度条件での生成鉱物組み合わせと観測される反射スペクトルの理論予想を行った。そして、赤外線天文衛星あかり(Usui et al. 2019)および NASA Infrared Telescope Facility (Takir & Emery 2012; Rivkin e al. 2003; 2015; 2019)による小惑星観測の結果との比較から、小惑星表面鉱物の生成条件を制約した。

その結果、2.7 μm (含水鉱物)に加えて 3.1 μm (アンモニア), 3.4 μm(炭酸塩)吸収帯を持つ鉱物組み合わせは、NH_3・CO_2氷を含むバルク組成・W/R が約 4 以上・70℃以下の低温という条件下でのみ生成することがわかった。一方、W/R が低いなどこの条件を外れると、3.1 μm 吸収帯は見られなくなる。

これらの結果から、C 型小惑星と炭素質コンドライトのスペクトル的特徴の違いを説明可能な、以下のような形成・進化シナリオを提案する。1. 大型の C 型小惑星は NH_3・CO_2の雪線以遠(現在の太陽系では土星軌道以遠)で形成した。2. 昇温に伴って W/R の高い氷(水)マントルと W/R の低い岩石コアに分化し、それぞれ異なる反応物が生成した。3. 小惑星帯への移動に伴って外層の氷が昇華して失われることで、高い W/R での生成鉱物が小惑星表面に残った。4. 衝突によって小惑星が破砕するとマントル由来物質は氷が昇華しばらばらになるため、石化した岩石コア由来物質が選択的に隕石として地球上で発見された。

はやぶさ 2 や OSIRIS-REx のリターンサンプルにアンモニウム塩が含まれていた場合、この仮説の裏付けとなることが期待できる。

原始惑星系円盤におけるダストの紫外線被曝と有機物形成：乱流混合とアグリゲイト衝突破壊の重要性

○ 本間和明[1], 奥住聡[1]

[1] 東京工業大学

炭素質コンドライトや惑星間塵には難揮発性有機物が含まれている(e.g., Alexander et al., 2017, Flynn et al., 2013)。この有機物がいつ・どこで・どの程度存在したかを明らかにすることは、惑星形成(Homma et al. 2019)や生命の起源(Anders 1989, Pizzarello et al., 2006)の解明にとって重要である。有機物の形成メカニズムの 1 つとして、Ciesla & Sandford (2012)は原始惑星系円盤における多成分氷ダストの星間紫外線被曝と加熱を提案している。彼らは乱流円盤の中で運動するダストの紫外線被曝量を計算し、被曝量から形成される有機物量を見積もった。その結果、μm サイズの小さな氷ダストは円盤上層へ拡散されやすく、被曝効率も良いため、10 wt%程度の有機物が形成されうることが示されている。

しかし、Ciesla & Sandford (2012)の計算モデルは、円盤内での紫外線強度場をダストの分布を考慮せずに仮定していた。紫外線はダストに吸収されるため、その強度場はダストのサイズ分布・鉛直分布によって決まる。円盤内の氷ダストの被曝量進化を正しく求めるためには、ダスト自身のサイズ・鉛直分布の進化も同時に考慮する必要がある。

本研究の目的は、大きなダストも小さなダスト同様に被曝を経験し、どの程度の有機物が形成しうるか明らかにすることである。そのため、本研究ではダストの成長・破壊・沈殿・乱流拡散に伴うサイズ分布・鉛直分布進化と、紫外線被曝を同時に計算するシミュレーションモデルを構築した。シミュレーションの結果、赤道面での大きなダストの衝突破壊、衝突破片の鉛直拡散と被曝、被曝破片の赤道面での再成長を通じて、赤道面の大きなダストにも被曝氷が効率よく供給されることを見出した。主要なモデルパラメータであるダストの付着力と乱流強度を変えた計算から、上述の被曝氷供給はダストの衝突破壊によって円盤が光学的に厚く保たれる場合に有効であることもわかった。また、赤道面ダストへの被曝氷供給は拡散によって律速されることもわかった。氷の紫外線被曝量に基づく簡単な見積もりから、大きなダスト中に形成される有機物の存在量（岩石ダストの質量に対する有機物質量）は、炭素質コンドライトや惑星間塵中の有機物存在量に匹敵することを明らかにした。

O-D2-B34

木曽広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen を用いた微小地球接近小惑星の探索

The search for small Near Earth Asteroids with a wide-field CMOS camera, Tomo-e Gozen, on the 105-cm Schmidt telescope at Kiso Observatory

◯紅山仁[1], 酒向重行[1], 大澤亮[1], 諸隈智貴[1], 瀧田怜[1], 小林尚人[1], 奥村真一郎[2], 浦川聖太郎[2], 吉川真[3], 柳沢俊史[3], 黒崎裕久[3], 吉田二美[4,5], 佐藤英貴[6]

[1] 東京大学天文学教育研究センター, [2]日本スペースガード協会
[3] 宇宙航空研究開発機構, [4]産業医科大学,[5] 千葉工業大学,[6] 東京警察病院

地球接近小惑星の多くは小惑星帯 (メインベルト) の天体が軌道進化したものであると考えられており、メインベルトに比べ地球からの距離が近く明るく見える機会があるので小惑星を詳細に観測できるという利点がある。実際、メインベルトの小惑星は世界の大型望遠鏡を用いても直径 100 m 級より小さな天体は検出が困難だが、地球接近小惑星については 10 m 級天体が発見されている。このような小惑星の多くはより大きな母天体の衝突破壊破片、すなわち一枚岩、であり、表面重力が弱く天体表面にレゴリス層を保持できないと考えられている。自己重力で集積したラブルパイル小惑星とは異なる構造・性質をもつ一枚岩小惑星は、太陽系の衝突・破壊の歴史を知る上で重要な天体である。10 m 級の地球接近小惑星が、その重要さに関わらずこれまで十分に観測・研究されてこなかったのは、一般的に地球に近づくほど小惑星の地球に対する相対的な速さが大きくなり、画像上で天体が伸びてしまうことで検出が難しくなるからである。

我々は i) 約 20 平方度の有効視野、ii)2Hz 動画観測、という特徴を持つ Tomo-e Gozen によるサーベイ観測データを用いた高速地球接近小惑星の探索を行なっている。最適化された経路を辿る動画全天サーベイ観測のデータレートは毎晩 20TB に及び、その中からは多くの未発見天体の検出が期待される。本講演ではこのデータから移動天体を見つけるための移動天体検出システムについて紹介する。Tomo-e Gozen サーベイビッグデータからは毎晩約 100 万個の移動天体候補が検出されるが、そのほとんどは大気擾乱に起因する誤検出である。そこで我々は誤検出に埋もれた真の移動天体を抽出するため、機械学習 (ランダムフォレスト) を用いた移動天体分類モデルを作成した。これを実際の観測データに適用したところ、誤検出除去率は 99.9 % に及ぶことを確認した。この一連の分類は毎晩リアルタイムで行われ、観測データに対する分類結果は観測から数分後に確認することができる。これにより発見天体に対する迅速な追観測が可能となり、主に Tomo-e Gozen 自身を用いて追観測することで、発見から 2-3 時間でその移動天体の軌道精度を高め、小惑星センターへ報告している。約 1 年半のサーベイ観測を通して 2020 年 9 月 1 日時点で 27 個の小惑星候補天体を報告しており、そのうち 13 個の小惑星に対して仮符号が付与された。このシステムで発見される天体の特徴として、サイズが小さく (平均直径約 17 m)、高速 (平均約 2.4 arcsec/s) で地球近傍 (平均約 2 月距離) を通過することが挙げられる。このようなパラメータ領域の天体を検出できるサーベイは他になく、これらの小惑星を用いることでレゴリスに覆われていない天体に対する非重力効果や宇宙風化作用に対する観測的知見を得ることが期待できる。

赤外線カメラデータを用いた局所地形モデルの作成と小惑星「リュウグウ」の熱慣性評価

○伊藤瑞生[1]，田中智[2]，坂谷尚哉[3]，千秋博紀[4]
[1]東京大学，[2]宇宙科学研究所，[3]立教大学，[4]千葉工業大学

「はやぶさ2」にはリモートセンシング機器として 8-12 μm で小惑星表面温度を調べる中間赤外カメラ（TIR : Thermal Infrared Imager）が搭載されている．これまでのTIRの観測結果から，リュウグウ表層の熱物性に関してラフネスが温度変化に影響を及ぼしていること，地球上に存在する岩塊（ボルダー）の一般的な熱慣性が 1000-2000 J m^{-2} K^{-1} $s^{-0.5}$ であるのに対し，リュウグウの熱慣性が 225±45 J m^{-2} K^{-1} $s^{-0.5}$ 程度であることが分かっている[1)]．これらの結果は1自転の日照温度変化を利用した 5 m 程度の分解能の画像で取得されたデータに基づいている．低熱慣性の原因としてボルダーが多孔質であること，ボルダー自体の熱慣性が低いことなどが考えられているが，物質構造の特徴やその成因を解明するためには，より分解能が高く深さ方向を含めた熱物性構造が重要である．本研究では 300 m 以下の低高度で撮像した高分解能（27 cm/pix 以下）のTIR画像を用いて小惑星「リュウグウ」の詳細地形における表面温度分布を解析し熱慣性を評価する．

高分解能画像は撮像タイミングが限られているためワンショットの撮像データで熱慣性を推定する必要があるが，地形の傾斜の影響で入射エネルギーが変化するという問題がある．TIR画像ではボルダーや地形の凹凸でつくられた影が撮像されており，この部分の熱慣性を評価することができる．この場合30秒程度の温度変化を解析するため，skin depth は 1.4 mm 程度である．リュウグウの自転周期（7.6 h）に基づく日周温度変化を観測したときの skin depth である 4.1 cm と比べ，より表層部分の熱物性構造を解析することができる（密度：1200 kg m^{-3}，比熱：800 J kg^{-1} K^{-1}，熱伝導率：0.06 J m^{-1} K^{-1} s^{-1} の場合）．いずれの場合についても正確な地形モデルに基づいた熱解析シミュレーションが必要であるが光学航法カメラ（ONC : Optical Navigation Camera）で作成された地形モデルでは分解能が不足している場合も多く，今回TIRを用いた局所地形モデルの作成も合わせて試みた．

以上のことを踏まえ，本発表ではTIR画像から作成した局所地形モデルを熱計算にかけ，地形の凸凹やボルダーで形成された一時的な影の温度を利用することで自転周期よりも短いタイムスケールで応答するより浅い skin depth の熱慣性を推定する．

参考文献

1) Y. Shimaki, et al. Thermophysical properties of the surface of asteroid 162173 Ryugu: Infrared observations and thermal inertia mapping, Icarus **348**, 113835, 2020.

はやぶさ2SCIによる人工クレーター形成に伴う小惑星リュウグウの再表面化過程

○本田理恵[1]，荒川政彦[2]，嶌生有理[3]，白井　慶[2]，横田 康弘[3]，門野敏彦[4]，和田 浩二[5]，小川和律[3]，石橋　高[5]，坂谷 尚哉[6]，中澤 暁[3]，保井みなみ[2]，諸田 智克[7]，亀田 真吾[6]，[8]巽 瑛理，[5]山田 学，[9]神山 徹，[7]長 勇一郎，[3]松岡 萌，[10]鈴木 秀彦，[11]本田 親寿，[3]早川 雅彦，[7]吉岡 和夫，[3]澤田 弘崇，[7]杉田 精司，[11]平田 成，[2]平田直之

[1]高知大学，[2]神戸大学，[3]宇宙航空研究開発機構，[4]産業医科大学，[5]千葉工業大，[6]立教大学，[7]東京大学，[8]Instituto de Astrofísica de Canarias,University of La Laguna，[9]産業技術総合研究所，[10]明治大学，[11]会津大学

はやぶさ2のSCIによる人工クレーター形成に伴うリュウグウの再表面化過程を、ONC-Tで観測されたこの領域の衝突前後の画像を比較することで調べた。特に、再表面化過程を引き起こす素過程について、クレーターリムプロファイル、ボルダーの移動や出現、SCIクレーター周囲の表面地形の変化から調べた。

SCIクレーターの形成に伴うエジェクタ堆積物の厚さをSCIクレーター領域のDEMを解析することで調べた。その結果、SCIクレーターのエジェクタ堆積物は、自然クレーターおよびクレーター形成理論から計算されたものより薄いことが分かった。ただし、理論値との差は、衝突点から13m以遠においては衝突後に現れたボルダーの体積を考慮することでほぼ解消することがわかった。そこでSCIクレーター中心から約22m離れたTD2周囲に堆積したエジェクタの厚さをこの理論を用いて見積もると1.8cmとなることがわかった。

クレーター形成に伴うボルダーの移動を衝突前後の撮像画像を目で見て判別する視認法で調べた。その結果、約50個のボルダーが初期位置から移動したことを確認した。この移動の原因は、エジェクタ堆積物の衝突、オカモト岩の微移動に引きずられた地表面の変形、SCI形成時の衝突励起振動に分類できた。また、視認法により約200個のボルダーが衝突後に新たに現れたことがわかった。新たに現れたボルダーの積算個数分布は、リュウグウ表面で観測された5m以下のサイズのボルダーのものと整合的であることが確認された。また、発見されたボルダーの数はSCIクレーター中心からの距離に伴い減少した。

衝突前後の画像の相互相関係数を調べて、衝突後にボルダーの移動が起きたと考えられる領域を調べた。その結果、SCIクレーターの中心から30mの領域では相互相関係数の低下が見られ、特に15mを超える遠方では、パッチ状に相互相関係数が低い領域が見つかった。さらにテンプレート法によりボルダーの移動ベクトルを推定したところ、SCIクレーター中心から15m以内では、特にSCIクレーターの北側の領域で数cm以上移動するような領域が広く確認された。また、15m～30mの領域においても10%程度の領域で3cm以上の移動が見られた。室内実験との比較から衝突励起振動によるボルダー移動が広く起こるにはリュウグウの表面重力加速度の7倍以上の加速度が必要であることが推測された。

遠心力による砂山の形状変化および流動特性

○入江輝紀[1]，山口隆正[2]，渡邊誠一郎[1]，桂木洋光[1,3]

(1. 名古屋大学大学院環境学研究科，2. 名古屋大学全学技術センター，3. 大阪大学大学院理学研究科)

1. 背景

粉体は砂礫等の形で地球惑星表層に普遍的に存在する. JAXA の小惑星探査機はやぶさ 2 の探査結果より，小惑星リュウグウは母天体の衝突破壊破片が自己重力によって再集積したラブルパイル天体で[1]粉体構造を持つと言える．リュウグウの赤道で隆起したコマ型形状は自転による遠心力によって砂礫物質が赤道域へ流動して形成されたと考えられている．粉体の流動特性の解明はこのような地形形成過程を理解する上で重要である．一般的に，粉体斜面が流動する際は流動層と静止層に分離する．流動層の厚さは，定常粉体斜面流では粒子数個分でほぼ一定であり[2]，振動流動による砂山傾斜緩和では砂山の高さに比例する[3]．一方で，リュウグウのような回転の遠心力により流動する砂山傾斜の形状変化や流動状態観察は，現状では不十分である．そこで本研究では，回転による砂山の形状変化観察を可能とする装置を開発し，それを用いて砂山回転実験を行い，重力・遠心力・摩擦力のバランスによって決定される砂山の平衡形状を観察し，遠心力による粉体傾斜の流動状況を解明することを目的とする．

2. 実験・解析手法

実験を実施するにあたり，名古屋大学全学技術センターと共同で砂山の回転実験装置を開発した．装置にはモーターで駆動する回転機構が備わり，回転部に搭載された小型のカメラと電算機によって，回転中の対象物を任意時刻・一定方向で撮影することができる．

砂山の材料には直径約 1.0–2.0mm のガラスビーズ，アルミナ球，砂などを用いた．砂山は装置回転部中央に積載できる擬 2 次元サンプルケース(内寸：100 mm × 100 mm × 10 mm)に漏斗を用いて安息角の傾斜となるように積み上げた．実験では，ケース端での遠心力を重力で規格化した値 Γ が 0–20.5 となる範囲で段階的に回転数を上げた．各回転数に到達してから約 14 秒後に撮影された砂山の画像から二値化処理により輪郭線を抽出することで平衡形状を観察した．

3. 結果・議論

図 1 に，アルミナ球を用いた砂山に遠心力を加えた際の平衡形状変化を示す．図中の縦軸の高さ z，横軸の回転軸からの距離 r は，それぞれケース半径 (r_0 = 0.05 m) で規格化されている．実線は実験により得られた平衡形状を示し，破線は局所砂山斜面にかかる摩擦・重力・遠心力のバランスから求まるモデル平衡形状を示す．モデル形状は実験条件で決まる規格化遠心力 Γ とフィッティングパラメータである摩擦係数 μ によって図 1 中の式のように表される．

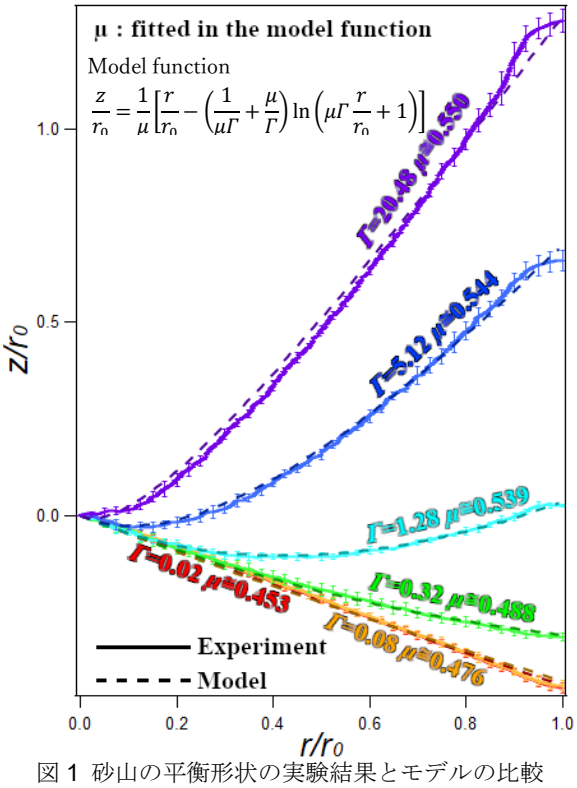


図 1 砂山の平衡形状の実験結果とモデルの比較

図 1 より，実験結果とモデル形状が概ね一致するように μ を選ぶことができ，遠心力を受ける砂山形状が表面での力のつり合いによって決定されていることが示唆された．また実験で得られた砂山画像から表面流動層の存在が定性的には確認されたが，流動層厚の計測と定量的解析，リュウグウなどの小惑星表面を模擬した層構造を持つ砂山の流動化実験などは今後の課題となる．

参考文献

[1] Watanabe, S. et al., Science **364**, 268–272 (2019).
[2] Katsuragi, H et al., Soft Matter **6**, 3023–3029 (2010).
[3] Tsuji, D et al., Phys. Rev. **E 99**, 062902 (2019).

行列表示を用いた有機物反応のモンテカルロ計算：星間粒子を模擬した糖合成実験の再現に向けて

Monte Carlo calculation of organic synthesis by the matrix-based bond model: Toward reproduction of sugar synthesis experiment on interstellar particles

○竹原 仁[1]、庄司 大悟[2]、井田 茂[3]

[1]東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、[2]JAXA、[3]東京工業大学 地球生命研究所

背景と動機：有機物は生命にとって必要不可欠な物質であり、地球生命の誕生において複雑有機物の生成は重要なイベントであったと考えられている。有機物の合成実験はこれまでに行われてきているが、その反応経路ははっきりとわかっていない。例えば、Meinertらは宇宙空間の氷ダストを模擬してそれに紫外線を当てることによる複雑有機物の生成実験を行い、多数の糖が生成することを確認した(Meinert et al., 2016)。彼女らはそれらの糖の生成はホルモース反応によるものであると予想したが、あくまでもそれは推測の域を出ていない。本研究ではMeinertらの実験のシミュレーションを行い、実験との整合性の確認と反応経路の解明を試みる。

計算手法と内容： 化学反応を行列の足し算で表現する計算モデル(Modified Dugundji-Ugi model)を用いた。Meinert らの実験は真空中で行われたが、糖の分析をする際には大気にさらされてしまうと考えられる。そこで、反応の途中で酸素を加える計算を行い、実験後の分析で大気にさらされるという状況が糖の生成にどのような影響を与えるかを調べた。具体的には、様々な糖の生成量、および炭素数５の糖の生成反応経路の分析を行った。また、生成したいくつかの有機物について、量子化学計算ソフト Gaussian を用いて分子の安定性を調べた。

結果：計算の途中で酸素を追加すると、酸素を追加しない場合に比べて糖の生成量が増加した。これは糖の生成に酸素が重要な役割を果たしている可能性を示唆している。ただし、酸素の量をさらに増やすと炭素数の少ない糖はさらに生成量が増加した一方で炭素数の多い糖は生成量が減少したため、酸素が豊富に存在する環境では炭素数の少ない糖が安定であると考えられる。また、炭素数５の糖の生成反応経路を見ると、糖生成後も反応が進み、糖が壊れて最終的に炭素が複雑に結合した分子が生成していた。しかし Gaussian の計算によるとこの複雑な分子は非常に不安定であり、このことは糖が生成した段階で反応が終了して最終物質に糖が残りうることを示している。

土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の非弾性衝突メカニズムに関する実験的研究

神戸大学大学院理学研究科　○豊田優佳里　荒川政彦　保井みなみ

はじめに：土星リングは，サイズ数 mm から数 m まで水氷粒子で構成されており，その粒子は数 cm/s 以下の相対衝突速度で互いに衝突すると言われている．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(厚さ数 100 m)を保っているのは，リング粒子が非弾性衝突を起こし，エネルギーを効果的に散逸しているためであると考えられている．リング粒子は惑星探査機カッシーニの観測から高空隙率の氷粒子集合体であると予測されているが，多孔質氷球の反発係数はこれまで詳しく調べられていない．そこで，多孔質氷球の衝突過程について詳しく調べる必要がある．本研究の目的は，多孔質氷球の反発係数及びエネルギー散逸のメカニズムを明らかにし，土星リング粒子の内部構造を推定することである．そのため，多孔質氷球と花崗岩板，氷板，多孔質氷板の 3 種類の板に対して低速度衝突実験を行い，衝突速度と反発係数の関係に対する空隙率依存性を調べた．

実験方法：本研究では球と板の自由落下衝突実験を行い，反発係数を測定した．多孔質氷球(半径 1.5 cm，空隙率 46.0 ~ 60.0%)は氷粒子(平均粒径 20 μm)を球形に押し固めて作成した．また，標的板は花崗岩板，氷板，多孔質氷球と同様に作成した多孔質氷板(半径 1.5 cm，高さ 2 cm の円盤形，空隙率 45.3 ~ 61.9%)を使用した．反発係数は衝突の時間間隔を測定することで求めた．衝突速度範囲は v_i = 48.9 ~ 249.9 cm/s であった．

実験結果：多孔質氷球の反発係数は氷球の場合と異なり，衝突速度の増加とともに反発係数は下がり続け，準弾性領域は確認されなかった．また，空隙率が大きいほど反発係数は低くなる傾向が見られた．この関係は経験式 $\varepsilon = \varepsilon_0 v^{-b}$ で表すことができ，b = 0.33 ~ 0.73 であった．
実験で得られた反発係数から衝突時のエネルギー散逸量，凹みの幅から圧縮体積を計算すると，その関係は経験式 $\Delta V = V_0 E_{dis}^{n}$ で表すことができた．その結果，n は 0.80 ~ 1.50 となり，圧縮体積はエネルギー散逸量に比例することが示唆された．ここで，多孔質氷球の降伏応力を Y_d とし，エネルギー散逸量が多孔質標的の塑性変形により起きたと仮定すると $E_{dis} = Y_d \Delta V$ と書くことができる．この関係から求まる Y_d は多孔質氷板の場合は，空隙率 47%では 2.01 ~ 40.3 MPa，空隙率 53%では 0.73 ~ 16.3 MPa から，空隙率 60%では 0.11 ~ 4.25 MPa とばらつきが大きくなった．花崗岩板，氷板の場合は，空隙率 47%では，6.69 MPa ，53%では， 2.81 MPa ，60%では，0.76 MPa となった．この値は，静的変形実験から得られる Y_d よりも，空隙率 47%では 3．97 MPa， 空隙率 53%では 1.43 MPa ，空隙率 60%では 0.32 MPa 大きかった．従って，多孔質氷球と多孔質氷板の反発係数低下のメカニズムは圧縮だけでは説明できず，花崗岩板，氷板の場合は圧縮が主要であることが分かった．

階層粉体の伝熱過程に基づく彗星表層の熱慣性の解釈

○荒川創太[1], 大野和正[2]
[1]国立天文台, [2]東京工業大学

欧州宇宙機関の彗星探査機ロゼッタによるチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の観測によって、彗星の構成物質・構造を理解するための重要なデータが得られた。その結果、彗星表層の引張強度が極めて弱いことが明らかになり、彗星の核はダスト粒子のかたまり（いわゆる「ペブル」）がゆるく集積した「階層的な粉体」であることが示唆されている（Blum et al. 2017 など）。彗星は氷微惑星の生き残りであり、ペブルは微惑星の材料であると考えられている。ゆえに、彗星表層の熱物性からペブルの大きさを推定することは、太陽系外側領域における微惑星形成過程を理解するために重要である。本研究では、彗星表層温度の自転周期および公転周期での変動について、階層粉体の熱慣性と熱浸透深さを計算した。その結果、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の熱慣性は、cm または dm サイズのペブルからなる階層粉体によってよく説明できることが明らかになった（詳細は Arakawa & Ohno 2020 を参照されたい）。

衛星の内部海のシミュレーションのためのSPH法のコード開発

○村嶋慶哉[1]，細野七月[2]，斎藤貴之[2]，佐々木貴教[1]

[1]京都大学理学研究科　宇宙物理学教室，[2]神戸大学理学研究科　惑星科学専攻

近年、EuropaやEnceladusなどの氷衛星で内部海の存在を示唆する証拠が見つかっている。液体の水の存在は生命の誕生に必要不可欠であると考えられており、内部海の内部構造、特に温度の分布と進化について理解することは重要なことである。内部海は潮汐加熱と放射冷却のバランスによって保たれていると考えられる。そこで、我々は氷衛星の内部海について三次元の流体数値シミュレーションを行うことを目的として、粘性、熱伝導と放射冷却を考慮したSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法のコードを開発を行なっている。

SPH法は天文や惑星科学の分野でよく使われている粒子法的流体シミュレーション法である。しかし、標準的なSPHでは粘性を考慮すると衛星のような剛体回転する系を解くことができないことがわかった。問題は二つあり、一つ目はSPH法における一般的な粘性がシアーのある系では回転を止めるような非物理的な力として働いてしまうことで、二つ目は標準的なSPHは元々接触不連続面や自由表面で適切な計算ができないという問題を抱えており、衛星の表面付近で正しくエネルギー分布を解けないことである。

まず一つ目の問題を解決するために、粘性流体の方程式のSPH法での定式化の見直しを行った。SPH法でよく使われている粘性の定式は粒子間の相対速度によって粘性力が働くような形式になっており、これが非物理的な力の原因と考えられる。そこで、相対速度の代わりに速度勾配によって粘性力が働くような定式に変更したところ、非物理的な力を抑えることができた(図１)。

また、二つ目の問題を解決するために、計算手法を従来のSPH法から、Saitoh & Makino(2013)などで開発されたDensity Independent SPH(DISPH)法に変更した。DISPHは不連続面での困難を発生させないように定式化されており、これにより表面付近でのエネルギー分布の問題も解決できることがわかった(図２)。

このことより、速度勾配に基づく粘性の定式化とDISPHを用いることで、粘性のある物体の剛体回転を計算することができることを発見した。

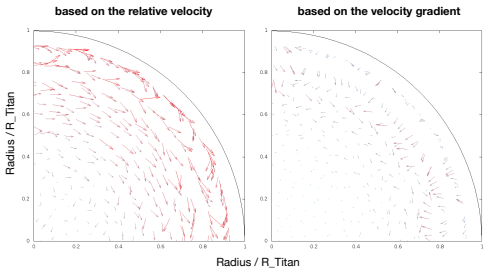


図１：粘性による加速度のベクトル表示。(左)相対速度に基づく定式。(右)速度勾配に基づく定式。

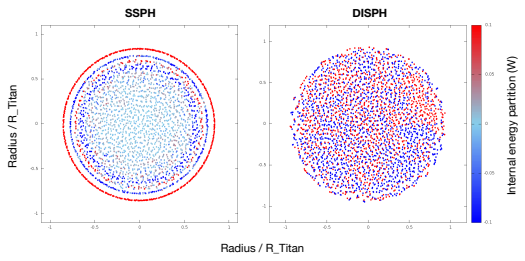


図２：粘性による内部エネルギーの変化率。粘性は速度勾配に基づく定式。(左)標準的なSPH(SSPH)。(右)DISPH。

海王星衛星 Triton の窒素噴出現象における内部熱構造の寄与

○今井田奈波,　木村淳
大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

海王星の最大衛星 Triton は、1989 年に Voyager 2 号が初めて接近観測を行った。その際に撮影された画像から、表面から窒素ガスが黒く細い噴煙柱のように噴出していることや、その表面は極めて若い年代を持つなどの活発な地質活動が起きていることが明らかになった。その窒素噴出のメカニズムとして、これまで提示されてきたのは太陽日射による駆動説である。これは、太陽の日射が表面にある窒素氷層を透過し、窒素氷層の底部にある暗い物質に吸収され、窒素層の底部が温められる。温められガス化した窒素が上の窒素氷層中の間隙を通って上昇し、窒素氷や暗い物質を伴いながら噴出する、というものである（Smith et al., 1989; Kirk et al., 1990)。従来は、観測時に夏であった南極付近で窒素ガスの噴出が見られることや噴出時間が比較的短いことも、太陽日射による駆動説を支持していた。そのため、Triton と大きさや表面組成、太陽からの距離の点で類似した冥王星でも同様の窒素ガスの噴出が観測されると期待された。しかし探査機 New Horizons が撮像した冥王星の表面画像にはそのような噴出が見られなかったことから、窒素噴出には太陽日射以外の熱源が寄与している可能性も考えられる。そこで本研究では、太陽駆動説を補う形で提示された内部熱流による駆動説（Brown and Kirk, 1994）に注目し、トリトン内部の熱進化に関するモデル計算を行うことでこれを再考察した。

モデル計算では、熱源として Triton の岩石核内で発生する放射性元素の崩壊熱と軌道傾斜角によって内部海の底面で発生する潮汐加熱を考え、固体氷殻および岩石核内での対流と伝導による熱輸送と H_2O の固液相変化を考慮した。氷の融点粘性率や潮汐加熱率をパラメタとした 46 億年間の長期シミュレーションを行い、現在のトリトン表面における熱流量を、地溝帯の形状解析から推測される熱流量（Martin-Herrero et al.,2018）と比較して適切なパラメタレンジを見出す。また、窒素氷層底面でのガス化に伴う加圧によって窒素氷層に生じる亀裂の伝搬（Neveu et al., 2015）を評価することで、窒素噴出過程を考察する。

木星衛星カリストの不完全な内部分化と地下海の維持を説明する長期進化モデル

A long-term evolutionary model
for current incomplete interior differentiation and subsurface ocean of Callisto

○松岡夏季，木村淳
大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

太陽系の木星以遠に存在する，表面を氷に覆われた「氷天体」の幾つかにおいては，その氷殻下に海の存在が示唆されており，生命体の存在可能性が議論されている．木星衛星のカリストもそのひとつであり，1996 年にガリレオ探査機が表面近傍で誘導磁場を検出したことから，内部に電気伝導層として振る舞うような地下海が全球的に存在していると考えられている．一方で，重力場観測によって得られた 0.3549 という慣性能率の制約下では，カリストの内部は成分分化が不完全であると示唆される．これらの観測に基づき，先行研究では地下海の有無を含めた現在のカリストの内部構造について実験的・理論的な推測はされているが，その長期的な進化に関する定量的な考察はまだ行われていない．そこで本研究では，現在のカリストが地下海を保持しつつも成分分化が不完全なままであるという内部状態を実現する条件を探ることを主な目的とした，内部熱進化のモデル計算を行った．初期の内部構造を(1)含水岩石核，高圧氷層，氷殻の 3 層構造，および，(2)含水岩石核，地下海，氷殻の 3 層構造の 2 パターンを仮定してモデル化し，岩石核の脱水反応を含めた天体内部の熱的な進化を数値計算によって解析した．熱源は，岩石核中の長寿命放射性核種同位体崩壊熱(^{238}U, ^{235}U, ^{228}Th, ^{40}K)とした．初期の岩石核密度は蛇紋石を仮定して 2300 [kg/m^3]とし，900 K に達すると脱水を起こして橄欖石 3500 [kg/m^3]となる．岩石核からの熱を受けて氷が底面融解を起こすとき，氷が高圧氷(ice III)である場合は，形成された液体水は ice III より密度が小さいことから，高圧氷層を通って瞬間的に氷殻(ice Ih)下に移動すると仮定した．形成した地下海は，高圧氷層が存在する場合は，ice III から受け取る熱と ice Ih から引き抜かれる熱との収支に従い，また高圧氷層が存在しない場合は，岩石核から受け取る熱と ice Ih から引き抜かれる熱との収支に従って厚さが変化する．また，含水岩石核から脱水した液体水は直ちに上昇し地下海へと加わることを仮定した．

計算の結果，氷の粘性率が大きい場合(融点粘性率 10^{17} Pas 以上)は，底面融解によって高圧氷が全て融解し，厚い地下海が現在まで維持される可能性が高いことが分かった．また，典型的な氷の粘性率(融点粘性率 10^{13}~10^{15} Pas)を仮定する場合，カリストが現在まで地下海を維持するためには，潮汐加熱などの追加熱源を考慮する必要があることが分かった．本発表では，カリストのさまざまな初期状態や内部構造を仮定したモデル計算の結果を示し，カリスト形成初期から現在にかけて，高圧氷層の存在や岩石核の脱水縮小が地下海形成に与える長期的な影響について数値シミュレーションした結果を報告する．

木星衛星エウロパに地下海が存在し金属核起源磁場が存在しないための内部構造条件

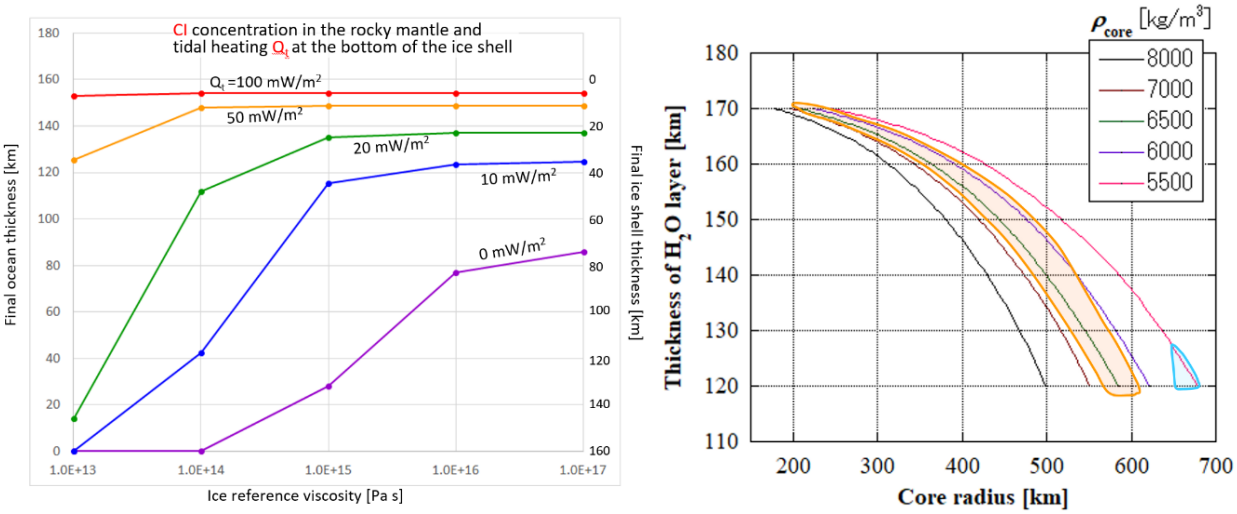
Structural conditions for the existence of a subsurface ocean and the absence of a magnetic field exerted by metallic core on Europa

木村淳（大阪大学）

木星系探査機ガリレオが衛星エウロパへのフライバイの際に行った磁場環境測定では，木星磁場の変動にエウロパ内部の伝導体が応答して生じた磁場が発見された一方，地球磁場のような金属核でのダイナモを起源とする磁場は見つからなかった．これは，電解質を含んだ全球的な海が氷殻下に存在することを強く示唆し，金属核で対流運動が起こっていないことを意味する．1565 km の表面半径を持つエウロパの内部は，重力場測定を通して推定された慣性能率（半径と質量で規格化した値として 0.346±0.005）にもとづき，金属核，岩石マントル，H_2O 層に分化していると予想される．しかし各層の量比においては，Fe-FeS 系組成を仮定した 5.5~8.0 g/cc の核密度に対してその半径が 0.11~0.43 エウロパ半径，最外層の H_2O 層の厚さは 120~170 km と，小さくない不定性がある．このような内部構造や氷の物性値などが取り得る値の範囲において，エウロパの内部がどのような進化をたどった末に現在の「地下海はあるが金属核磁場はない」状態へ行き着いたのかについては，まだ系統的な考察がなされていない．

そこで本研究では内部長期進化のモデル計算を行い，地下海の厚さや金属核の温度・熱流量の変化を追跡した．慣性能率の制約下で許容される内部密度成層構造（金属核密度および H_2O 層厚さ），氷の粘性率，岩石マントル中の放射性同位体量，潮汐加熱率をさまざまに変え，先行研究において地形解析などから推定されている氷殻の厚さや，金属核内に対流が起こらないためのパラメタレンジを見出した．

氷殻のダイナミクス計算から推定される氷殻厚さの上限値 90 km (Vilella+ 2020)を満たすために必要な潮汐加熱率は，氷の融点粘性率 $10^{13}, 10^{14}, 10^{15}$ Pa s に対してそれぞれ 40, 20, 5 mW/m^2 であり（下左図），H_2O 層全体の厚さの違いは現在の氷殻厚さにほぼ影響しない．また，金属核の熱史は H_2O 層全体の厚さや金属核密度（従って金属核サイズとマントル質量）によって決まり，氷殻（海）の厚さの変化は影響しない．そしてエウロパの金属核では，溶融条件と冷却条件を共に満たす解が存在せず，核が低融点組成の場合は融けているが対流していない，高融点組成の場合はそもそも溶融していないため，金属核磁場が発生していないものと思われる．講演ではさらに，岩石中の放射性同位体濃集度を普通コンドライト的と仮定した場合の結果や，金属核磁場を持つガニメデと比較した観点での考察を行う．



図：岩石マントル中に CI コンドライト的な熱源元素濃集度を仮定した時のモデル計算の結果．左図は，計算開始から 45 億年後のエウロパ地下海および氷殻の厚さと，潮汐加熱率および氷の融点粘性率との関係．右図は，金属核密度と H_2O 層厚さが取り得る範囲において，金属核の溶融条件（オレンジ）と冷却条件（水色）が満たされる範囲．

形成過程から明らかにする長周期彗星分布の非等方性

○樋口有理可（産業医科大学）

オールトの雲とは小天体が作る構造で、太陽系を遠方から球殻状に取り囲んでいる。ここから惑星領域内部まで落ちてきた小天体は長周期彗星として観測される。この長周囲彗星の軌道は天球上のあらゆる方向からまんべんなくやってくると考えられてきたが、そうではないということを形成過程から示す。

オールトの雲を作る小天体は元は黄道面近くに分布していた微惑星である。銀河系からの摂動を受けることで、元は太陽系内部の黄道面に集中していた軌道は大きく広がった球殻状分布へと進化した。銀河潮汐力は小天体の軌道要素を周期的に変化させる。軌道要素のうち、近日点距離、軌道傾斜角、近日点引数は共通の周期で進化する。一方、昇交点経度は一般には他の軌道要素とは独立の周期を持つ。

本研究では、軌道の遠日点方向を与える銀経(L)と銀緯(B)の進化に着目した。Lは昇交点経度と、Bはその他の軌道要素と連動して進化する。これらの進化をラグランジュの惑星方程式を積分することにより時間の関数として陽に表すことに成功した。その結果より、長周期彗星のように離心率が1に近い軌道を持つ天体ではLとBの進化に特殊な関係が保たれることが導かれた。特殊な関係とは、(1)Bは振動するがLはほとんど進化しない、(2)LとBの周期の比がほぼ2:1になる、というものである。(1)と(2)のどちらになるかは初期の近日点引数に依る。この特殊な関係は、初期に黄道面で惑星領域に近日点を持っていた小天体がオールトの雲から再び惑星領域に戻ってくる時に持つ軌道の遠日点方向が、特殊な2面に含まれるということを示唆する。特殊な2面とは、1面は黄道面、もう一面は黄道面を銀河面に対して反転させた面である。JPL/NASAによる小天体の軌道要素カタログから長周期彗星のL、B分布を作成したところ、本研究が提唱する2面にほぼ対応する分布の集中が確認できた。

地球に接近したパンスターズ彗星 (P/2016 BA14) の彗星核の中間赤外線観測

○ 大坪 貴文 [1], 河北 秀世 [2], 新中 善晴 [2]

[1] 国立天文台, [2] 京都産業大学/神山天文台

2016 年 1 月 22 日に発見されたパンスターズ彗星 (P/2016 BA14) は，2016 年 3 月 22 日 (UT) に地心距離約 0.024 au まで地球に接近した。この地心距離はここ 200 年では彗星が最も地球に接近する距離であり，ダストコマの構造などを分解し彗星核そのものをとらえる観測が可能になることが期待された。そこで我々は，2016 年 3 月 21 日 (UT) にすばる望遠鏡搭載の冷却中間赤外線分光撮像装置 (COMICS) を用いて，この彗星の中間赤外線撮像分光観測をおこなった。今回はその結果について報告する。

撮像観測は 8.8, 12.4, 17.7, 18.8 μm の 4 バンド，分光観測は 8–13 μm の低分散分光 (比波長分解能 $R \sim 250$) でデータを取得した。我々が観測したのは近日点通過後，彗星の地球最接近直前であり，地心距離は約 0.026 au (約 390 万 km)，日心距離は約 1.01 au であった。観測時のシーイングは FWHM で約 0.5 秒角 (彗星の位置で約 10 km 相当) であったが，彗星撮像イメージの空間プロファイルは標準星とほぼ同等であり、明確なコマの寄与は見られなかった。彗星からの熱放射は彗星核からの寄与が卓越していると考えられ，今回の観測では中間赤外線で彗星核の放射をとらえることができたことを示唆している。パンスターズ彗星の規格化した放射率スペクトルにはわずかにスペクトル・フィーチャが見られるが、通常の彗星ダストコマのような連続光成分からの超過フィーチャは見られず、粒径が ~1 μm 程度のオリビンやパイロキシンなどの鉱物では再現できない。また 8–9 μm 付近には複雑な有機物起源と考えられるフーチャが見られた。現在我々は，パンスターズ彗星の熱放射スペクトルとさまざまな候補物質の放射率スペクトルとの比較をおこなっている。本講演では、炭素質隕石や南極採集微隕石、あるいは OSIRIS-REx が測定した Benu などの熱輻射スペクトルと比較した結果を紹介する。

レゴリス粒子の固着力：粒子の形状と塑性変形の効果

○長足 友哉, 青木 隆修, 中村 昭子 （神戸大学理学研究科）

はじめに：

小天体上の小粒子に働く重力に比べてその粒子間の固着力は無視できず、高速自転する小天体の存在は粒子間の固着力により説明されている。一方、それらの粒子は衝突破壊または熱疲労で形成され、不規則形状をしている。粒子の形状や塑性変形の有無は、粒子間の接触面積（固着力）に影響すると予想される。これまでに我々は、数十ミクロンサイズの隕石粒子の固着力が理想的なシリカ球の固着力予測値よりも数十倍小さいことを示した（長足他、2019 年秋季講演会）。そこで今回は、(1)前回の固着力測定に用いた隕石粒子の表面形状の測定と定量化、(2)隕石粒子とサブミクロンサイズのシリカ球からなるアグリゲイトのプレスオン遠心法による固着力測定（e.g., Lam & Newton, 1991）を行い、固着力に与える粒子形状と塑性変形の効果を調べた。

実験方法：

光学顕微鏡と共焦点顕微鏡により、数十ミクロンサイズの隕石粒子（CM2, CV3, LL3.5, LL5, LL6, Eucrite）の円形度（>数ミクロンスケールの粗さ）と算術平均粗さ Ra（サブミクロンスケールの粗さ）を求めた。加えて、5000 G（G: 地上での重力加速度）の遠心力で数十ミクロンサイズの CM2 粒子とアグリゲイトを平板に押し付けた後に、平板から引き離す方向に遠心力をかけていくことでその固着力を測定し、プレスオンなしの場合と比較した。

結果・議論：

粒子の固着力が粒子の円形度の減少と表面粗さの増加に伴って減少する傾向が明らかになった。今回の結果を用い、小惑星上のボルダーや回収されたイトカワ粒子の円形度に基づく粒子形状効果、および、水蒸気吸着効果を補正して得られる小惑星上の粒子の典型的な固着力はサブマイクロニュートン程度と推定された。平板に押し付けなかった場合の室内でのアグリゲイトの固着力（~0.3 μN）は、モノマーの固着力（Heim et al., 1999）よりも数倍大きかった。また、この値は、2 倍程度大きいモノマーからなる 4 倍程度大きいアグリゲイトの場合の先行研究の値（Brisset et al., 2016）と同等であった。一方で、5000 G の遠心力で平板に押し付けると、CM2 粒子の固着力は変化せず塑性変形の効果は確認されなかったが、ダストアグリゲイトの固着力は 5 倍程度増加することが確認された。これは押し付けによるアグリゲイトと平板の接触点の増加を示唆する。本講演ではこの結果についても議論する。

放出物カーテン内での粒子のクラスター形成：解析モデルと室内実験・数値計算との比較

○中澤 風音[1], 奥住 聡[1], 黒澤 耕介[2], 長谷川 直[3]
[1]東京工業大学 , [2]千葉工業大学 , [3] JAXA/ISAS

太陽系において、衝突現象は普遍的に見られる。クレーター形成を伴うような衝突では、多数の粒子放出が起こり、放出物カーテンと呼ばれる空間的に薄い帯状の構造を形成する。近年の数値シミュレーションやクレーター形成実験により、放出物カーテンには非一様な粒子パターンが見られることが明らかになってきた(e.g. Kadono et al., 2015)。このパターン形成により生じる粒子密度の不均質は、クレーターレイのような衝突点周辺の地形形成に関係することが示唆されている(Minton et al., 2019)。従って、パターン形成を理解することは、衝突現象そのものだけでなく周辺地形への理解にも繋がっており、重要である。

我々は、放出物カーテン内に見られるパターンの形成メカニズムの理解に向け、縦型 2 段式軽ガス銃を用いた衝突実験と数値シミュレーションおよびパターン形成のモデル化を行った。衝突実験では、衝突自発光により撮影が行われていなかった、形成初期の放出物カーテンを撮影した。数値シミュレーションでは、実験で見られる放出物カーテンを多粒子の非弾性衝突と系の膨張で再現した。シミュレーションにおいて、クラスター分析の手法を用いることでパターンを構成する粒子群を追跡した。解析モデルにおいてもクラスターに着目し、非弾性衝突で生じるクラスターの完全合体を仮定したモデルを構築した。

実験では、形成初期（$t < 100$ μs）の放出物カーテンの様子を捉え、衝突後 10 μs 時点でパターン形成が起きていることを明らかにした。数値シミュレーションでは、$t \sim 10$ μs の段階で非弾性衝突によって粒子がクラスターを形成し、このクラスターが系の膨張によってパターンを形成することを示した。解析モデルは数値シミュレーションで得られた系の速度変化をよく再現し、クラスター質量もファクター2 の範囲内で再現した。

本研究で得られた結果は、パターン形成がクラスター形成と系の膨張により説明できることを示唆している。さらなる研究により、本研究で導入したモデルに基づいて現実の放出物カーテンに生じる不均質の程度や空間スケールが予測できるようになると期待される。

石鉄隕石メソシデライトの形成シナリオ解明に向けた ベスタ様小惑星への巨大衝突の数値計算

○杉浦圭祐[1]，羽場麻希子[2]，玄田英典[1]
[1]東京工業大学 地球生命研究所
[2]東京工業大学 地球惑星科学系

メソシデライトは石鉄隕石の一種で，ケイ酸塩と鉄-ニッケル合金を同量程度含んでいる．メソシデライトのケイ酸塩と鉄-ニッケル合金はその化学的組成などから，それぞれ分化した小惑星の地殻と溶融状態にある金属コア由来であると考えられている(e.g., Mittlefehldt et al. 1979; Hassanzadeh et al. 1990). また金属成分は石鉄混合時にもまだ溶融していたと考えられている(e.g., Floran 1978). 一方でマントルの主成分であるカンラン石はメソシデライトにはほとんど含まれていない(e.g., Prinz et al. 1980). メソシデライトの金属部分の冷却速度の測定などから，メソシデライトは形成後に数 100 km サイズの小惑星のある程度深くに埋め込まれてゆっくりと冷却したことが予想されている(e.g., Haack et al. 1996). 以上からメソシデライトは，分化小惑星の溶融状態にあるコアが巨大衝突で掘削され，直後に数 100 km サイズの小惑星の表面付近の地殻と混合することで形成したと考えられる．メソシデライトを形成した石鉄混合時 (約 45 億年前) にコアが溶融状態にあったことから，メソシデライトの金属部の母天体は直径 500 km 程度の小惑星だと考えられている(Haba et al. 2019). さらにメソシデライトのケイ酸塩部分の酸素-クロム同位体組成が HED 隕石と完全に一致すること(e.g., Greenwood et al. 2006)と，HED 隕石の赤外分光スペクトルが小惑星ベスタと似ていること(e.g., McCord et al. 1970)から，メソシデライトのケイ酸塩部分の母天体はベスタである可能性が高い．

巨大衝突による小惑星のコアの掘削・集積過程は Scott et al. (2001)が低解像度シミュレーションで大雑把に調べているものの，集積後の物質の分布を詳しく調べ金属コアと地殻を主成分とする物質の形成が可能か調べた研究は存在しない．そこで本研究では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を用いた数値シミュレーションでベスタ様小惑星への巨大衝突を再現し，衝突後の小惑星の物質分布を詳しく調べる．ターゲット天体の半径はベスタ同様の 270 km とし，内部構造はベスタのマグマオーシャンモデル(Mandler&Elkins-Tanton 2013)に基づいてコア半径 110 km，マントル厚さ 120 km，地殻厚さ 40km とした．インパクタ質量はターゲット天体の 0.1 倍とし，衝突角度を 10°から 50°，衝突速度を 2 km/s から 5 km/s の間で変化させて様々な衝突計算を実行した．

その結果，衝突後の天体質量が元の質量の 0.5 倍になる程度の破壊的な衝突で金属コアを掘削し，表面地殻と混合できることがわかった．より非破壊的な衝突ではコアが掘削できず，より破壊的な衝突では地殻が優先的に失われるので天体上で地殻とコアの混合を実現することがより難しくなることもわかった．図 1 は衝突角度 30°，衝突速度 3.25 km/s の計算のスナップショットを表しているが，衝突によって変形したコアの一部が放出され(b, c)，その後薄くなった地殻の上に堆積していることが分かる(d, e). 図 2 は衝突で形成された天体上で表面から 20 km にある物質の割合の分布を表している．平均的には表面の 50%程度でマントルが露出してしまっているものの，経度 60°，緯度 60°のように 85%程度が地殻を占めているが少量のコア物質も堆積している部分も形成された．メソシデライトはこのようなサイトで形成可能である．

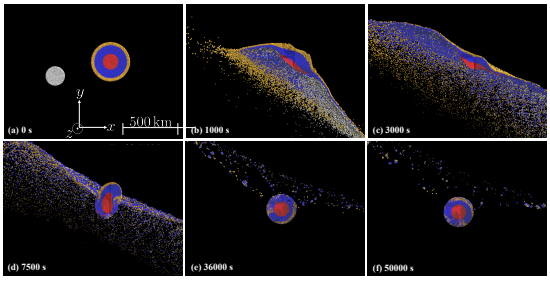


図 1：衝突角度 30°，衝突速度 3.25 km/s の衝突計算のスナップショット

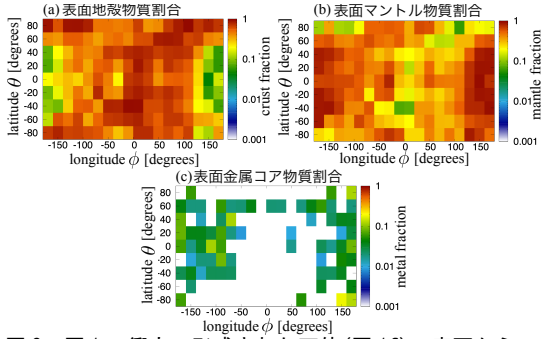


図 2：図 1 の衝突で形成された天体(図 1f)の表面から 20 km にある物質の，(a)地殻，(b)マントル，(c)コアの割合．横軸は経度，縦軸は緯度，色は割合を表す．図 1 の x 方向が経度 0°緯度 0°，z 方向が緯度 90°に対応する．

火星隕石 ALH 84001 の炭酸塩中の硫黄化学種解析に基づく初期火星表層環境の推定

Sulfur speciation in carbonates of a 4.1-billion-year old Martian meteorite constraining surface environment on ancient Mars

○梶谷伊織[1]，中田亮一[2]，小池みずほ[3]，田辺学[4]，臼井寛裕[1,5]，
松浦史宏[1]，福士圭介[6]，黒川宏之[5]，横山哲也[4]
[1]JAXA 宇宙科学研究所，[2]JAMSTEC，[3]広島大学，[4]東京工業大学，
[5]地球生命研究所，[6]金沢大学

太陽系の惑星の中でも火星は、地形学的な分析により、過去に液体の水が地表面に存在していた可能性が指摘されている天体である。しかし、現在の火星は寒冷で乾燥した惑星である。このように大きな表層環境の変化を経験した火星の過去の水環境を、水—岩石反応をよく反映する鉱物を用いて定量的に推定することは、火星表層進化を解明する上で非常に重要となる。火星の表層環境進化を読み解く上で重要な、表層の物理化学状態をよく反映する鉱物として、炭酸塩鉱物に注目した。ALH 84001 は、40 億年前の情報を保持する唯一の火星隕石であり、約 39 億年前に火星に存在した液体の水から晶出した炭酸塩鉱物を有する。

本研究では、ALH 84001 中の炭酸塩を対象として、X 線吸収端近傍構造(XANES)分析を行った。その結果、全ての測定点で 6 価の酸化型硫黄に起因するピークが、一部の測定点で 4 価と−2 価の硫黄、および硫黄を含む有機物に起因するピークが検出された（図 1）。スペクトル解析および熱力学計算の結果、6 価の硫黄に起因するピークは CAS の存在で説明できることが分かった。予想される炭酸塩形成モデルから、初期火星において炭酸塩は比較的深い場所で晶出し、現在の火星地下に炭酸塩の炭素貯蔵層が存在する可能性が示唆された。

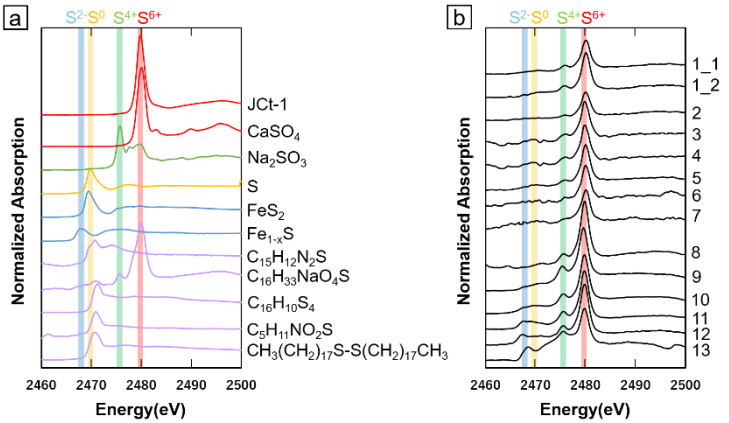


図 1. 取得した XANES スペクトルの一部。(a)参照試料の XANES スペクトル。(b)ALH 84001 の炭酸塩から得られた XANES スペクトル。

隕石有機物の主要生成反応：炭素同位体組成からの制約

○古川善博[1], 岩佐義也[1], 力石嘉人[2,3]
[1]東北大学 理学研究科, [2]北海道大学 低温科学研究所, [3]JAMSTEC

隕石にはカルボン酸、アミノ酸、糖、核酸塩基などの水溶性有機物と IOM と呼ばれる溶媒不溶性有機物が含まれているが、水溶性有機物は高い炭素同位体比（例えば、Murchison meteorite のグリシンとアラニンで+13 から+40）を持ち、IOM は低い同位体比（約-20‰）を持つことが知られている。この同位体比の違いを生じる原因はわかっていないが、この炭素同位体比が起源の全く異なる炭素源によるもので、高い炭素同位体比を持つアミノ酸などの水溶性有機物が低温環境で生成したものという議論もされている。一方で、この炭素同位体比の特徴は説明できないが、隕石有機物の生成反応モデルは他にも提案されており、IOM の変質でアミノ酸ができる反応や、アンモニアが関与するホルモース反応(ammonia-involved formose-type reaction; AFR)で、アミノ酸と IOM が同時に生成し、隕石に含まれる水溶性の主要有機物がこの反応の生成物に該当するということも報告されている。本研究では、AFR に伴って起こる炭素同位体に関する動的同位体分別効果が、^{12}C に富む IOM と ^{13}C に富むアミノ酸を生成したという仮説を立て、その検証のために、ARF による隕石有機物の生成模擬実験を行い、生成物に含まれる合成 IOM とアミノ酸の炭素同位体比を測定した。実験の結果、生成した IOM は ^{12}C に富み、アミノ酸はグリシン、アラニン、β アラニン共に ^{13}C に富むことが明らかになった。合成 IOM とアミノ酸の炭素同位体比の差は最大で 48‰であり、この差は Murchison 隕石や他の CM コンドライトおよび CR コンドライトに含まれる IOM とグリシンの差（29 から 63‰）に匹敵するものであることが明らかになった。また、この差は彗星回収物質(81P/Wild2)から見つかっている有機グロビュール(mean value: -32.6‰)と彗星暴露試料から検出されたグリシン(+15‰)との炭素同位体比の差(64‰)よりは低いものの、同位体の分別方向は一致している。したがって、この結果は隕石に含まれる有機物に関して強い制約となっていた炭素同位体組成を初めて説明するもので、生命関連物質も含む隕石有機物が必ずしも極低温環境で生成したものではないことを示している。

分光観測と数値シミュレーションによる 2017-2018 年ふたご座流星群 Na 変動量の調査

○小川 巧覽[1]，阿部 新助[1]，新垣 志麻[1]，宇田 天音[1]，前田 幸治[2,3]，荒井 朋子[4]
[1]日本大学理工学部，[2]宮崎大学工学部，
[3]日本流星研究会，[4]千葉工業大学惑星探査研究センター

[背景・目的] 毎年 12 月中旬に出現する「ふたご座流星群」は，現在最も流星数が多い主要流星群として知られている(理想条件下での 1 時間当たり流星数~150 個)．「ふたご座流星群」のダスト・トレイル形成年代については，数百年～数千年と複数のモデルが提唱されているが，母天体「3200 Phaethon」は，太陽に 0.14AU まで接近するため枯渇彗星(B 型小惑星)となっていて，「ふたご座流星群」の形成メカニズムは大きな謎となっている(e.g.Ryabova, 1999, 2007).

[観測・結果] 我々は，SONY 製超高感度 CMOS カメラ ILCE-7S を用いて 4K30fps による非圧縮動画記録を行い，2017-2018 年「ふたご座流星群」の可視分光観測において 149 個の良質なスペクトルを取得した(表 1)．観測したスペクトルから Na-Mg-Fe 組成比の推定を行い，三角ダイアグラムを用いて流星の分類(Borovička et al., 2005)を行った(図 1)．そして，観測データから含有 Na にサイズ依存性があり，約 80%の「ふたご座流星群」の含有 Na が枯渇(太陽組成の 1/6 程度)していることを統計的に明らかにした(Abe et al., 2020).

表 1　観測条件および結果

カメラ	波長範囲	波長分解能	視野角(水平)	観測日時	観測個数
SONY ILCE-7S (IR フィルターなし)	380-800[nm]	0.44[nm]	73.74°	2018 年 12 月 13～16 日	5
		0.28[nm]	36.97°	2017 年 12 月 13～14 日	2
SONY ILCE-7S	400-700[nm]	0.51[nm]	73.74°	2018 年 12 月 1～21 日	63
		0.37[nm]	54.43°	2018 年 12 月 9～18 日	79

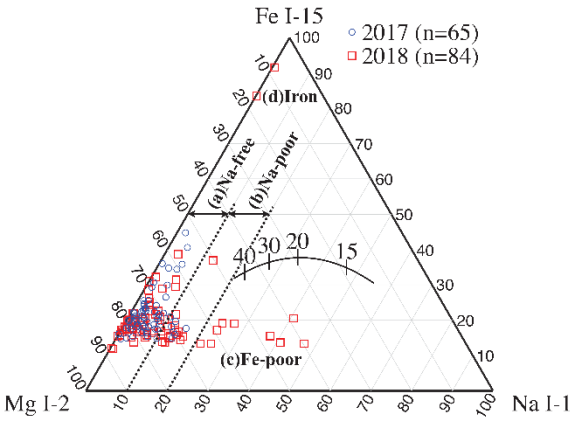


図 1　2017-2018 年ふたご座流星群 Na-Mg-Fe 組成比

[議論] 本研究では，流星スペクトルより求めた発光強度から流星体の等級・質量を推定するモデルを適応し，Na の質量毎の枯渇分布を導出した．さらに，曹長石などの Na を含有する珪酸塩鉱物の加熱拡散係数と Phaethon の惑星間軌道を考慮した太陽加熱による Na 拡散モデル(Čapek et al., 2011)を我々の観測結果から得られた分布に適応することで，ダスト・トレイルの形成年代について考察する．

[参考文献]

[1]Borovička, J., Koten, P., Spurný, P., Boček, J., Štork, R., “A survey of meteor spectra and orbits: Evidence for three populations of Na-free meteoroids” Icarus 174, 15-30., 2005.

[2]Čapek, D., Borovička, J., “Quantitative model of the release of sodium from meteoroids in the vicinity of the Sun: Application to Geminids”, Icarus 202, 361-370., 2009.

[3]Abe S., Ogawa T., Maeda K., Arai T., “Sodium variation in geminid meteoroids from (3200) phaethon”, Planetary and Space Science, 2020

東京大学木曽観測所 Tomo-e Gozen と京都大学生存圏研究所 MU レーダーを用いた微光流星の同時観測

○森田 晃平[1]，阿部 新助[1]，大澤 亮[2]，Daniel Kastinen[3]，Johan Kero[3]，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]日本大学理工学研究科航空宇宙工学専攻，[2]東京大学理学系研究科天文学教育研究センター，
[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]国立天文台情報センター

[背景] 地球には 1 日に数十~数百トンの物質が降り注いでいると推算されている(Plane et al.,2012).これらの起源は彗星や小惑星を起源とするメテオロイドや惑星間塵と呼ばれる固体物質である．これらダストのサイズ分布と軌道進化を知る事は太陽系小天体の起源と進化の新たな知見に繋がると考えられている．ダストの研究では，黄道光や宇宙機,月面のマイクロクレーターからの空間密度分布の導出などがあるが，衝突速度などの仮定がサイズの不確定性となっている（Devine,1995）．また質量が 1μm 以上になると，空間密度が低いため上記の手法では更に不確定性が大きくなる． これに対し地上での流星観測手法では，ダストが地球大気に突入する流星現象を通じて物性値の情報を取得する．これは地球大気を巨大な検出器として使用できるため，1μm の粒子も含めたより広い質量範囲のダストを一粒ずつ多量に取得でき，ダスト研究に有効性のある手法である．

[手法] 地上観測ではレーダー観測が最も感度が高く，中でも大出力大口径レーダー(HPLA)を用いた「流星ヘッドエコー観測」は微光流星の軌道と速度を精度良く導出できる観測手法である(Close et al.,2004)．しかし，ヘッドエコー観測により得られる観測量(RCS：電波反射断面積)は．ダストのサイズ，突入速度，突入角度，組成，形状など様々な物理量に依存しており，レーダー観測のみでダストの質量,サイズを導く事は難しいとされている．近年この RCS を較正するため，光学観測との同時観測が実施されている(Brown et al.,2017).しかし同時流星としての個数は少なく，可視光観測の検出限界により等級に制限がかけられていた．それに対し今回の「京都大学生存圏研究所 MU レーダー」と「東京大学木曽観測所広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen」の同時観測システムでは，既存のシステムと比べ高感度,広視野(~20 deg^2)である事から，より多くの同時観測流星数，より暗い(小さい質量)流星までの検出が期待される．

[目的・結果] 2018 年 4 月に実施した試験観測(Tomo-e Gozen の CMOS センサが望遠鏡全焦点面の 1/4 のみ)では，12 等級(質量換算で約 10^{-5}[g])までの微光流星 228 個を MU レーダーとの同時流星として検出することに成功した．また従前に ICCD カメラで得たデータも含めて，流星の電波特性と光学特性の変換式である，レーダーの最大 RCS と可視等級の相関関係の式を求める事ができた(Ohsawa et al.,2020)．そこで本研究では，先行研究で課題であった解析工程の自動化に取り組むのと同時に，サンプル数を高めるためにも 2019 年秋に Tomo-e Gozen を本格稼働させた同時観測システムで流星観測を行った．結果として自動化による解析日数の短縮と，1 日の同時観測数の増加を確認することができた．そこからの議論として，得られた観測結果を先行研究の結果と比較し，今後の同時観測数の増加に向けて改善への提言と，先行研究のデータを使い，サンプル数を増加させたデータで RCS と等級の速度依存性などを調査し，流星の電波特性と光学特性への考察を行う．

炭素含有鉱物による天体のシステム環境（流体・生命）研究

Study of System Events (fluids, life) on Celestial Bodies based on Carbon-bearing Minerals

Yasunori MIURA (Post Yamaguchi Univ.; Post Univ. Toronto)

Fine carbon-bearing minerals can be found on all celestial bodies locally or globally. Size and compositional data of the above minerals show waterless or ocean-water system of the celestial bodies. Life system of mini-Earth type requires ocean-water system of Earth for complex mixing of refractory elements for carbon organic compounds and carbonate rocks.

はじめに：水惑星地球の研究は、広大な三圏（大気・海水・岩石）の学術分野で行われている。三圏からなる地球像は、二圏が揮発性物質なので、残物は固体圏内で分類（光学像・電子線Ｘ線解析像）され、地質年代値から最近数億年の大陸移動による表層部の変化が追跡されているが、古期の惑星情報は順次動的に消失している。本件では、三圏内での残存物である炭素含有固化物に注目して、地球惑星の固化物をまとめて、地球外の鉱物（ミクロ観察）に応用し、天体での流体や生命体を三圏全体視野から対比して考察するのが目的である。

地球鉱物の特徴：鉱物は各天体表層の固体圏情報を示す。しかし鉱物固体は二圏（気圏・流体圏）の情報を消費して極限条件下で晶出している。固体中の残存ガスや流体は急冷時の局所的な捕獲物であり、全圏の形成進化情報でなく、全圏（消失）と局所（残存）で相違する。地球の二圏の消費で岩石固化物を形成変化させ、残物は炭素含有固化物で確認できる。

炭素含有固化物の室内形成実験：炭素は三圏で最も安定的に存在する揮発性元素で、急冷固化物を形成する時に取り込まれて炭素含有固化物を生成する。実験室で無水と液体中条件で急冷固化し回収できた。これは地球上で大陸と海水環境の両者で残存することを示す。実際に地球各地の大陸地と海底地下物でこれらの炭素含有物を発見回収しそれらの電顕写真を諸学会で報告している。本件では地球外の環境推定にも応用できることを紹介する。

地球外天体での特徴：本実験の結果、地上（無水）では超微細な鉱物物質集合体（無水圏天体相当）が残存し、流体中試料は溶液中でガス照射固化反応が進み比較的大きな炭素含有物鉱物結晶（炭酸塩集合体）を生成している。地球外天体では、無水圏の創成期天体（小惑星、月、火星など）での前者の微細な炭素質固化物が隕石回収物から観察できている。物質状態がミニ地球系である生命体圏は複雑に地上岩石圏と共存している。炭素有機物は複雑に親石元素を取り込み急に消失するので、地球型海水圏での形成物の確認が必要である。

まとめ：　惑星の三圏の存在の有無が炭素含有物から議論できることが実験から確認できた。ミニ地球体である生命体の形成の有無が三圏の惑星天体の反復過程に依存するので、広大な炭酸塩岩などの残存報告があれば、生命体の形成を間接的に示すと思われる。

参考文献：三浦保範（1996)「衝撃波ﾊﾝﾄﾞﾌﾞｯｸ」1073-1209.　Miura Y. (2017) Planet. Sci.-2050, 8101 (USA). Miura Y. (2018) IMA'18, 2039. Miura Y. (2020)鉱物科学（仙台）R7-04:

すばる/IRD を用いた赤外ドップラー法による M 型星周りの系外惑星サーベイ

○大宮正士[1,2], 佐藤文衛[3], 田村元秀[1,4], 小谷隆行[1,2], 葛原昌幸[1,2], 平野照幸[3], 原川紘季[2], 工藤智幸[2], 日下部展彦[1,2], 宝田拓也[1,2], 高橋葵[1,2], 笠木結[5], IRD-SSP チーム
[1]アストロバイオロジーセンター, [2]国立天文台, [3]東京工業大学, [4]東京大学, [5]総研大

我々は、すばる望遠鏡と視線速度(RV)精密測定用に特化した赤外線高分散分光器 IRD(InfraRed-Doppler)を用いて、M 型矮星周りの大規模系外惑星サーベイプログラム（IRD-SSP: IRD Subaru Strategic Program）を進めている。このプログラムは、太陽近傍にハビタブル地球型惑星の詳細観測に適する惑星を発見するとともに、低質量星における惑星系形成と進化のメカニズムを包括的に理解することを目的としている。赤外ドップラー法を用いた惑星探索により、太陽近傍の低質量星周りに、1)ハビタブルゾーンの地球質量惑星（~1-3 地球質量）を発見する、2) スノーラインを含む領域においてスーパーアースから巨大惑星までの分布を明らかにする、3) 主星近傍における地球型惑星～スーパーアースの惑星の分布を明らかにする、ことを目標としている。

すばる望遠鏡を用いた IRD-SSP の観測は 2019 年 2 月から開始しており、1 年目の観測では星パラメータを限定して事前に選んでおいた 150 星の M 型矮星から地球型惑星探索に適し、本サーベイの目的に合うサンプルを選ぶためのスクリーニング観測を主に行ない、2020 年以降はスクリーニング観測で選ばれた星の集中的な RV モニター観測を中心に進める。本講演では、IRD-SSP の計画・戦略を紹介し、IRD-SSP のサンプル星とこれまでの RV 観測の進捗を報告する。

スクリーニング観測では、IRD のファイバー入射モジュールのカメラで取得された AO 画像によって実視連星をサンプルから除き、 IRD 分光器で取得したスペクトルを用いて分光連星と高速自転星を除外する。3 回以上の RV 観測によって視線速度の変化が大きい天体も省く。そして、150 星のサンプルから、自転速度が遅く、表面活動が安定している M 型矮星をその後のモニター観測のターゲットとして選ぶ。スクリーニング観測で選ばれたサンプルに対して、80 回の集中的な RV モニター観測を随時行い、低質量惑星の検出が可能なサーベイを展開する。これまでに 120 星以上の M 型矮星に対してスクリーニング観測を行い、10 星のサンプルに対してモニター観測を進めた結果、周期的な RV 変化を持つ可能性がある星と地球型惑星探索のターゲット候補の星を複数検出している。

中間赤外高分散分光による系外地球型惑星の大気組成の検出可能性

◯藤井友香[1,2]、松尾太郎[3]

[1]国立天文台、[2]東京工業大学 ELSI、[3]名古屋大学

ハビタブルゾーン（HZ）付近に地球型惑星の大気観測の大きな問題は、すぐ傍にある主星と惑星の光のコントラストの大きさである。反射光が支配的な短波長の領域では、地球サイズの惑星の主星光との比は、10^{-6}-10^{-10} 程度となる。しかし、中間赤外線領域、特に 10 μm より長波長では、惑星の熱輻射によりそのコントラストが大幅に改善し、晩期 M 型星の HZ 付近の地球サイズ惑星では $10^{-4} = 100$ ppm のオーダーになる。そのため、主星と惑星を合わせたスペクトルの中から惑星大気由来の特徴を検出する可能性が考えられる。特に、将来の赤外線宇宙望遠鏡計画で検討されている高分散分光器を用いれば、惑星の公転運動に伴うドップラーシフトによって、主星と惑星のスペクトルとの切り分けが比較的容易になると期待される。この方法は原理的にはトランジットしていない惑星にも適用可能なため、視線速度法で発見された太陽近傍の晩期 M 型星周りの HZ 付近の地球サイズの惑星（Proxima Cenaturi b、Ross 128 b、Teegarden's Star b など）の大気の特徴付けのための貴重な手段となりうる。そこで本講演では、温暖な地球型惑星を持つ晩期 M 型星の中間赤外線高分散分光模擬観測を行い、惑星大気成分の検出可能性を検討する。

まず、地球に類似した大気構造を想定し、惑星の高分散熱輻射スペクトルのモデルを作成した。恒星の光子ノイズとコントラストの点で有利な波長帯 13-40 μm に注目すると、CO_2 や H_2O、N_2O といった惑星気候や生命環境の特徴付けに重要な分子の吸収が見られる。また、CO_2 が現在の地球の 100 分の 1 以下程度であれば、O_3 の波長 14μm 付近の吸収帯もみられることが分かった。

次に、これらのスペクトルモデルを用いて、5 パーセク彼方にある M8 型星（2500 K）と M5 型星（3000 K）の周りの地球サイズの惑星を仮定し、口径 6.5 メートルの極低温宇宙望遠鏡で波長分解能 R=30,000 の高分散分光をするとして模擬観測を行った。恒星単独のスペクトルの形状が正確にモデリングできると仮定すると、観測装置や恒星光の変動に由来する系統誤差が無視でき装置の透過率を 20%とした理想的な条件では、主星が M8 型星の場合で 1.2 日程度、M5 型星の場合で 3 日程度の積分で、CO_2 を 3σ で検出できることが示唆された。しかし、恒星単独のスペクトルの形状が正確に決まらないとしたより現実的な場合では、この 3-6 倍の積分時間が必要になることが分かった。また、温度逆転層がない場合、CO_2 や H_2O などの幅の広い吸収線の検出においては、コントラストと軌道傾斜角が縮退しやすく、それらを制限するにはさらに長い積分時間がかかることが分かった。12-18μm の波長帯域を使うことを考えると、今回のモデルでは CO_2 が最も検出しやすく、H_2O が続く。一方、地球程度の量の N_2O や O_3 の吸収線の検出には、遥かに長い積分時間が必要となる。

主星が正確にモデリングできない場合に CO_2 の検出に必要な積分時間を主星スペクトルのノイズ (標準偏差) に焼き直すと、1 データあたりの平均 350 ppm 程度（M8 型星）あるいは 100 ppm 程度（M5 型星）に対応する。装置の系統誤差と主星スペクトルの変動によるノイズはこれより十分低いレベルに抑える必要がある。

低温度星周りの水惑星が持つ炭素循環の観測的制約：高層酸素大気による紫外線トランジット透過率の理論的検討

中山 陽史[1]、生駒 大洋[1]、亀田 真吾[2]

[1] 東京大学、[2] 立教大学

近年の系外惑星サーベイによって、低温度星周りで数々の地球と似た条件 (質量半径・日射量) を持つ系外惑星が見つかっている。その中のいくつかは、大陸と海の両方を持つことによって地球のような炭素循環が働き、温暖な気候を持つ可能性が考えられる。また、近年の炭素循環モデリングの結果、大気 CO_2 量は惑星が持つ海洋水量や脱ガス率といった惑星固有のパラメータに大きく依存することが知られている。そのため、系外地球型惑星が持つ大気 CO_2 量は多様であり、惑星の気候状態やハビタビリティを理解する上で観測的な制約が不可欠である。しかしながら、下層大気に存在する CO_2 量を赤外・可視光を用いて観測的に制約することはその小さいスケールハイトから困難であると考えられる。一方で、CO_2 は大気上層で強い冷却材として働くため、大気 CO_2 量は高層大気の膨らみに大きく影響を与えることが知られている。先行研究ではそれを利用し、膨らんだ酸素大気の紫外線トランジット減光率を用いて、CO_2 量の大きく異なる金星と地球が観測的に区別可能であると示唆している。このような紫外線トランジット観測は WSO-UV や LUVOIR などの次世代の宇宙望遠鏡で観測が可能である。しかしながら、彼らの大気構造計算は太陽型星の UV スペクトルを考えており、低温度星の持つものとは大きく異なる。また、UV スペクトルや大気組成といった系に依存したパラメータによって、大気の膨らみと大気 CO_2 量の関係がどのように変わりうるのか検討されていない。そのため、紫外線トランジット減光率から大気 CO_2 量を制約することは困難である。そこで本研究では、静水圧高層大気モデルとトランジット透過光モデルを開発し、低温度星周りの地球型惑星が持つ高層大気とそのトランジット減光率が大気 CO_2 量などのパラメータにどのように依存するのか検討した。そして、将来的に観測されるトランジット減光率から、惑星の炭素循環や気候状態を観測的に制約することを目的とする。

高層大気モデルは光・熱化学、恒星赤外光の吸収・放射冷却、拡散過程を取り扱い、大気組成や恒星スペクトルの変化に対して整合的に高層大気構造を計算可能である。また、外圏底以遠の密度構造は解析なモデル [Chamberlain 1963] を用いており、O のエネルギーレベル分布はボルツマン分布を仮定している。本発表では、UV スペクトルとして、M 型星の中では強度が比較的弱い GJ1214 のスペクトルを用いた結果を紹介する。地球と同程度の日射量を受ける惑星を考え、地球大気組成をベースモデルとし、下層大気組成 (CO_2・O_2 量) や惑星質量を変えた場合に酸素トランジット減光率がどの程度変わりうるか求めた。結果として、CO_2 量を変化させていった場合に、閾値となる CO_2 量を境にトランジット減光率が大きく変わることがわかった。これは大気の構造が静水圧構造から流体的に散逸するレジームに変わるため、高高度における密度構造が大きく変わることを反映している。閾値となる CO_2 量は重力による大気の束縛力に依存するため、惑星質量に強く依存する。また、O_2 量の増加に伴って、冷却材として働く NO 存在度が大きく変わるため、トランジット減光率が減少することが分かった。これらの結果は観測されうる減光率が下層大気組成を強く反映している事を示し、系外地球型惑星を通した地球型惑星の炭素循環やハビタビリティの観測的理解に対して、紫外線観測が重要な役割を担うことを示唆する。

系外惑星大気における非平衡化学の影響

○川島 由依[1], Michiel Min[2]
[1]理化学研究所
[2]SRON Netherlands Institute for Space Research

近年、いくつかの系外惑星について、宇宙・地上望遠鏡を用いた透過スペクトルや放射スペクトルの観測が行われるようになってきた。これまでの多くのスペクトル・リトリーバルコードでは、単純化、かつ計算の高速化のために、大気中の化学種の混合率分布は、熱化学平衡、または大気中で一定であると仮定されてきた。温度の高い大気下層では化学種の混合率は熱化学平衡にあると考えられるが、ある高度で化学反応のタイムスケールは大気の混合のタイムスケールと等しくなる。そしてこれより上層では、化学種の混合率はその高度での混合率に「クエンチ」され一定となる。最近、いくつかの研究で、この非平衡の影響を取り入れるためにクエンチの高度をリトリーバルのパラメータとして導入し始めた。しかし、これらの先行研究では、物理的根拠なしに全ての化学種に対して同じクエンチの高度を仮定していた。化学反応のタイムスケールは各化学種によってそれぞれ異なるため、本来はクエンチの高度も化学種により違う。

そこで我々は、Tsai et al. (2018)で導かれた化学反応のタイムスケールを用いることで、それぞれの化学種に対して渦拡散係数をパラメータとしてクエンチの高度を計算するコードを開発し、スペクトル・リトリーバルコード ARCiS (Min et al. 2020)に組み込んだ。また今回開発したコードを用いて、ハッブル宇宙望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡などで高精度の透過スペクトル観測がなされている 10 個あまりの系外惑星に対して、スペクトルのリトリーバルを行った。その結果、HD 209458b などにおいて、大気が非平衡である示唆を得た。講演では、リトリーバルされたパラメータのトレンドについても議論する。

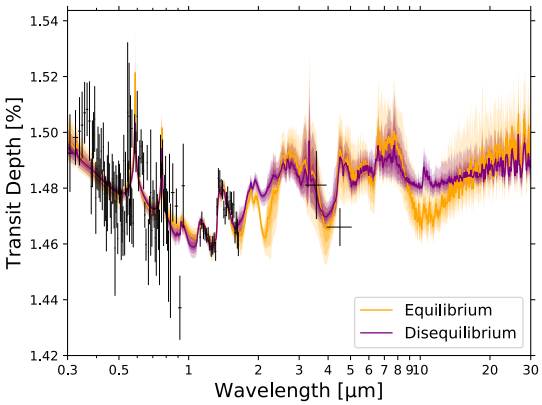


図 1 HD 209458b のスペクトル・リトリーバルの結果。化学平衡を仮定した場合（オレンジ色）と非平衡化学の影響を考慮した場合（紫色）。

磁場から探る系外巨大惑星の内部組成

堀　安範
アストロバイオロジーセンター
国立天文台　ハワイ観測所

短周期巨大惑星は10-100G程度の強い磁場を保有すると予想されている。近い将来、系外惑星の磁場は原子ラインの偏光分光観測やオーロラ電波放射 (> 10MHz)の観測によって検出が期待されている。一方、上層大気の組成や雲／ヘイズの有無を除いて、系外惑星の内部組成は未だベールに包まれている。そこで、系外惑星の磁場検出を見据えて、磁場の有無およびその強度推定から、短周期巨大惑星（0.2-10倍の木星質量）の内部組成（中心核の有無および質量）を推定するアプローチを検証した。若く、質量の大きなガス惑星ほど強いダイナモ磁場を示すが、磁場強度は中心核の有無および質量にはあまり影響を受けないことがわかった。対照的に、土星質量以下の短周期巨大惑星では、ダイナモ領域の出現はコア質量に大きく左右され、小さいコアを持つ場合では、数千万年-数億年の間、惑星は磁場生成できない。質量の大きな短周期ガス惑星は、輻射平衡状態に達するまでは、中心星近傍に存在するほど、強い磁場強度を有する。土星質量程度の短周期惑星の磁場観測はコアの存在を探る指標となり得るが、予想される電波放射強度と地球電離圏での遮蔽の影響から、観測的には困難かもしれない。将来の地上電波観測にとっては、木星質量の半分以上の短周期ガス惑星が現実的に有望なターゲットといえる。

The Linkage between the Magnetic Field and the Interior of an Extrasolar Giant Planet

Yasunori Hori
Astrobiology Center
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory

Close-in gas giants are expected to have a strong magnetic field of 10-100 G. Magnetic fields in extrasolar giant planets are detectable by future radio observations in >10 MHz and the spectropolarimetry of atomic lines. In contrast, the elusive interiors of exoplanets remain largely unknown. Here we consider the possibility of inferring the existence of innermost cores of extrasolar giant planets through the detection of planetary magnetic fields. We simulated the long-term thermal evolution of close-in giant planets with masses of 0.2-10 $M_{\rm Jup}$ (Jupiter-mass) to estimate their magnetic field strengths. A young, massive gas giant tends to have a strong magnetic field. The magnetic field strength of a hot Jupiter is insensitive to its core mass, whereas the core strongly affects the emergence of a planetary dynamo in a hot Saturn. No dynamo-driven magnetic field is generated in a hot Saturn with no core or a small one until ~10-100 Myr. A highly-luminous, massive gas giant maintains a strong magnetic field until it achieves the thermal equilibrium under stellar irradiation. The magnetic field strength of an evolved gas giant after ~100 Myr is almost independent of the stellar incident flux. Detecting the magnetic field of a hot Saturn as a good indicator of its core should be challenging because of the weakness of radio signals and the shielding effect due to plasma in the Earth's ionosphere. Promising candidates for future ground-based radio observations can be hot Jupiters with >0.4 $M_{\rm Jup}$.

オールト雲起源新彗星の力学進化： 新彗星の最小近点距離分布

Dynamical lifetime of the Oort Cloud new comets under planetary perturbation: Distribution of their smallest perihelion distance

○ 伊藤孝士 [1], 樋口有理可 [2]

[1] 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト, [2] 産業医科大学医学部

本研究ではこれまで、オールト雲の成長と同時進行で惑星領域に落ちて来る新彗星の軌道進化を数値実験により追い掛けて来た。現時点までに以下の事柄が分かりつつある。(1) 惑星領域へ突入後の新彗星の力学的寿命は 10^7 年の程度に留まる。(2) 新彗星が平面的に飛来する場合にはいわゆる惑星バリアが有効に働く。今回は上記の (2)、特に新彗星の近点距離の最小値の分布について報告する。惑星バリアを「新彗星の最小近点距離の分布に於いて或る軌道領域に極大値を作り出す作用」と定義すれば、その作用程度には新彗星の軌道要素への依存性があることは容易に想像できる。私達の実験結果によれば、惑星バリアは軌道半長径の小さな新彗星に対してより効果的であることが示された。このことは軌道半長径が小さい、即ち内側オールト雲から来る天体は軌道傾斜角が小さく、惑星と容易に相互作用し得ることから納得される。そして予想通り、軌道傾斜角が小さな新彗星は惑星バリアの影響を強く受け、最小近点距離の分布は土星軌道のすぐ外側に極大値を持つ。興味深いのは逆行する新彗星 (軌道傾斜角 $I > 90°$) であり、幾何学的には似たようなものとも思える $150° < I < 180°$ の新彗星は $0° < I < 30°$ の新彗星とは異なり、惑星バリアの影響をほぼ受けない。これは意外だが、逆行天体は摂動天体との遭遇速度が大きいために相互作用は順行天体よりも弱いという既知の事実と整合的ではある。

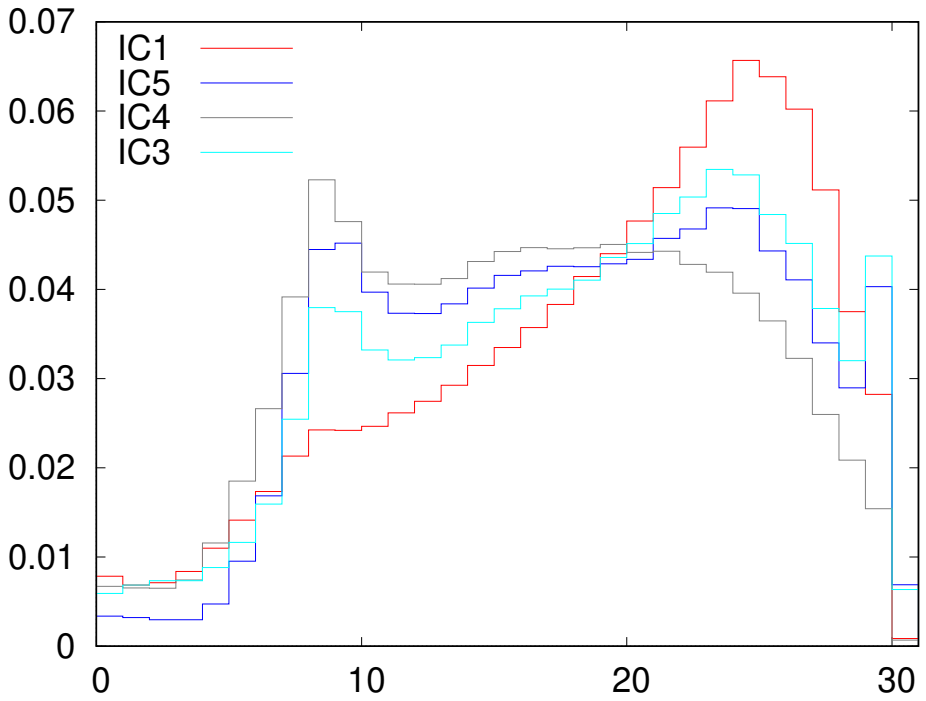


図 1: オールト雲の様々な初期条件 (IC1–5 と名付けている) から出発した新彗星の近点距離の最小値の分布。横軸は近点距離 (天文単位)、縦軸は相対的な割合。

MMX 搭載用イオンエネルギー質量分析器の性能評価

○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[4]、浅村和史[4]、笠原慧[5]

[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]京都大学大学院理学研究科、[4]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
[5]東京大学大学院理学系研究科

現在火星が持つ希薄な大気中の同位体比は、現在の地球大気の同位体とは異なることが知られている。このことから、以前の火星には現在の地球と同程度の大気が存在していたが、これまでの進化の過程において、大気が選択的に宇宙空間に放出されたと考えることができる（Eric Chassefiere, Francois Leblance, 2004）。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、火星散逸イオンの主要成分（O^+, C^+, N^+, Ar^+）を太陽風パラメータとともに観測することを目指す。実際の観測ではアルゴンを整数のマスナンバーで分離する必要があり、このときに要求される質量分解能 M/ΔM は～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電荷比を分別し、下半部では TOF を計測することで質量電荷比の分析を行う。質量分析部の入り口に設置してある厚さ数 10 Å の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）がリング電極によって配位されている。

数値モデルと、それを基にして作成した試作モデルの実験結果を比較した。実験は真空チェンバ内で行われた。2keV の単一エネルギーの He, N, O のイオンビームを入射させた実験データでは、それぞれの分解能 TOF/ΔTOF の値は～168, 180, 133 であることが確認でき、要求される質量分解能を上回った。今回のポスターではこれらの結果と、実験データから考えられることについて発表する。

小惑星リュウグウ形状モデリングの現状

○平田 成[1]，平田 直之[2]，野口 里奈[3]，嶌生 有理[3]，
杉田 精司[4]，松本 晃治[5]，千秋 博紀[6]，山本 幸生[3]，村上 真也[3,7]，石原 吉明[3]，
津田 雄一[3]，渡邊 誠一郎[8]，Robert Gaskell[8]，Eric Palmer[9]
[1]会津大学，[2]神戸大学，[3]ISAS/JAXA，[4]東京大学，[5]国立天文台，[6]千葉工業大学，
[7]慶應義塾大学，[8]名古屋大学，[8]PSI

小惑星探査機はやぶさ 2 では，2018 年 6 月の小惑星リュウグウ到着から 2019 年 11 月の離脱までの約 1 年半の近傍運用期間中に得られたカメラなどの観測データに基づいて，リュウグウの全球形状と数カ所のローカル地形が復元された．これらの形状・地形データは，着陸地点選定などの探査機運用に関わる工学的・理学的検討に用いられたほか，小惑星リュウグウの起源と進化に関する議論のための基礎データともなった．また，形状モデリングの副産物として，リュウグウの自転パラメータや源泉となったカメラ撮像の際の探査機位置と姿勢の推定値も得られている．

はやぶさ 2 プロジェクトでは，形状モデルの作成手法として Stereo Photoclinometry (SPC)と Structure-From-Motion (SFM)の二種類の方法を採用した．SPC はステレオ法と photoclinometry 法を組み合わせた手法である．多くの小天体探査ミッションで採用された実績を持っている．一方，SFM は一般的なステレオ法の拡張というべき手法であり，いわゆるフォトグラメトリソフトとして近年多方面で利用されている．両手法はそれぞれの長所を活かす形で相補的に用いられた．近傍運用期間を通じて得られた全てのカメラ画像を用いて生成された最終的な全球形状モデルを図 1 に示す．両者は基本的によく一致しており，差異の RMS 値は 0.899 m であった．この値はモデルと真のリュウグウ形状からの誤差と見なすことができる．形状モデリングにもっとも寄与が大きかった画像セットの解像度は 0.5-0.7 m/pix（高度 5-7 km での観測に相当）であるから，使用画像の 1-2 画素分の精度で形状推定が行えたことになる．

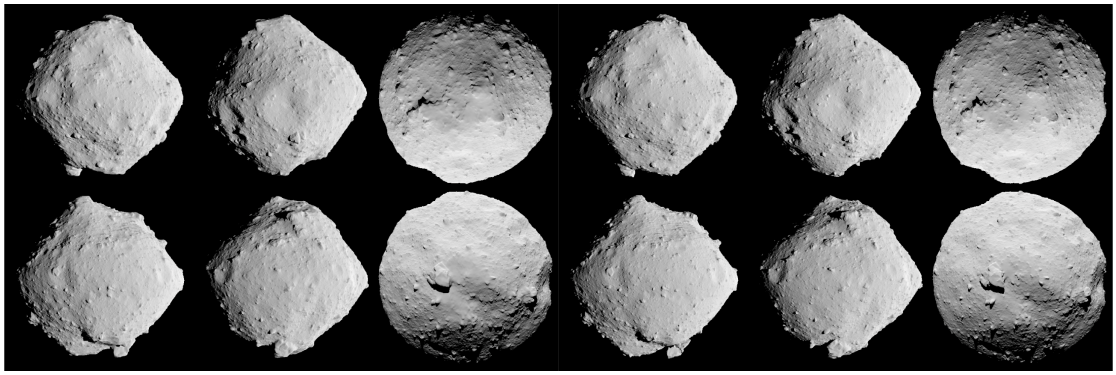


図 1 形状モデルから作成した小惑星リュウグウの 6 面図．左が SPC，右が SFM による．

火星ポリゴンにおける、亀裂方向の定量化とアナログ実験

○植村千尋[1]、中原明生[2]、岩田隆浩[1,3]、松尾洋介[2]、庄司大悟[3]、野口里奈[3]、臼井寛裕[3]
[1]総合研究大学院大学、[2]日本大学、[3]宇宙航空研究開発機構

火星にはポリゴンと呼ばれる表面亀裂地形が存在する(Levy et al., 2009)。斜面上に見られるポリゴン亀裂は、上部で斜面方向に異方性(斜面方向に長い長方形形状)を持ち、下部ではランダムになることが知られている(Ulrich et al., 2011)。異方性の有無は、斜面角度に依存すると考えられてきた。本研究では異方性が現れる要因を調べるため、以下の実験および解析を行なった。

(1) ペーストの乾燥破壊を利用したアナログ実験(図 1)

ポリゴンは土壌の凍結収縮によって形成される。本研究では、ペースト(粉体と水の混合流体)の乾燥収縮破壊とポリゴンの形成過程が類似していることに注目した。ペーストの乾燥破壊において、特定の粉のペーストを乾燥前に一定方向に流すと、その方向に平行な亀裂が生じることが知られている(Matsuo & Nakahara, 2012)。傾斜をつけて設置した容器の上でペーストを流し、その後の乾燥亀裂パターンを観察した(図 1)。その結果、傾斜角度が大きいほど、異方性が強く現れることが明らかとなった。

(2) 亀裂方向の定量化と、斜面角度との相関の検討(図 2)

亀裂方向に異方性があるポリゴンが報告されている北半球の中緯度領域の HiRISE データ(オルソ画像:PSP_002439_2265_RED_A_01_ORTHO)を使用し、亀裂方向の定量化を行なった。元画像から、亀裂部分をトレースし、細線化を行なった(図 2(b))。トレース画像に対し、各角度方向の乱雑さ(情報エントロピー)を計算することで、亀裂方向を定量化した(図 2(c))。斜面方向に異方性があると、0°、90°、180°でエントロピーの値が小さくなる。図 2(a) 中では、Area3～6 には亀裂方向の異方性が確認された。各領域ごとの斜面角度との比較を行ったところ、斜面角度が小さくても異方性を示す領域があることが明らかになった。火星ポリゴンが異方性を持つ要因が、斜面角度以外にも存在する可能性がある。

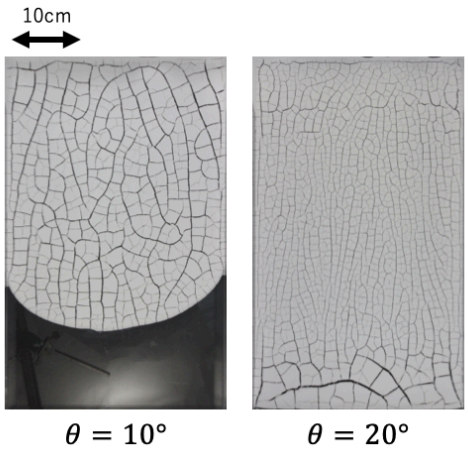


図 1: ペーストの乾燥破壊の実験結果。容器を θ 傾けた状態でペーストを流し、その後の乾燥亀裂パターンを観察した。図の上部から下部へ向かってペーストを流している。

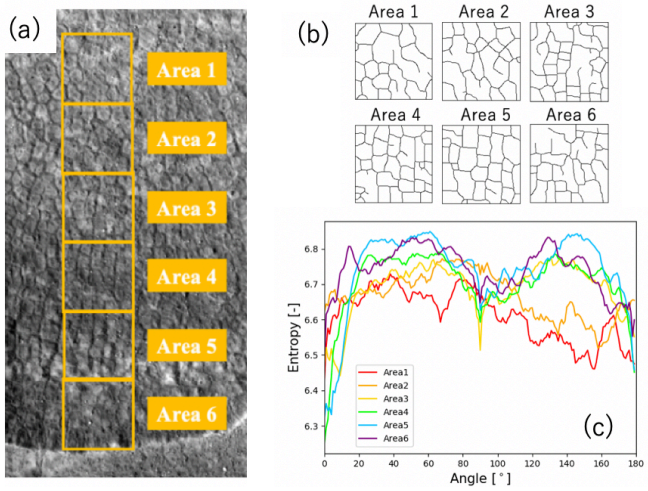


図 2: 火星ポリゴンの亀裂方向の定量化結果 (a)HiRISE データから 50m 四方の領域を切り出した。(b)ポリゴンの境界を抜き出し、細線化を行なった。(c)情報エントロピーを用いて定量化を行なった。

FDTD 法に基づいた小惑星内部探査の基礎研究

○石山謙[1], 熊本篤志[2]

[1]鶴岡工業高等専門学校 創造工学科 電気・電子コース
（Email: ishiyama.ken@tsuruoka-nct.ac.jp）
[2]東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻

近年、月・火星・彗星の表層構造や地質探査に、地下レーダが積極的に活用されてきている[e.g., Ishiyama et al., 2013; Noguchi et al., 2019; Heggy et al., 2019]。これまで、小惑星の内部構造探査に地下レーダが使われたことはないが、地下レーダシミュレーションの研究は検討されている[e.g., Sava et al., 2015]。本研究では、二次元の FDTD シミュレーションコード[e.g., 宇野, 1998]を作成・使用し、均一な誘電率をもつ小惑星に対し、その誘電率を地下レーダから観測される遅延時間から推定できるかどうかを検討した。

シミュレーション実験では、始めに 300×300 の空間メッシュを用意し、その空間メッシュを 1m/cell とする。シミュレーション空間の端には、電磁波の吸収を可能とする境界として PML（Perfectly Matched Layer）を設定した。シミュレーション空間の中心部には、小型の小惑星を模擬した小惑星形状モデル（丸、四角、三角）の均一物体を配置した。これらの誘電率は 3 である。小惑星中心から 100m 離れた点から、人工衛星を模擬したダイポールアンテナからパルス波（周波数：10MHz）を照射し、その反射波を確認した。最も強いエコーを小惑星表面のエコー、2 番目に強いエコーを小惑星の反対側からエコーと仮定した。

均一な誘電率をもつ丸型の形状モデル小惑星の場合、約 3.7 程度の平均の誘電率値がレーダ観測から推定された。この誘電率値のズレは、小惑星内部での反射エコー間で干渉が発生し、その結果、エコーのピークの位置にズレが生じたと考えられる。今後、本研究では、小惑星の内部構造を複雑化した場合、どの程度、推定される誘電率に誤差が生じるのかを検討し、このズレを定量評価できれば、正確な小惑星内部の誘電率を推定できることを検討する。ポスターでは、四角・三角の形状モデルについての結果もまとめ、ポスター発表時に報告予定である。

原始惑星系円盤内に埋没した原始惑星周りの 3 次元ガス流構造：その形態とペブル降着への影響

◯桑原歩[1,2], 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、㎞サイズの微惑星集積による惑星形成モデルに代わり、㎜—㎝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。従来のペブル降着モデルの大半は、惑星重力による影響を受けていない非摂動流のもとで議論されてきた。しかし、近年の高解像度 3 次元流体計算から、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[e.g., 3]。このガスの流れ場は、惑星質量及び原始惑星系円盤パラメータに応じてその形態が変化し、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、惑星周囲のガス流構造を考慮したペブルのダイナミクスを調べているものの、3 次元ガス流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、まず幅広い惑星質量・原始惑星系円盤パラメータに対して 3 次元流体計算を実施した。次に、得られた流体計算結果を元に、幅広いペブルサイズに対するペブル軌道計算を実施し、3 次元ガス流構造がペブル降着効率に及ぼす影響を調べた。

まず、3 次元流体計算から、原始惑星周りのガス流構造は、惑星質量と惑星に対するガスの向かい風の強さの大小関係に応じて、シアー流卓越形態または向かい風卓越形態のどちらかに分類できる事がわかった。次に、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、シアー流・向かい風卓越形態のどちらの場合においても、従来仮定されていた非摂動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。更に、ペブル降着効率の見積もりから、シアー流卓越形態の流れ場中では、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)、従来仮定されていた非摂動流中と比較して、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、原始惑星周りのガス流構造はペブル降着効率に影響しない事がわかった。向かい風卓越形態の流れ場中では、ペブルの乱流巻き上げが生じているかどうかによらず、原始惑星周りのガス流構造はペブル降着効率に影響しない事がわかった。発表では、本研究結果に基づく惑星系形成モデルについて議論する。

[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

コンドリュール・リム形成時のダスト形態のモノマーサイズ依存性

○金子寛明[1], 荒川創太[2], 中本泰史[1]

[1]東京工業大学, [2]国立天文台

【背景】

コンドリュールは始原的コンドライト隕石の主要構成物である。コンドリュールは nm-μm サイズのダストでできたリムに覆われている。Xiang *et al.* (2019) のダスト付着によるリム形成のモデルによれば、サイズ分布を持つダストがモノマーのまま付着する場合とアグリゲイトになってから付着する場合とで、充填率やダストの空間分布などのリムの内部構造が異なる。一方で、微小なダストは時間の経過とともにブラウン運動によって衝突合体をしてアグリゲイトを作る。コンドリュールに付着するダストの時間進化はリムの構造を特徴づける。リムの充填率はコンドリュールどうしの衝突合体の可能性にも影響する (Gunkelmann *et al.* 2017)。

【問題設定・手法】

本研究では、リムに付着するダストの形態のモノマーサイズ分布依存性を調べる。まず、μm サイズのダストは衝突合体タイムスケールがコンドリュールのダスト捕獲タイムスケールと同程度であることを示す。その後、サイズ分布を持つダストの合体成長を計算し、コンドリュールに付着するダストのモノマーの割合とアグリゲイトの内部密度の時間進化を求める。ダストの体積進化については単一サイズのモノマーの合体成長 N 体計算から得た経験式を使用する。星間空間のダストサイズ分布と同じ-3.5 乗のべき乗分布に従った場合、質量分布は質量を支配する大きいダストが決めるが、最小サイズの値によってアグリゲイトの成長と各サイズのモノマーがアグリゲイトに取り込まれるまでの時間が変わる。

【結果】

アグリゲイトの平均サイズは時間に対して冪函数で上昇する。各サイズのモノマーはアグリゲイトの平均サイズが自身のサイズ程度になると急激に減少する。アグリゲイトの内部密度は平均サイズがモノマーの最大サイズ程度になるまでは緩やかに減少し、最大サイズ程度に達すると半径におよそ反比例して減少する。

【議論】

モノマーがサイズ分布を持つダストの体積進化は単一サイズの場合に得られている経験式に従うかは明確ではない。この点は今後検討が必要である。

また、リム形成はコンドリュール前駆体の加熱イベントと関連する可能性がある。例えば、ダストの高速衝突によるリム形成を提案する研究がある (Liffman 2019)。衝撃波加熱シナリオでは、コンドリュールはガスやガスとよくカップリングしたダストに対して > 100m/s の相対速度を持つため、このようなリム形成が可能である。そこで、ダストの付着によるリム形成の視点から bow shock モデルと雷加熱モデルの 2 つのコンドリュール形成シナリオについて検討した結果を述べる。

リュウグウの宇宙風化から見たB型小惑星とC型小惑星の関連
Link between B-type and C-type asteroids inferred by the space weathering on Ryugu

◯巽瑛理[1,4], 杉田精司[1], 本田理恵[2], 諸田智克[1], 亀田真吾[3], 長勇一郎[1], 吉岡和夫[1], 澤田弘崇[5], 横田康弘[2,5], 坂谷尚哉[3], 早川雅彦[5], 松岡萌[5], 山田学[6], 神山徹[7], 鈴木秀彦[8], 本田親寿[9], 小川和律[10,11]

[1]東京大学, [2]高知大学, [3]立教大学, [4]Instituto de Astrofísica de Canarias, [5]JAXA/ISAS, [6]千葉工業大学, [7]産業技術総合研究所, [8]明治大学, [9]会津大学, [10]JAXA/JSEC, [11]神戸大学

リュウグウは非常に暗い（幾何アルベド約4%）C/F型小惑星であり、可視波長域では平均的に赤い（スペクトル傾斜が正値）[Sugita et al. 2019, Tatsumi et al. 2020]。はやぶさ２のホームポジション観測（~20km）により極域に特に青い（スペクトル傾斜が負値）領域が広がっていることが明らかになった。より詳細な観測を行うため、5km高度での観測が複数回行われた。この観測により、極域の青い領域に他の領域に比して大きな0.7-μm吸収があることがわかった。0.7-μm吸収はFe^{2+}-Fe^{3+}のチャージ転移によると考えられており、特に層状ケイ酸塩などの含水鉱物に見られる[Vilas and Gaffey, 1989]。小惑星形状モデルおよび軌道要素に基づく計算により、極域は太陽風や太陽光の影響を受けにくいことが明らかになった。つまり、極域には特に新鮮な物質があることが強く示唆され、リュウグウにおける宇宙風化は青→赤、0.7μm吸収の弱化と考えられた。これはB型小惑星がC型小惑星へ宇宙風化により変化する可能性を示している。C型小惑星の宇宙風化が観測から強く制約された初めての例である。これはこれまでに実験室で行われた含水鉱物の宇宙風化の傾向[e.g. Lantz et al. 2017, Matsuoka et al. 2020]と異なる。特に、含水鉱物を多く含む炭素質隕石CM、CIでは青化することが知られており、リュウグウがこのように赤化するのは含水鉱物が少ないことと関係していると考えられる。DESTINY+の探査目的天体である(3200) Phaethonは表面に含水鉱物がほとんどないことが観測から示唆されている[Takir, 2020]。Phaethonがリュウグウと同様に宇宙風化により赤化すると考えると、Phaethonの表面は彗星活動により新鮮に保たれていると考えられる。また、リュウグウではYORP効果により自転速度が加速・減速したと考えられており、同時に自転軸の傾きも変化した可能性がある。しかし、本研究において様々な自転軸を仮定したときの太陽光照射フラックスを計算すると、自転軸が公転面に対して60度以上にねていた場合にはリュウグウの極域に太陽光が照射するため新鮮な物質を保存することが難しいと考えられた。つまり、リュウグウの自転軸は公転面に対して常に60度以上であったことが示唆される。

Sugita et al. (2019) *Science* **364**, 252
Tatsumi et al. (2020) *A&A* **639**, A83
Vilas and Gaffey (1989) *Science* **246**, pp. 790-792
Lantz et al. (2017) *Icarus* **285**, pp. 43-57
Matsuoka et al. (2020) *ApJL* **890**,2

鉄コンクリーションから推測する地下水組成

◯ 城野信一[1]，柴田拓真[1]，吉田英一[2]，勝田長貴[3]

[1] 名古屋大学大学院環境学研究科，[2] 名古屋大学博物館，[3] 岐阜大学教育学部

地球のユタ州やゴビ砂漠，また火星のメリデイア二平原において，直径数 mm - 数 cm の球状鉄コンクリーションが発見されている．発見されている環境は相互に似通っており，鉄コンクリーションの形成メカニズムを明らかにできれば，その地域の古環境に制約を与えることができる．Yoshida et al. (2018) により，鉄コンクリーションの形成過程は次のように明らかにされた．1 : 炭酸カルシウムコンクリーションが何らかのメカニズムで形成される　2 : そこに鉄イオンを含んだ酸性の地下水が流入する　3 : 炭酸カルシウムが溶解し pH が上昇し，それにより水酸化鉄 $FeOH_3$ が沈殿する　4 : 乾燥して酸化鉄からなる鉄コンクリーションが形成される．そこで本研究では，鉄コンクリーション形成過程のうち上記プロセス 2,3 の数値シミュレーションを行った．反応を含む 1 次元拡散方程式を，鉄イオン，水素イオン，溶存酸素の 3 要素について数値的に解いた．パラメータは： 鉄イオン濃度，pH, 溶存酸素濃度，鉄イオンの種類（2 価か 3 価か）の四種類である．数値計算の結果，実際に発見される鉄コンクリーションを再現できるパラメータ領域を制約することができた．まず鉄は 2 価である必要があり，pH は 5.5 から 7 程度，鉄イオン濃度は $10^{-2} - 10^{-5}$ mol/L, 溶存酸素濃度は 10^{-6} mol/L 程度になっている必要があることがわかった（図 1 参照）．ここから，鉄コンクリーションは幅広い地下水組成で形成されうることが判明した．

しかし，鉄コンクリーションは球殻状の構造をしているため，内側と外側とに二つ境界面が存在する．この境界面近傍において，鉄の量は連続的に変化している．鉄の量が増加している幅は観測可能な量であるので，数値シミュレーションにおいても沈殿物の量が増加している領域の幅を算出した．その結果，天然で見られているような狭い幅を再現しようとすると，地下水の組成は図 1 において下方に制約されることがわかった．

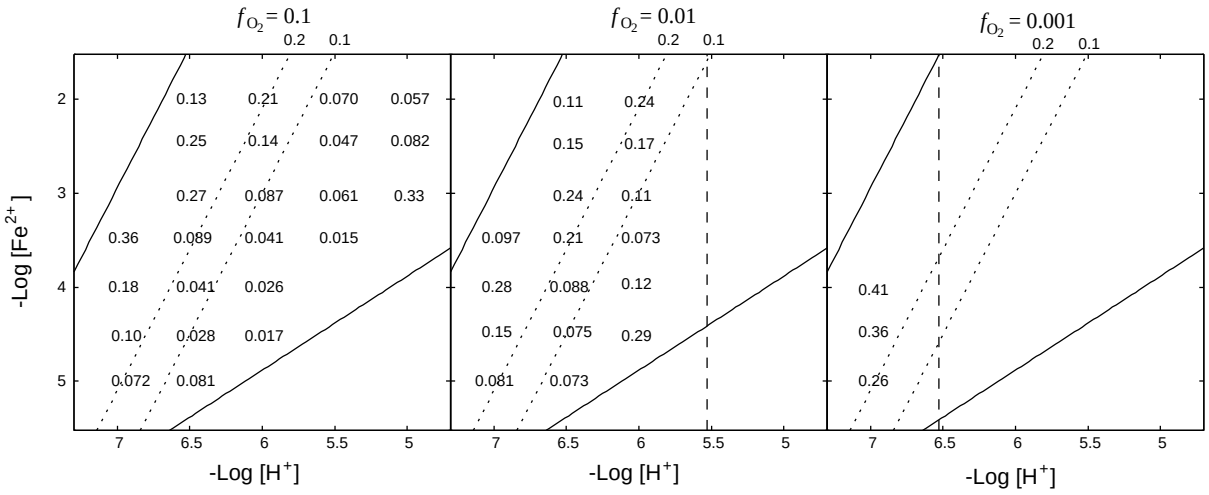


図 1 : 鉄イオン濃度ー水素イオン濃度の関数としての外側境界面の厚さ/コンクリーション半径．左から順に，溶存酸素量が大気圧下の 0.1, 0.01, 0.001 倍の場合．

熱赤外カメラを用いた多孔質標的の衝突加熱に関する実験的研究

○嶌生有理[1]，長谷川直[1]，福原哲哉[2]
[1]宇宙航空研究開発機構，[2]立教大学

はやぶさ２搭載熱赤外カメラ TIR が観測したリュウグウ表面の日温度変化と凹凸効果を考慮した熱モデル結果との比較から，リュウグウの表面熱慣性は 225 ± 45 J m^{-2} s^{-1} K^{-1} と推定された [1]．この値は典型的な炭素質コンドライトよりも小さいことから，リュウグウの岩塊は典型的な炭素質コンドライトよりも多孔質であると推定される．小型衝突装置 SCI 運用から 3 週間後に実施された人工クレーターの TIR 観測では，衝突放出物によるクレータ周囲の明確な温度変化は検出されなかった．これは衝突後 3 週間という時間スケールに起因する．一方，熱赤外カメラによる衝突現象のその場観測は，衝突残留熱と衝突堆積物による温度変化の検知を可能とするため，岩塊に衝突した際の衝突クレータの同定や放出物分布の推定に有用である．本発表では，熱赤外カメラを用いた多孔質岩塊への高速度衝突実験の暫定結果を報告する．

実験は宇宙研の縦型二段式軽ガス銃を用いた．弾丸は直径 2 mm と 4.76 mm のポリカーボネート球を用い，衝突速度 6.0—6.5 km/s で標的に衝突させた．標的試料には直径 15.0 cm，高さ 4.5 cm の石膏ブロックを用いた．衝突の様子は上部から熱赤外カメラ（BOL, 10 fps, <120℃，5 分間），高速度熱カメラ（M3K, 3kfps, <152℃，0.2—2 秒間），および可視カメラ（HPV-X, 3kpfs，0.02 秒間）で撮像した．真空度は 3—15 Pa とした．熱カメラの校正は，衝突前のヒータ加熱アルマイト板の撮像と，試料表面の K 熱電対を用いて実施した．

高速度熱カメラによって，衝突直後に 152℃以上の高温放出物が観察された．直径 4.76 mm の弾丸の場合，30 ms 以降から約 130℃のピット内壁が観察され，徐々に温度は低下した．熱赤外カメラから，ピット内の温度が周囲と同程度になる時間は約 3 分であった．衝突後，標的にはピット型クレータが形成されていた．スポール直径，ピット直径，ピット深さはそれぞれ 52.1 ± 3.4 mm，16.6 ± 1.1 mm，13.1 ± 0.7 mm であった．本発表では，石膏資料の冷却効率について議論する．

[1] Shimaki, Y. et al., 2020, *Icarus*, 113835.

フォボスシミュラント（UTPS-TB）の衝突破壊実験

*〇塩本純平[1]，中村昭子[1]，長谷川直[2]，宮本英昭[3]，新原隆史[3]
[1]神戸大学大学院理学研究科，[2]JAXA 宇宙科学研究所，[3]東京大学工学系システム創成学専攻

天体の衝突破壊は太陽系天体の形成及び進化に大きく影響するため、非常に重要な物理現象として考えられている。その破壊の様子は標的となる天体の空隙率や構造の違いによって異なる。衝突破壊について調査するためにこれまでに様々な物質を標的とした衝突破壊実験が行われている。玄武岩（Fujiwara et al., 1977）、多孔質の石膏（Okamoto and Arakawa, 2009）、氷（Arakawa et al., 1995）のような均質物質の衝突破壊強度 Q*はそれぞれ、>~750 J/kg、~2000 J/kg、>~50 J/kg であり、コンドライトは 1400 J/kg である（Flynn and Durda, 2004）。また、不均質性が衝突強度に及ぼす影響を調べるために行われた石膏とガラスビーズの混合した普通コンドライト模擬物の衝突実験（Yasui and Arakawa, 2011）では、模擬物に含まれるガラスビーズのサイズが大きくなるにつれて Q*が小さくなることが明らかにされた。さらに同研究では、衝突面の角の重心系の速度（破片速度）を測定し、石膏または普通コンドライト模擬物で構成される天体の再集積のしやすさが求められた。その結果、カタストロフィック破壊時では石膏天体が半径 13 km、普通コンドライト模擬物天体が 3 km のサイズまでであれば再集積可能であることが示された。

これら先行研究で用いられた標的は構造的に均質なものが多く、普通コンドライト模擬物のような不均質な標的はこれまであまり扱われていない。反射スペクトルから D 型小惑星に近いとされているタギシュ・レイク隕石を模擬したシミュラント（UTPS-TB）（Miyamoto et al., 2018）は、様々な物質や大きさの鉱物が含まれる混合物である。本研究では UTPS-TB を標的とした衝突破壊実験を行い、不均質構造を持つ物質の衝突破壊強度や、ラブルパイル天体の再集積条件を調べることを目的としている。

実験は宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸はナイロン球、アルミニウム球を用い、衝突速度 0.85〜5.3 km/s で標的の面に対し垂直に衝突させた。結果から UTPS-TB の衝突破壊強度 Q*=1000 J/kg であることがわかった。また、高速度カメラによって衝突後の標的の反対点速度及び破片速度を記録した。破片速度からカタストロフィック破壊時に再集積可能な天体サイズは 10 km であることがわかった。これは普通コンドライト模擬物よりは再集積しやすく、石膏よりも再集積しにくいことを示す。またこの標的に加え、UTPS-TB を一度砕いたものに水を加え、1 kN の力で圧縮しその後乾燥させた弱くて空隙率が小さな標的も作成し実験に用いた。UTPS-TB との引張強度、圧縮強度及び空隙率（φ）の比はそれぞれ、0.7、0.7、0.8 であった。衝突実験の結果、Q*=220 J/kg となり UTPS-TB よりも壊れやすいことがわかった。$\rho_t Q^*/Y$（ρ_t：標的密度、Y：標的の圧縮強度）は φ が大きいほど大きい傾向が示されているが（Okamoto et al., 2015）、今回はそれぞれ 1.3（UTPS-TB：φ=0.46）、0.5（新しい標的：φ=0.38）とこれと調和的である。なお、カタストロフィック破壊時に再集積可能な天体サイズは UTPS-TB と同程度かやや小さいことが示唆された。

Evolution of small dust around Mars under solar radiation forces

Yuying Liang[1], Ryuki Hyodo[1](兵頭龍樹)
[1] ISAS/JAXA

Since the discovery of Martian moons, Phobos and Deimos, they have become increasingly interesting astronomical objects to investigate (and now target bodies of the MMX mission). From a scientific perspective, understanding the origin of Martian moons provides insights into the evolution of Mars and other small bodies in our solar system. There are two hypotheses on the origin of Martian moons: (1) Phobos and Deimos are captured asteroids (e.g., Hartmann 1990), and (2) they are formed from a debris disk produced by collision of a large planetesimal with the Mars (Craddock 2011, Rosenblatt et al. 2016, Hyodo et al.2017ab, 2018ab, Hesselbrock & Minton 2017, Canup & Salmon 2018).

If giant impact hypothesis is correct, some leftover small dust should exist around Mars just after the formation of Martian moons, (i.e., the accretion efficiency cannot be 100%), while observations found no visible dust ring today (e.g., Showalter et al. 2016). This discrepancy motivated us to study the long-term dynamical fate of the leftover small dust.

This study is devoted to the evolution of small dust around Mars under solar radiational forces. According to Krivov and Dikarev's results (Krivov and Dikarev 1996), the solar radiation force plays an important role in the evolution of eccentricity and inclination of dust around Mars. The non-spherical gravity perturbation, such as J_2, affects the long-term motion of the dust. But they neglected the Poynting-Robertson. In this study, we perform orbital calculations on dust around Mars under a combination of perturbations including solar radiation pressure, the Poynting-Robertson effect, the solar gravity, and the non-sphericity of the Mars. The sun shadow is also taken into account. In the presentation, we will discuss the long-term evolutions of semi-major axis, eccentricity, and inclination of dust around Mars.

DESTINY+による小惑星フライバイ探査を模擬した地上撮像試験

○洪鵬[1], 石橋高[1], 岡本尚也[2], 奥平修[1], 山田学[1]
[1]千葉工業大学 惑星探査研究センター
[2]宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

2024 年度の打上げに向けて検討が進められている DESTINY+探査機は、ふたご座流星群の母天体と考えられている小惑星 3200 Phaethon を高速フライバイする間に、追尾駆動鏡を備えた望遠カメラ TCAP (Telescopic CAmera for Phaethon)を用いて、最高 3.5 m/px の空間解像度で小惑星表面を撮像する。フライバイは一度しかなく、高空間分解能で小惑星表面を観測できる時間帯は極めて限定的であるため、理学成果を最大化するような撮像運用を綿密に検討することが非常に重要である。現在の TCAP 開発案では、Phaethon 地表面を 120 m/px 以上の分解能で 9 分間にわたって 1 fps の撮像頻度で観測する計画であり、これによって解像度 10 m/px 以上の画像をおよそ 50 枚撮像する。私たちはこのような撮像計画で具体的にどのような理学成果（例えば 3 次元形状モデル）が得られるのか、またさらに理学成果を最大化できるような撮像条件がないか検討するために、TCAP の撮像を模擬した地上撮像試験を行った。TCAP での使用が予定されている 2k×2k の CMOS センサを搭載した産業用カメラと，TCAP と同じ F 値を維持しつつ焦点距離を落とした光学系、および 20 m 四方の部屋を暗室として用いた。はやぶさ、およびはやぶさ２で作成されたイトカワとリュウグウの小惑星模型（長軸 20 cm）を 3D プリンタによって造形し、それに太陽光を模擬した白色 LED の平行光を 11 m の距離から照射し、探査機による実際の撮像運用を模擬して、カメラを光学レール上で 20 m にわたって移動させながら最接近 151 秒前から 0 秒前までに対応するカメラ―天体の幾何学的な配置で撮像した。得られた画像から、SfM (Structure from Motion)によって形状モデルを作成し、探査機画像から作成された真のモデルとの差分を計算した。二つのモデルの位置合わせの際には、Point pair picking によって大まかにアライメントした後に、Iterative Closest Point アルゴリズムによってさらに精密なアライメントと点群のスケール調整を行った。その結果、真のモデルとの再現度や生成される形状モデルの面数を考慮すると、TCAP による撮像間隔は 2 秒以下であることが望ましいことがわかった。現在検討されている TCAP のノミナル撮像間隔は 1 秒であるため、この条件を満たす。本発表では実験で得られた小惑星画像から作った形状モデルや、達成される理学成果の検討、および実験の結果から TCAP の撮像条件の最適化案を報告する。

将来の惑星探査に向けた高エネルギー電子観測器のASIC技術による小型化

○菅生真[1], 笠原慧[1], 池田博一[2], 小嶋浩嗣[3], 菊川素如[3], 頭師孝拓[4]
[1]東京大学, [2]JAXA/ISAS, [3]京都大学, [4]奈良工業高等専門学校

太陽系の宇宙空間の電子の起源は太陽と惑星大気であり、その典型的なエネルギーは 10 eV 以下である。それにもかかわらず、keV を超えるエネルギーの電子があらゆる惑星近傍で観測されており、その加速機構の解明、惑星環境への影響の評価は惑星科学における重要課題である。特に 10-100 keV のエネルギーは熱的な分布から非熱的な分布に遷移する点で電子の加速研究において重要なエネルギー帯である。近年このエネルギー帯に感度の良い検出器である APD(Avalanche PhotoDiode)が地球周回衛星用の電子観測器に適用された。本研究では APD を惑星探査機搭載用の電子観測器に応用する。我々はこれまでの研究で衛星スピンに依存せず、2-pi sr の半球視野をカバーできる高エネルギー電子観測器を開発し、ロケット実験で超高層大気での動作性能を確認してきた。加えてペイロード重量制限の厳しい惑星探査では搭載する観測器の小型化の意義は大きい。そこで電子観測器で大きな体積を占めている信号処理基板を ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 化することで、観測器を小型化することを目指している。本研究では前置増幅・波形整形・ピークホールド回路に加えて、ADC 回路を含む信号処理回路の ASIC 回路設計・シミュレーション・素子配置設計を行った。APD が増幅率を内蔵し、大きな容量を持つという特性を考慮して、ダイナミックレンジ~10^6 e^-・波形整形回路の時定数~1 μs となるような回路設計を行い、シミュレーション上での動作を確認した。ASIC 回路の素子配置設計では、~10 個程度の検出器の信号処理を行うことを念頭に置いた設計を行い、5 mm 四方のチップに搭載可能であることを確認した。

予稿

タイトル：
太陽系探査を目指したOrbitrap型質量分析器の開発

著者情報（○は発表者）：
1. ○ 川島桜也（東京大学）
2. 笠原 慧（東京大学）
3. 齋藤 義文（ISAS/JAXA）
4. 横田 勝一郎（大阪大学）
5. 平原 聖文（名古屋大学）
6. 杉田 精司（東京大学）

本研究では将来的な惑星探査に向けて，超小型（~10×10×10 cm3）かつ高分解能（m/Δm > 10,000）な質量分析器の開発に取り組んでいる．開発している質量分析器は，ラボ用のイオントラップフーリエ変換型質量分析器「Orbitrap™」の原理に基づいて考案したものである．地上で用いられるOrbitrap™は高分解能であり，宇宙機搭載用としての応用が期待されるが，未だ飛翔体搭載実績はない．そこで本研究では，飛翔体で利用可能なリソース内で開発することを念頭に，小型化・軽量化・省電力化に重点をおいて装置の設計を行なった．現在までに，超小型の形状からなるイオン光学系に一定の成立性があることをシミュレーションで確認し，テストモデルの製作を完了している（川島ほか，惑星科学会2019）．現在はテストモデルを用いた性能評価試験に取り組んでおり，発表では主に質量分析部の試験結果について紹介する．

P-D1-A17

N 体計算を用いた近地球型小惑星の惑星による掩蔽の探索

〇櫻井祥, 北里宏平

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よってその光学特性が時間とともに変化する. この現象は宇宙風化と呼ばれており, はやぶさ探査機の持ち帰ったイトカワ粒子によって, 近地球型小惑星の大半を占める S 型小惑星はその影響を強く受けた天体であることが実証されている [1]. 一方, 近地球型小惑星のなかには Q 型小惑星のように宇宙風化の影響が小さく, 新鮮な表面を持つ天体も見つかっている. そのような小惑星では, 比較的最近, 表面更新が起きたと考えられており, それを引き起こすメカニズムとして, 近年, 昼夜の温度サイクルによる熱疲労が注目されている [2, 3]. しかしながら, 熱疲労による岩石の破砕は亀裂が成長することによって起こるが, 最初の亀裂がどのようにして作られるかはよくわかっていない. そこで本研究では, 小惑星が惑星の影に入った場合に生じる熱衝撃で亀裂が発生する可能性を考え, その検証のために惑星による掩蔽が起こる確率を調べる. N 体計算コード Rebound を用いて S, Sq, Q 型の近地球型小惑星 95 天体について過去 50 万年の軌道計算を行い, 惑星との近接遭遇時に小惑星が惑星の影に入ったか否かの判定を行った. これらの結果から, 小惑星の掩蔽を経験した可能性とスペクトル型の関係性について議論する.

参考文献:

[1] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121–1125.

[2] Delbo, M. et al., 2014, Nature 508, 233–236.

[3] Graves, K.J. et al., 2019, Icarus 322, 1–12.

簡易的な落下装置を用いた高速度クレーター形成実験：クレーターサイズの重力依存性

○木内真人[1]，岡本尚也[1]，長足友哉[2]，長谷川直[1]，中村昭子[2]
[1]宇宙航空研究開発機構，[2]神戸大学大学院理学研究科

小天体表面における重力加速度は微小であり，クレーターの観測から小天体表面の進化の過程や表面の物性を推定するためには，クレーターサイズの重力依存性を理解することが重要である．低重力下および高重力下で様々な速度域(1 m s^{-1} to 6.6 km s^{-1})での衝突実験がこれまで行われており，クレーター直径は重力の-0.165 ～ -0.19 乗に比例するという結果が得られている(e.g., Gault and Wedekind, 1977; Kiuchi et al., 2019)．ここで，太陽系天体表面での衝突現象は一般的に数 kms^{-1} から数 10 kms^{-1} の速度範囲におよび，例えば小惑星帯では平均速度 5 kms^{-1} (Bottke et al., 1994)で衝突するが，高速度域での低重力下での衝突実験例は少ないという問題点がある．微小重力実験には落下塔や放物飛行などの手法が一般的に用いられるが，これらの実験装置では秒速数キロメートルでの実験を行うことは難しい．また，これらの実験はコストがかかるため，多くの実験データを得ることが難しい．

本研究では、低重力下で高速衝突実験を行える装置の開発を行った．宇宙航空研究開発機構(JAXA)施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に簡易な落下装置を構築することで、低コストで容易に秒速数キロメートルの衝突速度での微小重力衝突実験を実現する．ボールベアリングとレールを用いることで標的容器が鉛直方向に滑らかに落下するように設計した．標的容器を高さ 2 m のチャンバー天井付近に電磁石で固定し、電磁石のスイッチを切ることで容器を落下させる．容器の落下時間は約 0.4 s であり，標的にかかる模擬的な重力は 0.04 ～ 0.06 G であった．この落下装置を用い，直径 4.76 mm のポリカーボネイト球（密度 1.2 gcm^{-3}）を硅砂（粒径～425 μm）に速度 1.2 km s^{-1} で衝突させた結果，低重力下で形成されたクレーター直径は 1 G 下で形成されたクレーター直径の約 1.8 倍であり，明確な重力依存性が見られた（Kiuchi et al., 2020, JpGU-AGU）．

前回の実験では容器が落下するまでにクレーターの形成が終わっていない可能性があったため，今回我々は直径 1 mm のガラス球弾丸（密度 2.5 gcm^{-3}）を用いた．結果，一部の条件ではクレーター直径の成長は容器の落下までに終わっており，前回同様クレーター直径には重力依存性が見られた．また，πスケーリング(e.g., Holsapple, 1994)を用いて結果を整理すると，これまでに砂標的で得られているスケーリング則(Housen and Holsapple, 2011)に近い関係をとることがわかった．発表ではさらに実験データを増やした結果を紹介する．

DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上較正計画 2020

◯平井 隆之[1], 小林 正規[1], 荒井 朋子[1], 木村 宏[1],
薮田 ひかる[2], 天野 翠[2], 小林 幸雄[3], 伊藤 元雄[3], 佐々木 晶[4], 矢野 創[5],
Trieloff Mario[6], Hillier Jon[7], Khawaja Nozair[7], Eckart Lisa[7], Simolka Jonas[8],
Krüger Harald[9], Srama Ralf[8],
DESTINY+チーム

[1]千葉工業大学, [2]広島大学, [3]JAMSTEC, [4]大阪大学, [5]JAXA,
[6]ハイデルベルク大学, [7]ベルリン自由大学, [8]シュトゥットガルト大学,
[9]マックスプランク太陽系研究所

深宇宙探査技術実証機 DESTINY+に搭載予定のダストアナライザ（DESTINY+ Dust Analyser, DDA）は、衝突電離によりイオン化されたダスト粒子を質量分析する装置である。質量分析部は飛行時間型（計測質量範囲：m/z～1,000）を用い、ダストを構成する有機物と鉱物のバルク化学組成の同定を目指している。DDA は地球周回フェーズから運用を開始し、巡航中には惑星間ダストや星間ダストの計測を行う。また、活動的小惑星(3200)Phaethon とのフライバイ時には、小惑星由来のダスト計測を実施する。

DDA のハードウェア開発では概念設計フェーズがほぼ完了し、衝突電離プラズマ中の陽イオンを質量分析する単一モード（陽イオンモード）のみ実装、二軸ジンバル搭載、センサヘッド数の 2 台から 1 台への変更、センサ面積及び視野拡大といった点が、昨年からの主な変更点として挙げられる。この設計に基づいた BBM を作成し、高圧印加時のノイズ確認、パルスレーザーを用いた衝突電離模擬試験による機能・性能評価に着手している。

DDA で得られる質量スペクトルの解釈には、鉱物・有機物ともに地上アナログ物質を用いた地上較正が必須である。そこで、ダストを模擬した微粒子を実際に数 km/s～数十 km/s に加速し標的板に衝突させる従来の静電加速器を用いた方法に加え、二次イオン質量分析法（SIMS）、マトリクス支援レーザー脱離飛行時間型質量分析法（MALDI-TOFMS）、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法（LA-ICP-MS）など、DDA の原理である衝突電離とは異なるイオン化と質量分析を用いた較正を計画している。これらの代替手法を用いた相互比較と較正により、DDA の計測データをより正確に解釈することが可能になると期待される。

本講演では最新の DDA 設計と地上較正計画の検討状況について報告する。

MMX 搭載赤外線分光計 MIRS の観測計画と開発状況

Observation Plans and Development Status of MIRS: MMX Infrared Spectrometer on the MMX Spacecraft

○岩田隆浩[1], 中川広務[2], 中村智樹[2], Maria Antonietta Barucci[3], Jean-Michel Reess[3], Pernelle Bernardi[3], Alain Doressoundiram[3], Sonia Fornasier[3], Michel Le Du[4], Eric Sawyer[4]

[1]JAXA宇宙研、[2]東北大、[3]LESIA, Observatoire de Paris、[4]CNES

The Martian Moons Exploration (MMX) is a probe which will be launched by the Japanese launch vehicle H-III, and it will navigate the quasi satellite orbit of Phobos and will make a fly-by of Deimos. MIRS (MMX InfraRed Spectrometer) is a push-broom imaging spectrometer in the wavelength range of 0.9 to 3.6 micrometers which is one of the candidate instruments to be installed on the MMX spacecraft. It has a field-of-view (FOV) of 3.3 deg width with instantaneous-FOV (IFOV) of 0.35 mrad, which can be scanned by inner along track scan mirror in the range of ±20 deg.

MMX aims to elucidate the evolution of our solar system by investigating the migration process of primitive bodies in the early stage. MIRS will observe absorptions of hydroxide or hydrated minerals on Phobos and Deimos in the wavelength range of 2.7-3.2 micrometers. By analyzing the behavior of the spectra, we will distinguish between structural water in hydrous silicate minerals, and water ice particles. MIRS will also try to detect the absorption of organic matters in the wavelength range of 3.3-3.5 micrometers. These results will be crucial evidence to answer the question of the origin of the Martian satellites and identify whether they are satellites formed by a giant impact or primitive asteroids captured by Mars gravitational field. MIRS will observe Phobos to survey the sampling site candidates, to investigate the sampling site precisely at the touch-down mode, and to make global mapping. The global mapping of Phobos to select prior areas and landing sites will be performed on the quasi satellite orbit. Precise mapping for candidate landing sites will be followed on the lower altitude. Observations for Deimos will be basically executed from the fly-by orbit. MIRS will also monitor the Martian atmosphere with particular attention to spatial and temporal changes as clouds, dust and water vapor. We will report and discuss on the observation plans and the development status of the MIRS instrument.

(162173)リュウグウ上の岩塊の割れ目の方向の分布と熱疲労効果

Crack Orientations of Boulders and Thermal Fatigue on (162173) Ryugu

○佐々木 晶、神田 志穂(大阪大学)、菊地 紘(ISAS/JAXA)、道上 達広(近畿大学)、
諸田 智克(東京大学)、本田 親寿(会津大学)、宮本 英昭、逸見 良道、杉田 精司(東京大学)、
巽 瑛理(カナリア天体物理学研究所)、渡邊 誠一郎(名古屋大学)、竝木 則行(国立天文台)、
平林 正稔(オーバーン大学)、平田 成(会津大学)、中村 智樹(東北大学)、野口 高明(九州大学)、
廣井 孝弘(ブラウン大学)、松本 晃治、野田 寛大(国立天文台)、坂谷 尚哉、亀田 真吾(立教大学)、
神山 徹(産業総合研究所)、鈴木 秀彦(明治大学)、山田 学(千葉工業大学)、本田 理恵、
横田 康弘(高知大学)、長 勇一郎、吉岡 和夫(東京大学)、早川 雅彦、松岡 萌、金丸 仁明、
澤田 弘崇、吉川 真(ISAS/JAXA)

小惑星(162173)リュウグウの表面は様々なサイズの岩塊（ボルダー）で覆われている[1,2]。Ryugu 表面の画像からボルダー上の亀裂を抽出し、その方向を統計的に調べた。100 枚以上の高分解能画像の解析から、20cm から数 10m程度のサイズの岩塊に亀裂がしばしば見られること、その方向は南北に偏っていることを明らかにした。500 個以上の亀裂のある岩のうち、方向を 10 度毎に分類すると、６割の亀裂の方向が南北(±15 度)の範囲に集中する。亀裂には、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見られる。蛇行タイプ、中途タイプには、岩塊の内部組織の影響を受けているものがある。複雑タイプのものは、方向のバラツキがあり、衝突の関与を示していると考えられるが、衝突だけでは南北方向への亀裂の偏りは説明できない。太陽を背にする小さい位相角による、見かけの効果（影の幅が狭く亀裂に見える）の可能性もあるが、異なる時期に撮られた位相角が異なる画像でも、同一と判別できる亀裂は少なくない。

岩塊の亀裂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[3]や火星表面の岩石[4]で確認されている。岩塊表面の日照による非対称な温度変化が、熱ストレスを生じて、亀裂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[5]。30 度刻みのデータでは出てこないが)10 度刻みでは非対称が現れるのは、このこの 8 度の傾斜の影響かもしれない。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大きく、南北方向の熱疲労亀裂を生んだかも知れない。

文献：[1] Sugita et al., (2019) **Science** 364, eaaw0422. [2] Michikami et al., (2019) **Icarus**, 331, 179-191; [3] MacFadden et al., (2005) **Geol. Soc. Am. Bull.** 117, 161-173; [4] Eppes et al., (2015) **Nature Comm.** 6, 6712; [5] Watanabe et al., (2019) **Science** 364, 268-272.

月の溶岩洞探査用 4 足走行型ロボットの実験モデル

○LIANG CHEN[1], 荒井 武彦[1]
[1]足利大学

日本の月周回衛星探査機 SELENE（かぐや）は 2009 年に月面に溶岩洞によって形成された空洞が存在することを搭載地形カメラで発見した(Haruyama et al., 2009).月の溶岩洞は安定な温度と宇宙線の遮断効果があると想定され,将来の月面基地の人員や機材を守る用途として期待ができる.また内部を探査することによって,太古に形成された地質や当時の物理状態を知ることができ,月・地球系の進化過程解明への手がかりを得ることが期待される.本研究は月の重力下での月の溶岩洞の環境に適応した探査用ローバを開発することを目的としている.

溶岩洞内の複雑な地形は車両型ローバの探査において,岩の段差,少ない平坦な地面,狭い空間など,様々な克服課題がある.そのため,本研究では,4 足歩行機構でそれらの課題を克服することを目指す.4 足歩行型は複雑な地形で安定性が高く,姿勢調整可能なメリットもあり,搭載する探査機器を守ることができると考えられる.現在,課題である月の溶岩チューブの中を自在に動くことができるローバにするために,月環境を模擬し,駆動シミュレーションのトライアンドエラーを行う堅牢なシステムを構築している.

今後,市販の分光センサやレーザ高度計（LIDAR）を搭載し,化学・鉱物組成を取得することによって,その地域の物理特性（密度,空隙,硬いか脆いか）をローバ自身が自律的に推定するシステムを構築する予定である.その後,富士の風穴などでローバを駆動させ,LIDAR で 3 次元形状データを取得しながら自律的に洞窟内を探査する基礎技術を確立する予定である.宇宙仕様のローバに地球環境でも堅牢に駆動するプログラムを学習させ,月面のマリウス丘にある溶岩チューブを模擬した環境でも探査目標を達成できることを目指す.

中心核星と逆回転方向 太陽系外惑星の存在

犬山 文孝　　元 九州電力(株) 火力部

一般相対性理論の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場のエネルギー方程式を算出し、変分原理とエネルギー最小原理に基づいて、宇宙の安定回転惑星系等の配列に関する次の微分方程式が導出された（昨年予稿集[1]）。 微分方程式の判別式に従って 惑星軌道の配列、土星リングの個数およびファインリング星の径はカー・ニューマン解（1965 年発見）によって初めて理論解明できるテーマである。

$dS/dR = 2e^2(e^2+2m^2)/SR + (4a\delta m + S)/R + 6a\delta m S^2/R^5$　　$S = R\sqrt{2\varepsilon R^2 + 2mR + e^2}$

$m,\ e,\ a$ は中心核星の質量・電荷・回転要素　　δ=±１（中心核星の回転方向）

微分方程式の判別式＞０の場合、ティティウス・ボーデ法則 $\xi = \frac{r}{r1} = (1-0.4)\cdot 2^{n-1} + 0.4$ が証明された。

$$\xi_\delta = \left[1 - \frac{30a\delta m^2E^4\pi N_1}{r_1[2E^4-4a^2m^2]^{\frac{3}{2}}}\right]\cdot EXP\left[\frac{4am\pi(n-1)}{\sqrt{2E^4-4a^2m^2}}\right] + \frac{30a\delta m^2E^4\pi N_1}{r_1[2E^4-4a^2m^2]^{\frac{3}{2}}}\ ,$$

一方、太陽系外惑星の観測結果、「惑星軌道半径の比が太陽系惑星のものと逆転する」実現象が、系外惑星に発生している[2]。これは中心核星の回転方向 δ=±１に起因している。

太陽系と同じように $\frac{1}{\log 2} = \frac{\sqrt{2E^4-4a^2m^2}}{4am\pi}$, $0.4 = \frac{30am^2E^4\pi N_1}{r_1[2E^4-4a^2m^2]^{\frac{3}{2}}}$ とする場合の計算例として、$\xi_{\delta=+1}$, $\xi_{\delta=-1}$, r_n/r_{n-1} の結果を表１に示すように, n が大きくなると $\xi_{\delta=+1}$, $\xi_{\delta=-1}$ は共に 2.0 になる。しかし、n=1 では $r_n/r_{n-1}(\text{in}\ \xi_{\delta=+1})$=1.4＜2.0, $r_n/r_{n-1}(\text{in}\ \xi_{\delta=-1})$=3.3＞2.0 である。つまり、$r_n/r_{n-1}$ は $\xi_{\delta=+1}$の場合 単調増加であり、$\xi_{\delta=-1}$の場合 単調減少である。

このように一部の太陽系外惑星には**中心核星と逆回転方向の惑星系が理論的に存在する。**

表１　n と惑星軌道半径 r_n/r_{n-1}の比

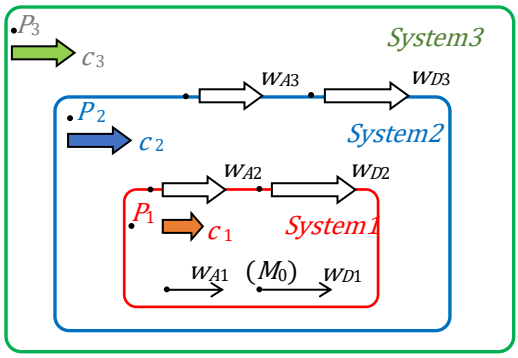
n		-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\xi_{\delta=+1}$	$(1-0.4)\cdot 2^{n-1} + 0.4$	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.6	2.8	5.2	10	20	39	77
	r_n/r_{n-1}	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0
$\xi_{\delta=-1}$	$(1+0.4)\cdot 2^{n-1} - 0.4$	0.3	-0.2	-0.1	0.3	1.0	2.4	5.2	11	22	44	89	179
	r_n/r_{n-1}	0.9	0.7	0.2	-6.0	3.3	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0

1) 犬山文孝(2019). “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“, 日本惑星科学会 2019 年秋季講演会予稿集 P105

2) Winn & Fabrycky (2015). “The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems”. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 53 : p.409-

ダークマターの宇宙年齢 約１億年を特殊相対論，３元時空 等によって推算

犬山 文孝　元 九州電力(株)火力部



ESA によるとダークエネルギーDE・ダークマターDM・バリオン Ba のエネルギー割合は 68%, 27%, 5%であるが DE･DM の実体は未だ不明である。そこで、

P_1, P_2, P_3 はそれぞれ系 1～3 の静止座標。系 1 時空は系 2 の時空中を光速 c_1で、系 2 時空は系 3 の時空中を光速c_2で移動。銀河A は天の川銀河、銀河D は宇宙の全銀河を集約した仮想的銀河とする。系 1～3 において、c_1、w_{A1}、w_{D1} は P_1 から観測した光速、銀河A・銀河Dの速度、c_2、w_{A2}、w_{D2} は P_2 から観測した光速、銀河A・銀河Dの速度、c_3、w_{A3}、w_{D3} は P_3 から観測した光速、銀河A・銀河Dの速度。

P_2, P_3から観る銀河$A \cdot D$の合成速度は $w_{A2}=\frac{w_{A1}+c_1}{1+w_{A1}c_1/c_2^2}$　$w_{D2}=\frac{w_{D1}+c_1}{1+w_{D1}c_1/c_2^2}$　$w_{A3}=\frac{w_{A2}+c_2}{1+w_{A2}c_2/c_3^2}$　$w_{D3}=\frac{w_{D2}+c_2}{1+w_{D2}c_2/c_3^2}$

w_{D1}とw_{A1}等の相対速度$w_{AD1}, w_{AD2}, w_{AD3}$は　$w_{AD1}=\frac{w_{D1}-w_{A1}}{1-w_{A1}w_{D1}/{c_1}^2}$　$w_{AD2}=\frac{w_{D2}-w_{A2}}{1-w_{A2}w_{D2}/{c_2}^2}$　$w_{AD3}=\frac{w_{D3}-w_{A3}}{1-w_{A3}w_{D3}/{c_3}^2}$

静止質量M_0，系 1～3 $w_{AD1}, w_{AD2}, w_{AD3}$での運動質量 m_{D1}, m_{D2}, m_{D3}は $M_0=m_{D1}\sqrt{1-{w_{AD1}}^2/c_1^2}=m_{D2}\sqrt{1-{w_{AD2}}^2/c_2^2}=m_{D3}\sqrt{1-{w_{AD3}}^2/c_3^2}$ 。また静止座標系での物理現象継続時間をΔt_0，系 1～3 の相対速度 w_{AD1}，w_{AD2}, w_{AD3} での物理現象継続の運動時間を$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$.とする　$\Delta t_0=\Delta t_1\sqrt{1-{w_{AD1}}^2/c_1^2}=\Delta t_2\sqrt{1-{w_{AD2}}^2/c_2^2}=\Delta t_3\sqrt{1-{w_{AD3}}^2/c_3^2}$

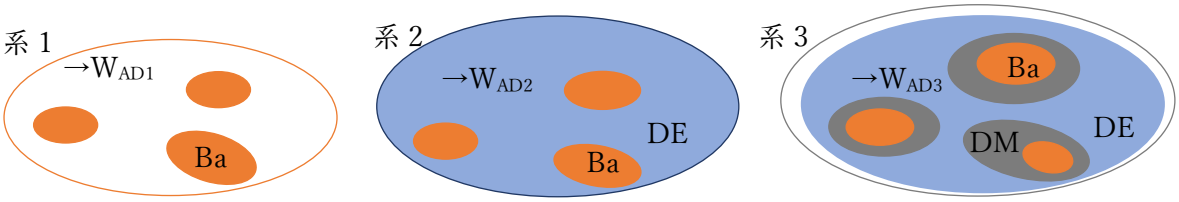
変数m_{D1}、m_{D2}、m_{D3} の代わりに $m_{D1}=m\varepsilon_1$，$m_{D2}=m(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$，$m_{D3}=m(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)$ となる新しい変数 ε_1、ε_2、ε_3 を導入すると $\Delta t_1=T\varepsilon_1$，$\Delta t_2=T(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$，$\Delta t_3=T(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)$ となる。次の 3 条件を課して連立方程式を解く。①DE が初めて現れる系の光速は他の光速と異符号　②$|c_3|>|w_{A3}|, |w_{D3}|$, $|c_2|>|w_{A2}|, |w_{D2}|$,　$|c_1|>|w_{A1}|, |w_{D1}|$　③系 1～3 における静止質量エネルギー ${M_0}{c_1}^2, {M_0}{c_2}^2, {M_0}{c_3}^2$ が最小。　w_{A1}/c_1，w_{D1}/c_1 を夫々－0.999～＋0.999 に変動させた場合 ε_1: Ba 0.049　ε_2: DE 0.683　ε_3: DM 0.268，$c_1>|c_2|\geqq c_3$，(－0.9～＋0.9 変動で c_2/c_1 は－0.9～－0.1，c_3/c_1は 0～0.9)である。

系 3 時空の実世界に Ba・DE・DM が共存しており、Ba 本体から DM を間接的に観察することはできるが、各々は時空で仕切られているので、DM 素粒子そのものを Ba 本体から直接捕捉できない。系 4 時空の存在は否定される。

運動時間$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ をプランク時間で分割すると、夫々の時間は Ba・DE・DM だけの正味の時間の集積であり、$\Delta t_1=\Delta t_{11}=\varepsilon_1 T$，$\Delta t_2=\Delta t_{21}+\Delta t_{22}=(\varepsilon_1+\varepsilon_2)T$，$\Delta t_3=\Delta t_{31}+\Delta t_{32}+\Delta t_{33}=(\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3)T$。　DM の正味の進化距離は ①プランク時間による正味の継続時間と②物理現象の反応速度が関係し、

$$\frac{\text{ダークマターの進化距離(宇宙年齢)}}{\text{バリオンの進化距離(宇宙年齢)}}=\frac{\text{バリオンの正味の継続時間}}{\text{ダークマターの正味の継続時間}}\times\frac{\text{ダークマターの正味の反応速度(濃度)}}{\text{バリオンの正味の反応速度(濃度)}}=\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3}\right)^3$$

Ba の進化距離は宇宙年齢 138 億年であり、DM の宇宙年齢は約 1 億年となる。これは宇宙の暗黒時代(宇宙年齢 37 万年～約 4 億年)に匹敵する光の無い暗黒の宇宙であるが 重力は存在する。



「はやぶさ２」搭載分離カメラ DCAM3 により SCI 衝突実験時に観測された放出ボルダ

○石橋 高[1], 白井 慶[2], 和田 浩二[1], 小川 和律[3], 坂谷 尚哉[4], 嶌生 有理[3], 横田 康弘[3], 本田 理恵[5], 門野 敏彦[6], 荒川 政彦[2]

[1]千葉工業大学, [2]神戸大学, [3]宇宙航空研究開発機構, [4]立教大学, [5]高知大学, [6]産業医科大学

小惑星探査機「はやぶさ２」による小惑星リュウグウの探査において，2019 年 4 月 5 日に衝突装置 Small Carry-on Impactor（SCI）によるリュウグウ表層への衝突実験が実施され，SCI の衝突の様子は分離カメラ Deployable Camera 3 (DCAM3)により観測された[1]. DCAM3 には 2 種類のカメラ，DCAM3-D と DCAM3-A が搭載された．このうち，理学観測用の高解像度カメラ DCAM3-D の主な観測目的は，（1）起動前の SCI の位置を確認する，（2）SCI の衝突地点を確認する，（3）衝突により生成される放出物（イジェクタ）を高解像度撮像することであった．1 はリュウグウ表層への SCI の衝突条件（角度）を知るために必要であり，2 は衝突実験後の SCI 生成クレータ探索の手がかりを与え，3 はリュウグウの表層状態の推定や微小重力下での衝突現象の理解にとって重要である．DCAM3-D の観測ではこれらすべての目的が達成された．

本発表では，DCAM3-D で SCI 衝突実験時に観測された「放出ボルダ」について報告する．SCI 衝突により，衝突地点からの比較的小さな粒子で構成されるイジェクタカーテンが観測されたが，同時にそれなりにサイズの大きいボルダと思われる物体が放出される様子も確認された．そのサイズは画像上で高々数画素程度の大きさであり，点像分布関数（PSF）や DCAM3 の回転の効果などを考慮しなければ，見た目だけではサイズを推定できず，従ってそのアルベドもわからない．そこで本研究では，地上でのコリメータ試験で得られたピンホール像や機上で撮像された SCI の像を元に放出ボルダが写っている領域の PSF を推定し，DCAM の推定回転速度と回転中心からの距離に応じた露光時間中のぶれも考慮して，放出ボルダのサイズを推定した．また，観測されたシグナル量と推定したサイズと disk-integrated Hapke model [2,3]を用いてアルベドを推定した．発表では，これらの結果を報告すると共に，リュウグウの表層状態や，微小重力天体上での衝突による物質の放出についても議論する予定である．

[1] Arakawa, M. et al., Science, 368, 67-71 (2020), [2] Ishiguro, M. et al., Astrophysical Journal, 792, 74 (2014), [3] Tatsumi, E., et al., Astronomy & Astrophysics, 639, A83 (2020).

DCAM3D 画像を用いた小惑星 Ryugu の形状モデル

○白井　慶[1]，石橋　高[2]，小川 和律[3]，澤田 弘崇[3]，荒川 政彦[1]，門野 敏彦[4]，
和田 浩二[2]，本田 理恵[5]，坂谷 尚哉[6]，嶌生 有理[3]
[1]神戸大学，[2]千葉工業大，[3]宇宙航空研究開発機構，[4]産業医科大学，[5]高知大学，[6]立教大学

はやぶさ 2 DCAM3D/SCI により撮影された画像により， structure from motion から，小惑星リュウグウの 3 次元形状モデルを構成した．

小惑星探査機はやぶさ 2 に搭載された衝突装置(SCI)は，2019 年 4 月 5 日小惑星 Ryugu 表面に人工クレーターを生成することに成功した．そのクレーター生成の様子は，探査機本体から分離された DCAM3 によるその場観測を行った．

DCAM3 は分離によってはやぶさ 2 打ち上げ後初めて電源 ON となり，SCI の衝突(衝突点: 経度 301.2 度，緯度 7.7 度)をはさんで 3 時間以上動作しその間，撮像画像データを探査機本体へと通信した．DCAM3D の撮像は，視野角 74 度，2000 x 2000 pixel CMOS イメージャーでおよそ高度 1 km の位置で回転とニューテーションによる姿勢が変化しながら行われている．動作期間に渡っての最短撮像間隔は 1 秒であるが，探査機本体との伝送通信量の制約により，フレームレートは間引かれている．このような DCAM3D の画像のうち，130 枚（+ 250 枚の x5 ビニング画像)以上の小惑星リュウグウを視野内に納めた画像が取得され，これらの画像を使，商用ソフトウェアである Metashape（Agisoft）を用いて小惑星リュウグウの形状モデルを構成した結果を報告する．

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam で検出された微小メインベルト小惑星のサイズ分布測定

Size distribution of small main belt asteroids obtained by the Subaru/Hyper Suprime-Cam

○前田夏穂[1] 寺居剛[2] 大槻圭史[1] 吉田二美[3,4] 石原昂将[1,2,5] 出山拓門[1,6]

1) 神戸大学理学研究科惑星学専攻 2) 国立天文台 3) 千葉工業大学 4) 産業医科大学

5) 総合研究大学院大学 6) 株式会社 NTT データ MSE

火星軌道と木星軌道の間の領域にあるメインベルトには，多数の小惑星が存在している．これらの小惑星は惑星形成期から現在に至るまでの間に多様な力学・衝突進化を経験したと考えられる．同様の進化を経た小惑星グループは同様のサイズ分布になると考えられる．特に，直径 100 km 以下の小さな小惑星は衝突により生成された破片もしくはその再集積体であると考えられており[1]，そのサイズ分布はそれらが経験した多数回の衝突の結果を反映している．従って，微小小惑星のサイズ分布は天体衝突破壊プロセスを理解する重要な鍵となる．また，近年多数の探査により小惑星クレーターサイズ分布の詳細なデータが得られている．個々の小惑星が経験した衝突進化過程を明らかにするためにも，衝突体としてクレーター生成に寄与した可能性があるメインベルト微小小惑星のサイズ分布を明らかにすることは重要である (c.f., [2])．しかし，小さな小惑星は暗いため観測には大口径の光学望遠鏡が必要になる．さらに，それらの正確なサイズ分布を得るためには多数の小惑星サンプルを集める必要がある．

そこで本研究では，ハワイ・マウナケア山頂にある口径 8.2 m のすばる望遠鏡と広視野 CCD カメラ Hyper Suprime-Cam による広域撮像観測を実施し，多数の微小メインベルト小惑星を検出した．g バンド (波長 0.40-0.55 μm)，r バンド (波長 0.55-0.70 μm) の 2 種類のフィルターにより取得したデータから，各天体の g-r カラーを測定した．カラーを求められたメインベルト小惑星は 3459 個で，そのうち最小の天体の絶対等級は 23.5 等 (r バンド;幾何アルベド 0.21 を仮定すると直径約 55 m) である．検出限界に起因する観測バイアスを排した統計サンプルを抽出し，サイズ分布を測定した．サイズ分布測定に用いた小惑星は最小で直径約 165 m となった．SDSS (Sloan Digital Sky Survey) のデータ[3-5]に基づいて，g-r カラーから小惑星サンプルを 2 つのタイプ (S 型 like, C 型 like) に分類した．サイズ分布を S 型 like, C 型 like の両方で求めたところ，数 km 以下のサイズ領域における累積個数分布 ($dN(<H)/dH = 10^{\alpha(H-H_0)}$, H :絶対等級) のべき指数はともに $\alpha \simeq 0.2$ であることがわかった．これは過去のサーベイ観測[3,6]の結果と整合的である．カラーの異なる小惑星は組成や形成場所が異なると考えられることから，本研究の結果は小惑星の組成・形成場所と衝突進化の関係について重要な知見を与え得る．

参考文献: [1] Bottke et. al., 2005, Icarus, 175, 111 [2] Bottke et al., 2020, Astron. J. 160, 14 [3] Ivezic et. al., 2001, Astron. J. 122, 2749 [4] Carvano et al., 2010, Astron. & Astrophys. 510, A43 [5] Bus & Binzel, 2002, Icarus, 158, 146 [6] Yoshida & Nakamura, 2007, Planet & Space Sci., 55, 1113

超木星質量の惑星周囲における巨大衛星の形成可能性

○ 山中陽裕[1]　佐々木貴教[1]　芝池諭人[2]

[1] 京都大学
[2] ベルン大学

現在、5,747 個の太陽系外惑星が発見されているが、その中でハビタブル惑星を考えられている惑星はわずか 46 個しかない (ExoKyoto, Kopparapu et al. 2013)。惑星がハビタブルであるためには、1) 軌道が中心星のハビタブルゾーン内にあること、2) 岩石惑星であることが必要である。一方で、ハビタブルゾーン内を公転するガス惑星も数多く発見されている。これらのガス惑星は、自身はハビタブルになり得ないが、大気を保持できる十分な大きさの衛星が惑星の周りに存在していれば、ハビタブル衛星となり得る。また、衛星は中心星からの輻射に加えて惑星からの潮汐と輻射による加熱を受けるため、惑星軌道が恒星のハビタブルゾーンに入っていなくても、衛星はハビタブルである可能性がある。このように、太陽系外衛星は宇宙のハビタブル環境の重要な候補であり、その形成過程を理解することは極めて重要である。太陽系のガス惑星には、衛星の総質量が惑星質量の約 10^{-4} 倍になる質量スケーリング則が成り立っているが (Canup & Ward 2006)、系外の巨大ガス惑星でも同様に成り立つと仮定すると、木星の 10 倍程度の質量の惑星であれば火星程度の大きさの衛星が存在でき、大気と磁場を長期間保持できると考えられる。我々はコア集積モデルで形成した 10 木星質量の超巨大ガス惑星の周惑星円盤における衛星形成について Population Synthesis シミュレーションを行い、巨大衛星の形成可能性とその分布を調べた。本講演では計算結果の報告と、超木星質量惑星と木星周囲の衛星形成環境の違いについて議論する。

高 EUV 放射下における初期火星の膨張大気を考慮したフォボスの軌道進化計算

〇藤田晃平、寺田直樹、堺正太朗、寺田香織
東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

火星はフォボスとダイモスの 2 つの衛星を持っている。これらの衛星は、軌道傾斜角と離心率が小さいという共通した特徴がある。2 つの衛星の起源として、小惑星が火星の重力によって捕獲されたとする捕獲説と、小天体が火星に衝突し、衝突により形成された破片が集積することによって形成されたとするジャイアントインパクト説などが考えられている。捕獲説が支持されている理由として、D 型小惑星と 2 つの衛星の反射スペクトルが一致していることが挙げられるが、現在の軌道傾斜角と離心率の特徴を説明することは難しいと考えられている。一方で、ジャイアントインパクト説は、火星を周回する破片の円盤中で衛星が形成されるため、現在の軌道の特徴を説明することができる。本研究では、特に初期火星の膨張大気の共回転からのずれを考慮に入れてフォボスの軌道進化計算を行い、捕獲説の妥当性の評価を行った。

まず、原始火星大気に捕獲され、大気ドラッグにより軌道進化する場合を考える。捕獲された小惑星は、大気ドラッグの影響により火星に落下する。そこで先行研究では原始火星大気の共回転を考慮に入れた軌道計算を行い、その結果、静止軌道近傍において大気の回転に順行する衛星の寿命が比較的長くなる解があることが示された。しかしながら捕獲後の衛星の軌道進化を追うためには、火星大気の変遷も同時に考慮する必要がある。本研究では、太陽極端紫外線(EUV)放射の進化に伴って、膨張した初期火星大気が収縮していく過程を考えた。大気が共回転半径を越えて著しく膨張していた時は、火星の自転と比較的近い角速度で大気も回転していた可能性がある(e.g., Matsuoka and Kuramoto, JPGU-AGU Joint Meeting, 2020)。しかし、大気が収縮していく過程で、昼夜間対流などの共回転からずれる風系が卓越する領域が静止軌道を通過する。そこで本研究では、大気の共回転からのずれを考慮に入れてフォボスの軌道進化計算を行い、衛星の寿命の変化を求めた。

また、火星大気が収縮する途中で衛星が捕獲説により形成された場合も考えられる。しかし、この場合衛星は火星の近くで形成されるため、潮汐散逸により火星に落下し、現在に至るまで軌道を維持できないと考えられる。

本発表では、以上のシナリオにおけるフォボスの軌道進化計算結果を発表し、捕獲説の妥当性について議論する。

弾丸形状が重力支配域クレータ形状に与える影響

○嶌生有理[1]，黒澤耕介[2]
[1]宇宙航空研究開発機構，[2]千葉工業大学惑星探査研究センター

2019 年 4 月 5 日，はやぶさ２搭載小型衝突装置 SCI は小惑星リュウグウの表面上空約 500 m で動作し，リュウグウ表面に直径 14.5 m の人工クレータを形成した [1]．さらに，SCI 動作の前後 2—3 週間に撮像された光学航法カメラ ONC 画像から，人工クレータを中心とする同心円上の地形変化（副クレータとボルダ出現）が観察された．これらは，SCI 前方破片が形成したと推定されている．前方破片の発生は地上試験で観察されており，大きさ数 cm の不規則形状の銅/ステンレスであることがわかっている．前方破片が形成した副クレータはクレータ形成のサイズスケーリング則とアーマリング効果の検証に有用だが，不規則形状の弾丸が重力支配域クレータ形状に与える影響はよくわかっていない．そこで本研究では，iSALE 衝撃計算コード [2-4] を用いて円柱弾丸のアスペクト比が重力支配域クレータ形状に与える影響を調べた．

弾丸として銅円柱，標的として砂層を用いた．それぞれの物質は Tillotson EOS [5-6] を用いた．計算領域は円柱座標系とし，extension zone を含めて 150x300 セルとした．円柱座標系での銅円柱弾丸のアスペクト比は 5x40 セル（棒）から 14x5 セル（円盤）まで 4 段階に変化させた．計算時間短縮のため，重力加速度を 500G とした．衝突初期の接触・圧縮段階から掘削段階，クレータ内壁が崩壊する修正段階まで計算するため，ダンプ機能によるリスタートを行い，貫入特徴時間（弾丸長さ／衝突速度）の 1 万倍程度まで計算を実施した．

過渡クレータ形状は，細長い弾丸ほど入り口が狭く深い孔となった．一方，修正段階では，平たい弾丸ほどクレータ形状の変形が小さく，細長い弾丸ほどクレータ内壁の崩壊と周囲の砂層の圧密が顕著であった．最も細長い弾丸の場合，弾丸物質が地下深くで停止し，その上部を圧密していない砂層が充填する構造が見られた．このことは，弾丸の密度と形状がクレータ地下構造に影響を与えることを示している．

謝辞：iSALE の開発者である G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, D. Elbeshausen の各氏に感謝します．数値計算は国立天文台シミュレーションプロジェクト(CfCA)の計算サーバを使用した．

[1] Arakawa, M., et al., 2020, *Science*, **368**(6486), 67-71. [2] Ivanov, B. A. et al., 1997, *International Journal of Impact Engineering* **20**, 411.[3] Collins, G. et al., 2004, *MAPS* **39**, 217.[4] Wünnemann, K. et al., 2006, *Icarus* **180**, 514. [5] Tillotson, J. H., 1962, *Technical Report GA-3216, General Atomic Report*. [6] Borg, et al., 2005.

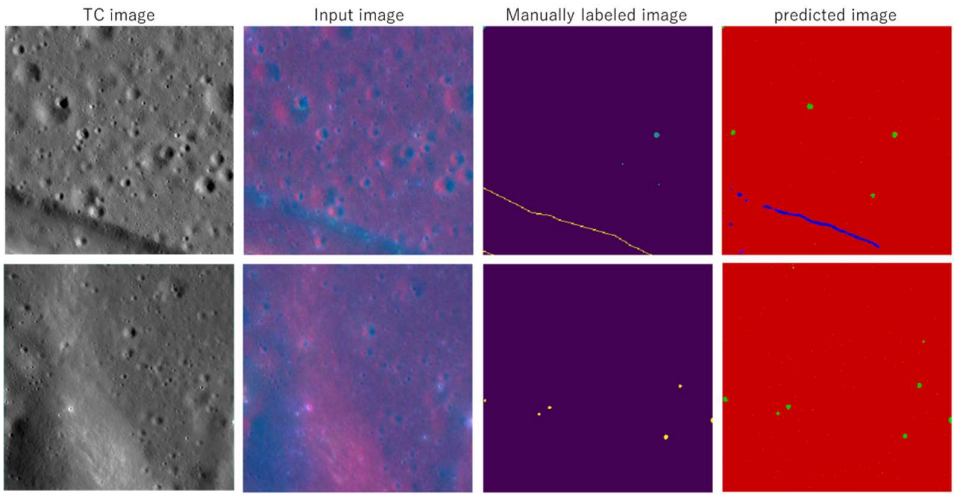
機械学習による月地形の自動抽出

○嵩　由芙子[1]，本田　親寿[1]，出村　裕英[1]
1. 会津大学

近年、解像度の高い衛星画像が多く取得され、全てを人の手で解析することは困難である。そこで本研究では、地質図作成時の労力削減を目的に、深層学習を使って、月の光条クレーター、リッジ、リルを自動でマッピングする学習器を作成した。

使用したデータは、SELENE の Terrain Camera（TC; 可視カメラ)画像、Multi-band Imager（MI; スペクトルデータ）画像である。MI は複数の波長で月面を観測したが、本研究では、鉄やチタン量、宇宙風化度の違いが現れる、415・749・950 nm の反射率データを使用した。約 2000 個の光条クレーターと、数本のリッジとリルが分布している、緯度 0 ～ 3 度、経度 0 ～ 3 度の範囲（12288×12288 pixel）を学習エリアとした。

本研究では、領域分割を行うアーキテクチャの一つである ENet（Paszke et al., 2016）を採用した。入力画像として、地質的特徴が捉えやすいように、TC と MI 画像を使った疑似カラー画像を用意した。この疑似カラー画像は、赤、緑、青にそれぞれ、 TC image、 MI バンド比画像（415/749 nm)、MI バンド比画像（749/1001 nm）をあてた画像である。また、ラベルデータ作成は、この疑似カラー画像を使って手動で行った。これらの疑似カラー画像と、手動で作成したラベルデータを教師データとして学習を行った結果、光条クレーターとリルのトレースうまく行うことができるモデルが作成できた。下図に推測結果の例を示す。図を見ると、手動では見落としていた光条クレーターもマッピングできていること、リルもトレースできていることがわかる。学習エリアの手動でのラベル付けには、約 2 日かかっている。しかし、学習器が同じ領域の推測にかかる時間は、数十秒であり、大幅な人的負担の軽減が期待できる。



推測結果の例を示す。左から、TC image(可視画像)、入力画像（TC/MI 画像から作った疑似カラー画像)、手動でラベル付けした正解画像、推測結果。

小惑星探査機はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR のデータアーカイブ

○荒井 武彦[1], 岡田 達明[2], 田中 智[2], 福原 哲哉[3], 出村 裕英[4],
坂谷 尚哉[3], 嶌生 有理[2], 千秋 博紀[5], 神山 徹[6], 関口 朋彦[7]
[1]足利大学, [2]宇宙航空研究開発機構, [3]立教大学, [4]会津大学,
[5]千葉工業大学, [6]産業技術総合研究所, [7]北海道教育大学

小惑星探査機はやぶさ 2 は, 2018 年から 2019 年にかけて，小惑星 162173 リュウグウのその場観測を行った．はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ（TIR）はリュウグウの上空から地表のサーモグラフィーを取得し，熱モデルと比較して，リュウグウの全体および局所的な熱慣性や物理的な特性を明らかにした(Okada et al., 2020)．自転する小惑星のサーモグラフィーの連続取得は世界初であり，小天体の成り立ちや進化を探る上で貴重なデータである．本発表では，TIR で取得した観測データのプロダクトの詳細と公開状況を紹介する．TIR の観測データは JAXA 内にあるデータサーバーで画像（Level1）に変換し，会津大学のデータベース HEAT（Endo *et al.,* 2017; Suko, 2019）を用いて輝度温度画像（Level2）に変換した．その後，リュウグウの形状モデル（Watanabe *et al.,* 2018 他）上にマッピングし（Level3），表層のラフネスモデル（Senshu *et al.,* in preparation）を取り入れた熱モデルでフィッティングして，熱慣性マップ（Level4）を作成した（Shimaki *et al.,* 2020）． 2020 年 12 月に Level1 と Level2 データを公開し，高次の Level3 と Level4 データは 2021 年 12 月に公開する予定である．Level3 においては, TIR データの形状モデルへの射影時に幾何補正（アライメント補正）を行っており(Arai *et al.,* submitted)， 例えば 5 km 上空の観測の場合，数 m の誤差内での位置決定精度を達成している．その結果をはやぶさ 2 の SPICE カーネル FK（Flame Kernel）と IK（Instrument Kernel）に反映し，観測データと同時に公開する予定である．

欧米火星探査機群観測データによる新大気リトリーバル技術の検証～欧 ExoMars Trace Gas Orbiter および日 MMX への応用展開準備～

○中川広務[1], 笠羽康正[1], 青木翔平[2], Arnaud Mahiaux[3], 小暮李成[1],岩渕弘信[1], 出村裕英[4]
[1]東北大学理学研究科, [2]ベルギー・リエージュ大学, [3]ベルギー宇宙航空研究所, [4]会津大学

火星は、表層に大量の水を湛えたことがある地球以外で唯一の惑星、またその大量喪失で"ハビタビリティ"を非可逆的に失った唯一の惑星である。現在も、希薄だが一定の大気を維持し、地下には氷(水)も湛え、人類の移住が現実的に検討しうる唯一の惑星である。現在議論が進む国際宇宙探査は、月の向こうに火星を見据えており、この領域におけるプレゼンス確保は、日本の宇宙開発の未来にとり絶対的に必要である。火星では、その長楕円軌道に伴う太陽距離変化によって夏・冬の度に極冠が蒸発・蓄積し、水・CO2(大気主成分)の大量供給・凝結が起きる。これらが駆動するダストストーム等の下層大気の激動が「水の上層大気への輸送と宇宙流出」に連なりうる。この「水」は、極冠や地殻からの放出によって供給される。地殻との相互作用や宇宙流出を含む、地表～宇宙空間に至る大気鉛直構造の掌握は、この惑星の現在の変動と過去の進化を物語るに不可欠である。この掌握は火星環境の変動・進化に重大な情報を提供しうるとともに、表層下の蓄積水の追跡探索と並んで国際火星探査の正面目標にも位置付けうるものである。とはいえ、地表から超高層に至る水を始めとする大気微量成分の高度分布、特に多様な緯度・経度およびローカルタイム・季節での追跡が十分行われていない。この理由は、鉛直構造の解明に不可欠な Limb 観測データの有効利用が難しい、ということにある。Limb 観測は、大気中ダストによる太陽光散乱光を利用し、大気を水平によぎる長基線観測となる。浮遊ダストと地表を含む多重散乱を解かないと、高度方向情報を分解することができない。本研究は、地球静止軌道からの Nadir 観測用に開発された高速リトリーバルツール「JACOSPAR」を火星のダスト・エアロゾル・大気組成を前提とした Limb 観測用に改造し、これまで有効活用されてこなかった多数の欧米火星探査機群の Limb 観測データへ適用可能なツールの試作確立を目的とする。このツールは「逆モンテカルロ法」を採用した高速性に特長があり、「高散乱大気の透過光・散乱光」の分光情報から従来法と比べ一桁高速で微量物質量を導出できる。リム観測は、約 100 km に及ぶ長光路の透過光を観測する。低高度の情報や、高度数十 km までダストが覆う全球ストーム中の情報は、多重散乱を伴う赤外透過光からの高精度情報抽出を要するため、その統計的処理においてまさにこの能力が生きる。このコードのデバッグ検証を進め、また Mars Express 搭載 OMEGA による Limb 観測結果をデータベース化したので、それらの概要をここで報告する。

Comet Interceptor mission: progress from WS to ISAS study team

○S. Kasahara[1], K. Yoshioka[1], N. Sakatani[2], S. Kameda[2], A. Matsuoka[3], N. Murata[4], R. Funase[1,4], S. Nakajima[4], N. Ozaki[4], N. Usami[1], H. Kawakita[5], and Y. Shinnaka[5]

[1]Univ. Tokyo, [2]Rikkyo Univ., [3]Kyoto Univ., [4]JAXA, and [5]Kyoto-Sangyo Univ.

Comets are pristine small bodies and provide key information about the solar system evolution. Remote observations by ground observatories have characterized various comets, while in-situ observations by spacecraft have brought much more detailed information on several comets. However, the direct observations by spacecraft fly-by or rendezvous have been limited to the short-period comets, which neared the sun many times in the past, thus lost some of primitive characteristics. The Comet Interceptor mission, led by ESA, aims at a long period comet or an interstellar object. JAXA will provide an ultra-small (24 U) daughter spacecraft, whose closest approach will be less than 1,000 km, allowing the first-ever multi-spacecraft fly-by observations of a comet. Here we report our recent programmatic progress as well as scientific strategies discussed so far.

SCI クレーター周辺のブライトボルダーのスペクトル解析
Spectrum analysis of Bright boulder around the SCI crater

◯**青木美波**[1]、**杉本知穂**[1]、**湯本航生**[1]、**巽瑛理**[2,1]、**諸田智克**[1]、**横田康弘**[3]、**荒川政彦**[4]、**杉田精司**[1]、ONC チーム、SCI チーム、[1]東京大学、[2]カナリア天体物理研究所、[3]JAXA/ISAS、[4]神戸大学

はやぶさ 2 は小惑星における衝突実験を世界で初めて実行し, 小惑星リュウグウ内部の掘削に成功した[1]．この衝突実験で形成した SCI (Small Carry-on Impactor)クレーター内には，宇宙風化をほとんど受けていない新鮮な物質が露出していると期待される．また, 先行研究で小惑星リュウグウの表面には，周辺に比べて反射率の高い岩（Bright boulder (BB)）が発見されており, これらのスペクトルを他の小惑星や隕石と比較することで, スペクトルの多様性を生み出す条件を制約することができる[2-5]．

例えば, [3]は 21 個の BB の分光解析に基づいて， S 型と C 型に近いスペクトルを持つ 2 グループに分かれることを見出し，前者は外因性の可能性が高く後者は内因性の可能性が高いことを示した．さらに、[5]は 79 個の BB のスペクトルを分析し，主成分解析によってリュウグウの S 型 BB が 2 つの異なる普通コンドライトの宇宙風化経路に沿っていることを示した。これは, リュウグウの母天体に二つの小惑星が衝突した可能性を示唆している。また, C 型 BB のスペクトルは, 加熱された CM コンドライトや CI コンドライトと同様のスペクトル傾向を示すことを示した．これは, リュウグウの母体は加熱を経験したとの説を支持している．さらに，[5]は SCI クレーター内に BB を発見しているが，解析の難しさ等から分光解析はなされてこなかった．

そこで本研究では, これら SCI クレーター内の約 20 個の BB を正確に分光解析した．その結果, SCI 内に見つかった BB の全ては C 型であった．これは，SCI クレーター内の BB はいずれも小さいので，小さい BB は C 型が多いというリュウグウ表面上の BB の傾向 [4] と調和的である．また，SCI クレーター内の C 型 BB のスペクトルは，紫外領域での反射率と可視全体でのスペクトル傾斜の 2 次元プロットを用いて比較すると，表面の BB に見られる全体的な傾向と良く一致していることが分かった．この予備的結果は，リュウグウ表面のスペクトルが，宇宙風化によって大きくは変成していない可能性を示唆するものである．このような SCI クレーター内外の BB スペクトルの比較は，リュウグウ表面上での宇宙風化と母天体の熱進化を理解する上で非常に重要な知見を提供してくれると期待される．

参考文献： [1] Arakawa et al. (2020) *Science, 368, 67-71*. [2] Sugita et al. (2019) *Science*, 364, eaaw0422 1-11. [3] Tatsumi et al. *Nature Astronomy*, doi.org/10.1038/s41550-020-1179-z. [4] Sugimoto et al. (2020a) to be submitted to *Icarus*. [5] Sugimoto et al. (2020b) to be submitted to *Icarus*.

DESTINY+搭載カメラ TCAP と MCAP の機上校正計画

○岡本 尚也[1], 石橋 高[2], 山田 学[2], 洪 鵬[2], 吉田 二美[2,3], 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, [3]産業医科大学

2024 年打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証機 DESTINY$^+$ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science)にはモノクロ望遠カメラ TCAP(Telescopic CAmera for Phaethon)とマルチバンドカメラ MCAP(Multi-band CAmera for Phaethon)の 2 台のカメラが搭載され, 小惑星(3200) Phaethon を高速フライバイし, 以下の 4 つを明らかにすることをカメラの科学目標として掲げている: (1) Phaethon のグローバル形状; 輪郭とライトカーブ (2) Phaethon のセミグローバル形状; 3 次元形状の作成, (3)Phaethon のローカル地形; 表層地形観測, (4) Phaethon 表層の物質分布. これらの目標を達成するために, カメラが得る画像データから科学データを正しく抽出するには両カメラの置かれる環境での挙動を正しく理解し, 取得したデータのリダクションや正確な校正方法を構築する必要がある. 打ち上げ前に両カメラの地上校正試験を行い, その特性を知っておくことは必須である一方で, 地上試験で得た特性が Phaethon 到着までの間, 一定に保たれている保証はない. なぜなら打ち上げ後の振動や放射線, 気圧, 重力環境, アウトガスなどによるカメラの性能変化・劣化の可能性があるためである. よって実際の Phaethon フライバイの前後で可能な限りカメラの性能を把握することが望ましい. また打ち上げ後は両カメラへのアクセスや画像のダウンリンクの機会は限られることから, 機上で可能な校正方法, 校正を行うタイミングを事前に検討しておくことは重要となる.

上記 4 つの科学目標を達成するために必要となる主な光学系および撮像素子のラジオメトリック・ジオメトリックな校正評価項目は暗電流, バイアス, ホットピクセル, デッドピクセル, フラットフィールド補正, リニアリティ, コンバージョンゲイン, 迷光, 点像分布関数, 放射輝度の絶対値校正, 歪曲補正である. これら宇宙機に搭載されるカメラでの基本的な校正評価事項に加え, DESTINY$^+$ミッションでは両カメラに使用されるセンサの飽和電荷量が入射光量に依存するということがわかっており, 飽和電荷量と露光時間の関係を入念に調べなければならない. これらの評価を航行中に行う必要があるが, 現在の設計では両カメラは厳しい質量制約のため校正用の光源を内部に持たない予定である. よって航行中に観測可能かつ適切に選択された天体を利用した校正が必要となる. 我々は校正用の天体として月・地球・恒星を用いることを計画している. 月は宇宙空間での安定した面光源として扱える. さらに, 過去の月観測データを用いて構築された月面反射率モデルである Rolo (RObotic Lunar Observatory)モデルや SP (Spectral Profiler)モデルと校正を行いたいカメラの月撮像画像の比較によって, センサ応答度の相対的な変化を高い精度で校正することが可能となる. また, 10%程度の不確定性はあるが放射輝度の絶対値校正も可能である. そこで月の日照域を撮像し, 飽和電荷量, リニアリティ, コンバージョンゲイン, デッドピクセル, フラットフィールド, 放射輝度の絶対値校正の評価を行う. 一方, 地球には雲や海, 砂漠といった輝度の大きく異なる対象があるため, それらを撮像することで異なる放射フラックスに対する飽和電荷量を調べることが可能である. 恒星では飽和電荷量, 点像分布関数, 歪曲, リニアリティ, 放射輝度の絶対値校正の評価を行う. 月面とは異なり恒星は点光源であるため, ピクセル単位での校正となるが, 航行中の任意のタイミングで撮像可能となるのが利点である. 月撮像で得た多数のピクセルの校正データと比較し, 月撮像後の航行中にどの程度性能が・経時劣化・変化したかを押さえる. またダーク画像の取得のため, 深宇宙をカメラで撮像し, 暗電流, バイアス, ホットピクセル, 迷光の評価を行う. 本発表ではより詳細なそれぞれの天体の撮像方法, 撮像時期, 撮像時の注意点についての検討状況について報告を行う.

火星表面探査に向けた
生命兆候探査顕微鏡のブレッドボードモデル開発

○吉村義隆[1]、山岸明彦[2]、宮川厚夫[2]、今井栄一[3]、佐々木聰[4]、塩谷圭吾[5]、三田肇[6]、小林憲正[7]、癸生川陽子[7]、佐藤直人[8]、佐藤毅彦[5]、薮田ひかる[9]、長沼毅[9]、藤田和央[5]、臼井寛裕[5]

1.玉川大学、2.東京薬科大学、3.長岡技術科学大学、4.東京工科大学、5.宇宙航空研究開発機構、6.福岡工業大学、7.横浜国立大学、8. 明治大学、9.広島大学、

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 2022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。

これに対して我々は、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-signature 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SYTO24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（BBM）の製作を行っており、今年度、試料に蛍光色素を添加する装置や、小型顕微鏡などの製作を行った。本講演では、BBMの開発状況を報告する。

21P/Giacobini-Zinner 彗星の形成環境

○新中善晴[1]、河北秀世[1]、大坪貴文[2]、田実晃人[3]
[1]京都産業大学、[2]国立天文台、[3]すばる望遠鏡

21P/Giacobini-Zinner 彗星は周期 6.6 年の短周期彗星で 10 月りゅう座流星群の母天体として知られている彗星である。この彗星はこれまでに、いくつかの有機物関連分子（揮発性の高い CO や各種有機分子、および C_2 や NH_2 などの光解離生成分子）の欠乏や、彗星ダストによる反射光の直線偏光度が可視光波長域で負の波長依存性を持つことが報告されていた。可視光線波長域に見られる C_2 や NH_2 などの光解離生成分子の欠乏からは、同彗星は全彗星の約 6%しか存在しないジャコビニ・ツィナー型に分類されており、また、通常の彗星は可視光での直線偏光度が正の波長依存性を持つことからも、同彗星は揮発性分子もダストも共に非常に特異な性質を持つ彗星であることが知られている。揮発性の高い分子が失われていることから、先行研究では、ジャコビニ・ツィナー彗星が原始太陽系円盤中で、他の彗星と比べて比較的高い温度の環境で形成された可能性が示唆されている。また、ダスト散乱光に見られる直線偏光度の負の波長依存性から、彗星ダストに複雑な有機分子が含まれている可能性が指摘されている。しかしこれまで、彗星における複雑な有機分子の検出は、彗星探査機ロゼッタによる 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星の「その場観測」など一部に限られ、天文観測（リモート観測）ではこれまで分子量が 100 を超えるような複雑な有機分子の確実な検出例がない。そのため、彗星にどの程度まで複雑な有機分子が存在するのかは、これまで殆ど分かっていなかった。

我々は、2005 年 7 月 5 日（世界時）に Giacobini-Zinner 彗星の中間赤外線の撮像及び分光観測（すばる望遠鏡／中間赤外線観測装置 COMICS）、2018 年 10 月 3 日（世界時）に可視光高分散分光観測（すばる望遠鏡／高分散分光器 HDS）を行った。得られたデータを詳細に解析した結果、中間赤外線分光スペクトルから、彗星コマ中に含まれるシリケイト鉱物特有の輝線バンドに加え、脂肪族炭化水素や多環芳香族炭化水素といった複雑な有機分子に起因する可能性が高い輝線バンドを検出した。こうした有機分子は氷が形成される温度よりも高温の環境で形成されやすいことから、同彗星は平均的な彗星よりも高温の領域で形成された可能性が示唆される。一方で、中間赤外線スペクトルから決定したシリケイト鉱物の結晶度は、他の彗星と似た値を示した。結晶質シリケイトが平均程度含まれていることから、同彗星は太陽からの距離という観点では他の多くの彗星と似たような領域で形成されたことが予想される。また、可視光高分散分光スペクトルに見られる酸素禁制線の強度比から CO_2/H_2O 存在量比を求めたところ、Giacobini-Zinner 彗星は、これまでに観測された彗星と比べて CO_2 の存在量が特に小さい彗星であることが明らかとなった。CO_2 は H_2O より昇華温度が低いことから、可視光分光観測の結果からも、同彗星は平均的な彗星よりも高温の領域で形成された可能性が示唆される。

これらの結果を総合すると、Giacobini-Zinner 彗星は、他の彗星と似た距離（シリケイト鉱物の結晶質の存在比より）にも関わらず、他の領域より暖かい場所で形成された（複雑な有機分子の検出、低い CO_2/H_2O 比）ことが示唆される。このような場所の有力候補として、原子太陽系円盤では、木星などの巨大惑星の周星周円盤中が考えられる。周惑星円盤は原始太陽系円盤の同じ距離の領域に比べて密度が濃く温度も高くなるため、有機物が形成できる環境が存在できる可能性がある。本発表では 21P/Giacobini-Zinner 彗星の形成環境及び原始太陽系円盤における彗星形成環境について議論する。

本研究は、科学研究費補助金（課題番号：20K14541）の助成を受けて行われた。

(3200) Phaethon の可視スペクトルとその自転位相への依存性

Full rotationally phase-resolved visible reflectance spectroscopy of 3200 Phaethon

○大塚勝仁 [1], 伊藤孝士 [2], 木下大輔 [3],
阿部新助 [4], 澤井恭助 [4], 船橋和博 [4], 加藤遼 [4],
宮坂正大 [5], 長谷川直 [6], 中村智樹 [7], 陳文屏 [3]

[1] 東京流星観測網, [2] 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト,
[3] 台灣國立中央大學天文研究所, [4] 日本大学理工学部航空宇宙工学科,
[5] 東京都庁, [6] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,
[7] 東北大学大学院理学研究科地学専攻

近地球小惑星 (3200) Phaethon の表面状態の情報を得るべく実施した観測結果を報告する。2007 年の冬にこの天体がに地球に接近した際、私達は台灣國立中央大學の鹿林観測所にある口径 1 m 望遠鏡を用い、可視域での分光観測を二夜にわたり実施した。また同時期に、日本国内 (宮坂観測所) に於いて R バンドでの測光観測をも実施した。その結果得られたスペクトルの勾配は波長 0.55 μm の位置を中心として -5.0% / 0.1 μm から 0.6% / 0.1 μm であり、B 型から C 型の表面色を示唆するものであった。また、スペクトル勾配はこの小惑星の自転と共に変化することも判明した。これはこの小惑星の表面に組成の不均一性が存在することを示す。Phaethon は一般には B 型小惑星であると認識されているが、特定の経度領域に於いてこの天体が C 型的な表面を持つことが予期される。

We present time-series optical spectroscopic observations of 3200 Phaethon during its 2007 return, complemented with R-band photometry. The spectral gradient centered around 0.55 μm varies between -5.0% / 0.1 μm and 0.6% / 0.1 μm, indicating a B- or C-type color. Moreover, rotational modulation of the spectral slope of this asteroid suggests its surface compositional inhomogeneity, particularly the existence of a C-type surface at a certain longitude on this asteroid.

文献 Katsuhito Ohtsuka, Takashi Ito, Daisuke Kinoshita, Shinsuke Abe, Kyosuke Sawai, Kazuhiro Funabashi, Ryo Kato, Seidai Miyasaka, Sunao Hasegawa, Tomoki Nakamura, Wen-Ping Chen, "Full rotationally phase-resolved visible reflectance spectroscopy of 3200 Phaethon", *Planetary and Space Science*, 191, 104940, 2020, 10.1016/j.pss.2020.104940

月の縦孔下に想定される溶岩チューブの探査項目とその探査精度

○本多力[1], 春山純一[2]
[1]NPO 法人火山洞窟学会, [2]JAXA 宇宙科学研究所

[はじめに] 月の縦穴・地下空洞探査(UZUME)計画で直接探査しようとする月の地下空洞について,それが溶岩チューブなのか,溶岩チューブであればどのような温度で形成されたのかを詳細に知ることは,月の火成活動を把握するのに不可欠である.ここでは、直接探査による溶岩チューブであることの確認項目,溶岩チューブ形成時の溶岩流温度推定のための物性データの取得と有意な温度検知のための要求精度,さらに,今後必要な月の溶岩物性についてのR&D に言及した.

[探査による溶岩チューブであることの確認と温度推定のための数値データ] 地球上の溶岩チューブでの特徴として,溶岩滝,溶岩棚,肋骨状溶岩,溶岩鍾乳,葡萄状溶岩,溶岩石筍,縄状溶岩,溶岩球,パホエホエ状壁面,等の存在がある. 富士山を含む地球上の溶岩チューブの特徴的な内部構造を写真などで紹介する.これらの形状が月縦孔空洞内で撮像されれば溶岩チューブと判定が可能である.その中で溶岩チューブ形成時の温度推定のために必要な定量的な測定対象として,溶岩降伏値を得るためのチューブ空洞高さ,幅,傾斜角度,溶岩表面張力を得るための溶岩鍾乳・肋骨状溶岩のピッチの検知が必要である.その検知精度により推定温度の精度も決まる.三原山,富士山,エトナ山の溶岩チューブの実測例から推定された降伏値と表面張力の温度依存曲線を用いて温度センシテイビテイを検討した.その結果,降伏値が２桁の差で±100℃,降伏値の差がファクターであれば±数 10℃となる。溶岩鍾乳のピッチ 4cm とするとその差±0.2cm で±100℃程度である。

[月への適用と今後の課題] マリウス丘縦孔下や静かの海の縦穴下の溶岩についての降伏値と表面張力の温度変化のデータは現在存在しない.ただし粘性係数の温度依存曲線は得られている(嵐の太洋の Apollo-12,静かの海の Apollo-11).三原山,富士山,エトナ山の例に見るように,粘性係数の温度依存性と降伏値の温度依存性の傾向が極めて類似していることから,ここでは降伏値に対して暫定的に,粘性係数の温度依存式と同じ式で試みることにする.表面張力の温度変化について三原山 1951 年の溶岩の温度依存式を用いて温度センシティビティの検討を行ってみた.その結果,降伏値が 120±40Pa であれば±30℃となる.溶岩鍾乳のピッチを 10cm とするとその差±0.5cm で±100℃程度である.検知精度は,今後,探査機器の仕様に反映させる必要があり,月溶岩の降伏値と表面張力のより信頼性のある温度依存式を実験的に得ておく必要がある.

[おわりに] 溶岩チューブの内部形状が明らかにできれば,その高さ傾斜角度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推定し,さらにその温度から粘性係数を推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必要がある.また合成した溶岩の板を下から加熱溶融させリップル(溶岩鍾乳)のピッチを実測するなどの実験が望まれる.

Hera 搭載熱赤外カメラ TIRI の開発
Development of Hera Thermal Infrared Multi-band 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[3]，嶌生有理[1], 荒井武彦[5]，神山 徹[6]，
出村裕英[7]，関口朋彦[8]，Hera TIRI チーム
[1]JAXA 宇宙科学研究所，[2]東京大学，[3]立教大学，[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

小惑星は太陽系初期の物理的・物質科学的な状態を現在まで保持する始原的天体であり、太陽系の起源と進化過程を解明するために重要な天体である。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が、その衝突過程は現在も続いており、しばしば小天体が地球に衝突することによって、人類社会に対して甚大な被害をもたらす。太陽系内には 100m 以下のサイズの天体は多数存在しており、地球への衝突は数 10 年から数 100 年に 1 回の割合で発生している。

この潜在的危険である天体衝突を回避するための方策、すなわち宇宙防災（ Planetary Defense）が国際的枠組みで議論されてきており、数 10m 級の小天体に数 m 探査機を衝突させることによって軌道を変化させ、地球衝突を回避する技術を実証する計画が進行中である。NASA の DART（Double-Asteroid Re-direction Test）は、2022 年 2 月に打ち上げ、2022 年 10 月に小惑星 65803 Didymos（S 型、直径約 780m）の衛星 Dimorphos（直径約 160m）に衝突する。ESA の Hera は、2024 年 10 月に打ち上げ、2027 年 1 月に Didymos にランデブーして衝突後の観測を行う。距離 30km から最終的には 2km 以下まで接近して、小惑星の特徴と DART による衝突痕の状態を詳細に観測するほか、小惑星の軌道と軌道進化の精密計測を実施する計画である。DART と Hera を連携した計画を AIDA（Asteroid Impact and Deflection Assessment）と呼ぶ。小惑星衝突回避技術の実証に加えて、S 型小惑星の初の熱物性観測、探査史上最小の天体の詳細観測、連星系の軌道進化の実測や BYORP 効果の評価を史上初めて行う。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 には日本から熱赤外カメラ TIRI を提供する予定で検討が進行している。「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こと、熱赤外画像による誘導制御を実証する機会とするためである。 TIRI は非冷却ボロメータ（Lynred 社製、1024x768 画素）による中間赤外帯（10μm 付近）の熱撮像を行う。機器の重量、消費電力は約 4kg、17W 程度の小型の観測機器である。観測期間における小惑星 Didymos の太陽からの距離は 1.0～2.0au であり、大きな太陽位相角（～70°）で観測するため、昼夜両方の温度の同時観測が必要である。そのため観測対象となる小惑星表面温度は 200～400K が想定され、その範囲の温度測定が必須である。温度分解能は NETD で 0.1K 以下（@300K）を実現する予定である。TIRI は小惑星の表面温度を 1 自転分取得し、地域ごとの温度履歴から熱慣性を導出し、全球熱慣性マップを作成する。さらに、複数の狭帯域バンドで Christensen Feature（CF）や

周白色矮星円盤モデルの構築：光球面への重元素供給メカニズムの解明に向けて

○奥谷彩香[1], 井田茂[2], 兵頭龍樹[3]
[1]東京工業大学 地球惑星科学系, [2]東京工業大学 地球生命研究所,
[3]宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

白色矮星は恒星進化の最終段階であり、その約 25-50%の大気表面に重元素が発見されている(Zuckerman et al. 2010)。さらに、重元素汚染が観測された白色矮星のうち約 10%には赤外超過が検出されており、白色矮星まわりに固体を主成分とする円盤が存在する(Rocchetto et al. 2015)。これらの起源は、主系列星時代から生き延びた小惑星や惑星であるとされている。具体的には、重力散乱によって白色矮星に接近した小惑星が、潮汐破壊されて周白色矮星円盤を形成する。そして円盤の内縁に達した固体粒子は昇華してガスとなり、白色矮星表面に降着するという一連のシナリオが考えられている。

しかしながら、固体粒子とガスの共進化を整合的に扱う周白色矮星円盤の理論モデルは存在せず、その進化や物理的描像は未知である。円盤モデルが完成すれば、円盤からの重元素の降着率や赤外放射を理論計算することができ、観測値との比較も可能となる。さらに、小惑星組成に依存する円盤進化を追跡して、白色矮星表面への各重元素の降着率を予測できれば、そこから系外小惑星のバルク組成を制約するユニークな手法を与える可能性がある。

本研究では上記を見据えて、周白色矮星円盤の物理モデルを構築し、円盤から白色矮星への重元素供給のメカニズムを明らかにすることを目標とする。そのため、Hyodo et al. (2019)の計算コードをもとに、動径方向 1 次元の固体粒子とガスの移流・拡散・昇華・凝縮を解いて、固体粒子とガス円盤の共進化を計算した。ここで、ガスは固体粒子の昇華によって生じるものであり、水素・ヘリウムを主成分とする背景ガスをもつ原始惑星系円盤の描像とは大きく異なることに注意する。また、円盤はロッシュ限界付近に位置し、白色矮星から大きな輻射を受けるため、固体粒子の運動にポインティング・ロバートソン効果も考慮した。本発表では、岩石小惑星が降着する場合を想定し、シリケイト粒子・シリケイトガスからなる円盤がどのように時間進化するのかを報告する。さらに、理論計算により得られた重元素の降着率が、観測値を再現できるかどうかについても議論する予定である。