日本惑星科学会
2018 年秋季講演会
予稿集

2018 年 10 月 17 日(水)－19 日(金)

旭川市科学館サイパル

日本惑星科学会　賛助会員

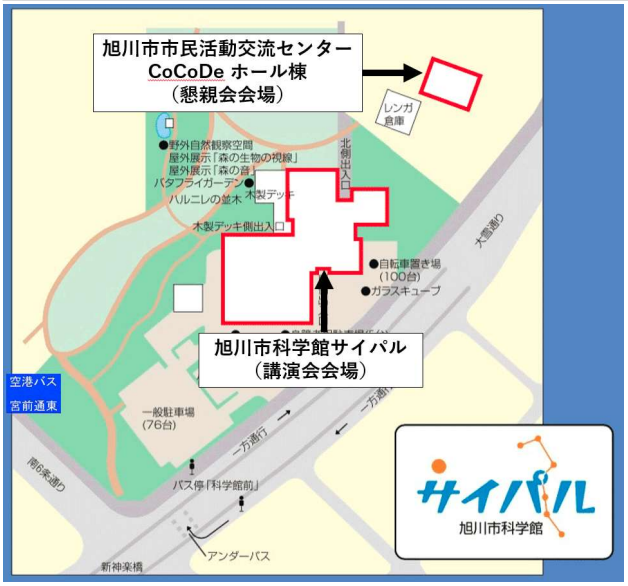
有限会社 テラパブ

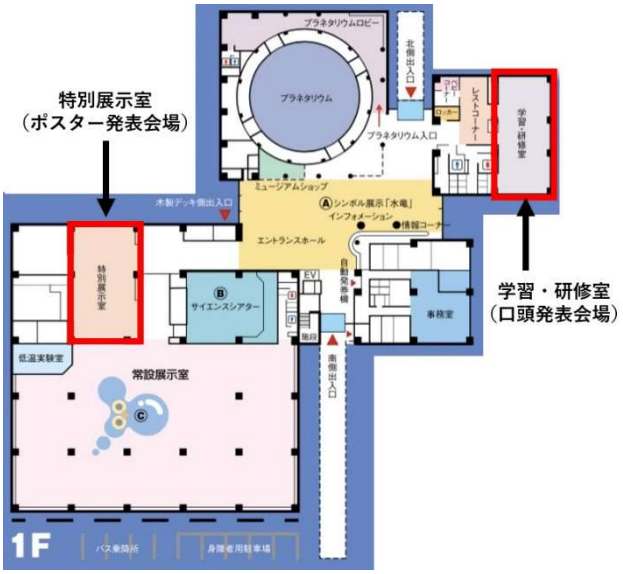
Harris Geospatial 株式会社

株式会社 ナックイメージテクノロジー

日本惑星科学会 2018 年秋季講演会プログラム

2018 年日本惑星科学会秋季講演会実行委員会





●一般市民講演会

日時：2018 年 10 月 20 日(土)10：00－12：00
開場・受付開始 9：30

場所：旭川市科学館サイパル

講演 1：「小惑星リュウグウに到着!ただいま観測中のはやぶさ 2 より」
講演者：坎本尚義(北海道大学理学研究院・教授，宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所地球外物質研究グループ長)

講演 2：「北海道大樹町で気球実験を行い地球生命圏の上端を探す：Biopause プロジェクト」
講演者：大野宗祐(千葉工業大学惑星探査研究センター・上席研究員)

主催：日本惑星科学会

共催：旭川市科学館サイパル

●秋季講演会

日程：2018 年 10 月 17 日(水)～19 日(金)

場所：旭川市科学館サイパル(〒078－8329 北海道旭川市宮前 1 条 3 丁目 3 番 32)

口頭発表：学習・研修室(1 階)

ポスター会場：特別展示室(1 階)

講演数：口頭 83 件(最優秀発表賞選考 10 件を含む)，口頭発表付きポスター23 件，ポスターのみ 49 件，最優秀研究者賞受賞講演 1 件

＊会場に Wi-Fi 設備はございません．インターネット接続環境が必要な方は各自ご用意下さい．

●プログラム概要

○ 10 月 17 日(水)

8：30　開場・受付
8：55　挨拶
9：00　**特別セッション**　最優秀発表賞選考
11：40　昼食
12：40　**口頭発表セッション**　火星
14：14　**口頭発表セッション**　月
14：50　**日本学術会議大型研究計画マスタープラン提案に向けての意見交換会**
15：50　**３分ポスター紹介セッション**
17：00　**ポスターセッション１**

○ 10 月 18 日(木)

8：30　開場・受付
8：50　**口頭発表セッション**　惑星形成【ダスト】
10：12　**口頭発表セッション**　惑星形成【コンドリュール・微惑星】
11：36　昼食
12：30　**ポスターセッション２**
13：40　**口頭発表セッション**　惑星形成【円盤ガス・

巨大衝突】・初期進化 1

15：14　**口頭発表セッション**　初期進化 2・系外惑星

16：40　**総会**

17：40　**最優秀研究者賞受賞講演**

18：45　懇親会

○ **10 月 19 日(金)**

8：30　開場・受付

8：50　**口頭発表セッション**　はやぶさ 2

10：36　**口頭発表セッション**　小惑星

12：00　昼食

13：00　**口頭発表セッション**　太陽系・アストロバイオロジー

14：34　**口頭発表セッション**　衝突・実験

16：08　**口頭発表セッション**　将来計画・機器開発

17：44　閉会

●口頭発表

最優秀発表賞選考は 15 分講演(3 分間の質疑時間を含む)．一般講演は 12 分講演(3 分間の質疑時間を含む), ポスター紹介は 3 分. 時間厳守でお願いします．以降のプログラムでは講演番号, 開始時間, 表題, 講演者を掲載しています. 講演者につきましては, 予稿集を参照下さい.

●ポスターセッション

掲示は 17 日(水)正午から 19 日(金)の正午までです．以降のプログラムでは, 講演番号, 表題, 講演者を掲載しています．コアタイムは講演番号で決められています．最優秀発表賞選考ポスターのコアタイムは 17 日(水)17：00－18：30, 一般ポスターのコアタイムは, 奇数番号が 17 日(水)17：00－18：00, 偶数番号が 18 日(木)12：30－13：30 です.

《口頭発表プログラム》

10 月 17 日(水)

8:55　LOC 委員長挨拶

特別セッション　最優秀発表賞選考

(座長：玄田 英典)

S1　9:00　雲粒の空隙率進化によるスーパーアースの高層雲形成と大気組成への示唆
大野 和正(東工大)

S2　9:15　ガリレオ衛星の新しい形成シナリオ
芝池 諭人(東工大)

S3　9:30　原始惑星系円盤中のダストの乱流拡散の再定式化と散逸が駆動する不安定性による多重リング形成　冨永 遼佑(名大)

S4　9:45　小惑星 Ryugu のクレーター形状解析と内部密度分布構造の推定　金丸 仁明(阪大)

S5　10:00　衝突数値実験による小惑星形状変化過程の解明: 直径 100 km 以上の「いびつな」小惑星の衝突史への制限
杉浦 圭祐(名大)

10:15　休憩(10 分)

S6　10:25　火星衛星の捕獲起源論　―回転原始大気による微惑星捕獲と衛星軌道進化―
松岡 亮(北大)

S7　10:40　火星 Recurrent Slope Lineae の地球アナログフィールドの発見：モンゴル南西部、半乾燥地域急斜面上の筋模様
中村 麻也(東工大)

S8　10:55　微惑星衝突破壊モデルを用いた微惑星系の N 体計算　石城 陽太(東大)

S9　11:10　北大 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた地球近傍小惑星(422699), 2012 TC4, Phaethon の偏光観測　岡崎 良(北海道教育大)

S10　11:25　小惑星ベスタの表層地殻における変成史：玄武岩質ユークライトからの考察
金丸 礼(総研大)

11:40　昼食

火星　(座長：兵頭 龍樹, 黒田 剛史)

A1　12:40　火星古気候を想定した全球 3 次元大気・水圏結合モデリング　黒田 剛史(NICT)

A2　12:52　水循環シミュレーションと室内実験による初期火星 Gale クレータ古湖周辺の水循環および水-岩石反応の復元
野田 夏実(東工大)

A3　13:04　Gale クレーター湖沼堆積物の間隙水水質に記録された古環境　福士 圭介(金沢大)

A4　13:16　火星表層を流れる塩水の流跡パターンの多様性に対する塩析出と粘性の役割
今村 翔子(東大)

A5　13:28　天体衝突による火星物質の放出過程
玄田 英典(東工大)

A6　13:40　火星圏物質輸送 I： 火星から火星衛星への質量輸送　兵頭 龍樹(東工大)

A7　13:52　火星圏物質輸送 II: 衛星上の火星物質分布と滅菌　黒澤 耕介(千葉工業大)

14:04　休憩(10 分)

月（座長：大竹 真紀子）

B1　14:14　かんらん石と月土壌シミュラントを用いた着氷実験と近赤外スペクトル比較
荻島 葵(阪大)

B2　14:26　月深成岩分光観測のための、かんらん石焼結体反射スペクトルの測定
五十嵐 優也(阪大)

B3　14:38　月表層のカンラン石に富む岩石の Mg#等から推定する月マントルの化学組成
大竹 真紀子(JAXA)

14:50　**日本学術会議大型研究計画マスタープラン提案に向けての意見交換会**
(座長：中本 泰史)

15:40　休憩(10 分)

3 分ポスター紹介(座長：保井 みなみ，佐々木 貴教)

PO4　15:50　還元型原始火星大気の流体力学的散逸
吉田 辰哉(北大)

PO7　15:53　高解像度火星境界層シミュレーションのデータを用いたダスト巻き上げ過程に関する解析　村橋 究理基(北大)

PO8　15:56　地球化改造した火星の気候シミュレーション　はしもと じょーじ(岡山大)

PO12　15:59　気液平衡原始月円盤からの月形成に関する長時間 N 体計算
佐々木 貴教(京大)

PO16　16:02　集積末期の地球マントルの酸化還元状態：深いマグマオーシャンにおける第二鉄生成　村瀬 祐太郎(北大)

PO17　16:05　短周期スーパーアース形成：円盤表層降着流による大気獲得への制限　堀 安範(アストロバイオロジーセンター)

PO18　16:08　ホットジュピターにおけるスリングショットモデル適用妥当性の検証
紀藤 准弥(九大)

PO19　16:11　原始惑星系円盤におけるギャップをもつ巨大惑星の動径軌道進化
金川 和弘(東大)

PO23　16:14　双曲線軌道小天体の起源
樋口 有理可(国立天文台)

PO24　16:17　小惑星 Ryugu の形状モデル作成
田中 小百合(神戸大)

PO33　16:20　「あかり」遠赤外線全天画像がとらえた小惑星ダストバンドの形成過程
大坪 貴文(JAXA)

PO39　16:23　冥王星表面の氷の昇華と凝結による反射率の変化　松井 弥志(阪大)

PO43　16:26　粉体流における凝集体成長過程のフラッシュ X 線観測　長足 友哉(神戸大)

PO45　16:29　海洋への隕石落下による津波の定量的な評価に向けて
近貞 直孝(防災科学技術研究所)

PO47　16:32　多孔質小天体模擬標的の衝突点下の密度解析　山崎 祐太朗(神戸大)

PO48　16:35　クレーターサイズへの衝突履歴効果：多孔質標的での衝突実験
横山 康喜(神戸大)

PO49　16:38　多孔質天体上に形成する衝突クレーター周囲の衝突残留温度に関する実験的研究　田澤 拓(神戸大)

PO50　16:41　多孔質氷への高速度クレーター形成実験：クレーターサイズスケール則に対する衝突溶融の影響
宮野 加菜(神戸大)

PO51　16:44　多孔質氷の圧縮変形における圧密速度と空隙率の関係：氷微惑星の密度構造への応用　矢部 みなみ(神戸大)

PO52　16:47　異なる粒径をもつ粒子の混合層へのクレーター形成実験：小惑星 Ryugu 上のクレーター地形との比較
保井 みなみ(神戸大)

PO55　16:50　粉体実験及び N 体計算による放出物カーテン中での粒子衝突の研究
岩澤 聖徳(東工大)

PO59　16:53　月ペネトレータ探査 APPROACH ミッション:公募型小型ミッションの選定結果と今後の方針について
田中 智(JAXA)

PO62　16:56　FDTD 電磁界シミュレーションに基づくレーダによる月表層の氷検出可能性の検討　熊本 篤志(東北大)

17:00　**ポスターセッション 1**

18:30　終了

---

10 月 18 日(木)

惑星形成【ダスト】　(座長：奥住 聡，木村 勇気)

C1　8:50　観測ロケットを用いた微小重力環境下でのダスト生成過程の再現実験
木村 勇気(北大)

C2　9:02　HD163296 の原始惑星系円盤の ALMA 観測 -水輝線と多重リング・ギャップ構造-
野津 翔太(京大)

C3　9:14　ALMA 偏光観測で探るダストの合体成長
片岡 章雅(国立天文台)

C4　9:26　焼結が誘起する若い原始惑星系円盤での多重ダストリング形成　奥住 聡(東工大)

C5　9:38　ダストの合体成長に基づいた惑星形成
西川 花(名大)

C6　9:50　ダストアグリゲイトの熱伝導率
荒川 創太(東工大)

10:02　休憩(10 分)

惑星形成【コンドリュール・微惑星】

(座長：長澤 真樹子，瀧 哲朗)

D1　10:12　コンドリュールの生存に適した原始太陽系星雲の条件について　瀧 哲朗(東大)

D2　10:24　急冷マグマ中における定比組成鉱物の成長過程の数値計算
三浦 均(名古屋市立大)

D3　10:36　高密度領域におけるコンドリュールとマトリクスの成長によるコンドライト母天体の形成　松本 侑士(中央研究院)

D4　10:48　ストリーミング不安定性の成長条件を表す臨界パラメータ　関谷 実(九大)

D5　11:00　自己重力による始原的隕石母天体内部の密度構造　大村 知美(神戸大)

D6　11:12　微粒子の加熱に寄与する高速度微惑星の形成条件　長澤 真樹子(久留米大)

D7　11:24　小質量微惑星から計算した暴走成長段階
小南(台坂) 淳子(東工大)

11:36　昼食

12:30　**ポスターセッション 2**

惑星形成【円盤ガス・巨大衝突】・初期進化 1

(座長：濱野 景子，黒川 宏之)

E1　13:40　原始惑星系円盤において鉛直方向に分布する小粒子の周惑星円盤への降着
本間 徹(神戸大)

E2　13:52　成長途中の原始惑星による微惑星の獲得：円盤ギャップ形成に伴う供給律速過程の影響　柴田 翔(東大)

E3　14:04　惑星近傍の原始惑星系円盤ガス流れ場とスーパーアース形成過程への示唆
黒川 宏之(東工大)

E4　14:16　衝突・破壊を考慮した惑星形成：惑星成長と乱流の強さ　小林 浩(名大)

E5　14:28　巨大衝突ステージにおける衝突・破壊を考慮した N 体シミュレーション
磯谷 和秀(名大)

F1　14:40　惑星集積時の表層・内部への元素分配と天体衝突による大気散逸を考慮した地球の揮発性元素量進化　櫻庭 遥(東工大)

F2　14:52　水素-水蒸気大気をもった地球型惑星の初期進化　濱野 景子(東工大)

15:04　休憩(10 分)

初期進化 2・系外惑星　(座長：成田 憲保，脇田 茂)

F3　15:14　形成段階にある原始惑星コアへの水素分配の可能性　脇田 茂(東工大)

G1　15:26　表層水分布を考慮した地球型水惑星における暴走温室限界　小玉 貴則(東大)

G2　15:38　M 型星まわりの潮汐固定惑星の habitability に G 型伴星が与える影響について　奥谷 彩香(東工大)

G3　15:50　系外惑星大気における鉱物雲形成：凝縮成長による雲粒のサイズ分布計算
関 航佑(東工大)

G4　16:02　北天で発見された重力マイクロレンズ惑星イベントのフォローアップ観測
福井 暁彦(国立天文台)

G5　16:14　4 色同時撮像カメラ MuSCAT2 の初期成果と TESS に向けた MuSCAT3 開発の展望　成田 憲保(東大)

16:26　休憩(14 分)

16:40　**日本惑星科学会総会**

17:40 **最優秀研究者賞受賞講演**
(座長：千秋 博紀)
固体惑星物理学における諸問題
鎌田 俊一(北大)
18:30 会場移動
18:45 懇親会

---

10 月 19 日(金)

はやぶさ 2 (座長：嶌生 有理，諸田 智克)

H1 8:50 はやぶさ 2 によるリュウグウ観測の概観
渡邊 誠一郎(名大)

H2 9:02 はやぶさ 2 探査機の観測に基づく小惑星リュウグウの形状 平田 成(会津大)

H3 9:14 小惑星 Ryugu のクレータサイズ頻度分布と表面年代 諸田 智克(名大)

H4 9:26 小惑星リュウグウの岩塊サイズ分布の初期解析結果 道上 達広(近畿大)

H5 9:38 リュウグウの画像テクスチャの解析によるサブピクセル粒子数密度の推定
田辺 直也(東大)

H6 9:50 はやぶさ 2 の着陸地点選定に向けた撮像模擬実験結果のリュウグウ撮像画像への適用 諸井 圭市(立教大)

H7 10:02 はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ(TIR)による Ryugu の初期観測 田中 智(JAXA)

H8 10:14 はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR が示す小惑星 Ryugu 熱物性の地域的多様性
嶌生 有理(JAXA)

10:26 休憩(10 分)

小惑星 (座長：浦川 聖太郎，臼井 文彦)

I1 10:36 赤外線天文衛星「あかり」近赤外線分光観測による小惑星の含水鉱物探査
臼井 文彦(神戸大)

I2 10:48 地球近傍小惑星(1566) Icarus と 2007 MK6 の分光観測：分裂の証拠と対応隕石種の推定 船橋 和博(日大)

I3 11:00 ふたご座流星群母天体として知られる分裂候補地球近傍小惑星(3200)Phaethon の分光観測 加藤 遼(日大)

I4 11:12 はやぶさ 2 のバックアップ天体捜索の為の観測：近地球小惑星の物理特性
長谷川 直(JAXA)

I5 11:24 地球接近天体 2012 TC4 の可視近赤外観測: 木曽広視野カメラ「Tomo-e Gozen」を用いた高時間分解ライトカーブ
浦川 聖太郎(日本スペースガード協会)

I6 11:36 MU レーダーと Tomo-e Gozen 及び高感度カメラを用いた微光流星の同時観測と太陽輻射圧を考慮したダストの軌道進化計算
弘田 旭(日大)

I7 11:48 制限三体問題における平面周期軌道の軌道面外方向の不安定性に基づく軌道傾斜角の励起 大島 健太(国立天文台)

12:00 昼食

太陽系・アストロバイオロジー
(座長：古川 善博，晴山 慎)

J1 13:00 水星全球スペクトル区分図と化学組成
晴山 慎(聖マリアンナ医科大)

J2 13:12 小天体における線状構造の特徴と分類
菊地 紘(東大)

J3 13:24 土星環粒子に働く熱応力と粒径進化
平田 直之(神戸大)

J4 13:36 土星衛星エンセラダス熱進化におけるクラスレートハイドレートの役割
西谷 隆介(阪大)

J5 13:48 ALMA による Titan 大気組成時空間変動と同位体比の観測的解明
飯野 孝浩(東京農工大)

J6 14:00 星間氷環境下での複雑態アミノ酸前駆体の生成とその宇宙環境下での安定性
小林 憲正(横浜国大)

J7 14:12 始原的隕石中の糖の探索
古川 善博(東北大)

14:24 休憩(10 分)

衝突・実験 (座長：末次 竜，黒崎 健二)

K1 14:34 望遠鏡観測と超高速衝突実験による月面衝突閃光の研究 布施 綾太(日大)

K2 14:46 高空隙率シリカ層への衝突実験とクレータリングにおける空隙率の効果
石黒 琢也(神戸大)

K3 14:58 巨大氷惑星の衝突現象における自転速度の影響 黒崎 健二(名大)

K4 15:10 巨大衝突による木星の低密度なコア形成
堀 安範(アストロバイオロジーセンター)

K5　15:22　固体天体衝突シミュレーションによる蒸発の理論的研究　伊藤 広大(名大)

K6　15:34　物質強度を考慮した微惑星の衝突破壊
末次 竜(産業医科大)

K7　15:46　鉱物および隕石粒子の摩耗実験：イトカワ表面でのレゴリス粒子の形状変化
土山 明(京大)

15:58　休憩(10 分)

将来計画・機器開発（座長：石橋 高，佐伯 和人）

L1　16:08　SLIM マルチバンドカメラ観測運用検討のための観測シミュレーション
佐伯 和人(阪大)

L2　16:20　月極域における水氷の資源利用可能性評価のための探査　星野 健(JAXA)

L3　16:32　月サンプルリターン計画 HERACLES の紹介　唐牛 譲(JAXA)

L4　16:44　火星生命探査のための生命探査顕微鏡の開発　山岸 明彦(東京薬科大)

L5　16:56　火星における hot oxygen 密度測定に向けた探査機搭載用質量分析装置のイオン化源の開発　沖津 由尚(東大)

L6　17:08　DESTINY+ミッションにおける小惑星 3200 Phaethon のフライバイ撮像観測
石橋 高(千葉工業大)

L7　17:20　JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計(GALA) － 概要および日本チーム開発状況　塩谷 圭吾(JAXA)

L8　17:32　放射光 4 次元 CT による、コンドリュール形成過程の高分解能その場観察の手法開発と現状
上椙 真之(高輝度光科学研究センター)

17:44　終了　散会

《ポスター発表プログラム》

ポスター展示は 10 月 17 日 12：00 から 10 月 19 日 12：00 まで

○ 最優秀発表賞応募ポスター　コアタイム　17 日(17：00－18：30)

PS1　雲粒の空隙率進化によるスーパーアースの高層雲形成と大気組成への示唆　大野 和正(東工大)

PS2　ガリレオ衛星の新しい形成シナリオ
芝池 諭人(東工大)

PS3　原始惑星系円盤中のダストの乱流拡散の再定式化と散逸が駆動する不安定性による多重リング形成　冨永 遼佑(名大)

PS4　小惑星 Ryugu のクレーター形状解析と内部密度分布構造の推定　金丸 仁明(阪大)

PS5　衝突数値実験による小惑星形状変化過程の解明: 直径 100 km 以上の「いびつな」小惑星の衝突史への制限　杉浦 圭祐(名大)

PS6　火星衛星の捕獲起源論　―回転原始大気による微惑星捕獲と衛星軌道進化―　松岡 亮(北大)

PS7　火星 Recurrent Slope Lineae の地球アナログフィールドの発見：モンゴル南西部、半乾燥地域急斜面上の筋模様　中村 麻也(東工大)

PS8　微惑星衝突破壊モデルを用いた微惑星系の N 体計算　石城 陽太(東大)

PS9　北大 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた地球近傍小惑星(422699)，2012 TC4，Phaethon の偏光観測
岡崎 良(北海道教育大)

PS10　小惑星ベスタの表層地殻における変成史：玄武岩質ユークライトからの考察
金丸 礼(総研大)

○ 一般ポスター　コアタイム　17 日(奇数番号 17:00－18:00)　18 日(偶数番号 12:30－13:30)

A　火星

P1　火星探査機 MAVEN の観測と多成分 MHD シミュレーションに基づく火星からの電離大気散逸機構に関する研究　関 華奈子(東大)

P2　火星の Coprates Catena の地下構造
野口 里奈(JAXA)

P3　古火星における温室効果気体リサーチ：過酸化水素の影響　伊藤 祐一(北大)

P4　還元型原始火星大気の流体力学的散逸
吉田 辰哉(北大)

P5　炭素流出が火星大気組成進化に及ぼす影響
八木 亮輔(東北大)

P6　火星古気候モデルへの導入に向けた積雲対流スキームの定量的評価　鳥海 克成(東北大)

P7　高解像度火星境界層シミュレーションのデータを用いたダスト巻き上げ過程に関する解析
村橋 究理基(北大)

P8　地球化改造した火星の気候シミュレーション
はしもと じょーじ(岡山大)

B　月

P9　月レーダサウンダー(LRS)を用いた月の地下空洞の探索　郭 哲也(東海大)

P10　海洋潮汐波の浅水挙動解析に基づく月の潮汐進化過程の考察　内田 菜月(山梨大)

D　形成【コンドリュール・微惑星】

P11　シリケイトメルトと水の混合時に放出される液滴のサイズ　城野 信一(名大)

E　形成【円盤ガス・巨大衝突】

P12　気液平衡原始月円盤からの月形成に関する長時間 N 体計算　佐々木 貴教(京大)

P13　タンデム惑星形成論から導かれる地球質量の天体形成　二村 徳宏(日本スペースガード協会)

P14　ガス惑星近傍へのガスの流れと温度構造
藤井 悠里(名大)

P15　ガス抵抗によって捕獲された微惑星の軌道進化
末次 竜(産業医科大)

F　初期進化

P16　集積末期の地球マントルの酸化還元状態：深いマグマオーシャンにおける第二鉄生成
村瀬 祐太郎(北大)

G　系外惑星

P17　短周期スーパーアース形成：円盤表層降着流による大気獲得への制限
堀 安範(アストロバイオロジーセンター)

P18　ホットジュピターにおけるスリングショットモデル適用妥当性の検証　紀藤 准弥(九大)

P19　原始惑星系円盤におけるギャップをもつ巨大惑星の動径軌道進化　金川 和弘(東大)

P20　原始惑星系円盤における周連星惑星の軌道進化と安定性　山中 陽裕(京大)

P21　系外巨大惑星の観測分布を説明する軌道移動の減速　井田 茂(東工大)

P22　短周期ガス惑星からの大気散逸とその観測的検証について　田中 佑希(東工大)

P23　双曲線軌道小天体の起源
樋口 有理可(国立天文台)

H　はやぶさ２

P24　小惑星 Ryugu の形状モデル作成
田中 小百合(神戸大)

P25　画像データを用いた小惑星(162173)リュウグウの形状モデル作成及び物理的諸量の推定
西川 直輝(神戸大)

P26　小惑星リュウグウにおけるボルダーの空間分布の特徴について　本田 親寿(会津大)

P27　はやぶさ２搭載可視分光カメラの感度校正
石田 茉莉花(立教大)

P28　162173 表面の明るさと色の変化：宇宙風化、熱疲労、物質移動　佐々木 晶(阪大)

P29　凸凹表面の熱進化計算ーはやぶさ２TIR への応用
千秋 博紀(千葉工大)

P30　はやぶさ 2/LIDAR 測距データを用いた着陸点選定のための探査機軌道改良
松本 晃治(国立天文台)

P31　JAXA 地球外物質研究グループによる太陽系探査活動：「はやぶさ２」試料受入準備等の最新状況レポート　岡田 達明(JAXA)

I　小惑星

P32　木曽広視野カメラ Tomo-e Gozen と重ね合わせ法による高速移動 NEO サーベイ観測計画
奥村 真一郎(日本スペースガード協会)

P33　「あかり」遠赤外線全天画像がとらえた小惑星ダストバンドの形成過程　大坪 貴文(JAXA)

P34　メインベルトおよび地球近傍小惑星のアルベドと可視近赤外反射スペクトルの関係
洪 鵬(千葉工大)

J　太陽系・アストロバイオロジー

P35　国際宇宙ステーション搭載シリカエアロゲルで捕獲された微粒子の高速衝突トラックの３次元形状
西 瑞穂(京大)

P36　国際宇宙ステーションからの長期流星観測プロジェクト「メテオ」の概要と観測状況
荒井 朋子(千葉工大)

P37　火成活動マントル湧昇流フィードバックの二つの型　小河 正基(東大)

P38　風成砂丘から探るパンゲア超大陸時代の地表風系： 火星とのアナロジー　庄崎 弘基(高知大)

P39　冥王星表面の氷の昇華と凝結による反射率の変化
松井 弥志(阪大)

P40　冥王星地下海の安定性と進化
木村 淳(阪大)

K　衝突・実験

P41　フォボスおよび炭素質小惑星のレゴリス模擬土壌の作成　宮本 英昭(東大)

P42　月極域探査に向けたレゴリスシミュラントの岩石比誘電率測定　小林 真輝人(東大)

P43　粉体流における凝集体成長過程のフラッシュ X 線観測　長足 友哉(神戸大)

P44　硫黄に富んだ環境下での宇宙風化の模擬実験と分光計測　田中 宏和(阪大)

P45　海洋への隕石落下による津波の定量的な評価に向けて　近貞 直孝(防災科学技術研究所)

P46　高空隙率焼結体の高速度衝突破壊実験
村上 雄一(神戸大)

P47　多孔質小天体模擬標的の衝突点下の密度解析
山崎 祐太朗(神戸大)

P48　クレーターサイズへの衝突履歴効果：多孔質標的での衝突実験　横山 康喜(神戸大)

P49　多孔質天体上に形成する衝突クレーター周囲の衝突残留温度に関する実験的研究
田澤 拓(神戸大)

P50　多孔質氷への高速度クレーター形成実験：クレーターサイズスケール則に対する衝突溶融の影響
宮野 加菜(神戸大)

P51　多孔質氷の圧縮変形における圧密速度と空隙率の関係：氷微惑星の密度構造への応用
矢部 みなみ(神戸大)

P52　異なる粒径をもつ粒子の混合層へのクレーター形成実験：小惑星 Ryugu 上のクレーター地形との比較　保井 みなみ(神戸大)

P53　低強度粗粒レゴリスを用いた衝突実験：クレータースケール則と衝突励起振動に対する粒子強度の影響　山本 裕也(神戸大)

P54　多孔質氷球の反発係数の空隙率依存性：土星リング粒子の衝突過程に関する実験的研究
豊田 優佳里(神戸大)

P55　粉体実験及び N 体計算による放出物カーテン中での粒子衝突の研究　岩澤 聖徳(東工大)

P56　iSALE に基づいた月の盆地の衝突条件
石山 謙(JAXA)

L　将来計画・機器開発

P57　SLIM マルチバンドカメラのオートフォーカス機能開発　佐藤 広幸(JAXA)

P58　SLIM-MBC 搭載 InGaAs 検出器の放射線耐性評価データに基づく観測性能検討
仲内 悠祐(JAXA)

P59　月ペネトレータ探査 APPROACH ミッション:公募型小型ミッションの選定結果と今後の方針について　田中 智(JAXA)

P60　月サンプルリターンミッション“HERACLES”の着陸地点検討結果報告 ～HERACLES が目指す月科学～　長岡 央(JAXA)

P61　月サンプルリターンミッション"HERACLES"の着陸地点検討結果報告～着陸候補地点の紹介～
山本 聡(JSS)

P62　FDTD 電磁界シミュレーションに基づくレーダによる月表層の氷検出可能性の検討
熊本 篤志(東北大)

P63　月火星の地下空洞直接探査 UZUME 計画　その 3　春山 純一(JAXA)

P64　火星衛星探査計画 MMX とそのサイエンス 2018
倉本 圭(北大)

P65　火星衛星探査計画における望遠カメラ(TENGOO)性能評価装置の開発　加藤 博基(立教大)

P66　撮像データを用いた DePhine ミッションにおける Phobos フライバイ軌道の復元のシミュレーション　山本 圭香(国立天文台)

P67　DESTINY+によるふたご座流星群母天体 Phaethon の高速フライバイとダストその場分析
荒井 朋子(千葉工大)

P68　木星トロヤ群探査 OKEANOS の現状
岡田 達明(JAXA)

P69　小惑星探査計画 OKEANOS：その場質量分析機器開発の現状　伊藤 元雄(JAMSTEC)

P70　太陽風を利用した周回軌道での小天体表面同位体質量分析手法の開発　横田 勝一郎(阪大)

M　その他

P71　月の海が常に地球を向く真の理由,　マルチインパクト仮説を用いて地球と月の起源 2014 U06-P24(1)から進化の Abduction で検証.
種子 彰(SEED SCIENCE Labo.)

P72　起源仮説の検証は，進化の結果を利用したアブダクションで検証可能
種子 彰(SEED SCIENCE Labo.)

雲粒の空隙率進化による スーパーアースの高層雲形成と大気組成への示唆

○大野和正[1]、奥住聡[1]、田崎亮[2]
[1]東京工業大学　[2]東北大学

惑星の大気組成は、惑星の形成・進化過程を反映していると考えられており、観測を通じてこれを知ることはその惑星の起源を明らかにする上で非常に重要である。近年、太陽系外惑星の大気を探るため、多波長トランジット観測を通じた系外惑星大気の透過光スペクトルの測定が盛んに行われている。しかし、透過光スペクトルの解釈において、系外惑星大気中の雲の存在が大きな問題となっている。大気高層が雲に覆われるような系外惑星では、大気組成の手がかりとなる大気分子の吸収線を雲が弱めてしまい、透過光から大気組成を直接知ることが困難となってしまうのである。特に、スーパーアースと呼ばれる比較的小型の系外惑星は、その半数以上が大気吸収の特徴を持たない透過光スペクトルを示しており、高層の雲もしくは靄によるものである可能性が示唆されている(e.g., Crossfield & Kreidberg 2017)。

このような“曇った惑星”から大気の情報を引き出す 1 つの方法は、系外惑星の雲の形成機構を理論的に理解し、どのような大気条件であれば高層雲が形成されるかを明らかにすることである。しかし、従来の理論モデルが推定する雲の高度は観測が示唆する高度より遥かに低いという問題点があり(Ohno & Okuzumi 2018、Gao & Benneke 2018)、系外惑星における雲の形成過程が十分に理解されているとは言えない。

我々は、系外惑星における高層雲の存在を説明するため、雲を構成する粒子が雪片のような高い空隙率を持つクラスター(アグリゲイト)であるという説を提唱する。観測可能な系外惑星の多くは非常に高温のため、雲の構成物質は固体の鉱物であると考えられており、これらは衝突合体を経てアグリゲイトを形成しうる。我々は、雲粒の鉛直輸送、成長、空隙率進化を同時に計算することで、粒子の空隙率進化が雲の空間・光学構造に与える影響を調べた。その結果、雲粒の内部密度は物質密度より数桁低くなり、従来の理論計算の推定より遥か上空まで雲粒が輸送されうることが分かった。

また、得られた雲の鉛直構造から大気透過光スペクトルの理論予測を行い、雲の存在が示唆されるスーパーアースの観測スペクトルとの比較を行った。その結果、重元素の濃度が太陽組成の 100 倍以上という非常に重元素に富む大気を考えると、理論スペクトルが観測をよく説明することが分かった。このような重元素に富む大気は、惑星形成時の降着物質の情報を反映している可能性があり、スーパーアースの形成過程を制約する手がかりとなるかもしれない。

ガリレオ衛星の新しい形成シナリオ
A new formation scenario of Galilean satellites

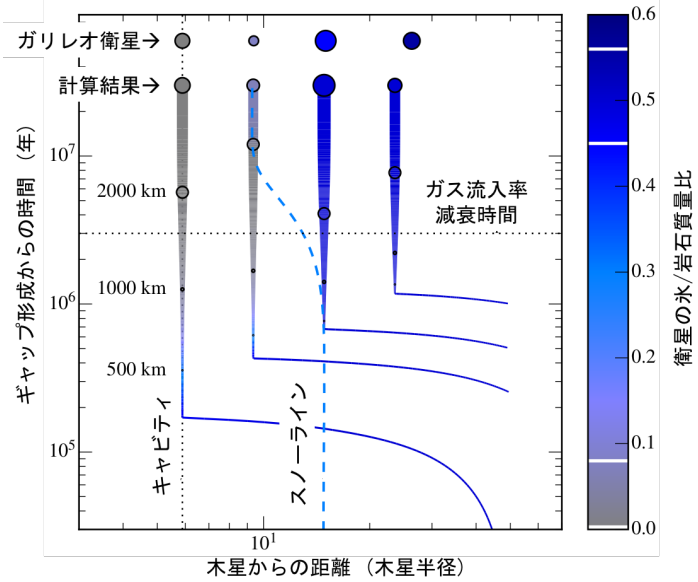
○芝池諭人[1], Chris W. Ormel[2], 井田茂[3], 奥住聡[1], 佐々木貴教[4]

1. 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系, 2. アムステルダム大学 Anton Pannekoek Institute,
3. 東京工業大学 地球生命研究所, 4. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室

木星の四つの巨大衛星(ガリレオ衛星)は，周惑星円盤内で形成されたと考えられている(e.g. Canup and Ward 2006)．しかし，従来のシナリオに必要な微衛星が形成されるためには，円盤に非現実的な量のダストが流入する必要があり，特殊な状況を除けば，cm-m サイズの粒子(ペブル)まで成長した段階で中心惑星へと落下してしまう(e.g., Shibaike et al. 2017)．一方で，原始惑星系円盤内で形成された微惑星が，周惑星円盤に捕獲された後に衛星へと合体成長した可能性もあるが，この場合も微惑星が多量に存在する必要がある(e.g. Suetsugu and Ohtsuki 2017)．つまり，周惑星円盤に供給される少量の固体物質から効率的に衛星を形成する手段を見つけることが，巨大衛星の形成過程における大きな課題となっている．

我々は，周惑星円盤に捕獲された少数の微惑星がペブルを集積して衛星へと成長する，新しい形成シナリオを構築した．このシナリオでは，円盤へのダスト-ガス流入質量フラックス比が小さくても，長い時間をかけることで衛星が形成される．さらに，ガリレオ衛星の四つの特徴，すなわち，(1)全ての衛星のサイズ; (2)イオ，エウロパ，及びガニメデの，互いに 2:1 の平均運動共鳴に入った軌道; (3)エウロパの少量(~ 8wt%)の氷; そして，(4)カリストのみ未分化の内部構造，がこのシナリオにより同時に説明される(Shibaike et al. in prep.)．

口頭発表では，新たに構築した形成シナリオとその結果，このシナリオの強み，を説明する．ポスター発表では，円盤内のペブルの分布や，衛星の軌道を固定した場合，異なるパラメーターの場合，などを示し，このシナリオの構造を詳細に解説する．



左図: 新しい形成シナリオにおける，ガリレオ衛星の軌道，サイズ，及び氷/岩石質量比の進化．スノーライン位置の進化と，実際のガリレオ衛星も示した．本文に記した特徴(1), (2), (3)が再現されていることが読み取れる．

なお，このシナリオでは，円盤周囲のギャップ構造と，円盤内側のキャビティ構造(位置固定)を，仮定している．

(Shibaike et al. in prep. より改変)

原始惑星系円盤中のダストの乱流拡散の再定式化と散逸が駆動する不安定性による多重リング形成

○ 冨永遼佑[1]，高橋実道[2,3]，犬塚修一郎[1]

[1] 名古屋大学理学研究科，[2] 工学院大学，[3] 国立天文台

近年のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計による原始惑星系円盤の高解像度観測によって、HL Tau をはじめとする様々な天体に多重のリング構造が発見された (e.g., ALMA Partnership et al. 2015)。観測された多重リング構造は惑星形成との関連が示唆されており、非常に注目を集めている。多重リング構造の形成機構の候補のひとつとして永年重力不安定性によるものが考えられている (Takahashi & Inutsuka 2014, 2016)。永年重力不安定性はダストとガスの間の摩擦によって自己重力的に安定なガス円盤でも成長し、ダストを動径方向に集積する。この不安定性はもともと微惑星形成機構やデブリ円盤の起源として提案された現象である (e.g., Youdin 2011, Tominaga et al. 2018)。永年重力不安定性の成長過程を議論する上で重要な素過程のひとつにダストの乱流拡散がある。この拡散過程は永年重力不安定性を安定化する働きをしダスト集積を妨げるため、観測されたリング構造の形成可能性を議論する上で乱流拡散を取り入れた解析を行うことが重要である。先行研究ではダストの連続の式に拡散項を加えることで乱流拡散をモデル化していた。しかしこのモデルには、円盤の全角運動量が保存しないという理論的な不備がある。角運動量の非保存は特にダストの運動に影響するため、ダストの集積過程を議論するためにはまずこの問題を解決する必要がある。

そこで本研究では平均場近似に基づき、円盤の全角運動量が保存しつつ摩擦が強い場合のダストの拡散過程を適切に記述する現象論的な方程式系を新たに定式化した。この方程式系を用い局所線形解析を行った結果、永年重力不安定性は指数関数的に単調成長するモードであることがわかった。これはパラメータによっては永年重力不安定性が過安定モードとして現れていた先行研究とは本質的に異なる結果であり、この過安定性は角運動量保存が破れていることに起因した非物理的な性質であることがわかった。さらにガスの乱流粘性を考慮した場合には永年重力不安定性とは異なるダスト-ガス混合系の新しい不安定性 (two-component viscous gravitational instability, TVGI) が現れることを発見した。TVGI はダスト-ガス間の摩擦とガスの粘性によって、ダストとガスそれぞれのコリオリ力が弱められることで成長する不安定性であり、永年重力不安定性と同様にダストの集積を引き起こす不安定性である。このことは TVGI が原始惑星系円盤における多重リング形成機構となり得ることを示唆している。これを受けて本研究では局所線形解析に基づいて HL Tau 円盤に観測された多重リング構造が TVGI によって形成可能かどうかについても調べた。その結果、ダストサイズが 3mm、乱流強度 α が 3×10^{-4} の場合半径 50au より外側では TVGI が成長し、多重リングを形成し得ることがわかった。

小惑星 Ryugu のクレーター形状解析と内部密度分布構造の推定

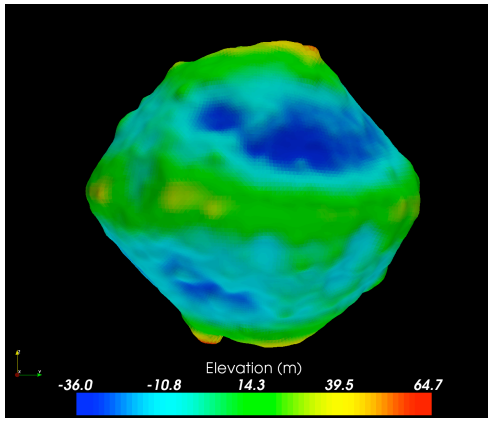
○金丸 仁明[1]、佐々木 晶[1]、Mark Wieczorek[2]、諸田 智克[3]、長 勇一郎[4]

[1]大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、[2]Observatoire de la Côte d'Azur、[3]名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻、[4]東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

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、光学航法カメラ（Optical Navigation Camera; ONC）による Ryugu 全球の撮像を開始した。

我々は、ONC 画像と三次元形状モデルを用いて、クレーターの同定と形状解析を行った。我々の解析チームでは、8 月 3 日現在、50 以上のクレーター候補地形を同定している。直径 100 m を越える主要なクレーターの深さ／直径比は、0.10 ~ 0.16 ほどであり、小惑星上で観測される一般的なクレーターのそれと調和的である。同定されたクレーターの中には、深さ／直径比の小さなクレーターも存在している。Ryugu 表層における物質移動を支持する間接的な証拠として期待できる。

一方、３次元形状モデルの内部に均質な密度分布を仮定することで、小惑星の重力場を計算することが可能である（Werner & Scheeres, 1997）。Ryugu の形状モデルを用いて、小惑星表面における重力ポテンシャル、重力加速度、傾斜、標高を計算した。Ryugu は現在 7.6 時間の周期で自転している。自転による遠心力を加味して重力場計算を行うと、相対的に中緯度域が低地、極域と赤道面が高地となる。高速で自転する小惑星は、しばしば赤道域にリッジをもつことが知られている。過去の Ryugu が現在よりも高速に自転していたとして、赤道リッジの成因を説明するためには、3~4 時間程度の短い自転周期を必要とする。



小惑星 Ryugu の形成過程を知るためには、上記の表層進化過程に加えて、内部構造を制約する必要がある。母天体の衝突破片が集積して形成した小惑星や彗星は、内部に不均質な密度分布構造をもつ可能性がある（Jutzi & Benz, 2017）。我々は、小惑星内部の密度不均質を考慮した重力場計算と、表面地形の緩和過程に着目した内部密度分布構造の推定手法を開発してきた（ポテンシャル分散最小化法、Kanamaru & Sasaki, in press.）。本手法を Ryugu に適用して、可能性のある密度分布構造の検証を行った。

衝突数値実験による小惑星形状変化過程の解明：直径 100 km 以上の「いびつな」小惑星の衝突史への制限

○杉浦圭祐[1]，小林浩[1]，犬塚修一郎[1]
[1]名古屋大学大学院理学研究科

小惑星イトカワの形状のように多くの小惑星は不規則な形状をしており，直径 100 km 以上の小惑星でさえ 10%程度が短軸/長軸の比が 0.6 以下の形状を持つ．このような不規則な形状は小惑星どうしの衝突に伴う破壊や合体で形成された可能性が高く，衝突条件と形成される形状に関係を付けることで，形状から過去の衝突環境や小惑星の形成年代を制限できると期待される．

そこで，我々が開発した弾性体 SPH 法 (Libersky and Petchek 1991) に自己重力，岩石のひび割れ破壊 (Benz and Asphaug 1995)，粉々に砕けた岩石間に生じる摩擦 (Jutzi 2015) の効果を導入した計算コードを使用し，形状が粉体の摩擦と自己重力で決まるような直径 100 km の小惑星どうしの衝突計算を行う．我々の計算コードは FDPS (Iwasawa et al. 2015, 2016) を用いて並列化されており，高解像度の計算も可能である．

まず衝突速度 $v_{\rm imp}$ と衝突角度 $\theta_{\rm imp}$ を様々に変えた場合にできる形状を大まかに調べるため，SPH 粒子を 10 万体だけ使用して計算を行った．$v_{\rm imp}$ を 50 m/s から 400 m/s まで 25 m/s ごとに，$\theta_{\rm imp}$ を 5°から 45°まで 5°ごとに変化させて合計 135 通りの計算を実行し，最大天体の形状を調べた．その結果，図 1 に示すように最大天体質量 $M_{\rm lr}$ とターゲット天体質量 $M_{\rm t}$ の比が 0.4 より大きい破壊的ではない場合に，様々な形状の最大天体が形成された．さらに，中間軸 b/長軸 a の比が 0.2 程度の極めて細長い形状や短軸 c/長軸 a の比が 0.4 程度の極めて平たい形状も形成されることがわかった．

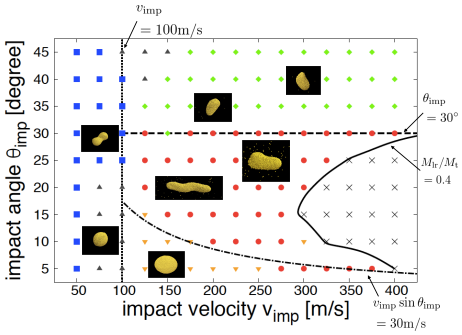


図 1: 衝突条件と形成された最大天体の形状の関係を，典型的な形状の図とともに表したもの．衝突角度は 0°が正面衝突である．青い四角は頭が 2 つある形状，灰の三角は球形状，オレンジの逆三角は平たい形状，赤い丸は細長い形状，緑の菱形は半球形状を表す．四本の線は細長い形状とその他を大まかに分ける線である．実線の右側は破壊の度合いが大きく形状を調べなかった領域を表す．

次に破壊的な場合にできる小さい集積天体の形状分布を調べるために，$v_{\rm imp} = 350$ m/s, $\theta_{\rm imp} = 15°$の大規模破壊の衝突計算を 400 万体もの SPH 粒子を使用して実行した．衝突破壊と自己重力再集積によって多数の小さな集積天体が形成されるが，図 2 に示すように主に丸い形状と頭が二つあるような形状が形成された．しかしながら，$c/a < 0.4$ になるような極めていびつな形状は調べた 68 天体中ひとつも形成されなかった．

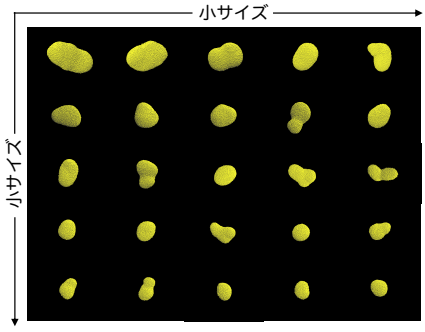


図 2: 高解像度大規模破壊の衝突計算で形成された，大きいものから 25 個の集積天体の形状．左上ほど大きいものを表す．

現在の小惑星帯で起きる平均衝突速度 5 km/s の衝突は主に大規模破壊を引き起こすため，極めていびつな形状の形成は難しい．一方で，木星形成前に頻繁に起こったと考えられる質量が近い天体同士の低速度 (< km/s) の衝突では極めていびつな形状を含む様々な形状が形成される．そのため (216) Kleopatra (直径 $D \approx 120$ km, $c/a \approx 0.3$) のような極めていびつな形状は木星形成前の環境で形成された可能性が高い．DAMIT データベース (Ďurech et al. 2010) によると，$D > 100$ km の小惑星 104 個のうち 10%以上の 11 個が $c/a < 0.6$ のいびつな形状を持つが，大規模破壊で形成された小惑星族に属する 10 個の小惑星のうちで $c/a < 0.6$ の形状を持つものはいない．これはいびつな形状が最近の大規模破壊では形成されにくいということを示しており，その形状が始原的であることを示唆している．またこの示唆は $D > 100$ km の小惑星の衝突破壊時間が太陽系年齢よりもずっと長いという見積もりと整合的である．

火星衛星の捕獲起源論
—回転原始大気による微惑星捕獲と衛星軌道進化—

○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，フォボスとダイモスの起源説の一つに，捕獲説がある．実際，火星の衛星の反射スペクトルや平均密度は始原的な炭素質小惑星と類似しており，微惑星を捕獲したというシナリオを支持するものとなっている．

しかしながら，現在の火星衛星の軌道は真円に近く，火星の赤道面に沿ったものとなっており，捕獲のみではこの軌道の特徴を説明することは困難である．火星衛星の巨大衝突説 (*e.g.* Rosenblatt *et al.* 2016) はこの低離心率・低傾斜角の軌道特徴を説明することに成功している一方，衛星形成時に高温を経験するため，始原的な炭素質小惑星に類似した組成を持つ衛星を作ることは難しい．

低離心率・低傾斜角という火星衛星の軌道特徴を捕獲説の枠組みで説明する試みとして，捕獲後の軌道エネルギーの散逸過程が考えられてきた．このエネルギー散逸の媒体の一つとして，星雲ガスが重力束縛して生じた原始火星大気が提唱されている (Hunten 1979; Sasaki 1990)．しかしながら，これらの先行研究では静止大気が想定されており，離心率を減衰させることはできるものの傾斜角の減衰を引き起こすことはできない．また，衛星と静止大気との間には常に大きな速度差が生じ，エネルギー散逸が持続的に起きてしまう．結果として静止大気による抗力は衛星落下を招き，衛星形成を阻害する．そこで本研究では，衛星落下を抑えつつ離心率・傾斜角の減衰が起こると期待される，回転する原始火星大気に着目した．このような回転原始火星大気は，星雲ガスの角運動量保存的な重力束縛や，自転する火星からの角運動量輸送によって生じる可能性がある．

本研究では回転大気モデルとして，静止軌道よりも内側で火星の自転と同期回転し，外側では Kepler 回転する速度構造を持つ等温大気を仮定し，Hill 半径で原始太陽系星雲と接続する境界条件の下でその密度場を解析的に求めた．ここで得られた密度場と速度場が及ぼす抗力を考慮した軌道計算を行い，回転大気の下での捕獲衛星の形成と軌道進化を調べた．

本研究では，捕獲過程を見るための数値実験と，衛星の軌道進化を見るための数値実験を行った．捕獲過程を見るための数値実験では，Hill 圏の外部から侵入した天体を考え，回転大気からの抗力を考慮した制限 3 体軌道計算を行った．捕獲実験からは，順行衛星として捕獲されるケースが火星と直接衝突する場合と比較してさほど珍しくないことを見出した一方で，逆行衛星として捕獲される例も多く認められた．しかしながら，このような逆行衛星は回転大気から向かい風を受け，大きなエネルギー散逸を経験する．回転大気からの抗力を受けて軌道進化する衛星を考慮した 2 体軌道計算と解析計算からは，逆行衛星は 1,000 年以下のタイムスケールで速やかに火星へと落下することがわかった．このことは，現在の火星系に逆行衛星が存在しない理由を説明するかもしれない．対して，順行衛星の軌道縮小は，捕獲後の潮汐進化を考慮したフォボスの初期軌道半径では少なくとも数十万年以上のタイムスケールでゆっくりと起こり，衛星の落下が抑制される．また，順行衛星は原始太陽系星雲の寿命 (〜数千万年) と比較して速やかに真円化 (〜数年) と傾斜角減衰 (〜数十万年) を達成する．さらに，捕獲時点での軌道半径はその後の潮汐進化を考慮した場合の火星の衛星の初期軌道半径をカバーしている．したがって，回転原始火星大気による捕獲と衛星軌道進化は，現在の火星衛星の低離心率・低傾斜角の軌道特徴を説明できることがわかった．

火星 Recurrent Slope Lineae の地球アナログフィールドの発見：モンゴル南西部、半乾燥地域急斜面上の筋模様

○中村 麻也[1,2], 関根 康人[1], 福士 圭介[3], 長谷部 徳子[3], ダバドルジ ジャハナ[4], 高橋 嘉夫[2], 長谷川 精[5]

[1]東京工業大学地球生命研究所, [2]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, [3]金沢大学環日本海域環境研究センター, [4]モンゴル国立大学地理学専攻, [5]高知大学理工学部

現在の火星表層に液体の水が存在するかという問題は、単なる惑星科学上の重要性にとどまらず、地球外生命の探索や有人探査における水資源獲得においても重要な課題である。近年、火星上で Recurrent Slope Lineae (RSL) と呼ばれる、暖かい時期に急斜面に現れて寒い時期に消える細長い筋模様が発見された。この RSL 形成メカニズムには、浅い地下氷の融解(Stillman et al., 2017)や塩の潮解(Dickson et al., 2013)など、液体の水が関与している可能性が示唆されている(McEwen et al., 2014 など)。一方、この RSL は急斜面の重力崩壊で形成されるとする考え(Dundas et al., 2017 など)も提唱されており、RSL の形成メカニズムは未だに明らかでない。RSL 形成要因の解決を阻む大きな障壁は、得られるデータが周回衛星からのリモートセンシング観測のみである点であり、詳細な地質学的・化学的データに基づく議論は行われていない。そのような中、地球上での RSL 類似のアナログフィールドの詳細な地質調査・化学分析を通じて、地球 RSL アナログの形成メカニズムを明らかにし、火星 RSL との類似性・相違性を議論することは大きな重要性を持つ。しかしながら、地球上で RSL のアナログフィールドはこれまでほとんど見つかっておらず、したがってそのような地質的・地球化学的研究例も極めて乏しい。

本研究では、地球上に存在する火星 RSL のアナログフィールドを発見し、その地質調査・サンプル分析の結果を報告する。我々は、衛星画像データベース Google Earth および Digital-Globe 社の衛星画像データを用いて、モンゴル南西部に急斜面上に現れる筋模様を複数発見した。これらの筋模様は、形態的に火星 RSL に類似し、生成と消失が年単位で生じていることから地球 RSL アナログと考えられる。本研究では、発見した地球 RSL アナログを 3 つのタイプに分類し、火星上にもそれぞれ対応する RSL があることを示す。これら発見された地球 RSL アナログは、亜寒帯気候と半乾燥気候の境界に位置し、地下凍土層の夏季の融解に伴い形成した可能性が高い。さらに、本研究では、モンゴル南西部、バヤンホンゴル県オルゴイ湖周辺地域にみられる地球 RSL アナログフィールドの地質調査を行った。調査では、発見した筋模様にそって土壌サンプルを採取し、ドローンによる空撮から三次元地形モデルを構築する。そして、採取したサンプルの鉱物・化学分析を行うことで、筋模様を作る物質の特定とその空間分布を明らかにする。これらの結果をもとに、地球 RSL アナログの形成要因を明らかにするとともに、火星 RSL 形成メカニズムを議論する。

微惑星衝突破壊モデル用いた微惑星系の N 体計算

○石城陽太[1,2]，藤本正樹[2]，小南淳子[3]，牧野淳一郎[4]
[1]東京大学 理学系研究科，[2]宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所，
[3]東京工業大学 地球生命研究所，[4]神戸大学 理学研究科

現在の惑星系形成論の標準的な理論では，惑星は，原始惑星系円盤の中で，微惑星の暴走的成長，寡占的成長を経て形成されると考えられている．この暴走成長段階，寡占成長段階は，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きた(Kokubo & Ida 1996, 1998).

これまで N 体計算は，計算できる粒子数の制限により，惑星系円盤の動径方向の計算領域を広くとることや，微惑星の衝突時に生じる破片の影響を考慮することが困難であった．しかし，最近では，太陽系外惑星の多様な特徴を理解するために，惑星系形成過程における原始惑星の移動を議論することが重要となっており，惑星系円盤の動径方向に広い範囲の N 体計算の必要性が高まっている．また，近年では，原始惑星が周囲の小さな微惑星との相互作用により移動するメカニズム(planetesimal-driven migration, PDM)が提唱されている(Ida et al. 2000)．そのため，このような原始惑星の移動を議論するために，微惑星の破片のような小さな粒子の影響も考慮した N 体計算の重要性が高まっている．

本研究では，計算領域を惑星系円盤動径方向に広めに設定し，微惑星同士の衝突破壊モデルを導入した微惑星系の暴走成長段階の N 体計算を行う．そのために，FDPS(Iwasawa et al. 2016)や， Particle-Particle Particle-Tree 法(PPPT 法，Oshino et al 2011; Iwasawa et al. 2017)を用いた計算コードの開発を行う．それらのコードを用いて，微惑星の衝突を完全合体と仮定した場合，微惑星の衝突破壊の効果を導入した場合のそれぞれについて，微惑星系の暴走成長段階の N 体計算を行う．

本発表では，Kokubo & Ida (1996)の初期条件を用いて，計算領域を惑星系円盤動径方向に広くとり，微惑星の衝突が完全合体の場合，微惑星の衝突破壊が起こる場合のそれぞれの N 体計算を行う．衝突破壊モデルは，Kominami et al. (2018, in preparation)で用いられるモデルを用いる．その計算結果から，微惑星の破片の効果を考えることで，暴走成長段階の原始惑星の成長過程に変化が生じるのかを調べる．それにより，微惑星の破片の効果を考慮することで，惑星系形成過程の理論にどのような影響があるかを考察する．

北大 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた地球近傍小惑星 (422699), 2012 TC4, Phaethon の偏光観測

○岡崎良[1]，関口朋彦[1]，石黒正晃[2]，内藤博之[3]，浦川聖太郎[4]，今井正尭[5]，大野辰遼[6]
[1]北海道教育大学　[2]ソウル大学　[3]なよろ市立天文台
[4]日本スペースガード協会　[5]産業技術総合研究所　[6]北海道大学

小惑星表面の偏光度の測定は，小惑星表層の状態（アルベド，粒子径，組成:スペクトル型）を知るための有効な手段である。偏光度は太陽位相角(Sun-Asteroid-Observer のなす角)に強く依存する。2017 年，我々は北海道大学 1.6m ピリカ望遠鏡（北海道名寄市）を用いて三つの地球近傍小惑 (422699) 2000 PD3，2012 TC4，(3200) Phaethon の偏光観測を行った。いずれも地球と交差する軌道を持つアポロ型小惑星で，将来的な地球衝突の可能性を秘める。このうち 2012 TC4 は，2017 年 10 月に地球に約 5 万 km の距離まで超接近した。また，ふたご座流星群母天体 Phaethon は不活動彗星核候補であり，探査機計画 DESTINY+の目的天体である。

解析の結果，2000 PD3 の偏光度（図 1）やその傾きから幾何学アルベド p_v=0.22±0.04 が得られ，S 型または Q 型小惑星であることがわかった。これは地球近傍小惑星に多いスペクトルタイプである。2012 TC4 は自転周期が約 0.2 時間と遠心力に対する Spin barrier（自転限界）を越え（Light Curve Database），表層粒子や岩石を保持できないモノリス小惑星であると考えられる。2012 TC4 は C-type に近い偏光度を示し（図 1），岩体小惑星候補の偏光観測は初めて行われ，炭素質から成る岩盤小惑星であれば非常に稀有な存在である。Phaethon は，2016 年の観測(Ito et al., 2018)と同様に 2017 年も小惑星の中では最も高い偏光度を示したが，その値は 2016 年と有意に異なっていた（図 2）。これは Phaethon 表層が地域的に不均一であることを示しており，2017 年 Borisov et al. (2018, astro-ph)の観測でも表面不均一性の結果の報告がなされている。

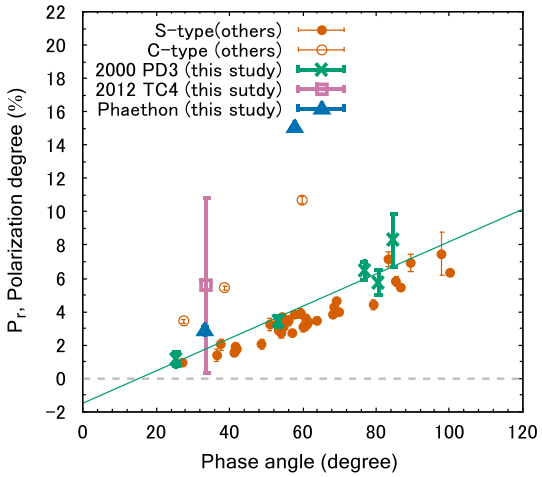


図 1　3 天体と S-type，C-type 小惑星の偏光度の比較
2000 PD3 のプロット位置は S 型を示し，偏光度の傾きからアルベド p_v=0.22±0.04 が求められた。

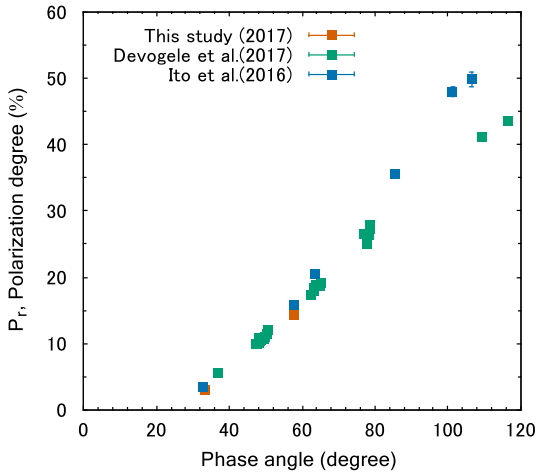


図 2　Phaethon における 2017 年と 2016 年の偏光度の比較
位相角 60° 付近で 2017 年は 14.47±0.13%，2016 年は 15.8±0.1%と有意な差が見られる。

小惑星ベスタの表層地殻における変成史：玄武岩質ユークライトからの考察

○金丸 礼（総研大）、山口 亮（極地研・総研大）、西戸 裕嗣（岡山理大）

ユークライト隕石は、小惑星ベスタを起源に持つと考えられている隕石種の一つである。その中で、玄武岩質ユークライトはベスタの表層地殻に対応する物質と考えられており、地殻の変成史を理解する上で重要な試料である。小惑星ベスタは、DAWN 探査機により、詳細なリモートセンシングデータが得られている。地形データからベスタの表面は、多数のインパクトクレーターで覆われていることが示された。本研究では、玄武岩質ユークライトの内、モノミクト角礫岩ユークライト（Juvinas, Millibillillie, Cachari, A-881747, Y-792510）と角礫化を受けていないユークライト（Y-790266, Y-983366）の組織観察・鉱物組成分析からベスタ地殻の変成史を考察した。

・モノミクト角礫岩ユークライト

Juvinas, Millibillillie, Cachari, Y-792510, A-881747 は、結晶質の岩石片が細粒な砕屑性マトリックスに取り囲まれている組織を示す。Juvinas, Millibillillie には、衝撃メルトから結晶化したと考えられる部分が存在する。先行研究では、これら岩石組織に基づき、Juvinas は２回の衝撃変成作用、３回の熱変成作用（Kanemaru et al. 2017）、Millibillillie は３回の衝撃変成作用、１回の熱変成作用（Yamaguchi et al. 1991）を受けた事が推定されている。Cachari, Y-792510, A-881747 には、結晶質部分と砕屑性マトリックスを切る衝撃溶融脈が観察された。この組織は、角礫化の後に衝撃変成作用を経験した事を示す。

・結晶質（非角礫岩）ユークライト

Y-790266, Y-983366 は、角礫化を受けておらず玄武岩組織を示す。これら試料にも、衝撃溶融脈が観察される。Y-790266 の斜長石は、衝撃溶融脈に沿ってマスケリナイト化している。以上の結果から、角礫化を受けていないユークライトであっても衝撃変成を経験していることが明らかになった。

本研究で観察した試料すべてに衝撃変成作用の痕跡を見出した。これは、ベスタの表層地殻において衝撃変成作用は普遍的なプロセスであることを示唆する。地殻の局所的な領域において、複数回のインパクトイベントと熱変成イベントが起こったことを示し、これまで考えられているよりも複雑な地殻形成史の存在が示唆される。これらの事実は、DAWN 探査機の地形データから推測される表層史と調和的である。今後、ユークライトを構成する結晶質なクラストの詳細な組織記載、バルク組成の分析を行い、潜在的な母岩を推定するとともに、異なるユークライトに含まれる岩片の地質学的な成因的関係を明らかにする。

A1

火星古気候を想定した
全球3次元大気・水圏結合モデリング

○黒田剛史[1,2], 鎌田有紘[1], 鳥海克成[1], 笠羽康正[1], 寺田直樹[1], 中川広務[1]
[1]東北大学大学院理学研究科, [2]情報通信研究機構

火星地表面には多くの流水地形(valley network)が発見されており, 古火星の地表面に水が潤沢に存在したことを示唆している. 実際に火星隕石の同位体比を調べた研究からは, 41億年前の火星には0.5気圧以上の大気が存在し, 平均550m程度の水が表面に存在したことが示唆されている[Kurokawa et al., 2016, 2018]が, 大気大循環モデルでそのような環境を再現することは, 当時の太陽光度が現在の75%と考えられることから二酸化炭素と水蒸気の放射効果のみでは困難とされてきた[Wordsworth et al., 2013など]. 本研究では先行研究で考慮されていなかった液体の海の存在を仮定した上で, そのような環境が再現されるかどうかを大気大循環モデルで計算し, また得られた降水量分布と観測されている流水地形の分布との整合性を調べた.

東大大気海洋研・国立環境研・JAMSTECにより共同開発された大気大循環モデルMIROCの力学コアをベースに火星古気候モデルを構築した. 水平分解能 T21(グリッド間隔約 330km), 鉛直分解能は σ レベルで49層, 上端高度を約90kmに設定し, 現在の75%の太陽光度・96%二酸化炭素大気を仮定して二酸化炭素と水の気体／雲の放射効果を導入, 二酸化炭素の雲生成は現在の火星大気に対応したスキーム[Kuroda et al., 2013]を流用, 水雲生成と降水はMIROC標準の地球大気用積雲対流スキーム(簡略化Arakawa-Schubert法)[Moorthi and Suarez, 1991]と大規模凝結スキーム[Le Treut and Li, 1991] から求めた. また現在の火星地形における標高-2.54kmを海面と定めてそれより低地の部分を海あるいは湖とし, 海面の凍結と海氷の融解, 二酸化炭素／水の降雪・積雪と融解, またこれらに伴う地表面のアルベド・熱慣性の変化を考慮した. さらに地表面における降水と積雪の融解に伴う流量の計算も行った.

地表面気圧0.5～2barについて計算を行ったところ, 0.5barでは先行研究[Forget et al., 2013]でも示唆されている大気コラプスが発生した. また我々の計算結果では先行研究では再現できなかった273Kを上回る地表面温度が地表面気圧1.5bar以上で春から秋にかけて達成され, 冬の間にできる積雪が春に融解する気候を再現した. このような結果が得られた要因, またこのモデルが示した流量分布の観測流水地形との比較についてはまだ検証中の部分もあり, 当日発表の中で議論する予定である.

A2

水循環シミュレーションと室内実験による初期火星 Gale クレータ古湖周辺の水循環および水-岩石反応の復元

○野田夏実[1,2], 関根康人[1], 丹秀也[1,2], 渋谷岳造[3], 玄田英典[1]
[1]東京工業大学地球生命研究所, [2]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻,
[3]海洋研究開発機構

火星では、過去に液体の水が表層付近に存在した地質的・地球化学的証拠が数多く得られてきた。近年の火星着陸探査では、堆積岩の鉱物・化学組成のその場分析が可能となり、当時の水質や大気組成に迫る研究が行われつつある。その代表例が、火星探査車 Curiosity による Gale クレータに残された湖底堆積物の分析である。その結果、約 38~35 億年前の Gale クレータ湖成層に、マグネタイトやヘマタイトといった鉄酸化物やシリカに富む層準が存在することが明らかになった(Hurowitz et al., 2017)。これらの鉄酸化物やシリカは、鉄イオンや溶存シリカに富む地下水あるいは地下熱水がクレータ内に湧昇し、溶存成分が沈殿することで形成した可能性も考えられる。しかしながら、Gale クレータ古湖を維持した水循環において、地下水の寄与の割合やその経験温度、溶存化学組成は全く分かっていない。これらの情報は、Curiosity により得られた探査データを解釈する上で本質的であり、またクレータ古湖への還元剤の供給および生命生存可能性にも関連する重要な事象である。

本研究では、3 次元流体シミュレーションコード（GETFLOWS）を用いて、Gale クレータ古湖周辺の水循環を再現する。GETFLOWS は、陸域における表層および地下の水の流れを定式化した数値シミュレーションコードである。本研究では、まず、Gale クレータ内の汀線の標高に相当する湖水量を再現する降水と蒸発のフラックスから、当時の気候状態を制約する。また、その場合における表層水および地下水の動きを数値解析する。そして、推定される火星地殻の地温勾配から、Gale クレータに供給される水に対する熱水の寄与割合を定量化する。

さらに本研究では、これらの温度条件における水-岩石反応を再現する室内実験も行う。岩石は、Gale クレータ周辺の地殻組成に基づき電気炉によって合成する。実験は、ディクソン型熱水装置およびフロー系テフロン製反応装置を用い、溶存成分とその時間変化を測定する。これらの実験結果に基づき、Gale クレータ古湖に供給された地下水の溶存種組成、特に鉄イオンや溶存シリカ濃度を推定し、Gale クレータ湖成層の鉱物化学組成と比較する。最後に、地下から供給される鉄イオンフラックスと、表層での酸化剤存在量に基づき、Gale クレータ古湖において生命が利用可能なエネルギーについて定量化を行う。

A3

Gale クレーター湖沼堆積物の間隙水水質に記録された古環境

○福士 圭介[1], 関根 康人[2], Robin Wordsworth[3]
[1]金沢大学環日本海域環境研究センター, [2]東京工業大学地球生命研究所,
[3]Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University

過去の火星には広範囲にわたり液体の水が存在していたことを示す証拠が数多く報告されている. しかしながら, 液体の水の存在を可能にした当時の環境条件はよくわかっていない. 液体の水が持つ最もユニークな特徴は, 物質を溶かし込む溶媒として機能する点である. 水に溶ける物質の種類と量(すなわち水質)は, 液体の水を取り巻く周辺地質・大気組成・気候条件などの環境条件に強く依存する. したがって火星に存在していた液体の水の水質を復元できると, 当時の火星表層環境に制約を与えることができるはずである.

初期火星における水-岩石反応とその結果生じる水の化学組成をボトムアップ的な地球化学反応モデリングから復元する試みが報告されている(Fairén et al., 2017; Zolotov and Mironenko, 2007). これまでの地球化学モデリングでは, 初期溶液組成, 初期鉱物組成, 岩石の透水性, 水岩石比さらに一連の化学反応を想定することにより初期火星における水質の復元が行われてきた. しかしながら、モデリングに必要とされる入力パラメータは初期火星では決定することが困難であるものが多く, 推定される水質には避けられない不確かさが伴っていた.

放射性廃棄物の地層処分分野では, 粘土岩中における間隙水の水質を定量的に予測・復元するためのトップダウンアプローチが提案されている(Gaucher et al., 2009). 堆積物中にほぼ普遍的に含まれる粘土鉱物のスメクタイトは, 層間に交換性陽イオンを有している. 層間では接触する溶液との間でイオン交換が瞬時に行われるため, 層間の陽イオン組成は外部溶液の主要陽イオン組成を反映する. 本アプローチでは, 粘土岩に含まれるスメクタイト中の層間陽イオン組成と粘土岩の鉱物組み合わせに基づき, 間隙水の水質を予測・復元することができる.

本研究では、火星探査車 Curiosity が明らかとした Gale クレーターYellowknife Bay 層に認められるスメクタイトの層間陽イオン組成と堆積物の鉱物組み合わせを利用し, 湖沼堆積物の間隙にかつて存在した水の水質復元を行った. その結果, 間隙水は Na-Cl 型で比較的高い塩濃度を示し, pH は中性であったこと, 堆積物-間隙水系は著しい酸化還元非平衡にあったことが推定された. 見積もられた NaCl 濃度から, 過去に存在した Gale クレーター湖は塩湖であり, 周辺環境は温暖・半乾燥気候であったことが推測された. また湖水は 10^4–10^6 年にわたり維持されており, Hesperian 初期における全球的な温暖期に生成していた可能性が示唆された. 酸化還元非平衡と pH の中性化は, 寒冷期に雪氷中に蓄積された大気物質起源の酸化剤が温暖期に融解し堆積物間隙中に拡散することで生じたことが推測され, Hesperian 初期における動的な気候変動が生命への利用可能エネルギーをもたらす引き金となった可能性が示唆された.

A4

火星表層を流れる塩水の流跡パターンの多様性に対する塩析出と粘性の役割

◯今村翔子[1,2]、関根康人[1]，前川優[3]，佐々木猛智[3]

[1]東京工業大学 地球生命研究所、[2]東京大学 大学院理学系研究科、[3]東京大学 総合博物館

現在の乾燥・寒冷な火星表層では、液体の純水は熱力学的に不安定である。しかしながら、高濃度の塩水は凝固点降下により、少なくとも一時的には液体として存在できる可能性がある（McEwen et al. 2011）。実際に探査車 Curiosity の観測から、火星のゲイルクレータにおける温度や湿度の日変化に対して、高濃度の塩水が繰り返し地表に出現・消失する可能性が示唆されている（Martin-Torres et al. 2015）。また、赤道南部の高地に広く塩化物が存在していることから、そのような液体の塩水の形成は、ゲイルクレータのみならず、現在の火星において広く起こりうる（Martin-Torres et al. 2015）。

このような塩水の形成と蒸発によって形成されている可能性のある地形に，近年注目を集める Recurring slope lineae（RSL）がある。RSL は、温暖な夏に急斜面（約 30°）に出現・伸長し、寒冷な冬に退色・消失する、幅が狭く長い暗い地形模様である（McEwen et al. 2011）。RSL に関連した液体の水の直接的な証拠は見つかっていない。しかしながら、RSL と共に水和塩化物・過塩素酸塩が存在することが示唆されていることから、高濃度の塩水がくり返し流れることに関連して RSL が形成している可能性が考えられる（Ojha et al. 2015）。このように塩水が流出と乾燥をくり返す場合、土壌中に塩の析出が生じる。析出する塩化物は土壌中の空隙率を低下させ、浸透率を変化させる。また、高濃度の塩化物の溶存によって、液体の粘性も大きく変化する。しかしながら、塩水の流出と消失のサイクルによって析出する塩化物が、塩水の流動および形態へ与える影響に対する理解は十分でない。そこで本研究では、塩成分の析出と粘性率の違いに着目し、塩水が流出と消失を繰り返す際に残る斜面上の流跡のパターンの多様性を室内実験によって調べた。

実験では、傾斜 30° のガラスビーズの砂層（層厚= 約 3mm; 砂の粒径= 45-250 μm）に、純水、5 mol/L $MgCl_2$ 水溶液、および 50 mol%エチレングリコール水溶液を 15 ml/分で 5 分間流したのち 8 時間以上乾燥させるサイクルを 5 回くりかえした。その結果、析出物の残らない純水およびエチレングリコール水溶液では、粘性の違いに関わらず、流跡は注入口を中心にほぼ同心円状に広がった。そして、乾燥後には流跡は完全に消失し、2 回目以降の液体の注入時にも、1 回目と同様の同心円状に広がる流跡を残すことがわかった。その一方、$MgCl_2$ 水溶液を注入した場合には、2 回目以降の注入でガラスビーズ層の表面を水溶液が流れる表層流が現れ、注入と乾燥のサイクルをくりかえすたびに流跡が斜面下方に向かって細長く伸び、乾燥しても流跡が残ることが明らかになった。$MgCl_2$ 水溶液の流跡が細長く伸長したのは、注入と乾燥をくり返すことにより析出した $MgCl_2$ 塩が、ガラスビーズ層内の空隙を埋めるためだと考えられる。つまり、空隙率が低下することでガラスビーズ内の浸透流を妨げられ、行き場のなくなった $MgCl_2$ 水溶液が表層流となり、重力によって斜面下方向に流れたと考えられる。このことは、塩水のような析出物を持つ液体が、現在の火星で細長い地形模様を形成する可能性を示唆している。本研究では，塩化物の析出によるガラスビーズ粒子中の空隙率の減少について X 線 CT を用いて定量化するとともに，斜面の角度を変化させて流跡を観察することで、火星において表層流が生じる条件について議論する．

A5

天体衝突による火星物質の放出過程について

玄田英典[1], 黒澤耕介[2], 岡本尚也[3]

[1]東京工業大学, [2]千葉工業大学, [3]宇宙航空研究開発機構

火星表面からの物質の放出過程は、火星隕石の起源や、火星衛星への火星物質の降着量を考える上で重要である。火星サイズの惑星から宇宙空間へ物質を射出することは容易ではないが、火星上で起こった天体の高速度衝突によって火星の岩石が宇宙空間へ放出され、地球まで飛来した可能性が高いと考えられている。

地球上で発見されたこれまでの「火星隕石」の岩石的な分析によって、天体衝突時に 30〜50GPa 程度の衝撃圧を経験したことがわかっている。一方で、衝撃物理学の観点からは、天体衝突時に火星の脱出速度（5km/s 以上）を超えるためには、50GPa 以上の強い衝撃波による加速が必要であり、火星隕石の具体的な放出メカニズムは、実は未解明であった。

我々は、２種類の衝突計算コード（iSALE と SPH）を用いて、これまでにない高解像度の衝突数値計算（正面衝突）をすることによって、高衝撃圧を経験した深部の岩石が、浅部(表面付近)の低衝撃圧しか受けない岩石を心太（トコロテン）式に押し出すことで火星脱出速度以上の速度まで効率よく加速する機構（後期加速メカニズム）を発見した。

さらに、我々は、斜め衝突でも同様の機構が働くかどうか調べた。その結果、斜め衝突でも同様の後期加速メカニズムが働くことを確認し、さらに、斜め衝突の方が、トコロテン式に押し出す領域が広くなることから、最大で、正面衝突の場合よりも約 10 倍、低衝撃圧力しか経験していない物質が火星脱出速度を超えて飛び出していくことがわかった。

火星隕石を考える場合は、放出速度が火星の脱出速度（5km/s）を超える必要があるが、火星周回の近くを公転している火星衛星フォボスへの降着量を考えた場合、火星脱出速度よりも低速度（3.8km/s）で良い。この場合、ほとんど衝撃圧力を経験していない、脆い物質（例えば、炭酸塩などの堆積岩）であっても、フォボス表面上に存在している可能性もある。

A6

火星衛星フォボスとデイモスⅡ：火星からの質量輸送について

○兵頭龍樹[1],
黒澤耕介[2], 玄田英典[1], 藤田和央[3]

[1]地球生命研究所・東京工業大学, [2]千葉工業大学 惑星探査研究センター, [3] 宇宙科学研究所

火星衛星の表面には，最近の約1000万年において，小天体が火星に衝突することで飛び出した破片物質が降り積もっていると考えられる．本研究では，このようなプロセスによって輸送される(1)火星由来物質の輸送効率/質量，(2)破片の火星衛星との衝突速度分布，および，(3)衝突位置分布 について議論する．

本研究の内容は、きたるJAXAの火星衛星サンプルリターン（MMX）ミッションにおけるサンプル物質の科学的評価，および，惑星保護の議論において重要となる．

火星圏物質輸送 II: 衛星上の火星物質分布と滅菌

黒澤耕介[1], 玄田英典[2], 兵頭龍樹[2], 山岸明彦[3], 藤田和央[4]

[1]千葉工業大学, [2]東京工業大学, [3]東京薬科大学, [4]宇宙航空研究開発機構

衝突放出に伴う物質輸送過程は「(Litho-)Pansperimia」と呼ばれ, 地球生命の起源として有力な仮説のひとつである. 近年では TRAPPIST-1 など Habitable zone に複数個の惑星をもつ惑星系が発見されており, (Litho-)Pansperimia が再度注目を集めている. 火星隕石は惑星間物質輸送が実際に起こった物的証拠である. JAXA は火星衛星探査計画(MMX)を次期惑星探査計画として掲げている. 火星隕石のように, 火星衛星にも火星物質が輸送されていると期待される. このとき問題になるのは火星には培養可能な微生物が存在している可能性が否定できないことである. 微生物は衛星に輸送されているかもしれない. (Litho-)Pansperimia は宇宙生物学の研究推進だけでなく, 惑星検疫の観点で要検討課題になりつつある.

我々は衝突により輸送された火星物質の火星衛星上の分布と火星由来微生物の生存率を調べた. 衝突加熱滅菌, 宇宙線照射滅菌は先行研究のモデルを採用した. 火星衛星は宇宙線に晒されている. このため輸送された微生物が現在まで生存しているとすれば火星上の若いクレータ由来に限られる. 本研究では~10 万年前に形成された Zunil クレータに着目した. Zunil は直径 10 km 以上で最も若い光条クレータである.

以下, 火星衛星上での火星物質・火星由来微生物の分布について述べる. 火星衛星への衝突の大半は>2 km/s の斜め衝突である(兵頭らの講演). このときレゴリス層から受ける動圧は~10 GPa に達し, 火星岩石は破壊される. 破砕された火星岩石の一部はクレータの内壁に張り付き(~20%), 残りはクレータの外へ飛散する(~80%). 衝突体残存率は先行研究の実験結果を参考にした. 形成されたクレータの内壁角度は一般に安息角より大きいため, 重力によって崩壊しクレータ中央に向かう粉体流を形成する. このとき破砕された火星岩石は崩壊粉体層に混合すると期待される. クレータ外に飛散した火星岩石破片群は火星周りにダストトーラスを形成し, その後再集積する. 再集積には数公転周期の時間がかかると予想されるため, ダストトーラスに分配された火星岩石は火星衛星の最表層に薄層(厚さ~0.1 mm)を形成すると期待される. 薄層に付着していた火星由来微生物は宇宙線に晒され速やかに滅菌される(~2 x 10^3 年). 一方火星岩石の衝突で作られたクレータ内部の崩壊粉体層の厚みは~1 m に達するため, 崩壊粉体層の深部にいる火星由来微生物は宇宙線から守られる. このような検討から火星に微生物がいると仮定した場合, 火星衛星上の微生物分布は水平方向にパッチ上(クレータ内部), 深さ方向には不均質(表面に近いほど生存生物密度が下がる)となることがわかった. 火星衛星表面のドリル掘削による無作為試料採取を実施した場合の培養可能微生物採取確率を計算し, COSPAR が定める惑星検疫基準と比較した. 採取質量を 100 g とした場合, Phobos では深さ 5 cm まで, Deimos では深さ 3 cm までの採取に限れば惑星検疫基準に抵触しないことがわかった.

B1

かんらん石と月土壌シミュラントを用いた着氷実験と近赤外スペクトル比較

○荻島葵・五十嵐優也・佐伯和人（大阪大・理）

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(JAXA)とインド宇宙研究機関(ISRO)によって、月極域での水資源探査計画の検討が昨年 12 月に始まった。この極域探査において、当研究グループでは近赤外画像分光によるその場観測を提案しており、月面または掘削した穴の側面の近赤外スペクトルから水の含有量を推定することを目指している。

本研究では、極低温で鉱物表面に霜として水が付着している状態を想定し、主要な月鉱物であるかんらん石と、月土壌シミュラント FJS-1（清水建設作製、富士山溶岩を砕き粒径中央値が 75um になるよう調整して作製されたもの）を用いて着氷実験を行なった。作製した霜付き鉱物の近赤外スペクトルをそれぞれ測定し比較した。またそのスペクトルの特徴と実際に付着していた霜の質量の関係を調べた。

2. 実験手法

試料鉱物として San Carlos 産かんらん石（Fo90、砕いてからふるいを用いて 125-250um に揃えたもの）と、月土壌シミュラント FJS-1 を用いた。着氷には自作のクーリングステージを使用した。試料が入ったステージ内を乾燥窒素で密閉し、-10℃まで冷却した後内部に 2 分間 4L/m の湿潤空気を送り込み、着氷させた。そしてステージ上部の天窓から、近赤外スペクトル（波長範囲 950-1650nm）を観測し、着氷→観測のサイクルを繰り返した。サイクル数は 5,7,10 と変えて三回の実験を行なった。それぞれの実験で最後のサイクルが終わった後、霜の質量を計測した。具体的には、あらかじめ乾燥窒素で満たしたビニールハウス内で霜付き鉱物の一部をすくい取り質量を計測し、その後ヒーターで加熱して霜を蒸発させ、再び質量を計測することで、減少分を霜の質量とした。

3. 結果

かんらん石、シミュラントの着氷スペクトルを得た。また、霜の質量を計測し質量分率に変換した。

得られたスペクトルは、どちらもサイクルを重ねる（＝着氷が進む）につれて全体的に明化し、1.5um における吸収が強くなる。1.5um における吸収は着氷が進むにつれ強くなることから O-H 振動伸縮によるものと考えられる。それぞれの試料、サイクル数の実験での最終スペクトルの 1.5um における吸収深さと、霜の質量の関係を求めると、同程度の着氷量だとかんらん石に付着している場合よりシミュラントに付着している場合のほうが、吸収ピークが浅いことが示唆されるデータを得た。

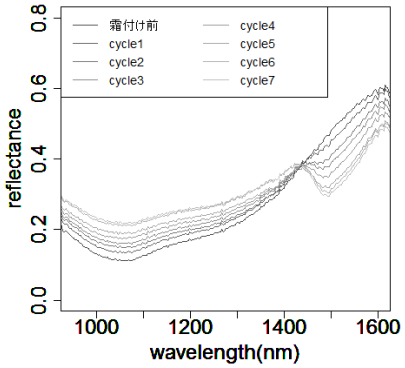


図 1. かんらん石の着氷スペクトル（7 サイクル分）

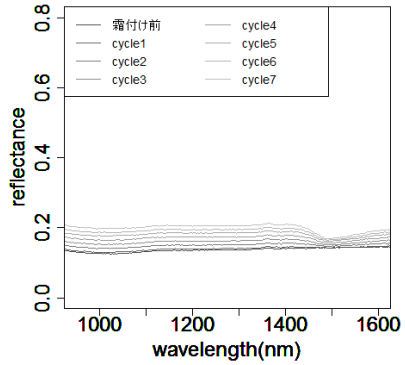


図 2. レゴリスシミュラントの着氷スペクトル（7 サイクル分）

4. 課題と対策

今回の実験方法では、霜が試料層の上部に着氷・降着する傾向にあり、着氷の仕方に偏りがあると考えられる。そこで、新たに着氷用の小型のクーリングケースを作製した。このクーリングケースは、耐熱性に優れる PTFE で出来ており液体窒素を導入して試料を直接冷却出来る構造となっている。湿潤空気の導入時にケースを振り試料を動かすことで、試料にまんべんなく着氷させることが出来た。

本研究の一部は、JAXA 宇宙探査イノベーションハブとの共同研究として実施したものである。また、レゴリスシミュラント FJS-1 は、JAXA 宇宙探査イノベーションハブ金森洋史博士よりご提供頂いた。ここに感謝します。

B2

月深成岩分光観測のための かんらん石焼結体反射スペクトルの測定

○五十嵐優也[1]　荻島葵[1]　佐伯和人[1]

[1]大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

月表面の主要鉱物の反射スペクトルは近赤外線の領域に特徴的な吸収ピークを持つことが知られている。そのため月のリモートセンシング観測データと、地上実験で得られた物質の反射スペクトル形状の比較により、月面の鉱物組成の推定が行われている。2021 年打ち上げ予定の小型月着陸実証機 SLIM では、月面のかんらん石露出地域に着陸し、分光カメラによるかんらん石の Mg#の観測が計画されている。しかし、反射スペクトル測定の実験データは粉末物質に対するものが多く、深成岩に見られるような等粒状組織の反射スペクトル特徴は明らかにされていない。

本研究では等粒状組織の反射スペクトルを調べる前段階として、結晶同士が結合した構造を持つかんらん石焼結体の反射スペクトル観測を試みた。出発試料として SanCarlos 産のかんらん石（Mg# = 90）を振動式ボールミルで砕き、ふるいを用いて 25μm～45μm、45μm～75μm、75μm～125μm と粒径分布が異なる３種類のかんらん石粉末を用意した。用意した粉末をペレッターで圧力を加えて押し固めた試料を白金るつぼに入れ、電気炉を用いて温度 1400℃で長時間の焼結を行った。加熱中は二酸化炭素と水素の混合ガスを炉内に流し、炉内の酸化・還元雰囲気を IW＋1 の状態に保った。25μm～45μm では 71 時間, 121 時間, 213 時間加熱したもの、45μm～75μm では 60 時間, 121 時間, 71 時間, 192 時間, 213 時間, 332 時間加熱したもの、75μm～125μm では 71 時間, 142 時間, 213 時間加熱したものを用意した。各加熱時間で試料を一度取り出して画像分光カメラを用いて反射スペクトルの観測を行い、観測後の試料を再び白金るつぼ内に戻し、再度 1400℃の温度で加熱を継続する方法を取った。加熱試料のうち 60 時間, 121 時間加熱した試料を薄片に加工し、SEM を用いて焼結途上のかんらん石の形状観察を行った。

60 時間加熱した試料では頂点の角ばった多角形形状の粒子が多く見られた一方で、121 時間加熱した試料は粒子が全体的に丸みを帯びている様子が観察された。また 121 時間加熱した試料では粒子の頂点同士が結合したような構造も複数見られた。これはかんらん石結晶の拡散運動に由来する形状だと考えられ、121 時間でかんらん石同士の焼結が進行していると言える。

波長領域 900nm～1600nm の範囲で反射スペクトル変化を調べたところ。粒径分布の異なるいくつかのかんらん石に対して、いずれの反射スペクトルにおいても試料の加熱に伴い、かんらん石吸収ピーク深さの弱化、吸収ピーク波長付近での全体的な明化、長波長領域での暗化、といった変化が共通して見られた。しかし、同一試料に対して分光観測と加熱を繰り返している間に試料内に不純物が混入した形跡が見られ、今回得られた反射スペクトル形状の変化がかんらん石の焼結に伴って起こったものであるという確証が持てない。そのため現在は新たな加熱前試料を作製し、加熱実験のやり直しを進めている。当日は再実験後のデータを示す予定である。

B3

月表層のカンラン石に富む岩石のMg#等から推定する月マントルの化学組成

Estimation of the lunar mantle composition based on Mg# of olivine-rich rocks

◯大竹真紀子[1], 山本聡[2], 諸田智克[3], 加藤伸祐[3]
1:宇宙航空研究開発機構 2: 財団法人宇宙システム利用推進機構 3:名古屋大

研究の背景：地球・月系の形成過程を理解する上で，月の全球組成を知ることは重要である．ただし月の体積の 90%以上を占めるマントルから直接もたらされた試料は得られておらず，月のマントル組成には不明点が多い．一方，「かぐや」により取得した表層の反射スペクトルデータの解析から，衝突盆地周辺に月マントルの主要構成鉱物の 1 つであるカンラン石を主成分とする岩石が分布することが報告されている．

本研究の目的：これまでに我々は，鉄の含有量や周辺の地質など情報から該当岩石の起源推定を行い，マントル起源の可能性が高い領域を同定した．また同岩石の可視・近赤外波長域の反射スペクトルに対して単純なカーブフィッティングを行い，カンラン石の吸収中心波長を用いて Mg#の推定を試みたが，同手法では残差が大きく，課題があった．今回の研究では，新しいカーブフィッティング手法を用いて Mg#の推定を行い，月マントルの化学組成に制約を与えることを目的とする．

解析手法：「かぐや」により同定されたカンラン石を主成分とする岩石の反射スペクトルデータに対し，新しく開発されたカーブフィッティングの手法(Kato S. et al., 2018；これまでの研究から得られているカンラン石の吸収中心波長の上限・下限や吸収強度比などを制約条件に用いる）を用いた解析を行い，カンラン石の Mg# (Mg/(Mg+Fe)モル%) を推定した．

結果と考察：今回の手法を用いることにより，従来の単純な数学的な処理に比べ，同一の領域内の複数露頭のスペクトルに対して，よりばらつきの少ない値を得ることができた．その結果，これまでに起源として推定した 3 つのグループ（マントル由来，地殻への貫入岩，カンラン石に富む火成岩）間で異なる Mg#の値をもつ傾向にあることや月試料分析値との違いなどが明らかとなった．

Kato S. et al. (2018) LPS XXXXIX Abstract.#1797.

観測ロケットを用いた微小重力環境下での ダスト生成過程の再現実験

○木村勇気[1]、Joseph Nuth[2]、Jurgen Blum[3]、石塚紳之介[4]、田中今日子[5]、野沢貴也[6]、左近樹[7]、田中秀和[5]、木村宏[8]、山﨑智也[1]、渡部直樹[1]、香内晃[1]、Saso Sturm[9], Nirmal Kuma Velu[10], 竹内伸介[10]、松原英雄[10]、稲富裕光[10]

[1]北海道大学低温科学研究所、[2]NASA, Goddard Space Flight Center、[3]Institute for geophysics and extraterrestrial physics、[4]国立環境研究所、[5]東北大学理学研究科、[6]国立天文台理論研究部、[7]東京大学理学系研究科、[8]千葉工業大学惑星探査研究センター、[9]Jozef Stefan Institute、[10]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

我々は、2012 年と 2015 年に宇宙科学研究所の観測ロケット S-520 28 号機および 30 号機を用いて微小重力環境下でダスト生成の再現実験を行った。28 号機では、鉄の主要な供給源である超新星爆発（特に Ia 型超新星）の後に、鉄粒子が生成する可能性を調べる実験を行った。鉄の蒸気から核生成する過程を 2 波長レーザー干渉計でその場観察し、核生成の素過程を下記らかにして宇宙における鉄の存在形態を理解する取り組みである。実験の結果、鉄の核生成時の原子同士の付着確率は 0.002%程度と非常に小さく、宇宙で鉄は金属として存在することは難しいことが分かった[1]。この結果は、鉄は他の微粒子中に不純物として取り込まれる、または化合物として存在することを示唆している。30 号機では、炭素よりも酸素が豊富な晩期型巨星における酸化物ダストの生成を再現する実験を行った。この星で最初に現れる 13 μm 帯の起源はアルミナであると考えられているが、確証は得られていない。実験室で確立した天体周辺に存在するダストの赤外線スペクトルと直接比較できるスペクトル測定の実験手法[2]を微小重力実験に適用した。この手法では、ガスから核生成を経て固体粒子となるまでの赤外線スペクトルの経時変化を捉えられる。そのため、核生成過程にも迫ることが可能である[3]。アルミナの核生成実験を行った結果、天体のものと非常に近い半値幅を持つ 13 μm フィーチャーを得た[4]。

S-520 観測ロケットでは、生成した試料や実験装置を回収することはできないため、現在はスウェーデンとアメリカの観測ロケットを用いた微小重力実験を計画している。これは、宇宙科学研究所の小規模計画の枠組みで進めている国際共同プロジェクトである。プロジェクト名は「DUST: Determining Unknown yet Significant Traits」であり、スウェーデンのロケットでは炭素質物質、アメリカのロケットではシリケイトの核生成実験を計画している。

[1] Kimura, et al., *Science Advances*, 3 (2017) e1601992. [2] Ishizuka, Kimura, et al., *Chemistry of Materials*, 28 (2016) 8732. [3] Ishizuka, Kimura, *Nanoscale*, 9 (2017) 10109. [4] Ishizuka, Kimura, et al., *Nature Communications*, in press, doi: .

HD163296 の原始惑星系円盤の ALMA 観測 -水輝線と多重リング・ギャップ構造-

○野津翔太[1], 野村英子[2], 秋山永治[3], Alice Booth[4], Catherine Walsh[4], 廣田朋也[5], 本田充彦[6], 塚越崇[5], Tom Millar[7]

[1]京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室, [2]東京工業大学, [3]北海道大学, [4]University of Leeds, [5]国立天文台, [6]久留米大学, [7]Queen's University Belfast

原始惑星系円盤の H_2O スノーラインを観測的に同定する事は、微惑星・惑星形成過程や、地球上の水の起源を考える上で重要である。これまで我々は円盤の化学反応ネットワーク計算と放射輸送計算の手法を用いて、水輝線プロファイルの観測から円盤赤道面の H_2O スノーラインを同定する方法を提案してきた(Notsu et al. 2016, ApJ, 827, 113; 2017, ApJ, 836, 118; 2018, ApJ, 855, 62)

本発表では、ALMA Cycle 3 にて我々が行なった Herbig Ae 型星 HD163296 の原始惑星系円盤の観測結果を報告する。今回は前述のモデル計算の結果に基づき、円盤赤道面の H_2O スノーラインの検出に適していると考えられる 3 つの水輝線(ortho-$H_2{}^{16}O$ 321 GHz, para-$H_2{}^{18}O$ 322 GHz, HDO 335 GHz 輝線)の高分散分光観測を実施した。観測時間が当初要求時間の 20%程に留まった事もあり現時点では輝線の検出には至っていないが、輝線の Flux の上限値を算出した。その後モデル計算結果との比較を行い、ダスト不透明度やスノーラインの位置に制限を加える事を試みた。その結果 Band 7 でのダスト不透明度が、円盤モデルで標準的な値であり過去のダスト連続波等の観測 (e.g., Boneberg et al. 2016) でも示唆された値である 3 $cm^2\ g^{-1}$ 程度以上の場合は、モデル計算の値が観測の上限値と矛盾しない事が分かった。

一方で、近年 ALMA (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) 等による高空間分解能・高感度観測を通じ、多数の原始惑星系円盤中に多重リング・ギャップ構造が発見されている (e.g., ALMA Partnership et al. 2015)。これらの構造は円盤内のダストサイズ成長や巨大ガス惑星形成等との関連が議論されており、今後のより詳細な理論・観測研究が欠かせない。

そこで今回 0.9mm (Band 7) ダスト連続波放射の ALMA 高解像度観測 (空間分解能約 15 天文単位) も併せて実施した結果、多重リング・ギャップ構造が発見された。これらの位置は Isella et al. (2016) の 1.3mm (Band 6) ダスト連続波放射の観測 (空間分解能約 20 天文単位) で報告された値と同程度であった。また我々の Band 7 の観測では、先行研究 (Band 6 観測)では報告されていない長軸方向の強度の非対称構造が発見された。併せて円盤内のダストサイズ分布等に制限を加える為、Bands 6, 7 のデータから spectral index α の半径分布の算出も試みた。

C3

ALMA偏光観測で探るダストの合体成長

○片岡 章雅、塚越 崇（国立天文台）、百瀬 宗武（茨城大学）、武藤 恭之（工学院大学）

惑星形成の第一段階はダスト粒子の付着成長である。そのため、観測からダストサイズを求めることは、惑星形成過程の解明において重要である。我々は、従来の手法とは独立なダストサイズ測定方法として、ミリ波偏光観測を提案した(Kataoka et al. 2015)。ダストが波長と同程度まで成長し、かつ原始惑星系円盤の連続波が非等方な輻射場を含んでいる時、ダスト熱放射の自己散乱に起因する偏光が検出できる。更に我々はALMAによる観測を行い、実際に散乱に起因する原始惑星系円盤の偏光を捉えることに成功した(Kataoka et al. 2016, 2017)。本講演では、特に原始惑星系円盤HD142527及びHL Tauの偏光観測結果について議論する。

焼結が誘起する若い原始惑星系円盤での多重ダストリング形成

○奥住 聡[1], 百瀬 宗武[2], 城野 信一[3], 小林 浩[3], 田中 秀和[4], 田崎 亮[4], 檜口 航太[1]

[1]東京工業大学, [2]茨城大学, [3]名古屋大学, [4]東北大学

最新のミリ波望遠鏡ALMAによる高分解能観測により、多くの原始惑星系円盤のダスト分布に多重のリングおよびギャップ構造が見られることが明らかになってきた。2015年の多重リング構造の初報告 (ALMA Partnership et al. 2015) から現在に至るまで、ダストの多重リング構造の起源に世界的な注目が集まっており、関連する理論研究が急速に発展してきた。これまでに、惑星と円盤の相互作用、ダストおよびガスの流体不安定、様々な物質の昇華線（スノーライン）の影響などが多重リング構造の起源として提案されている。

我々は、スノーラインが円盤の多重リング構造を作り出す具体的なメカニズムとして、スノーライン付近におけるダストの焼結とそれによるダストの濃集を提唱してきた (Okuzumi et al. 2016, ApJ, 821, 82)。彗星のようにさまざまな揮発性物質の氷を含むダストのアグリゲイトは、それぞれの揮発性氷のスノーラインのすぐ外側で焼結を経験すると考えられる (Sirono 1999, 2011)。焼結を経験したアグリゲイトは柔らかさを失うため、衝突の際に付着合体せずに跳ね返ったり破砕したりするようになる。最近の Sirono & Ueno (2017) によるアグリゲイトの数値衝突実験によると、焼結したアグリゲイトの限界付着速度（衝突を通じて成長可能な最大の衝突速度）は、焼結される前のアグリゲイトのそれに比べて約60%低下する。我々は、この効果を考慮した円盤ダストの大局進化シミュレーションを行ったところ、さまざまな揮発系氷のスノーラインの背後でダストが破壊・堆積し、多重のダストリングを自然に形成することを発見した。我々の計算結果を、代表的な多重リング天体であるおうし座HL星 (HL Tau) の周囲の円盤のALMA観測と比較し、我々の計算が多重リングの複数の観測事実をよく説明することを明らかにした。

さらに、CO_2氷がH_2O氷に比べて低い付着力を持つという近年の実験結果 (Musiolik et al. 2016) も考慮したダスト進化計算を実施し、HL Tau円盤に対する最近のミリ波偏光観測 (Stephen et al. 2014, 2017; Kataoka et al. 2017) の結果が我々のダスト進化モデルでよく解釈できることを明らかにした (Okuzumi, Tazaki, & Higuchi, in prep.)。本発表ではこれらの研究成果について報告する予定である。

ダストの合体成長に基づいた惑星形成

◯ 西川花[1]，小林浩[1]

[1] 名古屋大学大学院理学研究科

原始惑星系円盤の中に存在する 0.1 μ m 程度のダストは、衝突合体を繰り返し、数 km の微惑星、数千 km の原始惑星という段階を経て 1 万 km 以上の大きさの惑星に成長していく。木星のような巨大ガス惑星は、地球の 10 倍程度の質量を持つ固体核が円盤ガスを急速に捕獲することで形成されると考えられている。そのため、惑星形成過程には、円盤ガスが散逸する 3×10^6 年程度の間に地球質量の 10 倍程度の原始惑星を形成しなければならないという時間的制約がある (Ikoma et al., 2000) 。

円盤の中で、ダストはガスから摩擦抵抗を受け角運動量を失うため、中心星に向かって移動する。従来仮定されていた内部密度 1g/cm^3 程度のコンパクトな構造のダストは、1m 程度の大きさに成長したところで動径移動速度が成長速度を上回るので、速やかに中心星に落下し消失する。このダストの速やかな動径移動は、微惑星を形成する上で大きな障壁となっていた。しかし近年の研究で、ダストが衝突合体を繰り返すうちに空隙の多い構造になり、最終的に 10^{-4} g/cm^3 以下の非常に低密度なアグリゲイトとなることが明らかになった (Suyama et al., 2008) 。そして、このような低密度なダストは空気力学特性が変化するため、動径移動速度が最大となっても中心星に落下することなく成長できることが確かめられた (Okuzumi et al., 2012) 。したがって、10AU より内側の領域では、微惑星形成が可能となる。一方、10AU より外側の領域では、一定サイズに成長したダストは中心星に向かって速やかに落下する。そのため、円盤の外側から 10AU より内側の領域に固体天体の材料（ペブル）が大量に供給される。

近年、円盤内側で誕生した原始惑星がこのペブルを効率よく獲得し成長することで、巨大ガス惑星コアの形成時間を短縮できることが期待されている（e.g. Lambrechts & Johansen 2012）。同時に、秩序成長、暴走成長、寡占成長といった過程を経る惑星形成の標準モデルが示すように、原始惑星の周囲に大量に存在する微惑星もその成長に影響する (e.g. Kobayashi et al. 2016) 。以上のことから、巨大ガス惑星コア形成過程において、数 cm–m のペブルと数 km–数百 km の微惑星という異なる 2 つのサイズの固体天体が重要な役割を果たすと考えられる。これらの 2 種類の天体のサイズ分布や面密度は、ダストの合体成長に基づいて定まる。よって、ダストから原始惑星までの固体天体の成長を一連に取り扱い、幅広いサイズにまたがるような惑星形成過程を考えることが大切である。

そこで本研究では、0.1 μ m のダストから暴走成長が始まる 1 万 km までを扱い、5–100AU の円盤で固体天体の合体成長の統計シミュレーションを行う。シミュレーションの中では、2 天体の衝突合体による成長、ガス抵抗による動径移動、ダストの内部密度進化、乱流によるかき乱し、衝突による速度変化、微惑星同士の重力集積等を考慮している。その結果、原始惑星形成段階でのペブルと微惑星のサイズ分布および面密度が得られる。以上より、微惑星集積による原始惑星成長率ならびにペブル集積による原始惑星成長率を求め、原始惑星の成長に対するそれぞれの寄与を評価する。

ダストアグリゲイトの熱伝導率
Thermal conductivity of dust aggregates

○荒川創太[1]，辰馬未沙子[2,3]，坂谷尚哉[4]，中本泰史[1]
[1]東京工業大学, [2]東京大学, [3]国立天文台, [4]宇宙科学研究所

ダストアグリゲイトの熱伝導率は、惑星科学の様々な問題を考える際に重要なパラメータであるが、熱伝導率の充填率依存性はこれまで十分に理解されていなかった。そこで我々は、ダストアグリゲイトの数値計算によって熱伝導率の充填率および平均配位数に対する依存性を調べた。本研究では静的圧縮の数値計算によって作成されたアグリゲイトを用い、その温度構造を決定した。我々は充填率 0.01 から 0.56 のアグリゲイトについて熱伝導率を計算し、熱伝導率は充填率の 1.99 乗、および平均配位数の 0.556 乗に比例することを明らかにした。さらに、本研究で得られた経験式によって様々な実験結果を説明できることも確認した。

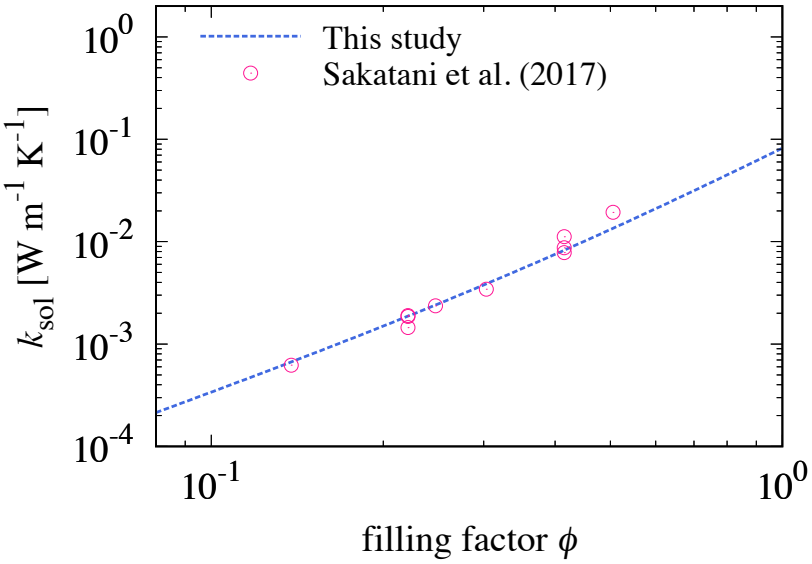


図 1. 直径 5 μm の SiO2 ガラス球からなるダストの熱伝導率の充填率依存性。本研究で得られた経験式（青破線）は坂谷らの実験結果（赤丸）をよく再現する。

D1

コンドリュールの生存に適した原始太陽系星雲の条件について

◯瀧 哲朗[1], 脇田 茂[2]

[1] 東京大学, [2] 東工大 ELSI

コンドリュールとはコンドライト隕石中に多量に含まれる ∼ 1 mm サイズの球状の固体微粒子である．岩石惑星の材料となった微惑星はコンドライト隕石の母天体であったと考えられており，コンドリュールからいつどのようにして隕石母天体が形成されたのかを理解することは，惑星形成理論において重要である．

同位体比分析の結果から，コンドリュール形成は CAI 形成直後から 200 万年後までの間にわたって起こったと考えられている．一方で，始原的なコンドライト隕石が熱変性を受けていないという事実から，このような始原的な隕石母天体の形成年代は CAI 形成後 200 – 300 万年後であったと考えられている（Doyle et al., 2015）．すなわちコンドリュールとコンドライト隕石母天体の形成年代には ∼ 100 万年のずれが存在しており，コンドリュールは原始太陽系星雲の中でコンドリュールのまま ∼ 100 万年存在しなければならない．

しかし，コンドリュールのような固体粒子は，円盤ガスからの抵抗を受けて中心星方向に移動してしまうことが知られている．このため最小質量太陽系星雲（MMSN; Hayashi 1981）におけるコンドリュールの寿命は 100 万年よりも大幅に短い (e.g., Nakagawa et al., 1986).

今回我々は，ガス乱流の強度・コンドリュールの初期位置・サイズ・必要な生存時間などをパラメータにして，鉛直方向の沈殿と不安定性の影響を考慮しながらコンドリュールの動径方向移動時間を見積もることで，コンドリュールの生存を説明できるような円盤の金属量 – 圧力勾配関係を求めた．ややフラットな円盤構造と弱い乱流を仮定すれば現実的な金属量の範囲でコンドリュールは生存可能であることが分かった．

D2

急冷マグマ中における定比組成鉱物の凝固過程の数値計算

○三浦 均[1]

[1]名古屋市立大学 大学院システム自然科学研究科

コンドリュールは，石質隕石に含まれる直径 1 mm 程度の球状珪酸塩組織である。45.6 億年昔の初期太陽系において，なんらかのメカニズムによって溶融したのち，急冷凝固したものだと考えられている。コンドリュール内部にはカンラン石や輝石などの鉱物結晶が含まれており，冷却条件を反映して様々な形状や化学組成分布（塁帯構造）を示す。したがって，コンドリュールの形成条件を調べるには，急冷マグマ中における鉱物結晶の形成・成長過程の理解が必要である。多くの再現実験によってコンドリュール形成条件が調べられてきたが，理論的側面からのアプローチは限られていた。私は，マグマ中における鉱物結晶成長過程を数値計算することによって，コンドリュールメルト凝固過程を結晶成長理論の観点から理解することを目指している。今回は，定比組成鉱物の成長過程を扱うことが可能な数値計算法を工夫したので報告する。

数値モデルはフェーズフィールド（phase-field，以下 PF）法に基づく。PF 法は合金分野で発展してきた現象論的な数理モデルであり，自由エネルギー最小の原理に基づいて結晶やその周囲の場（濃度場など）の時間発展を定式化している。時間発展方程式は，固相や液相の各自由エネルギーの組成微分項を含む。しかし，定比組成鉱物はその定比組成以外の組成を持たず，ゆえに自由エネルギーの組成微分が定義できない。従来の PF 法は，定比化合物の自由エネルギーを組成に関する放物関数で近似していた。だが，放物関数の曲率の決め方に任意性が残り，かつ計算結果が曲率に依存してしまう。そこで，本研究では，定比組成鉱物の自由エネルギーが組成に依存しないことから出発し，組成微分項を含まない形で時間発展方程式を再導出した。これにより，自由エネルギーの放物関数近似を用いる必要がなくなる。

単純化された Mg_2SiO_4-SiO_2 二成分系を対象として，いくかのテスト計算を実施した。固液平衡状態を初期条件として突然温度を低下させ，一方向凝固させた場合には，結晶成長速度が経過時間の 1/2 乗に反比例した。これは，拡散律速成長の理論式と整合的である。結晶内部には余分な SiO_2 がほとんど入らず，定比組成が正しく再現された。凝固中は系の自由エネルギーが時間とともに単調減少し，系が再びほぼ平衡に達したときに最小となった。また，空間二次元計算を実施し，固液界面曲率による平衡のズレ（Gibbs-Thomson 効果）が正しく計算できることを確認した。今後は三成分以上の成分を扱えるようにモデルを拡張し，数値計算によるコンドリュール凝固組織の再現を目指す予定である。

D3

高密度領域におけるコンドリュールとマトリクスの成長によるコンドライト母天体の形成

◯ 松本侑士[1], 脇田茂[2], 長谷川靖紘[3], 押野翔一[4,5]

[1] 中央研究院 天文及天文物理研究所, [2] 東京工業大学 地球生命研究所, [3]Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, [4] 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト, [5] 東京大学 宇宙線研究所

コンドリュールは始原的な隕石であるコンドライトに含まれる、mm 程度のサイズの球状粒子である。揮発性元素測定により、コンドリュールは 10^{-6} - 10^{-2} g cm^{-3} と非常にダスト密度が高い環境下での形成が示唆されている (Alexander et al., 2008)。このような非常に高密度な領域では自己重力不安定によってコンドライト母天体が形成する可能性がある。普通コンドライトは 60 - 80 vol.%のコンドリュールと <10 vol.%のマトリクスから構成されている (e.g., Scott 2007)。自己重力不安定によりコンドライト母天体が形成した場合、コンドリュールの割合は収縮前の分布を反映すると考えられる。高密度な領域では、ダストの衝突タイムスケールも非常に短くなり、コンドライト母天体の内部構造が衝突によって決まることが考えられる。マトリクスは nm - μm サイズの粒子であり、マトリクスがコンドリュールにリムを形成することで、衝突による成長が可能となる (Gunkelmann et al., 2017)。またコンドリュールとマトリクスが衝突することで、内部密度の小さいコンパウンドアグリゲイト (CA) が形成する (Arakawa 2017)。内部密度の低い CA は衝突断面積が増加するためダストの衝突タイムスケールが短くなる。そこで我々はコンドリュールとマトリクスからなる高密度クランプにおける、この 2 種類のダストからなるアグリゲイトの成長を、内部密度の変化を考慮して調べた。

コンドリュールとマトリクスからなる高密度クランプ内のアグリゲイトの衝突 (i. CA 同士の衝突, ii. CA とマトリクスのみからなるアグリゲイト (MA) の衝突, iii. MA 同士 の衝突)，CA の拡散，重力不安定による収縮を、それぞれのタイムスケールを評価しアグリゲイトの成長を追った。この結果、コンドリュールの密度とコンドリュールのクランプ内の質量割合に依存して 3 種類の進化が得られた。おおよそ Alexander らの示唆する高いダスト密度では、Toomre の $\mathcal{Q}$ 値が 2 以下 (Michikoshi et al., 2007) を満たしながらも衝突タイムスケールは短く、アグリゲイトは衝突で成長しコンドライト母天体を形成する。Alexander の示唆より低い、中程度のダスト密度では、ストークス数 (St) が 1 付近で $\mathcal{Q} > 2$ となり、またこの密度では衝突タイムスケールが長くなるためダストが拡散する可能性がある。更にダストが低密度な領域では、衝突タイムスケールが長くなりコンドリュールがマトリクスをまとった段階で成長が終わり、自己重力不安定を起こす。衝突により形成をしたコンドライト母天体は、コンドリュール周りにマトリクスが衝突する段階と、St > 1 を満たすほど大きくなった段階と、二度マトリクス成分を獲得することがわかった。コンドライト母天体のコンドリュール質量割合はクランプ内のコンドリュール質量割合よりも高く、10 %程度低いコンドリュール割合のクランプがよく普通コンドライトのコンドリュール割合を再現する。

D4

ストリーミング不安定性の成長条件を表す臨界パラメータ

○関谷　実[1]、大西　勇武
[1]九州大学・大学院理学研究院・地球惑星科学部門

ストリーミング不安定性とは、原始惑星系円盤内で、ダストが濃集しているところにさらに濃集するという現象である。一般的な円盤モデルでは、円盤中心面付近での圧力勾配力は中心星と反対方向に働く。よって、実質的に星の引力を弱めることになり、円盤ガスはケプラー速度よりもゆっくり公転する。ダストは圧力勾配力を感じないので、ガスよりも速く公転し、向かい風を受けて軌道角運動量を失い、徐々に中心星方向に落下していく。しかし、ダストの体積密度（円盤の単位体積に含まれるダストの総質量）が大きくなるとともに、ガス抵抗の影響を受けにくくなり、ダストの落下速度は減少する。これにより交通渋滞が起こり、ダストが濃集していく。

ストリーミング不安定性によってダストが濃集した領域のダストの体積密度が、重力不安定性の臨界密度（およそ、中心星質量を軌道半径の 3 乗で割った値）を超えると、自己重力によりダストがさらに濃集して微惑星が形成されると考えられている。

従来のストリーミング不安定性の研究では、３つの無次元パラメータが用いられてきた。（１）ストークス数 τ_s：ガス抵抗によりダストが減速する時間をケプラー角速度で規格化した量、（２）Z: 円盤のダストとガスの柱密度比、（３）Π：ガスの公転速度のケプラー速度からの遅れを音速で規格化した量。Yang et al. (2017)によると、τ_sが 0.01 から 0.1 の間では、Zが約 0.02 を超えるとストリーミング不安定性によるダストの濃集が起こる。

我々は、Zは物理的意味に乏しいパラメータであると考えた。なぜなら、ガス円盤のスケールハイトは、ダスト層のスケールハイトに比べてはるかに大きいが、はるか遠方にあるガスがストリーミング不安定性に関係するとは考えにくいからである。我々は、Πも物理的意味に乏しいパラメータであると考えた。なぜなら、ダスト層が形成される円盤中心面付近のガスはほぼ非圧縮性であり、音速は∞としても良い近似になるからである。

我々は、ストリーミング不安定性に関係する物理量だけを使って、ダストの柱密度 Σ_d を無次元化することを試みた。その結果、無次元ダスト柱密度、$\sigma_d = \Sigma_d / (\eta r \rho_g)$ を用いると良いことが分かった。ここで η はガス公転速度のケプラー速度からの遅れを、ケプラー速度で規格化した量、r は軌道半径、ρ_g は円盤中心面でのガス密度である。数値シミュレーションで比較したところ、σ_d の値が同じ場合は、Z や Π が異なってもほぼ同じ結果を得た。

結論：ストリーミング不安定性によるダスト濃集が発達する条件は、τ_s が 0.01 から 0.1 の間の場合、$\sigma_d \gtrsim 1$ である。

D5

自己重力による始原的隕石母天体内部の密度構造

○大村知美[1]，中村昭子[1]
[1]神戸大学大学院理学研究科

はじめに：隕石母天体の密度構造は天体の衝突進化や熱進化に影響する要素である．この密度構造は様々な要因で決まるが，本研究では遠心力と潮汐力が無視できる場合の，自己重力で作られる天体がとりうる最も空隙率の高い密度構造を考える．この密度構造は隕石母天体構成物質の圧密特性から推測できる．構成物質の圧密特性は隕石タイプによって異なる構成物の特徴や，その含有比に依存すると考えられる．本研究では構成物の粒子径，含有比と圧密特性の関係を調べた．また実験結果を用いてコンドライト母天体の内部密度構造を計算した．

実験手法：コンドライト構成物模擬物としてマイクロメートルサイズのダストとミリメートルサイズのビーズを体積比 f で混合したサンプルを用いた．ダストとビーズには粒子径の異なる数種類を用いた．サンプルを圧縮試験機に取り付けたピストンで圧密した．

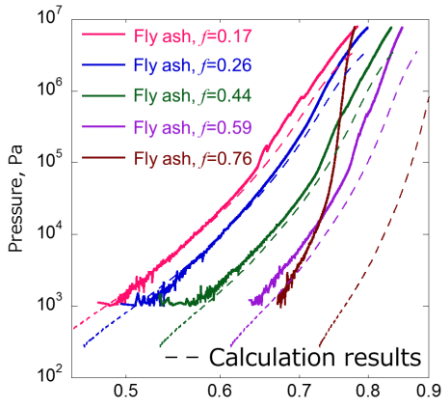


図 1　実験結果

実験結果：4.8 μm のフライアッシュと 1 mm のガラスビーズによる実験結果を図 1 に示す．f≦0.59 の場合にサンプルの充填率は f と共に増加した．f が同じ試料であっても違うダストを用いると結果は異なった．図中には Yasui & Arakawa (2009) の 2 層モデルに基づいて計算したモデル圧密曲線も示した．ただしビーズ間の空隙は考えず，ビーズ層は体積が粒子体積に等しく，充填率は常に 1 であるとした．ダスト層の圧密特性は f＝0 の試料の実験結果から与えた．f=0.78 を除く試料の圧密特性は計算結果と調和的であり，充填時のサンプル中でビーズの占める体積が～0.4 より少ない試料の圧密特性はダストの圧密特性で決まることがわかった．発表ではダスト・ビーズ粒子径の影響についても議論する．

天体内部密度構造の計算：Omura & Nakamura (2018)に示した方法で，べきの形で近似した各サンプルにおける圧力―充填率の関係を用いて天体内部密度構造を計算した．図 1 に示した f=0.59 の試料の圧密特性から計算した場合，半径 30 km の天体内部の深さ～5 km 以上の領域で CV コンドライト(マトリックス体積含有率 40% *(Weisberg et al., 2006)*)にみられる空隙率(～0.2 *(Consolmagno et al., 2008)*)が達成されることがわかった．

D6

微粒子の加熱に寄与する高速度微惑星の形成条件

○長澤真樹子[1]，田中今日子[2]，野村英子[3]
[1]久留米大学，[2]東北大学，[3]東京工業大学

微惑星がガス円盤中で高速度になると，衝撃波が形成され，周囲の微粒子の加熱が生じる．微惑星衝撃波は，隕石中のコンドリュールの形成やアモルファスシリケイトの結晶化に寄与するメカニズムの一つとして考えられている．コンドリュール溶融やシリケイトダストの結晶化に必要な微惑星の速度は知られているが，この微惑星の高速度がどのような時に生じるのかは，これまできちんと議論されていない．例えば，Iida ら 2001 では，1 ㎜サイズのコンドリュールの前駆体の溶融には，小惑星帯であればガス円盤と微惑星の相対速度が 10 ㎞/s 程度必要だとされている．これは大まかには微惑星の離心率が 0.5 以上になることを要求しており，力学的にはその達成は必ずしも容易ではない．なお，現在の小惑星帯では，木星や火星に散乱されてしまうため，このような離心率の微惑星は長期間安定には存在できない．

今回の研究では，ガス円盤中で，木星型惑星が形成されたときに微惑星がどの程度高速になるかを数値軌道計算から調べた．そして，どのような条件であれば，十分な数の微惑星がコンドリュール形成やシリケイト結晶化に寄与できるかを求めた．微惑星が高速化する仕組みとしては，微惑星がガス抵抗によって移動しながら，木星型惑星の共鳴を通過することを用いている．惑星の移動，円盤散逸，微惑星が衝撃波で蒸発する効果は考慮していない．

周囲の微粒子の加熱に最も寄与するのは，木星型惑星の位置(a_p)から，木星型惑星の軌道の約 6 割の位置までの間にある微惑星である．この $0.6a_p$-$1a_p$ の間の微惑星が移動し，木星型惑星の位置の半分のあたり($0.5a_p$)で，周囲に存在している微粒子をもっとも強く加熱する．小さい微惑星はガス抵抗によって移動する速さが速く，相対速度も上がりにくい．このため，小さい微惑星は，加熱に寄与することのできる時間が短く，寄与できる数も限られる．つまり，基本的に周囲の微粒子加熱に十分な寄与ができるのは，半径が 100 ㎞を超えるような微惑星となる．半径が 100 ㎞を超えるような微惑星であっても，1 つ 1 つの微惑星が微惑星加熱に効くような高速度になっている時間は典型的には数万年程度である．しかし，微惑星は共鳴に捕獲されるため，移動は一斉に起こるのではなく時間差をもって生じるため，木星型惑星形成後数十万年以降から円盤散逸までの比較的長い時間，高速度微惑星が系内に存在し続けることになっている．現在の太陽系のパラメーターにおいては，失われた小惑星の総量があれば，コンドリュール形成やシリケイトダストの結晶化にかなり寄与できると推測される．

D7

小質量微惑星から計算した暴走成長段階

○小南淳子[1]、Chris Ormel[2]

[1]東京工業大学、[2]アムステルダム大学

惑星形成は微惑星から形成されたと考えられているが、微惑星がどのように形成されたのかは定かではない。微惑星は暴走成長段階を経て原始惑星へと成長すると考えられている。暴走成長段階の理解については N 体計算が大きな役割を果たしてきた。従来の N 体計算では、計算コストの制限により、10^{23}g ほどの質量の微惑星から計算をスタートさせている。しかし、本来の暴走成長段階が始まる際の微惑星質量はこれほど大きかったかは不明である。また、小さい微惑星から始めるということは計算の解像度を上げることになる。少し成長した暴走成長天体の周囲に小さい微惑星が残っていることにより、暴走成長天体に planetesimal driven migration というメカニズムが働く可能性がある。このメカニズムが働くと、暴走成長天体は動径方向に移動すると考えられる。つまり、少し大きくなった暴走成長天体が動径方向に動きながら成長する可能性があることが示唆される。

本研究では、過去の研究で行われた N 体計算の初期条件の微惑星質量の 1/10 の質量の微惑星からスタートした N 体シミュレーションを行った。初期微惑星質量は 10^{22}g、初期微惑星は～10^{5} 個から始めた。その結果、暴走成長天体は動径方向に動きながら、成長していった。移動距離は数十ヒル半径に及び、従来の原始惑星が数ヒル半径間隔で並ぶという結果から異なる結果となった。本研究の計算により、初期微惑星質量を小さくし、N 体計算の解像度をあげると、従来の計算結果と違う結果になる可能性があることがわかった。今回の発表では、この結果を紹介する。

E1

原始惑星系円盤において鉛直方向に分布する小粒子の周惑星円盤への降着

◯ 本間 徹[1], 大槻 圭史[1], 末次 竜[2], 町田 正博[3], 谷川 享行[4]

[1] 神戸大学　[2] 産業医科大学　[3] 九州大学　[4] 一関工業高等専門学校

木星のガリレオ衛星に代表される規則衛星は，比較的母惑星の近くをその赤道面に沿ってほぼ円軌道で運動する衛星である．この特徴はそれらが周惑星円盤で形成されたということを示唆している．周惑星円盤は惑星へのガス降着にも関係しているため，衛星形成に関する研究は衛星の起源のみならず巨大惑星の起源の手がかりを得ることにもつながる．巨大惑星のまわりのガス流の詳細な構造は数値流体計算によって調べられており (e.g., Machida et al. 2008; Tanigawa et al. 2012)，ガスは周惑星円盤の上空から降着するという構造が明らかとなった．このようなガスの流れはガス抵抗力を通じて衛星の材料となる固体物質の運動に影響を与える (Tanigawa et al. 2014)．加えて，固体物質の供給源は原始惑星系円盤であることから，そこでの固体物質の分布は衛星形成過程と密接に関係する．本研究では，数値流体計算の結果を用いて様々な粒子サイズ・分布を考慮した軌道計算を行うことで周惑星円盤への固体物質の降着について調べた．

太陽・惑星・粒子の 3 体からなる系を考え，惑星とともに回転する局所直交回転座標系 (Hill 座標系) を用いた．この座標系上において粒子の運動方程式を記述し，それを数値的に積分することで粒子の軌道計算を行った．数値流体計算によって得られたガスの密度・速度場を用いることで粒子に働くガス抵抗力を考慮した．先行研究では原始惑星系円盤の中心面に存在する粒子のみについて調べていた (Tanigawa et al. 2014) のに対し，本研究では鉛直方向の分布を考慮して計算した．その結果，粒子サイズによって粒子の周惑星円盤への供給過程や周惑星円盤内での分布が異なることがわかった．特に，ガスとともに運動するような小粒子は原始惑星系円盤において鉛直方向に巻き上げられているほど周惑星円盤に捕獲される頻度が高くなることがわかった．

成長途中の原始惑星による微惑星の獲得

円盤ギャップ形成に伴う供給律速過程の影響

◯ **柴田翔**, 生駒大洋
東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

研究背景：太陽系内のガス惑星である木星は、その内部に多くの重元素（水素、ヘリウムより重い物質）を含むことが知られている [1]。特に、エンベロープは大量の重元素を含む可能性が示唆されており、エンベロープが太陽組成を持つ原始惑星系円盤由来だとする単純な形成理論では説明できない。この重元素過剰の問題を説明する仮説として、”形成後期における微惑星の獲得”が考えられている。これまで行われて来た研究 [2][3] では、原始惑星の暴走ガス獲得過程に着目し、原始惑星周りの微惑星について軌道積分を行うことで微惑星獲得量を見積もった。彼らの研究では、簡単のため円盤ガスを最小質量円盤と仮定し、一様なガス分布をモデルに組み込んでいたが、数十地球質量程度の原始惑星周りではギャップが形成されることが知られている。円盤ギャップの形成は微惑星の軌道進化に影響を与えるため、微惑星獲得量にも影響を与える可能性がある。そこで、本研究ではこのギャップ形成に着目し、ギャップが微惑星の獲得に与える影響を数値計算によって調べた。

研究手法：本研究では、太陽、質量成長中の原始惑星、10,000 体の微惑星からなる系について、４次精度のエルミート法を用いて軌道積分を行い、ギャップが形成された円盤中での微惑星獲得量を見積もった。円盤ギャップの形成は、以下の２つの効果を通して微惑星獲得に影響を与える。（１）円盤ギャップ形成に伴い、ガス抵抗が弱くなる効果（２）圧力勾配が変化し、ガス抵抗の向きが変わる効果。本研究では、それぞれの効果を明らかにするため、円盤ガスの速度を $v_{\rm gas} = v_{\rm K}(1-\eta)$ で与え、$\eta = 0$ の場合と、$\eta \neq 0$ の場合それぞれについて計算を行った。ただし、$v_{\rm K}$ はケプラー速度である。

結果：計算の結果、ギャップの形成に伴ってガス抵抗が弱くなる効果は、微惑星が原始惑星付近に滞在できる時間を長くするため、微惑星獲得量を増加させることがわかった。また、ガス抵抗の向きが変わる効果は、微惑星を原始惑星から遠ざけるため、微惑星獲得量を減少させることがわかった。これらの効果の組み合わせによって、半径が $10^5 = $ cm ほどの大きな微惑星は獲得量が増加し、半径が $10^4 = $ cm ほどの小さな微惑星は獲得量が減少した。また、ギャップが大きいほどこれらの影響は大きくなることがわかった。以上の結果から、ギャップが形成された円盤中では、微惑星の大きさによって獲得量が大きく変化することが示された。

参照 [1] Wahl S. M., et al., 2017, Geophys. Res. Lett., 44, 4649 [2] Zhou J.-L., Lin D. N. C., 2007, apj, 666, 447 [3] Shiraishi M., Ida S., 2008, apj, 684, 1416

惑星近傍の原始惑星系円盤ガス流れ場とスーパーアース形成過程への示唆

○黒川 宏之[1], 谷川 享行[2], 桑原 歩[3], 井田 茂[1]
[1]東京工業大学 地球生命研究所, [2]一関工業高等専門学校, [3]東京工業大学

系外惑星観測の進展により、太陽型星系の約半数のまわりに短周期スーパーアース(1-20 地球質量の惑星)が存在することがわかってきた。一方、短周期巨大ガス惑星(ホット・ジュピター)の存在は稀である。しかし、従来の惑星形成論の理解によれば、スーパーアース質量の原始惑星の暴走的ガス捕獲時間は典型的な円盤ガスの寿命より短い。そのため、スーパーアースの普遍性は惑星形成論における大きな謎の一つとなっている。

この問題には大きく分けて二つの解決策が考えられている。一つは従来の理解より円盤ガス降着が遅いというものである。Ormel et al. [1]は原始惑星エンベロープが絶えず円盤ガスと交換することで、エンベロープガスの冷却・収縮とさらなるガス降着が妨げられるという大気リサイクリングシナリオを提案している。他方、原始惑星コアは地球質量程度までしか成長せず、円盤ガス散逸に伴う巨大衝突によってようやくスーパーアース質量に至ることで暴走的ガス捕獲を回避するという、遅いコア形成シナリオも提案されている[2]。

スーパーアース形成過程を理解するため、我々は原始惑星コア近傍の円盤ガス流体シミュレーションを行い、等温・断熱・放射冷却入り計算の詳細な比較[3]、コア質量依存性の調査[4]を行った。計算コードは Athena++を使用し、シミュレーションの一部は国立天文台 CfCA の XC30/XC50 で行った。

まず、等温・断熱・放射冷却入り計算の比較から、放射冷却を考慮した現実的なシミュレーションではエンベロープ深部で大気リサイクリングが妨げられることを発見した。これは低エントロピーのエンベロープガスと高エントロピーの円盤ガスの間の密度差が浮力として働くためである。この結果から、大気リサイクリングシナリオではスーパーアースの普遍性を説明できないことがわかった[3]。次に、流れ場の原始惑星コア質量依存性を調べた結果、コア質量に依存せず、鉛直方向からボンディ/ヒル領域にガス流入し、円盤中心面からガス流出(アウトフロー)する流れ場が存在することがわかった。さらに、コア質量が大きくなるにつれてアウトフロー速度は大きくなることを発見し、その解析的表式を導いた。地球質量程度のコアにおいて、アウトフロー速度はコアへと降着するダスト/ペブルの終端速度を上回る。従って、惑星が駆動するアウトフローがコアの成長を妨げることで、遅いコア形成シナリオを実現できる可能性がある[4]。

[1] Ormel et al., 2015, 447, 3512. [2] Lee et al., 2014, ApJ, 797, 95. [3] Kurokawa & Tanigawa, 2018, MNRAS, 479, 635. [4] Kuwahara et al., submitted.

E4

衝突・破壊を考慮した惑星形成:惑星成長と乱流の強さ

◯ 小林 浩 [1], 田中秀和 [2]

[1] 名古屋大学, [2] 東北大学

木星や土星のような巨大ガス惑星は、地球の数倍の十分に重い固体核形成により引き起こされるガス集積により形成される。固体核は周りの微惑星を集積し成長するが、重くなるに従い微惑星の軌道は乱され、微惑星同士の衝突により破壊が起こる。破壊による破片は、ガス抵抗によりランダム運動を抑制されるため効率よく固体核に集積される。一方、ガス抵抗により角運動量を減らされるため、中心星に落下して、減少する。その結果、固体核成長が阻害される。固体核のまわりの微惑星のサイズ分布は、固体核の暴走成長が始まる時に決まり、その後も維持される。大きな微惑星ほど自己重力が強く実質的な破壊が起きにくい。そのため、強い乱流により暴走成長が遅れされられるほど、固体核の周りの微惑星が大きくなり、破壊が起きにくくなるため固体核は大きくなれる。惑星形成ための衝突進化シミュレーションの結果、無次元乱流パラメータ $\alpha \gtrsim 10^{-3}$ の強い乱流ならば巨大ガス惑星を形成可能な固体核が作れることがわかった (図 1)。また、ダストアグリゲイトの衝突・成長により固体面密度が上昇した初期円盤進化時間が百万年ほどの円盤であれば、円盤寿命の数百万年以内でに惑星移動を回避しつつ固体核の形成が可能である (図 2)。

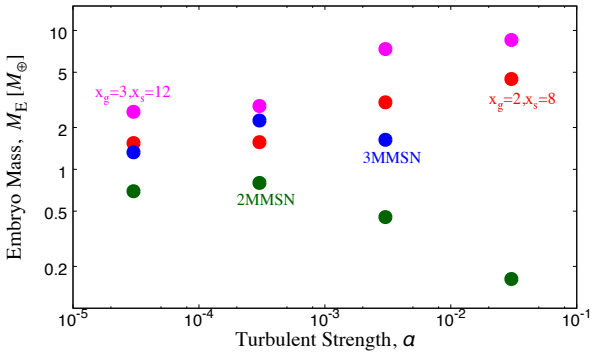


図 1: 2 倍 (緑) と 3 倍 (青) の最小質量円盤や、それぞれの円盤で固体が 4 倍濃集した円盤 (赤、紫) における 400 万年後、5.2AU で形成されるガス惑星固体核の質量と無次元乱流パラメータ α の関係

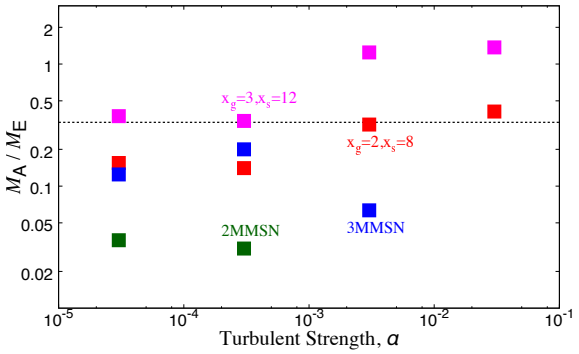


図 2: 図 1 の時の、惑星大気質量 M_A と固体核質量 M_E の比と無次元乱流パラメータ α の関係。$M_A/M_E \geq 1/3$ になると暴走ガス集積が起こり巨大ガス惑星が形成される。

E5

巨大衝突ステージにおける衝突・破壊を考慮した N 体シミュレーション

◯ 磯谷和秀 [1]，小林浩 [1]

[1] 名古屋大学

太陽系の地球型惑星は、大きく分けて 3 つのステージを経て形成される。まずダストから微惑星、次に微惑星から原始惑星、そして最後に原始惑星から地球型惑星が形成される。この最後の進化段階は巨大衝突ステージと呼ばれ、地球型惑星の軌道や質量などを特徴付ける重要な時期である。巨大衝突ステージを模擬し原始惑星の N 体計算を行うと、合体成長を繰り返し数億年程度で現在の太陽系の地球型惑星のようないくつかの地球質量の惑星が形成される (e.g., Chambers & Wetherill, 1998; Agnor et al., 1999; Kominami & Ida, 2002; Kokubo et al., 2006)。しかし、原始惑星同士が軌道交差を起こすほど軌道が歪んだ状態で衝突合体が起きるため、最終的に形成される地球型惑星の離心率 (~ 0.1) は、現在の太陽系の地球型惑星の離心率 (~ 0.01) を説明できない。これに関する現在の惑星形成論の理解では、地球型惑星が形成された後に残存する微惑星との力学的摩擦によって地球型惑星の離心率が下げられるという説が有力である (Morishima et al., 2010)。ところが、この力学的摩擦の反作用や地球型惑星からの摂動によって残存微惑星の離心率が上がり、微惑星同士の破壊的な衝突が起きるほど相対速度が速くなる。そのため残存微惑星円盤の中では様々なサイズの微惑星同士の衝突・破壊が次々に起こる（衝突カスケード）が、そのなかでも小さな微惑星は数が多く衝突が頻繁に起きており、破壊のタイムスケールが短い。微惑星が μm サイズまで小さくなると、中心星の輻射圧により吹き飛ばされることで系から速やかに取り除かれるため、残存微惑星円盤の総質量は減少していく。その結果、残存微惑星円盤の質量分布は形を変えないまま総質量が減少する (e.g., Tanaka et al., 1996)。このとき、微惑星の減少のタイムスケールは最大微惑星が衝突によって壊れるタイムスケールになるため、比較的簡単に解析的に表現できる (Kobayashi & Tanaka, 2010)。すなわち残存微惑星円盤の総質量減少によって力学的摩擦の効率が下がるため、本当に地球型惑星の離心率を下げることが可能なのかという問題が残る。この問題を調べるためには、長期的軌道進化と破壊を扱うことができる計算が必要である。軌道進化を扱うには N 体計算が有効であるが、破壊によって生じる様々なサイズの微惑星は 10^{35} 個以上にもなり、N 体計算ではこれら全ての微惑星をとても扱うことはできない。このような多数の粒子を取り扱うには、一つ一つの粒子を取り扱うのではなく、統計力学に基づいた統計的手法が有効であるが、統計的手法では、微惑星が重力的に集積する際にサイズ分布が非軸対称になることや、原始惑星による軌道共鳴のような、重力相互作用の取り扱いができない。すなわち N 体計算と統計的手法を同時に用いると、軌道進化と破壊を同時に考慮した計算を行うことができる。そこで本研究では、N 体計算と統計的手法を組み合わせた、衝突破壊を扱うことができるハイブリッドコードの開発を行った。そしてこのコードによる計算結果により、巨大衝突ステージにおける残存微惑星間の衝突・破壊現象を考慮すると、惑星-微惑星間の力学的摩擦の効率が下がること、そして破壊は微惑星のサイズが小さいほど効率的なので、最大微惑星半径が 10km 以下では現在の地球や金星のように惑星の離心率が下げられないことがわかった。

惑星集積時の表層・内部への元素分配と天体衝突による大気散逸を考慮した地球の揮発性元素量進化

Effect of element partitioning and impact erosion on the evolution of volatile abundances on Earth

○櫻庭 遥[1], 黒川 宏之[2], 玄田 英典[2], 太田 健二[1]

[1]東京工業大学, [2]地球生命研究所(ELSI)

地球表層及び地球全体(Bulk Silicate Earth, BSE)の揮発性元素組成はその供給源と考えられるコンドライト隕石と比較して炭素や窒素に欠乏しており，その理由は未解明である[e.g., 1]. 地球にもたらされた揮発性元素は，供給時期と惑星内部及び表層環境に応じてコア・マントル・地殻・大気へそれぞれ分配される．地球集積時のマグマオーシャンの内部では金属コアが分化し，表層では解放された揮発性成分が大気を形成する．その際，揮発性元素の一部はコアやマントルに取り込まれる．また，惑星集積時に形成される大気は，多数の天体衝突によって大気剥ぎ取りを経験したと考えられる．

我々は惑星形成期のコアへの元素分配と天体衝突による大気散逸の効果に着目し，表層・内部の各リザーバーの揮発性元素存在度進化モデルを構築した．マグマオーシャン中の金属鉄・シリケイトメルト・大気の 3 つのリザーバー間の平衡分配を仮定し，各層に分配される揮発性元素(炭素，水素，窒素)量を計算した[e.g., 2]. マグマオーシャン固化後の表層環境については海洋と炭素循環の存在を仮定し，地殻・海洋・大気間の元素分配を考慮した[3].

大気以外のリザーバーに分配された揮発性成分は天体衝突による大気剥ぎ取りを免れるため，揮発性元素(C, H, N)ごとの元素分配の違いによってその存在比は時間進化した．その結果，マグマオーシャン固化後の後期天体集積と元素分配によって地球表層の炭素・窒素量を再現できることがわかった．加えて講演では，マグマオーシャン固化前の天体衝突・元素分配が地球全体(BSE)の組成に及ぼす影響についても議論する．

[1] Bergin, E. A. et al. (2015) *Proceedings of National Academy of Sciences,* 112, **29**, 8965-8970. [2] Dalou et al. (2017) *Earth and Planetary Science Letters*, **458**, 141-151. [3] Sakuraba, H. et al. (2019) *Icarus*, **317**, 48-58.

F2

水素-水蒸気大気をもった地球型惑星の初期進化

Early evolution of terrestrial planets formed with H_2-H_2O atmospheres

○濱野景子，玄田英典

東京工業大学 地球生命研究所（ELSI）

形成の最終段階で巨大衝突を経験した地球型惑星は大規模に溶融すると予想される（マグマオーシャンの形成）．惑星が形成段階に揮発性物質を獲得していた場合，マグマオーシャン上には大気が形成され，その保温・温室効果は惑星の固化速度に影響を与える．一方，マグマオーシャンの固化速度は，大気，特にマグマへの溶解度の高い気体種の脱ガス速度を決める．さらに，マグマは酸素のリザーバーであるため，その酸化還元度は大気組成を決定づける．

脱ガスと温室効果を考慮した大気とマグマオーシャンの共進化問題は，これまで主に水蒸気・二酸化炭素からなる酸化的な大気について検討されてきた(e.g. Elkins-Tanton 2008, Lebrun et al. 2013)．これらのガスは，強い温室効果気体であり，またマグマの酸化還元度が現在のマントルと同様に酸化的である場合には大気の主要構成成分となると予想される．ジルコンを用いた地球化学的な研究では地球のマントルは約 4.1Ga にはすでに酸化的であった可能性が示唆されている．一方，巨大衝突後にコア形成が起こり，金属鉄とシリケイト間での平衡分配が起こった場合には，現在のマントル中の FeO 量からは Iron-Wustite バッファに対して約２桁低い(ΔIW-2)酸素のフガシティが予想され(e.g. Frost et al. 2009)，これと化学平衡にある大気主要成分は水素となる．

大気の初期酸化還元状態がマグマオーシャンの熱収支にどのような影響を与えるのかを明らかにするため，水素-水蒸気大気の非灰色放射対流平衡計算を行った．地表温度を 1,500K に固定して大気組成を変化させた場合，低圧下(<~1bar)では水蒸気に富む大気組成ほど温室効果は強くなるが，高圧下では逆に水素の増加に伴い，まず温室効果が強まる．これは水蒸気のモル分率が低くなることで，大気上層で水の凝結に伴う潜熱解放の効果が弱まることによる．さらに水素を増加させた場合の効果は全圧に依存する．

また，初期の地表マグマの酸化還元度（大気中の水素/水蒸気モル比）と総 H 量（モル）を変え，大気とマグマオーシャンの進化計算を行った．現在の地球と同程度の総 H 量 (~2-5 海洋質量相当)，酸素フガシティ ΔIW-2 以上であれば，地球で推定されている固化時間を満たし，かつ大酸化イベント(約 2.3Ga)前に水素を散逸させることが可能であることがわかった．一方，固化・海洋形成後の冷却速度は初期の地表マグマ/大気の酸化還元度に依存し，形成直後のマグマが還元的であった場合には，大量の水素の温室効果によって温暖な環境が維持されうる．

F3

形成段階にある原始惑星コアへの水素分配の可能性

○脇田茂[1]、小佐々唯[2]、玄田英典[1]、井田茂[1]
[1]東京工業大学 地球生命研究所、[2]NHK

地球のコアの密度は鉄ニッケル合金よりも低いと推測されており、軽元素を含むことが示唆されている。近年の研究からは、水素がその有力な候補の一つであると考えられている（Nomura et al. 2014）。しかしながら、どのような過程でコアが水素を含むことができるかについては明らかになっていない。そこで、原始惑星コアが保有しうる水素含有量を調べることを目的として、研究を進めた。

着目した天体は、初期に 3km の半径の微惑星であったものが、火星程度のサイズに成長したものである。成長速度は一定という仮定をおいた（e.g., Merk et al. 2002）。このような原始惑星における熱進化の過程を数値計算で調べ、以下の 2 つの熱源を考慮した。

1) 短寿命放射性元素 ^{26}Al の壊変熱
微惑星などの熱進化の研究において主な熱源とされているものであり、内部熱源となる（e.g., Miyamoto et al. 1981, Wakita et al. 2014, Bhatia and Sahijpal 2016）。

2) 表面での衝突エネルギー
微惑星から原始惑星までの成長過程において表面では衝突が起こっていると考えられる。そこで、衝突によるエネルギーからの温度上昇の効果も取り入れた（Senshu et al. 2000）。こちらは外部熱源となり、表面温度を決定づける。
また、熱対流が起こる条件下では、その効果も計算に取り入れた（Sasaki and Nakazawa 1986）。高温になり珪酸塩の融点に達すると、溶融して珪酸塩と鉄に分離する点も考慮した。さらには、ある圧力（3～5GPa）以上で水素が鉄に集積されるとして（Fukai 1992, Iizuka-Oku et al. 2016）、最終的にどの程度の水素の量がコアに集積されるかを見積もった。

短寿命放射性元素の初生比、表面での衝突による温度上昇の効率などを変化させながら、数値計算を行った結果、原始惑星はその材料物質の約半分程度の水素を保持しうることがわかった。また、この結果は短寿命放射性元素の初生比よりも、表面での衝突による温度上昇の効率に依存することがわかった。

G1

表層水分布を考慮した地球型水惑星における暴走温室限界

○小玉 貴則[1], 玄田 英典[2], 大石 龍太[1], 阿部 彩子[1], 阿部 豊[3]
[1]東京大学大気海洋研究所, [2]東京工業大学地球生命研究所, [3]東京大学理学部

地球型水惑星が強い中心星放射を受け取った場合、惑星表面の水をすべて蒸発させてしまう暴走温室状態に陥ることが考えられ、そのときの惑星が受け取る中心星放射を暴走温室限界と呼ぶ。暴走温室限界はハビタブルゾーンの内側境界を決めている。

我々は、地球サイズの惑星における表層水分布の暴走温室限界への影響を３次元大気大循環モデルを用いて調べてきた。惑星の水分布として、1)南北方向に一様な水分布、2)地球、火星、金星の地形を用いた様々な水量の場合での水分布を考慮し、現在の地球と同じ大気組成からなる 1bar の大気を考慮した。簡単のため、自転軸傾斜は 0 度で軌道離心率も 0 とし、季節変化を除いた。

その結果、暴走温室限界は、水分布面積により 2 つのレジーム(海惑星レジームと陸惑星レジーム)に分けられることを確認した。加えて、東西方向に一様な水分布を仮定した先行研究(Kodama et al., 2018)の結果と比べると、海陸比は同じ場合、今回採用した両水分布での暴走温室限界は低い値になった。暴走温室限界の発生は、大気が湿潤になることで射出できる惑星放射に上限が存在することによる。そのため、Kodama et al. (2018)で検討された水分布は、赤道域まで湿潤にするのに最も効率の悪い惑星地形に対応しており、一方で、今回の南北方向に一様な水分布は最も効率のよい惑星地形に対応していると言える。我々の結果は、ハビタブルゾーンの内側境界は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。

M 型星まわりの潮汐固定惑星の habitability に G 型伴星が与える影響について

○奥谷彩香 [1], 藤井友香 [2], 井田茂 [2]

[1]東京工業大学 理学院地球惑星科学系, [2]東京工業大学 地球生命研究所(ELSI)

M 型星は光度が小さいため Habitable Zone (HZ) が中心星に近く、HZ の惑星は潮汐固定されて高温な昼面・低温な夜面をもつと考えられる (Kasting et al. 1993)。薄い大気をもった潮汐固定惑星では、極端に寒冷化した夜面に大気分子が凝結する可能性がある。その結果、大気による熱輸送や温室効果が失われ、惑星全体はさらに寒冷化する (Joshi et al. 1997)。さらに、惑星表層に少量の水しか存在しないような惑星("陸惑星")においては、表層の水のほぼ全てが、寒冷な夜面に氷として局在凍結しまう可能性がある (e.g., Leconte et al. 2013)。このため、潮汐固定惑星は Habitable Zone に位置していても液体の水を表層に保てない可能性がある。

しかし、潮汐固定惑星をもつ M 型星がより明るい星と連星をなす場合、伴星摂動による軌道不安定が無視できても伴星からの放射で惑星表面の温度分布が変わり、上記の問題を避けられる可能性がある。G 型星の大半は M 型星と連星系をなしている (Raghavan et al. 2010) ため、M 型星のペアとして G 型星を想定した。本研究では 2 次元 Energy Balance Model (e.g., North 1975) を用いて、惑星の地表面温度分布を計算し、G 型伴星が潮汐固定惑星の水の局在凍結・大気の凍結に与える影響を調べた。全面が海に覆われた"海惑星"と表層に少量の水しか存在しないような"陸惑星"のそれぞれについて、地球大気または CO2 大気を持つ場合について計算を行った。

計算の結果、G 型星放射の時間変動に対して、海惑星と陸惑星の全球温度分布は異なる時間変化を示した。これは、各惑星の熱容量と拡散係数の違いにより生じる。一方で、海・陸惑星ともに連星間距離約 4 au まで、G 型星からの放射が夜面の温度を上昇させることがわかった。これにより水の局在凍結や大気の凍結が緩和され、惑星は液体の水を持ちうるような領域を有するようになる。特に、地球大気または 0.1-1bar CO2 大気を有する陸惑星は、このような連星系の場合のみに HZ をもつことが明らかになった。また、海惑星については 1bar 以下の薄い CO2 大気を有するときに、連星系の場合のみで HZ をもつことが可能となる。

G3

系外惑星大気における鉱物雲形成：凝縮成長による雲粒のサイズ分布計算

○関航佑[1]　奥住聡[1]　大野和正[1]
[1] 東京工業大学理学院地球惑星科学系

惑星の大気組成を推定する方法として，大気透過光分光観測がある．しかし，短周期スーパーアースの多くは波長依存性の少ない透過光スペクトルを持つため，大気組成を直接推定することは困難であることが知られている．その原因として，大気透過光を遮る高高度の厚い鉱物雲の存在が示唆されている (e.g. Kreidberg et al. 2014; Knutson et al. 2014a)．したがって，系外惑星大気における雲形成を理論的に理解することが重要である．

本研究では，雲を構成する雲粒のサイズ分布に着目する．これまでの雲粒のサイズ分布計算では，雲の光学的厚みや観測スペクトルの再現については議論されているが (e.g. Powell et al. 2018; Gao & Benneke 2018)，雲粒サイズ分布そのものの詳細な解析は行われていない．雲粒のサイズ分布が解析的に理解できれば，観測との比較が容易になることが期待される．

本研究は，雲粒のサイズ分布を解析的に理解することを目的とする．そのため，まず雲粒に凝縮するガスの過飽和度が一定の条件の下で，雲粒のサイズ分布凝縮成長・鉛直輸送計算を行った．また，得られた雲粒サイズ分布を解析的に説明することを試みた．計算には，雲粒のサイズ分布の広がりを無視していた Ohno & Okuzumi (2018) の鉛直 1 次元輸送モデルをもとに，雲粒のサイズ分布を解像する計算コードを新たに開発し使用した．また，大気透過光スペクトル観測から大気上層に雲の存在が示唆されているスーパーアース GJ 1214b の KCl 雲を仮定した．

その結果，大気下層における半径 10 μm 以下の雲粒サイズ分布は，単位対数半径あたりの数密度で表したとき半径の 1 乗のべき分布に従うことがわかった．これは，雲粒の鉛直輸送が無いとした場合の凝縮成長計算の定常解の冪と一致し，解析的に説明されることが明らかになった．また，雲粒は凝縮成長のタイムスケールが重力落下のタイムスケールより短くなる半径まで凝縮成長し，これによって各高度における雲粒の最大サイズが決まることがわかった．

本発表では，過飽和度を可変にした場合の雲粒サイズ分布についても議論したい．

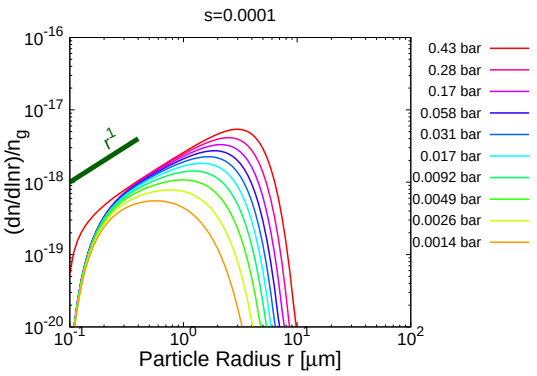


Fig. 1: 各高度における雲粒のサイズ分布．横軸は雲粒半径，縦軸は雲粒の単位対数半径あたりの数密度混合率である．s は雲粒に凝縮するガスの過飽和度である．

北天で発見された重力マイクロレンズ惑星イベントのフォローアップ観測

○ 福井暁彦[1], 鈴木 大介[2], 前原 裕之[3], 柳澤 顕史[1,4],
米原 厚憲[5], 成田 憲保[4], 平野 照幸[6,7], 葛原 昌幸[8], 越本 直季[4], 村田 勝寛[6], 河合 誠之[6]

[1] 国立天文台, [2]JAXA, [3] 京都大学, [4] 東京大学,
[5] 京都産業大学, [6] 東京工業大学, [7] ハワイ大学, [8] アストロバイオロジーセンター

惑星系の重力レンズ効果により背景の星の光が増光される現象（重力マイクロレンズ現象）を捉える重力マイクロレンズ法は、中心星からの距離がアインシュタイン半径付近の惑星に最も感度が高い。これは、銀河中心方向イベントの場合、約 2–5 天文単位 ($\times\sqrt{M_s/0.4M_{sun}}$) に相当し、惑星系形成時におけるスノーラインの位置の数倍遠方の距離に対応する。一方、重力マイクロレンズ現象が起こるためには、惑星系（レンズ天体）と背景星（光源天体）が天球面上で 1 ミリ秒角以下に近づく必要があり、発生確率が大変低い。そのため、惑星探索は専ら、発生確率が全天で最も高い ($\sim 10^{-6}$) 銀河中心方向で行われている（MOA, OGLE, KMT-Net など）。これらの探索によって、これまでに 70 個以上の惑星が発見され、スノーラインの数倍遠方の位置では海王星程度の質量の惑星が最も多い事などが明らかにされてきた。一方、発見される惑星系の大半は地球から遠方（数 kpc）であるため、個々の惑星についてのフォローアップは困難である。

そのような中、2017 年 10 月に、日本のアマチュア天文家（小嶋正氏）が新星探索中におうし座方向で未知の増光天体を発見し、後にそれが重力マイクロレンズ現象であることが確認された。我々は発見の一報を受け、国内外の複数の望遠鏡（岡山 188cm, 91cm, 50cm 望遠鏡、JAXA 宇宙研 1.3m 望遠鏡、京産大 1.3m 望遠鏡、カナリア諸島 1.5m 望遠鏡など）を用いてこのイベントの追観測を開始した。

一方、我々が追観測を開始する直前に、海外のアマチュア天文家らによって光度曲線の逸脱が捉えられ、レンズ星に惑星が付随することが判明した。Nucita et al. はこの光度曲線の解析に基づき、銀河モデルを仮定した確率的手法により惑星系の質量を推定し、主星は M 型星、惑星はスーパーアースであると報告した。

我々は独自の追観測データを解析し、新たにレンズ星の明るさを求めることに成功した。その結果、惑星系の質量や距離が銀河モデルに依存せず正確に求まり、主星は晩期 K/早期 M 型星、惑星は海王星質量（約 20 地球質量）であることが分かった。また、主星と惑星の射影距離は 1-2 天文単位であり、ちょうどスノーライン付近の軌道に位置することが分かった。稀なイベント中に偶然発見された惑星がスノーライン付近の海王星質量であるという事実は、スノーライン付近においても海王星質量惑星が豊富に存在する可能性を示唆している。この惑星系は主星が比較的明るく、光源星と数年以内に空間分離が可能であるため、今後様々な詳細追観測が期待される。

4色同時撮像カメラMuSCAT2の初期成果とTESSに向けたMuSCAT3開発の展望

○ 成田憲保[1,2,3,4,5], 福井暁彦[1,4,5], 日下部展彦[3,4], 渡辺紀治[4,6], 田村元秀[1,3,4], 山室智康[7], 生駒大洋[1], 川島由依[8], 越本直季[1,4], 川内 紀代恵[8], John Livingston[1], Jerome de Leon[1], 寺田由佳[1], 森万由子[1]

[1] 東京大学, [2] 科学技術振興機構, [3] アストロバイオロジーセンター, [4] 国立天文台, [5] カナリア天体物理学研究所, [6] 総合研究大学院大学, [7] オプトクラフト, [8] 東京工業大学

2018年4月にNASAの系外惑星探索の次期旗艦衛星計画であるTESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) が打ち上げられた。我々はTESSで発見される数多くのトランジット惑星候補の中から本物の惑星をいち早く発見するため、2014年に岡山天体物理観測所1.88m望遠鏡用に3色同時撮像カメラMuSCATを開発し、2015年から運用を行なってきた。

MuSCATの開発後、我々はスペインのカナリア天体物理研究所 (IAC) から共同研究の提案を受け、テネリフェ島テイデ観測所にあるTCS1.52m望遠鏡に搭載する新しい4色同時撮像カメラMuSCAT2を開発してきた。2016年にはカナリア天体物理研究所とアストロバイオロジーセンター (ABC) の間で覚書を締結し、2018年から5年間にわたって年間162夜の観測時間 (うち25夜がABC時間、残りが共同研究時間) が保証されることとなった。テイデ観測所の晴天率は年間約70%であり、世界的な天文観測最適地である。これは日本の最良観測地である岡山の約25%の晴天率を大幅に上回っている。MuSCAT2は2017年8月24日にファーストライトを迎え、本予稿執筆時には試験観測期間を含めて運用期間が1年を過ぎ、既に150夜以上のサイエンス観測を実施した。本講演ではこの1年の運用で得られた初期成果と、MuSCAT2の性能についてまず報告する。

次に、MuSCATとMuSCAT2の成功を受けて、2017年以降アメリカの研究者からMuSCAT3をホストしても良いというコンタクトを受けた。そこで我々は、新学術領域研究「新しい星形成理論によるパラダイムシフト：銀河系におけるハビタブル惑星開拓史の解明」(研究代表者：犬塚修一郎) の中の計画研究「惑星大気の形成・進化とその多様性の解明」(研究代表者：生駒大洋) の中でMuSCAT3の開発を提案した。この新学術領域研究は2018年6月に採択され、我々は本格的にMuSCAT3の開発検討を開始した。本講演ではこのMuSCAT3の計画についても紹介する。

H1

はやぶさ2によるリュウグウ観測の概観

○渡邊誠一郎[1,2]，吉川真[2]，田中智[2]，杉田精司[3]，北里宏平[4]，竝木則行[5]，岡田達明[2]，平田成[4]，平田直之[6]，山本幸生[2]，藪田ひかる[7]，中村智樹[8]，石原吉明[2]，佐伯孝尚[2]，津田雄一[2,] はやぶさ2サイエンスチーム

[1]名古屋大学，[2]JAXA宇宙科学研究所，[3]東京大学，[4]会津大学，[5]国立天文台，[6]神戸大学，[7]広島大学，[8]東北大学

2018年6月27日，小惑星探査機はやぶさ2は，3年半の往路航行の後に，C型小惑星リュウグウ近傍のホームポジション（小惑星表面から高度20 km）に到着した．探査機は通常は地球と小惑星重心を結ぶ線上付近にホバリングして，自転する小惑星を観測する．搭載機器（光学カメラ ONC-T，熱赤外カメラ TIR，近赤外分光計 NIRS3，レーザ高度計 LIDAR）の初期チェックアウトの後，7月10-12日に高度20 kmからのBox-A観測，7月20日に高度6.5 kmからのBox-C観測，8月1日には高度5.1 kmからの中高度観測，8月6,7日には重力計測観測．8月23，24日にはBox-Aから南極方向に移動してBox-B観測をいずれも成功裏に実施した．これらの観測に基づいて，試料採取の着地点選定（LSS）を行った．

リュウグウは軸対称に近いこま型で，直径500 m余りの赤道リッジを持ち，南北方向にほぼ一定の傾斜が中緯度まで続く形状を持つことが明らかになった．自転は周期7.63時間の逆行で，軸は軌道面に対し172°のobliqityを持つ．重力計測の結果から，きわめて小さいバルク密度を持つことがわかり，内部は50%を超える空隙率をもつと推定される．表面には大きな岩塊が散在し，形状中心と重心のずれも小さいことから，リュウグウは伸張強度が弱いrubble pile天体であると考えられる．講演ではコマ型の成因について議論する．

表面スペクトリは可視・近赤外ともに均一で，変化に乏しい．反射率はきわめて低く，勾配はフラットに近い．また，顕著な吸収は見られない．ただし，赤道リッジと中緯度には違いも見られ，これは形状形成と関係する可能性がある．日温度変化も特徴的である．

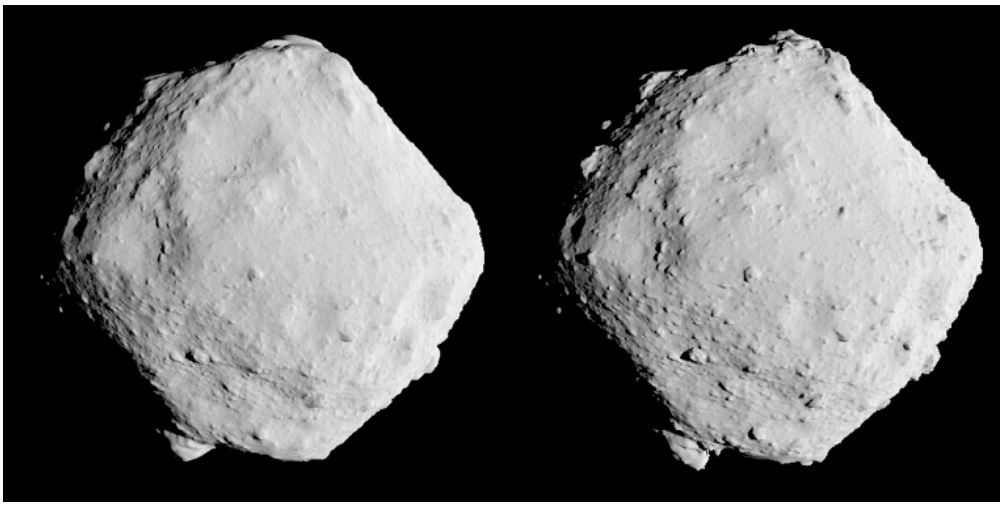
こま型の天体は，OSIRIS-REXの対象天体であるBennuや米国のDART計画の対象天体のDidymos A（連小惑星の主星）など，地上のレーダー観測で多数見つかっている．ただし，いずれも自転周期が短く，リュウグウのように自転速度が小さいものはほとんどない．地球接近小惑星は惑星からの潮汐を受けやすく，その際にこま型は非軸対称不安定を起こして細長く伸びた形状に変形される可能性がある．リュウグウがそのような変形を受けずにYORP効果で減速できたのかは，その進化を考える鍵となる．

はやぶさ2は今後，着陸機MASCOT・ローバMINERVA-IIの分離，さらには，そのボルダーの多い表面から着陸点を見出して，サンプル採取を成し遂げる必要がある．その見通しについても講演で紹介する予定である．

はやぶさ 2 探査機の観測に基づく 小惑星リュウグウの形状

○平田 成[1]、平田 直之[2]、田中 小百合[2]、西川 直輝[2]、杉山 貴亮[1]、R. Gaskell[3]、E. Palmer[3]、野口 里奈[4]、嶌生 有理[4]、杉田 精司[5]、津田 雄一[4]、渡邊 誠一郎[6]
[1]会津大学、[2]神戸大学、[3]PSI、[4]ISAS/JAXA、[5]東京大学、[6]名古屋大学

小惑星探査機はやぶさ 2 は 2018 年 6 月に目的地である小惑星リュウグウに到着し、観測を開始した。リュウグウの形状は、探査機の着陸地点の選定や、運用のための基礎情報であるとともに、小惑星の形成史を紐解く上で重要である。著者らは Stereophotoclinometry と Structure-from-Motion という独立した二種類の方法を用いて、はやぶさ 2 の観測データから小惑星リュウグウの形状の復元を試みた。
Stereophotoclinometry は最初のはやぶさのほか、多数の探査ミッションで実績のある形状復元手法であり、形状と同時に画像撮像時の探査機位置・姿勢、小惑星の自転情報を推定することができる。一方、Structure-from-Motion は近年のコンピュータビジョン分野で研究開発が進んだ技術であるとともに、広く一般にも利用されるようになっている。
それぞれの手法で得られた形状モデルは、全体として相互によく一致している。また、源泉となった実画像とも高い整合性を示している。このことから、二つの手法による形状モデルはリュウグウの形状をよく復元できていると評価されている。発表では詳細な手法の説明、評価の結果について述べるとともに、形状から推定できる斜度分布など、リュウグウの表面環境についても触れる。



図：復元されたリュウグウの形状モデル。左が Stereophotoclinometry、右が Structure-from-Motion によるもの。

H3

小惑星 Ryugu のクレータサイズ頻度分布と表面年代

諸田智克[1]，長勇一郎[2]，金丸仁明[3]，本田理恵[4]，亀田真吾[5]，巽瑛理[2]，
横田康弘[6]，神山徹[7]，鈴木秀彦[8]，山田学[9]，坂谷尚哉[6]，本田親寿[10]，
早川雅彦[6]，吉岡和夫[2]，松岡萌[6]，道上達広[11]，宮本英昭[2]，菊地紘[2]，逸見良道[2]，
平林正稔[12]，平田直之[13]，平田成[10]，澤田弘崇[6]，杉田精司[2]

[1]名古屋大学，[2]東京大学，[3]大阪大学，[4]高知大学，[5]立教大学，[6]宇宙航空研究開発機構，
[7]産業技術総合研究所，[8]明治大学，[9]千葉工業大学，[10]会津大学，[11]近畿大学，[12]Auburn Univ.，[13]神戸大学

小惑星表面のクレータ統計は，天体衝突史と様々な表層地質過程の歴史を反映している．我々は「はやぶさ２」搭載の光学航法カメラ(ONC)によって取得された全球画像を用いて小惑星 Ryugu 表面のクレータ構造の同定を行ってきた．Ryugu のクレータは Itokawa で観測された衝突痕と考えられる地形と比較し，明瞭なお椀型を示している．直径 100m 以上のクレータの数密度は経験的飽和レベルに近いものの，サイズ頻度分布の傾きは-3 となっており小天体のサイズ分布に近いことから飽和には達していないと考えられる．メインベルトのクレータ年代学モデルによると，Ryugu の表面年代は 1000 万年から 10 億年と見積もられる．一方で，直径 100m 以下のクレータはそれよりも大きいクレータの数密度から推定される数密度と比較して小さく，Ryugu 表面で何らかのクレータ消失過程が働いていることを示唆している．

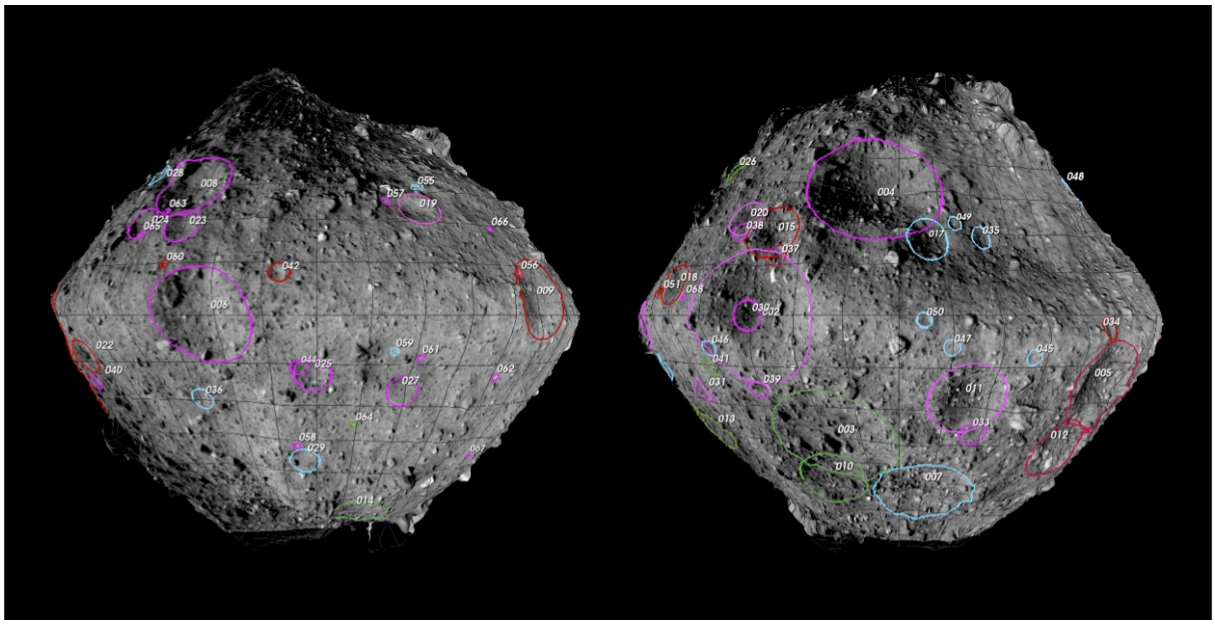


図１　Ryugu 表面のクレータ分布．

小惑星リュウグウの岩塊サイズ分布の初期解析結果

○道上達広[1], 本田親寿[2], 川村真輝[1], 杉本貴一[1], 巽瑛理[3], 宮本英昭[3], 平林正稔[4], 諸田智克[5], 野口高明[6], 長勇一郎[3], 亀田真吾[7], 菊地紘[3], 神山徹[8], 早川雅彦[9], 辺見良道[3], 平田直之[10], 平田成[2], 本田理恵[11], 松岡萌[9], 坂谷尚哉[9], 鈴木秀彦[12], 横田康弘[9], 山田学[13], 吉岡和夫[3], 澤田弘崇[9], 杉田精司[3]

[1]近畿大学, [2]会津大学, [3]東京大学, [4]オーバーン大学, [5]名古屋大学, [6]九州大学, [7]立教大学, [8]産業技術研究所, [9]ISAS/JAXA, [10]神戸大学, [11]高知大学, [12]明治大学, [13]千葉工業大学

本年 6 月末、小惑星探査機「はやぶさ２」は、小惑星リュウグウに到着し、詳細なデータを送信し続けている。小惑星リュウグウは、直径が 1㎞ に満たない小さな小惑星ながら、多くの岩塊に覆われていることが分かった。小惑星表面にある岩塊は、小惑星表層の物理的特性や地質的変化、そして衝突履歴を反映している。本研究では、主に本年 7 月に撮像された画像データから、岩塊を楕円で近似して、その位置と直径を調べた。ここで岩塊とは表面から突出しているように見えるすべての塊を意味している。岩塊の直径は、長軸の大きさを a、それに直交する短軸の大きさを b として、$(a+b)/2$ で定義した。それらの岩塊のサイズ分布の初期解析結果について報告する。

小惑星表面に見られる岩塊は、大きく分けて２つの形成メカニズムが考えられる。１つは、隕石が小惑星表面に衝突してクレーターが形成された際に、飛び出した破片が重力によって再び小惑星表面に降り積もったものである。もう１つは、過去にリュウグウのもととなる小惑星母天体が存在し、その母天体が激しい衝突を受けて壊れ、それらの一部の破片がリュウグウとして再集積する際に、表面に堆積したものである。前者は比較的大きな小惑星の表面に見られる。例えば、小惑星エロス（大きさ 34×11×11 km; Veverka et al., 2000）では、ほとんどの岩塊は、直径 7.6㎞ のシューメーカークレーターが形成された際の破片と考えられている（Thomas et al., 2001）。後者は比較的小さな小惑星の表面に見られる。例えば、小惑星イトカワ（大きさ 0.535×0.294×0.209 km; Fujiwara et al., 2006）では、ほとんどの岩塊はクレーター形成起源ではなく、イトカワ母天体が破壊されたときの破片と考えられている（Fujiwata et al., 2006;Michikami et al., 2008 など）。イトカワのようなラブルパイル天体の場合、岩塊の数密度は大きいことが知られている。

小惑星リュウグウは、直径 1㎞ 弱であることから、大きさとしては小惑星イトカワに近い。直径 20m 以上の岩塊の数密度は、約 50 個/km^2 もあり、小惑星エロス（～2 個/km^2; Thomas et al., 2001）の 20 倍以上、小惑星イトカワ（～20 個/km^2; Michikami+2008; Mazrouei+2014）と比べても、少なくとも２倍以上大きいことが分かる。また、この事実に加えて、小惑星リュウグウは、最大クレーターに対する最大岩塊のサイズ比が大きいこと、東西方向で数密度の違いは見られるものの、全体としては比較的一様に岩塊が分布していることが分かった。以上のことから、ほとんどの岩塊は母天体衝突起源であり、小惑星リュウグウは、母天体破壊から再集積したラブルパイル天体だと考えられる。

H5

リュウグウの画像テクスチャの解析による サブピクセル粒子数密度の推定

○田辺直也[1], 巽瑛理[1], 本田親寿[2], 諸田智克[3], 本田理恵[4], 亀田真吾[5], 澤田弘崇[6], 坂谷尚哉[6], 横田康弘[6], 早川雅彦[6], 松岡萌[6], 山田学[7], 神山徹[8], 鈴木秀彦[9], 杉田精司[1]

[1]東京大学, [2]会津大学, [3]名古屋大学, [4]高知大学, [5]立教大学, [6]宇宙航空研究開発機構, [7]千葉工業大学, [8]産業技術総合研究所, [9]明治大学

はやぶさ2は現在、サンプルリターンを目指して、小惑星リュウグウの探査を行なっている。サンプルリターンミッションにおいては、そのサンプル回収地点の決定が非常に重要となる。サンプル回収地点の決定で最も優先されるのは、探査機の安全性確保である。タッチダウン時の安全性確保に必要な地表面の条件は幾つもあるが、空間スケールの最も小さい表面形状の条件として、直径数十cm以上の大きさのボルダーの個数密度が低いことが挙げられる。しかし、全球的な観測ができる20km高度からの画像の解像度は2m/pixであり、高度5kmまで降下しても解像度は~0.5m/pix程度である。数十cmのボルダーを視認で判別することはできない。そこで、我々は本研究では、対象領域のテクスチャーを定量的に評価することで、sub-pixから数pix程度の小さなボルダーの存在度を推定する手法の開発を行った。

ボルダーはその表面の凹凸や曲率の影響により、小惑星の自転に伴う太陽光入射角の変化の影響による輝度値変化が大きくなる。この効果を利用して、太陽光入射角の異なる複数の画像の輝度値変化σ_{in}を解析することで、sub-pixから数pix程度のボルダーの存在度を評価する。

このような手法は、これまで用いられた例がないため、その正当性を評価する目的で、室内実験を行なった。リュウグウの表面状態を模したサンプルを用意し、光の入射角を変化させて撮像を行うことで、模擬的なリュウグウ画像を作成した。この画像からσ_{in}を算出し、サンプル領域のマッピングを行なったところ、σ_{in}>10%となる領域の割合と0.6pix以上のボルダーの表面被覆率とがよく相関していることが分かった。

そこで、本手法をはやぶさ2の撮像した画像にも適用した。まず、低解像度の画像に対して、本手法を適用し、ある種のキャリブレーションを行った所、室内実験と同様の傾向も確認でき、σ_{in}とボルダー被覆率を結び付ける検量線の作成にも成功した。そこで、より高解像度の画像に対して、本手法を適用した所、これまで目視では確認できていなかった0.75m以上のボルダー被覆率を推定することができた。これにより、より詳細に着陸候補地点の安全性を評価することができた。

はやぶさ２の着陸地点選定に向けた撮像模擬実験結果のリュウグウ撮像画像への適用

○諸井　圭市[1]、石田　茉莉花[1]、巽　瑛理[2]、亀田　真吾[1]、杉田　精司[2]、本田　理恵[3]、諸田　智克[4]、横田　康弘[5]、神山　徹[6]、鈴木　秀彦[7]、山田　学[8]、坂谷　尚哉[5]、本田　親寿[9]、早川　雅彦[5]、吉岡　和夫[2]、松岡　萌[5]、長　勇一郎[2]、澤田　弘崇[5]

[1]立教大学、[2]東京大学、[3]高知大学、[4]名古屋大学、[5]JAXA/ISAS、[6]産業技術総合研究所、[7]明治大学、[8]千葉工業大学、[9]会津大学

2014 年に打ち上げられたはやぶさ２は、C 型小惑星リュウグウを目標天体とした小惑星探査機であり、2018 年 6 月 27 日にリュウグウに到着し、観測を行っている。はやぶさ２におけるミッション目標の一つは、熱変成の進んでいない有機物や含水鉱物を地球へと持ち帰ることである。はやぶさ２では、3 つの可視カメラから成る光学航法カメラ（ONC）のうち、7 枚のバンドパスフィルタの備わった望遠カメラ「ONC-T」を用いてマルチバンド分光観測を行う。そして、その撮像結果から反射スペクトルの測定が可能であることを事前に確認しておく必要がある。我々はこれまでに、ONC-T のフライトモデルを用いて、C 型小惑星に対応する反射スペクトルを持つ炭素質コンドライトに対する反射分光実験を行い、高い精度で反射スペクトルの測定が可能であることを確認した[Kameda et al.,2015]。しかし、この反射スペクトルは 50×50 画素でビニングした結果であり、ボルダーやクレータなど、局所的なスペクトルの測定にはより高い空間分解能が必要である。また、ONC-T はフィルタホイールを回転させることで観測波長域を変更するが、その間に小惑星の自転によって視野がずれてしまう。バンドごとの視野のずれは、特に局所的なスペクトルの測定の際に影響が大きくなるが、先行研究では模擬されておらず、この影響を確認する必要がある。

そこで本研究では、新たにリュウグウの自転によるバンドごとの視野のずれを模擬した反射分光実験を行い、ONC-T で得られる反射スペクトルの精度を確認した。また、視野のずれによる影響を小さくするための補正を行い、補正後の反射スペクトルの精度についても確認した。本発表では、この実験結果について述べるとともに、この結果をリュウグウ画像に適用した場合の反射スペクトルをその精度と合わせて紹介する。

はやぶさ2搭載中間赤外カメラ(TIR)によるRyuguの初期観測

Initial Observation of the asteroid Ryugu by Thermal Infrared Camera (TIR) on board HAYABUSA2

○田中智[1] ,岡田達明[1], 福原哲哉[2], 田口真[3], 荒井武彦[4], 千秋博紀[1], 坂谷尚哉[1], 嶌生有理[5], 出村裕英[1], 小川佳子[1], 須古健太郎[1], 関口朋彦[1], 神山徹[1], 滝田隼[1], 松永恒雄[1], 今村剛[1], 和田武彦[1], 長谷川直[1], Jorn Helbert [1], T.G. Mueller [1], A. Hagermann [1], J. Biele [1], M. Grott [1], M. Hamm [1], M. Delbo [1], 平田成[1], 山本幸生[1], 照井冬人[1], 佐伯孝尚[1], 中澤暁[1], 吉川真[1], 渡邊誠一郎[1], 津田雄一[1]

S.Tanaka[1], T.Okada[1], T.Fukuhara[2], M.Taguchi[3], T.Arai[3], H.Senshu[1],N.Sakatani[1], Y.Shimaki[5], H.Demura[1], Y.Ogawa[1], K.Suko[1], T.Sekiguchi[1], T.Kouyama[1], J.Takita[1], T.Matsunaga[1], T.Imamura[1], T.Wada[1], S.Hasegawa[1], J.Helbert[1], T.G.Mueller[1], A.Hagermann[1], J.Biele[1], M.Grott[1], M.Hamm[1], M.Delbo[1], N.Hirata[1], Y.Yamamoto[1], F.Terui[1], T.Saiki[1], S.Nakazawa[1], M.Yoshikawa[1], S.Watanabe[1], Y.Tsuda[1]

1,宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2, 立教大, 3, 足利大, 4, 千葉工大, 5, 会津大, 6, 北海道教育大, 7, 産総研, 8, 北見北斗高, 9, 環境研, 10, 東京大, 11, ドイツ航空宇宙センター, 12, マックスプランク研究所, 13, スターリング大, 14, コートダジュール天文台

1, JAXA, 2,Rikkyo Univ., 3, Ashikaga Univ., 4,Chiba Institute of Technology, 5, Univ. Aizu, 6, Hokkaido Uviv. Edu., 7, AIST, 8 Kitami Hokuto High School, 9, NIES, 10, Univ. Tokyo, 11, DLR(Germany), 12, Max-Plancl Inst.(Germany), 13, Univ. Stirling(UK), 14, Obs. Cote d'Azur(France)

「はやぶさ2」搭載中間赤カメラ(TIR)は惑星表面の温度情報が得られる2次元撮像カメラである. 本機は打ち上げ時から健全な状態で航行を続け, Ryugu距離が2500kmに到達した時点からサイエンス観測を開始した. これまでに, 2500kmから20kmまでアプローチ運用時のライトカーブ観測, 近傍運用開始後は1自転分観測(撮像間隔は概ね自転角度6度おき)をそれぞれ20km, 5km高度(分解能はそれぞれ20m,5m程度), そして一部の領域ではあるが最下点高度1km付近での撮像に成功しており(9月10日時点)これまでに約1000枚の画像を取得した.

TIRは撮像位置, 機器の温度状態, そして高温部の撮像面積などによって温度変換係数が複雑に変化することがわかっている. 高精度に温度を決定するためには適切な補正が必要でありこれを地上試験で実施するのは限度があった為, 校正データを取得するための運用(撮像位置変更、ダーク撮像など)も適時実施している.

これまでの観測で最も特徴的な結果としては, 太陽高度に対する温度変化が単純な球面を仮定する場合と大きく異なり, 温度上昇が早く、温度下降が想定よりも遅れる現象である. これは表面のラフネスに起因していると考えられる. 今後のさらなる近接撮像や長期間の温度変化データを取得することで, ラフネスのスケール, 表層付近の熱物性についての理解が大きく進展することが期待される.

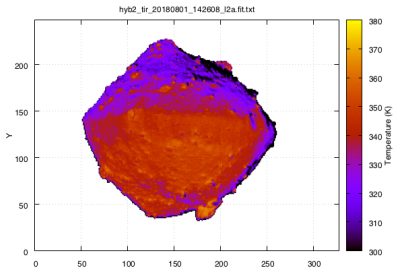


図:約 5km 高度から撮像した温度画像例(2018/8/1)

はやぶさ 2 搭載中間赤外カメラ TIR が示す小惑星 Ryugu 熱物性の地域的多様性

Regional variation of thermo-physical properties on asteroid Ryugu by TIR on Hayabusa2

◯ 嶌生有理 [1]，田中智 [1]，福原哲哉 [2]，荒井武彦 [3]，千秋博紀 [4]，
坂谷尚哉 [1]，出村裕英 [5]，須古健太郎 [5]，岡田達明 [1]
◯Y. Shimaki[1], S. Tanaka[1], T. Fukuhara[2], T. Arai[3], H. Senshu[4],
N. Sakatani[1], H. Demura[5], K. Suko[5], T. Okada[1]

[1] 宇宙航空研究開発機構，[2] 立教大学，[3] 足利大学，[4] 千葉工業大学，[5] 会津大学
[1]Japan Aerospace Exploration Agency, [2]Rikkyo University, [3]Ashikaga University,
[4]Chiba Institute of Technology, [5]University of Aizu

はやぶさ 2 に搭載されている中間赤外カメラ TIR は小惑星の熱放射撮像を行い，小惑星の表面熱物性と物理的状態を調査することを目的としている．TIR は熱型の非冷却 2 次元ボロメータを採用しており，波長 8–12 μm 帯での熱画像を撮像する．小惑星の表面熱物性は熱慣性で代表され，一般に砂，砂利–礫，岩塊の熱慣性は SI 単位系 [$\mathrm{Jm^{-2}s^{-1/2}K^{-1}}$] でそれぞれ $\leq$100, 100–1000, $\geq$1000 である．TIR では撮像した熱画像から小惑星表面の温度履歴を測定し，最高温度と到達時刻の遅れから熱慣性を推定する．

はやぶさ 2 は 2018 年 6 月 27 日に C 型小惑星 162173 Ryugu に到着し，リモートセンシングを開始した．TIR は高度 20 km のホームポジションおよび高度約 5 km の中高度において複数回の一自転観測を実施した．観測された熱画像は地上実験の校正データベース HEAT [1] によって輝度温度画像に変換され，探査機軌道等の SPICE kernel を用いて小惑星形状モデル上に投影された．投影された輝度温度の時間変化から，小惑星の各緯度経度における温度履歴を取得した．その結果，小惑星 Ryugu 表面の温度履歴は正午付近の最高温度と朝夕の温度が比較的近い平坦な形状を示した．これはボルダーに富む小惑星 Ryugu の表面ラフネスに起因すると考えられ，どの観測時刻においても TIR に正対する面が見えていることを示唆している．本発表ではラフネスモデルに基づく解析から小惑星 Ryugu の表面熱物性について報告する．

参考文献

[1] Ken Endo, Hirohide Demura, Takayuki Dairaku, Tetsuya Fukuhara, Tatsuaki Okada, and Satoshi Tanaka. Heat: Image and database browser for the thermal imager on hayabusa2. In *Aerospace Conference, 2017 IEEE*, pages 1–10. IEEE, 2017.

I1

赤外線天文衛星「あかり」近赤外線分光観測による小惑星の含水鉱物探査

○臼井 文彦[1]、長谷川 直[2]、大坪 貴文[2]
[1]神戸大学 CPS、[2]ISAS/JAXA

小惑星における含水鉱物の存在を調べることは、太陽系の形成や進化の過程、特に熱的な変遷を知る上で重要である。含水鉱物は液体の水と無水ケイ酸塩鉱物が反応して生成されるが、小惑星においては、天体形成後に天体内部にて反応が進行すると考えられる。含水鉱物は水の昇華温度以上でも安定に存在するため、生成後の温度変化の影響を受けにくい水の存在を示す重要なトレーサーである。実際、南極で回収された隕石のうち、炭素質コンドライトには含水鉱物に富むものが多くあることが知られている。

含水鉱物や水氷は、近赤外線・波長 3 μm 帯の反射スペクトルに顕著な吸収フィーチャーを持つ。具体的には、含水鉱物については 2.7 μm 付近、水氷については 3.1 μm 付近に特徴的なスペクトルパターンが現れる。そこで、水の存在の探査には、多様な小惑星について 3 μm 帯の分光観測を行う必要がある。しかし、赤外線の波長域は地球大気の吸収の影響を受けるため、地上望遠鏡では波長方向に連続的にデータを取得することができない。特に含水鉱物の吸収ピークが現れる 2.7 μm 付近は地上観測では捉えることができない波長帯であり、これまでの観測では対象天体の含水量の推定や表層物質の鉱物種の同定には至っていなかった。

そこで我々は、2006 年打ち上げの赤外線天文衛星「あかり」を用いて、地球大気に影響されることなく小惑星の近赤外線分光観測を行った。観測波長は 2.5-5 μm (波長分解能 R～100)、観測対象はメインベルト小惑星 66 個(C 型×23 個、S 型×17 個、X 型×22 個、D 型×3 個、V 型×1 個)を選んだ。その結果、ほとんどの C 型小惑星には波長 2.7 μm の含水鉱物の吸収を持つこと、一方 S 型小惑星には顕著な吸収が見られないことがわかった。

本講演では、「あかり」で得られた波長 3 μm 帯の反射スペクトルを提示し、さらにそこから考えられる小惑星の熱的な進化過程について議論する。

地球近傍小惑星(1566) Icarus と 2007 MK_6 の分光観測：分裂の証拠と対応隕石種の推定

○船橋和博[1]，阿部新助[1]，Nicholas Moskovitz[2]，浦川聖太郎[3]，大塚勝仁[4]
[1]日本大学，[2]Lowell Observatory，[3]日本スペースガード協会，[4]東京流星ネットワーク

地球近傍小惑星のアポロタイプである 2007 MK_6 は(1566) Icarus の分裂破片であることが力学的進化の類似性から指摘されている[1]. Icarus の自転周期は 2.237[hr][2]とスピンバリアである 2.2[hr]に近く，Icarus と 2007 MK_6 の母天体が YORP 効果などの要因で自転周期が変化し，スピンバリアを超えた際に分裂し，元々持っていた角運動量が Icarus 及び 2007 MK_6 に分配され，現在のスピンバリアに近い自転周期になったと考えられる. この両天体の近日点距離は Icarus が q_{Icarus}=0.187[AU][3]，2007 MK_6 は $q_{2007MK6}$=0.196[AU][3]という距離にまで近づく. Granvik らによる，「近日点距離が約 0.2AU 以内に近づく小天体は容易に破壊され得る」[4]という研究結果から Icarus，2007 MK_6 は太陽加熱により破壊された可能性もあり，今もなお崩壊の途中であるということが示唆される.

YORP 効果や太陽加熱などの要因でこの量天体は分裂したと考えられるが，分裂の証拠は力学的進化の類似性以外からは得られていない. さらに，2007 MK_6 のスペクトル型と Icarus の自転に伴うスペクトルの変化についての調査はこれまでに行われてこなかった. もし近い過去に分裂したとするならば，その分裂断面は宇宙風化を受けていないフレッシュな組成であり，スペクトルの不均質性が確認できると期待される. 本研究では可視光分光観測(波長:400 - 1000nm)から未分類の 2007 MK_6 の小惑星タイプを同定し，Icarus の異なる自転位相のスペクトルと比較して，分光学的類似性について調査した. これらの観測は，Lowell Observatory 4.3-m Discovery Channel Telescope と DeVeny 分光器(R=500)を用いて，Icarus は 2015 年 6 月 21 日(V=14)に，2007 MK_6 は 2016 年 6 月 15 日(V=18.5)に観測を行った.

本研究では，本観測結果と NASA Infrared Telescope Facility (IRTF)によって 2005 年と 2015 年に観測された Icarus の近赤外分光観測結果(波長:850 - 2500nm)を用いて議論を行う. それぞれの観測スペクトルは，Bus-Demeo の分類法を用いてタイプ分別を行った. その結果 Icarus は S 型の平均スペクトルの一部の自転位相で Q～O 型に近いスペクトルが存在し，2007 MK_6 は O 型に類似した平均スペクトルを有することが示唆された. また，Modified Gaussian Model (MGM)[5]を用いた隕石スペクトルとの比較と 1，2 μm 帯の吸収特性から Icarus と 2007 MK_6 の対応隕石種の推定も行った. その結果，Icarus の S 型表面に対応するものとして普通コンドライトの L5，Q～O 型表面と 2007 MK_6 に対応するものとして L6 もしくは LL6 が示唆された. 本研究では以上の解析結果をまとめ，Icarus と 2007 MK_6 の分裂の証拠について分光学的から議論を行う.

[1] Ohtsuka et al., (2007), [2] Warner et al., (2009), [3] JPL, [4] Granvik et al., (2016) [5] Sunshine et al., (1990)

ふたご座流星群母天体として知られる分裂候補地球近傍小惑星(3200)Phaethonの分光観測

○加藤 遼[1]，澤井 恭助[1]，船橋 和博[1]，阿部 新助[1]，大塚 勝仁[2]，
伊藤 孝士[3]，吉田 二美[4]，荒井 朋子[4]
[1]日本大学，[2]東京流星ネットワーク，[3]国立天文台，[4]千葉工業大学

小惑星(3200)Phaethonは，直径約5.8km，自転周期が約3.6時間の地球近傍小惑星である．軌道傾斜角が22.3°と大きく，近日点距離が0.14auと小さいという特徴的な軌道をもっており，過去の観測からBタイプ小惑星であることがわかっている[1]．B/Fタイプは，Cタイプよりも青いスペクトルをもち，Cタイプと異なりスペクトルに含水鉱物の存在を示す吸収がないことから，Cタイプ小惑星が加熱脱水を経たものだと考えられている[2]．さらに，ふたご座流星群や小惑星2005 UDと類似した軌道要素をもつため，その母天体として知られている[3]．一般的に流星群の母天体は彗星であると考えられているが，Phaethonはガスジェット等の彗星活動が乏しく，枯渇彗星あるいは活動小惑星だと考えられている．また，近日点距離が約0.2au以下であるCタイプ小惑星のような暗い小天体が太陽加熱により崩壊される可能性が示唆されている[4]．

すなわち，Phaethonの表面は基本的には加熱脱水した炭素質コンドライトに相当する物質で覆われており彗星活動は行われていないが，近日点付近では，集中的な太陽輻射圧によって表面が破壊され，内部の含水鉱物を含むCタイプのスペクトルを示す物質が表れている可能性が考えられる．Phaethonに関しては，紫外域で様々なスペクトルを示すことが報告されているが[2]，自転位相と表面スペクトルの相関については，まだ明らかになっていない．

本研究では，2017年12月のPhaethonの地球接近(約12可視等級)に際し，和歌山県にあるかわべ天文公園(望遠鏡口径 1.0m，F10)において可視領域(500-900nm)の分光観測を行い，表面組成の不均質性，および自転位相とスペクトルの関係を調査した．さらに，2007年12月の地球接近(約13可視等級)に台湾の鹿林天文台(望遠鏡口径1.0m，F12)で取られた可視領域(380-760nm)での分光観測結果との比較から，自転軸の向きや，太陽加熱による表面スペクトルの変化について推定する試みを行った．

その結果，Phaethon表面には，Bタイプに類似したスペクトルが支配的な領域と，Cタイプに類似したスペクトルが支配的な領域が存在することが分かった．2018年10月に2005 UDの地球接近(約15可視等級)に伴い，アリゾナ州にあるローウェル天文台(望遠鏡口径4.3m DCT，F6.1)において分光観測を実施する予定であり，今後はその結果との比較を行っていく．

[1] Bus, S. and R. Binzel (2002). Icarus, 158 pp.146–177.
[2] Licandro, J., H. Campins, T. Mothe-Diniz, N. Pinilla-Alonso, and J. de Leon (2007). AA, 461 pp.751–757.
[3] Whipple, F. (1983). IAU Circular, p. 3881.
[4] Granvik, M., A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, W. Bottke, E. Beshore, D. Vokrouhlicky, M. Delbo, and P. Michel (2016). Nature, 530 pp.303–306.

はやぶさ２のバックアップ天体捜索の為の観測：近地球小惑星の物理特性

長谷川直[1]、黒田大介[2]、北里宏平[3]、高遠徳尚[4]、春日敏測[4,5]、関口朋彦[6]、高遠徳尚[4]、青木賢太郎[4]、新井彰[5]、Choi Y-J.[7]、布施哲治[8]、服部尭[4]、花山秀和[4]、蕭翔耀[9]、柏川伸成[10]、河合誠之[11]、川上恭子[1,10]、木下大輔[9]、Larson S.[12]、林啟生[9]、宮坂正大[13]、三浦直也[10]、長山省吾[4]、南雲優[6]、西原説子[1,10]、大場庸平[1,10]、太田耕司[2]、大山陽一[14]、奥村真一郎[15]、猿楽祐樹[5]、清水康広[4]、高木悠平[4]、高橋隼[16]、戸田博之[2]、浦川聖太郎[15]、臼井文彦[17]、渡辺誠[18]、Weissman, P.[19]、柳澤顕史[4]、Yang H.[7]、吉田道利[4]、吉川真[1]、石黒正晃[20]、安部正真[1]

1: JAXA, 2: 京都大, 3: 会津大, 4: 国立天文台, 5: 京産大, 6: 北海道教育大, 7: KASI, 8: NICT, 9: 國立中央大、10: 東大, 11: 東工大, 12, LPL, 13: 東京都, 14: ASIAA, 15: スペースガード協会, 16: 兵庫県立大, 17: 神戸大, 18: 岡山理科大, 19: PSI, 20: ソウル大

小惑星探査探査機はやぶさ２の探査候補天体は計画当初からＣ型小惑星である162173 Ryugu (1999 JU3)であったが、打ち上げ延期対策の為Ryugu以外のＣ型小惑星の探査候補天体を捜索する必要があった。また、はやぶさ２以降の小惑星探査の為に、探査しやすい小惑星の物理的特性を調べることも重要であった。そこで我々は４８個の小惑星の表層の色情報を分光・多色測光にて、41個の小惑星周期を測光観測で調べ、合計74個の近地球小惑星の物理的特性が得た。その結果、下記のようなことが判明した。

1) 今回の多色測光(BVRI)の多色測光ではＣ型とその他のスペクトルタイプの判別には多少SNが悪くても判別は可能である。一方で、Ｄ型とＳ型の判別はSNがかなり高くないと判別は難しい。

2) 今回の観測で得られたはやぶさ２の到達可能なＣ型は153591 2001 SN263と341843 2008 EV5であった。他の研究結果と合わせても、現在判明しているはやぶさ２の到達可能なＣ型の個数は１０個程度である。

3) ＳとＣのサブクラスであるＱとＢの比率をメインベルト領域と近地球型小惑星で調べると、メインベルト領域のQ/S, B/Cの比率はそれぞれ５パーセント未満, 10%程度であったが、近地球型小惑星ではそれぞれ50%以上であった。Q/SとB/C比率変化として考えられる理由は、表層の粒径効果（粒径が大きなものが存在している）によって、スペクトルの青い天体（QとBはそれぞれSとCに比べてそのスペクトルは青い）を選択的に見ている可能性が考えられる。

地球接近天体2012 TC4の可視近赤外観測:木曽広視野カメラ「Tomo-e Gozen」を用いた高時間分解ライトカーブ

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

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

太陽系小天体とりわけ小惑星の地球衝突問題に対する取り組みはPlanetary Defenseあるいはスペースガードと呼ばれる。スペースガードでは、サーベイ観測によりNEO(near-Earth Object, 地球接近天体)を発見することと並行して、一つ一つのNEOに対して、自転周期、形状、反射スペクトルタイプといった物理素性を解明することも重要である。本研究は、NEOである2012 TC_4の高時間分解ライトカーブを取得し、その自転周期、形状、運動状態を推定することを目的とする。また、可視と近赤外における色指数を導出し反射スペクトルタイプを求める。2012 TC_4は2012年に発見され、その自転周期と直径はそれぞれ12.24 ± 0.06 min、7 - 34 mと推定された(Polishook 2013)。その高速自転から2012 TC_4は一枚岩小惑星と推測される。しかしながら、反射スペクトルタイプ、形状、運動状態を導出するほどの詳細な観測は実施できなかった。2017年10月に再び、2012 TC_4の観測好機を迎えた。その最接近距離は2017年10月12日のおよそ50,000 kmである。今回の接近は、直径の小さな一枚岩小惑星の物理状態を解明する良い機会である。我々は、東京大学木曽観測所1.05 m望遠鏡、美星スペースガードセンター1.0 m望遠鏡、兵庫県立大学西はりま天文台2.0 mなゆた望遠鏡、阿南市立科学センター1.13 m望遠鏡、なよろ市立天文台0.4 m望遠鏡を用いた観測キャンペーンを実施した。特に、木曽観測所では開発中の広視野CMOSカメラTomo-e Gozen(Sako et al. 2016)を用いて観測することができた。Tomo-e Gozenはそれぞれ21個のCMOSイメージセンサーからなる4つのモジュールで構成されている。その視野は約20平方度であり、最短で2 Hz(= 0.5秒積分)での撮像が可能である。2012 TC_4が接近した時に、Tomo-e Gozenは完成していなかったが1つのモジュールに4つのCMOSセンサーを用いた状態で機能試験観測を実施していた。短時間読み出しが可能なTomo-e Gozenは天球上を高速で移動し、なおかつ高速自転していることが分かっている2012 TC_4の観測に非常に適している。観測の結果、2012 TC_4は自転周期8.47 min、歳差周期12.25 minのタンブリング運動をしていることがわかった。また、色指数から求めた反射スペクトルタイプはXタイプであり、その直径は6 - 20 mであった。さらに、2012 TC_4を三軸不等楕円剛体とみなし、形状と運動状態を推定したところ、三軸比は(6.2 m, 8.0 m, 14.9 m)あるいは(3.3 m, 8.0 m, 14.3 m)と平たく扁平であり、長軸まわりに自転していることが分かった。本講演では、観測結果に加え、タンブリング運動の原因や、2012 TC_4の形状と、はやぶさを始めとする小惑星探査で明らかになったボルダーの形状(Michikami et al. 2016)を比較し、その相違点について議論を行う。

MU レーダーと Tomo-e Gozen 及び高感度カメラを用いた微光流星の同時観測と太陽輻射圧を考慮したダストの軌道進化計算

○弘田旭[1], 阿部新助[1], 大澤亮[2], 酒向重行[2], 小島悠人[2], Johan Kero[3], 中村卓司[4]
藤原康徳[4], 渡部潤一[5]
[1]日本大学, [2]東京大学, [3]Swedish Institute of Space Physics, [4]国立極地研究所
[5]国立天文台

太陽系内に散在する直径 30μm～1m サイズのメテオロイド，それより小さな惑星間塵，ダストは小惑星同士の衝突，彗星から放出された塵が起源だと考えられているが，そのサイズ分布や空間密度，母天体からの力学進化など不明な点も多く残されている．ダストは太陽系内の天体と同様に太陽重力と同時に太陽輻射圧を受ける．これにより，輻射圧の一部がダストの制動力となって働くポインティングロバートソン効果によって太陽に向かって螺旋降下していく(J. A. Burns et al., 1979)．惑星のような大きい天体では輻射圧と重力の比 β はほとんど 0 であるが，ダストのような小さい物質には輻射圧が効果的に働くためダストの力学進化に重要な役割を果たしている．特にふたご座流星群は平均近日点距離が 0.141[AU]であり(Peter Jenniskens 2006)，太陽輻射圧の影響を受けやすい．

ダストを地上から観測するには流星現象を通して観測が可能である．地球大気にはダストやメテオロイドをはじめとする宇宙物質が 1 日あたり 100~300 トン流入しており，大半は質量 10^{-6}～10^{-3}g，直径 0.5mm 以下と考えられている(John M. C. Plane 2012)．地上からそれらを観測するにはレーダーなどの電波を用いた方法のみがこの領域をカバーする手段となってきた．

京都大学・生存圏研究所・信楽 MU 観測所の MU レーダー(Middle and Upper Atmosphere Radar)[1]では流星ヘッドエコー観測により個々のダストの軌道が求められる．流星ヘッドエコー観測ではレーダー反射断面積(Radar Cross Section ; RCS)が得られるが，RCS はダストのサイズに直接置き換えることは困難である．流星を光学観測したときに，ダストの直径は大気突入速度，発光効率,発光エネルギなどから導出できる測光質量から推定可能である．よって等級と RCS の関係が分かれば，ヘッドエコー観測で得られる膨大なダストの個々のサイズと軌道に関する統計的データを得ることが可能となる．また 2022 年打ち上げ予定の深宇宙探査技術実証機 DESTINY+はふたご座流星群の母天体である小惑星 Phaethon へのフライバイ，ダストのその場観測を行うためサイズや空間密度に関する情報も共有可能となる．

超高感度・超広視野 CMOS カメラ「Tomo-e Gozen」と東京大学木曽観測所のシュミット望遠鏡(口径 105cm，F3.1)を組み合わせた光学観測により 13 等級の観測に成功しており，MU レーダーとの同時観測で数百個の同時流星が期待される．

本研究では MU レーダーと Tomo-e Gozen の同時観測から得られる RCS と等級の関係，地球流入ダストのサイズ分布及びふたご座流星群起源のダストに対して観測から得られたサイズ分布を持ち太陽輻射圧を考慮した軌道進化計算について報告予定である．

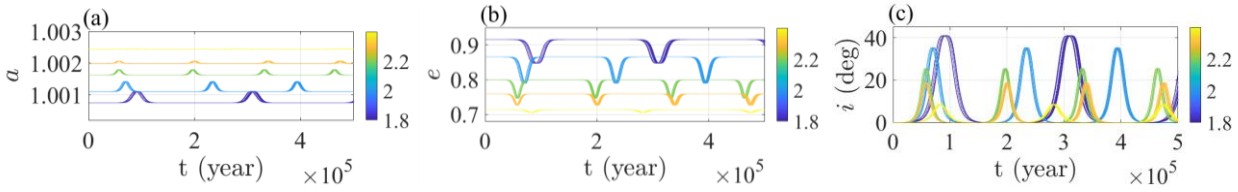
[1] Kyoto University, Research Institute for Sustainable Humanosphere : “http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/en/index.html”

制限三体問題における平面周期軌道の軌道面外方向の不安定性に基づく軌道傾斜角の励起

○大島健太（国立天文台）

太陽の周りを惑星とほぼ同じ周期で公転する軌道は co-orbital orbit と呼ばれ，その安定性の高さから多数の小惑星が存在する．代表的な軌道として，ラグランジュ点 L_4 もしくは L_5 周りに捕捉される tadpole orbit，L_3，L_4，L_5 を馬蹄形に取り囲む horseshoe orbit，惑星近傍に捕捉されているようにみえる quasi-satellite orbit(QSO)が挙げられる．ところで，軌道傾斜角が小さい小惑星は地球に衝突する可能性が高く(Sanchez & McInnes, 2012)，離心率や軌道傾斜角が大きい小惑星の検出は不十分であり(Greenstreet et al., 2012)，潜在的に危険な小惑星(PHA)の大部分が未発見であるとの推定(Naroenkov & Shustov, 2012)を考慮すると，離心率や軌道傾斜角が大きく安定性の高い軌道に現在位置しており，将来的に軌道傾斜角が小さくなる小惑星が存在すれば，未発見の PHA の候補となり得る．

そこで本研究では，太陽-木星系の円制限三体問題において，co-orbital orbit の形成に重要な平面周期軌道の，軌道面外方向の不安定性に起因する軌道傾斜角の励起現象に注目した．励起度合いを定量的に求める手法として，軌道面外方向の不安定性に付随する不安定多様体の数値積分を行った．その結果，地球型惑星の軌道に交差する平面周期 QSO の不安定多様体は，軌道長半径をほぼ一定に保ったまま高い離心率で，ゼロ度から数十度の軌道傾斜角の振動を長期安定的に示すことがわかった(下図)．実際に木星の高い離心率の QSO に捕捉されており，軌道傾斜角が小さい時期に発見された小惑星 2004 AE_9 は，火星への接近(Wajer & Królikowska, 2012)や，数十度からほぼゼロ度までの軌道傾斜角の振動(Kinoshita & Nakai, 2007)といった上述の不安定多様体と良く似た振る舞いを示すことからも，太陽-木星系の軌道面外方向の不安定性を持つ QSO の高い軌道傾斜角の位置に，未発見の PHA が存在する可能性があると考えられる．一方，L_3 周りの平面周期軌道は軌道面外方向の不安定性を持つにもかかわらず，軌道傾斜角はほとんど励起しないことがわかった．発表では，周期軌道の三次元分岐解の安定性と軌道傾斜角の励起量の関係についても言及する．また，L_4 および L_5 周りの短周期および長周期軌道(Murray & Dermott, 1999)は軌道面外方向の不安定性を持たないため，軌道傾斜角の励起は生じないと考えられる．



平面周期 QSO の軌道面外方向の不安定性に付随する不安定多様体の，近日点における(a)軌道長半径，(b)離心率，(c)軌道傾斜角の時間変化．ヤコビ定数の値に関して色分けした．

J1

水星全球スペクトル区分図と化学組成

○晴山 慎[1]、石原吉明[2]、大竹真紀子[2]、本田親寿[3]
[1]聖マリアンナ医科大学、[2]宇宙科学研究所、[3]会津大学

米国の MESSENGER による観測結果は、これまでの水星の知見を大きく変えている(たとえば、[1])。そのような水星の地殻進化を理解するうえで、水星の全球地質図は重要である。最近、水星全球の分光データや表面の化学組成データが公開され、全球地質図の作成が可能となってきている。本研究では、最初のステップとして、自動分類法による MESSENGER / MDIS [1]の 8color (MDR) の反射分光データ[2]を用いて、スペクトル区分図を作成した。8color (MDR) は、433.2,479.9,558.9,628.8,748.7,828.4,898.8 および 996.2 nm の 8 バンドを有する反射スペクトルの全球モザイクである。

本研究では、放射照度太陽角度が大きいために自動分類のための不適切なデータが多い高緯度帯を除いた、緯度の±65.5 度以内の領域を解析した。解析は、主成分分析をスペクトルデータに適用し、PC1、PC2、PC3、PC6 の 4 つの主成分を信号として選択したのち, 選択した各主成分の強度ヒストグラムの標準偏差が 1 になるように正規化した。これらの正規化された 4 つ主成分を分類データとして、教師なし分類法である K-means 法を適用し、反射スペクトル分類を行った。 K-means 法はスペクトルを分類するために、分類数を与える必要があるため、分類数として 2 から 10 を与えて試行した。この方法を検証するために、8 色 (MDR) に類似した 7 バンドを持つ月のモザイクデータに同じ手順を適用し、その結果は文献 [3]で報告されている反射吸収スペクトル分類マップとほぼ一致する結果であった。

水星を 6 クラスに分類した場合、分類マップは文献[2]で公開されている enhanced color mosaic map に近い結果であった。水星最大の衝突盆地である Coloris 盆地とそのほぼ反対側に位置する Debussy (H13) 領域のほとんどの地域は同じクラスに分類された。また、MESSENGER / GRS, XRS が報告している元素濃度分布[1]や標高とも対応が見つけられた。この事実は、水星地殻の形成史に関連している可能性がある。

この研究は、科学研究費補助金 基盤 (C) 17K05641 (P.I. : 晴山) に採択されている。

[1] Nittler L.R. et al. arXiv:1712.02187 [astro-ph.EP]
[2] http://messenger.jhuapl.edu/Explore/Images.html#global-mosaics.
[3] Hareyama M. et al. (2017) LPS XLVIII, Abstract #1706.

J2

小天体における線状構造の特徴と分類

○菊地紘[1]　宮本英昭[1]　[1]東京大学

小惑星や彗星，小さい衛星などの小天体は，惑星とは異なった進化を経て現在の姿となっており，これを把握することは太陽系の進化を理解する上で重要である．特に近年，太陽系の天体がかつて動的に攪拌されたと考えられはじめているが，その記録を多く保持している小天体について，進化過程を詳細に知り体系的に理解する意義は大きい．小天体進化の変遷を探るには，限られた探査データから有用な情報を抽出することが枢要であり，これを他の天体と比較し分類することで，全体像の理解を試みることとなる．

これまでの探査によって小天体の情報が蓄積され，高解像度画像からは天体表面の微細な構造も観測されてきた．そうした詳細な地質学的な情報は，表面にある物質の特徴，天体の強度，内部構造，天体の表層の進化などを推定する手がかりになっている．数ある特徴的な地形の中で，トラフ，ピットチェーン，グルーブ，リッジなどの線状の構造地形は，数多くの小天体で観測されており，このような構造は天体の内部構造を制約する強力な観測事実となり得るだけでなく，異なる環境に存在する天体を比較する上でも重要な情報になると考えられている．

小さい天体で線状構造が初めて詳細に観測されたのは Viking 探査機による火星の小さい衛星フォボスである．これにより他の小天体でもこのような構造が存在していることが予想され，Galileo，Rosetta，Cassini，NEAR Shoemaker などの探査機によって撮像された小惑星ガスプラ，アイダ（イダ），エロス，ヴェスタ，ルテティアや土星の衛星パンドラやエピメシウス（エピメテウス）などで線状構造が確認された．一方で解像度が低いため，線状構造の存在が不明瞭な場合もあった．

そこで本研究では，小天体における線状構造の解釈と系統的な分類に向けて，各小天体の現在まで得られたすべての高解像度画像を精査して，小天体の線状構造の有無を改めて調査することにした．さらに，公開された形状モデルがあるものに対しては線状構造の長さ，形態，大きさ，分布，表面の重力場などの検討も行った．その結果，これまで確認されたエピメシアスなどでも多くの線状構造が確認できた．さらにこれまで認められなかった土星の衛星プロメシウス（プロメテウス），ジェイナス（ヤヌス）などでも新しく線状構造が確認できた．小惑星リュウグウではいくつかのタイプの線状構造があることがわかったが，小惑星イトカワのように判断の難しい線状構造もあることがわかった．発表ではこれまで得られた線状構造の重要な知見を確認した上で，これまでの小天体の線状構造の有無と特徴をまとめた結果を報告する．

参考文献

Morrison, S.J., et al., Icarus, 2009. **204**(1): p. 262-270.

Buczkowski, D.L., et al., Icarus, 2008. **193**(1): p. 39-52.

Veverka, J., et al., Icarus, 1994. **107**(1): p. 72-83.

Buczkowski, D., et al., Geophysical Research Letters, 2012. **39**(18)

J3

土星衛星エンセラダス熱進化における クラスレートハイドレートの役割

○西谷隆介[1]，木村淳[1]，谷篤史[2]，佐々木晶[1]
[1]大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻
[2]神戸大学人間発達環境学研究科人間環境学専攻

土星の氷衛星であるエンセラダスはその氷殻の下に地下海が存在することが知られている。地下海を維持するには放射性熱源のみでは難しいとされ，潮汐加熱などを加えることによって地下海の存在は説明されてきた(Roberts and Nimmo, 2008)。しかし，現在のエンセラダスの離心率から推定される潮汐加熱の熱量でも地下海を維持することはできず，過去に軌道進化を経験し離心率が変化した可能性も考えられている(Spencer et al., 2009)。本研究では，氷殻を構成する物質として氷の代わりにクラスレートハイドレートに置き換えることで，より少ない熱で地下海を維持することができるかを調べた。クラスレートハイドレート（以下ハイドレート）とは，水分子でできた籠状構造のなかに主にガス分子であるゲスト分子を包接した化合物である。おおよそ氷と似た物性を持つが，氷よりも硬く熱伝導率が悪いといった特徴がある。エンセラダスにおいても南極付近から噴出するプリュームの成分からその存在は示唆されている(Bouquet et al., 2015)。このハイドレートが熱的な”蓋”の役割をすることで地下海の凍結を防ぐことを期待し熱進化計算を行った。

本研究では岩石コア-地下海-氷殻の３層モデルを採用し，先行研究で定式化された混合距離理論(Kamata, 2018)を用いた46億年間の一次元熱進化計算をエンセラダスについて行うことで氷殻厚さと温度プロファイルの時間変化を調べた。氷殻の成分は全て氷の場合と全てハイドレートの場合を考え，初期条件として全球が氷殻で覆われていたとして計算を行った。

計算の結果，熱源を岩石コア放射壊変熱のみとした場合でも初期温度を暖かくすれば氷地殻，ハイドレート地殻，どちらも進化過程で地下海が生成されることがわかった。しかし，それら地下海が現在まで維持されることはなかった。この時，ハイドレート地殻であれば氷地殻に比べ10倍ほど地下海の寿命が長くなった。また，内部の温度プロファイルについてはハイドレート地殻の場合，氷地殻の場合に比べ内部に多くの熱を溜め込み，温度が高くなることがわかった。地下海水温もそれに伴い高い温度となった。これらの結果から，地下海の維持には潮汐加熱は必要である一方，ハイドレートが存在する場合，従来想定されていた潮汐加熱よりも少ない熱量で地下海を維持できる可能性があることがわかった。温度プロファイルについてもハイドレート層が存在する場合，従来想定されていた温度より高くなると考えられる。

J5

星間氷環境下での複雑態アミノ酸前駆体の生成とその安定性

○小林憲正[1], 佐藤智仁[1], 浅野伸哉[1], 倉本想士[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], 依田功[5], 神田一浩[6], 山岸明彦[7], たんぽぽ RT[8]
[1]横浜国大, [2]福岡工大, [3]神戸大, [4]量研, [5]東工大, [6]兵庫県立大, [7]東薬大, [8]JAXA/ISAS

緒言　炭素質コンドライト中に 70 種を越えるアミノ酸が検出されるなど，地球外にもアミノ酸を含む多様な有機物が存在することがしられ，地球生命の起源との関連からも議論されている。炭素質コンドライトからの抽出液を加水分解するとアミノ酸が増加することなどから，地球外で生成したアミノ酸は「前駆体」として生成されると考えられる。アミノ酸前駆体としては，アミノ酸の Strecker 合成の中間体である，アミノニトリルが有名であるが，地球外でのアミノ酸生成機構やアミノ酸前駆体の構造については明かではない。本研究では，模擬星間環境で合成したアミノ酸前駆体のキャラクタリゼーションを行った。また種々のアミノ酸前駆体の宇宙環境下での安定性についても調べた。

実験　種々の組成比のメタノール・アンモニア・水の混合物を液体窒素で凍結したものに HIMAC（放医研）からの 290 MeV/u 炭素線を照射した。生成物を MeAW とよぶ。また，一酸化炭素・アンモニア・水の混合気体にタンデム加速器（東工大）からの 2.5 MeV 陽子線を照射した。この生成物を CAW とよぶ。各生成物の加水分解前後にアミノ酸の定量を行った。加水分解前の試料は FT-IR, XANES などで構造推定を行い，さらに陽イオン交換 HPLC や限外ろ過膜で分画を行った後，各画分の加水分解後のアミノ酸を定量した。また，アミノ酸前駆体の安定性の比較のため，グリシン(Gly)およびその前駆体のアミノアセトニトリル(AAN), ヒダントイン(Hyd)および CAW に炭素線(HIMAC), γ 線（^{60}Co 線源:東工大），軟 X 線（NewSUBARU:兵庫県立大）等の照射を行った。

結果と考察　星間塵アイスマントルの観測例に近い 10:1:111(モル比)の MeAW の加水分解物からもアミノ酸が検出され，星間塵中でアミノ酸前駆体が生成しうることが強く示唆された。MeAW, CAW はともに平均分子量が 1000 を超す複雑態有機物であること，ニトリル基は少なく，アミド結合を多くもつことなどがわかった。CAW を分画分子量 3000 の限外ろ過膜で分画したところ，分子量 3000 以上の画分にアミノ酸前駆体の 43%が存在した。HPLC による分画では，AAN が溶出する画分を加水分解してもアミノ酸は検出されなかった。これらのことから，CAW 中のアミノ酸の生成に関しては，Strecker 合成は主要な生成機構ではないことがわかった。MeAW 中のアミノ酸前駆体のキャラクタリゼーションを今後行う予定である。安定性の実験においては，CAW は遊離の Gly や AAN，Hyd よりも種々の放射線等に対して安定であることがわかった。宇宙実験「たんぽぽ計画」では CAW, Gly, Hyd の宇宙曝露が行われたが，その結果とも比較して議論する予定である。

従来，化学進化過程はストレッカー合成のような単純な化学式で表せるとされ，そのような視点から議論されてきた。本結果は，宇宙による初期化学進化は高エネルギー現象による Flash & Quench による非平衡反応が重要であることを強く示唆する。

J7

炭素質コンドライト中の糖の探索

○古川 善博[1], 力石 嘉人[2], 大河内 直彦[3], 中村 智樹[1]
[1] 東北大学地学専攻、[2] 北海道大学低温科学研究所、[3] JAMSTEC

これまでの隕石分析やリターンサンプル分析、探査機によるその場分析、電波望遠鏡観測により、太陽系を含む宇宙には様々な有機分子が存在することが知られている。しかし、それらの有機分子の中で、生命を構成する有機分子は限定的であり、生命を構成する主要な分子の中にも地球以外の太陽系で存在が確認されていないものがある。糖の一種であるグルコースは解糖系で ATP 合成反応の原料として使われる分子であり、別の糖のリボースとデオキシリボースは生命の遺伝情報を貯蓄する RNA/DNA の主要構成分子である。このように、糖は生命にとって不可欠な分子であり、生命の起源にとっても不可欠な分子と考えられている。しかし、生命を構成する糖のなかで、地球外由来の証拠をもつ糖はこれまでに検出されていない。本研究では、２つの CR2 コンドライト(NWA801, NWA7020)から極性分子を抽出し、ガスクロマトグラフ質量分析計(GC/MS)とガスクロマトグラフ同位体比質量分析計(GC-c-irMS)を用いてその中に含まれている糖の検出とその分子ごとの炭素安定同位体比測定を試みた。また、液体クロマトグラフタンデム質量分析計(LC/MSMS)を用いてアミノ酸と核酸塩基の含有量を測定すると共に、抽出残渣から不溶性有機物(IOM)を分離し固体 ^{13}C-NMR を用いて炭素の化学状態を、元素分析同位体比質量分析計(EA-irMS)を用いて炭素と窒素の安定同位体比測定を行った。鉱物部分については、SEM を用いてコンドリュール中のガラスを、シンクロトロン-XRD を用いてマトリクスの構成鉱物の評価を行った。

GC/MS による分析によって、複数の糖と糖アルコールが検出された。それらの炭素同位体比を分析した結果、NWA801 から正の炭素同位体比を持つリボースとキシロースが検出された。固体 ^{13}C-NMR 分析では 2 つの隕石の IOM は大きく違う炭素の化学状態を示した。糖が検出されなかった NWA7020 は同量程度の aliphatic 炭素と aromatic 炭素によって構成されていた一方で、糖が検出された NWA801 では aliphatic 炭素が aromatic 炭素に比べ非常に多く、熱熟成が進んでいないことを示した。マトリクス鉱物の分析でも NWA7020 は層状ケイ酸塩に富み、NWA801 は層状ケイ酸塩をほとんど含まないことが明らかになり、糖が検出された NWA801 は母天体での水質変質が進んでいないことが明らかになった。これらの分析結果により、小惑星には生命を構成する糖が存在することが明らかにった。また、それらの糖は母天体での水質変質を受ける前に生成された可能性がある。

K1

望遠鏡観測と超高速衝突実験による月面衝突閃光の研究

○布施綾太[1]，阿部新助[1]，柳澤正久[2]，長谷川直[3]
[1]日本大学，[2]電気通信大学，[3]JAXA/ISAS

メテオロイドが月に衝突する際に発生する可視近赤外線領域での短時間の発光現象を「月面衝突閃光(Lunar Impact Flash:LIF)」と呼んでいる．LIF は 1999 年のしし座流星群の際に初めて地上の望遠鏡で観測されて以来[1]，世界中で定期観測が実施されている．特に，NASA は 2006 年から 2018 年 6 月までに 435 個の LIF を検出しており，その観測データの一部を用いてメテオロイドのサイズ-頻度分布を導出した[2]．その導出の過程において，衝突速度や発光効率の不確定性は，サイズ-頻度分布や形成クレータ直径の推定に大きく影響するが，現在利用されている発光効率の近似式は，組成，衝突角度，真空度などを考慮できておらず，また，LIF の発光メカニズムに関しても未だ十分な研究がなされていない．

本研究では LIF の総合的理解に向けて望遠鏡観測によるアプローチと，超高速衝突実験によるアプローチで取り組んでいる．望遠鏡観測では日本大学阿部研究室が所有する LIF 専用望遠鏡 LiFAST での地上観測と，超小型探査機搭載カメラ DELPHINUS での軌道上観測を計画している．LiFAST は NASA の専用望遠鏡を上回る性能を有しており，これまでにない暗い LIF の検出や高解像度のデータ取得が期待できる． DELPHINUS は世界初となる宇宙からの LIF 観測を行い，地上観測では不可能な月裏側・極域の観測を予定している．どちらも継続的な観測の実施により，LIF の統計データの取得を目指している．

超高速衝突実験では石英球を玄武岩に衝突させ(図 1)，対物分光器付き高速度カメラで分光観測を実施した．分光解析の結果，黒体放射と複数の輝線が観測され，それぞれの発光強度の時間的・空間的な変化が確認できた．この実験により，衝突発光の黒体成分とプラズマ発光の割合を明らかにすることができる．今回の石英球-玄武岩の衝突実験では，確実に発光を捉えられたのは 1shot だけであり，今後は測定系の確立と真空度の変化による発光効率の変化を調査する予定である．

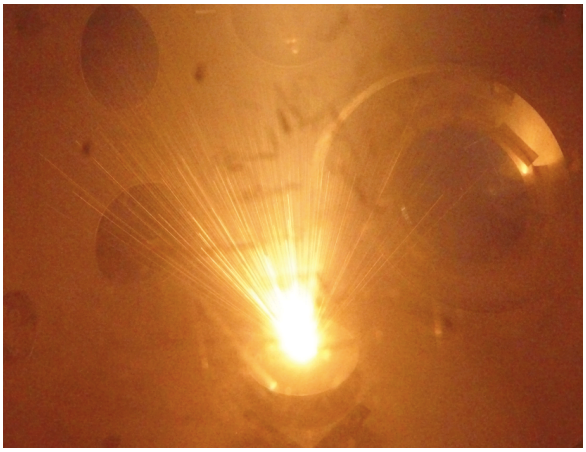


図 1 石英球-玄武岩の衝突発光

[1] Yanagisawa, M., Kisaichi, N. Icarus 159, 31-38 (2002).
[2] Suggs, R. M. et al. Icarus 238, 23-36 (2014).

K2

高空隙率シリカ層への衝突実験とクレータリングにおける空隙率の効果

*石黒琢也[1]　荒川政彦[1]　保井みなみ[1]
[1]神戸大学大学院　理学研究科

近年の惑星探査および地上観測により太陽系小天体の多くは高い空隙率を持つことが分かってきており、小惑星においては 75%までの空隙率が報告されている。このような多孔質天体上でのクレーター形成過程を考える際、空隙の崩壊により表層が圧縮されてクレーター孔が作られるというメカニズム、いわゆる「圧縮型クレーター」の存在が近年提案されている。これまで、クレーター形成のメカニズムは、強度支配と重力支配の２つが知られており、各々のメカニズムで作られるクレーターは、πスケール則により良く説明されてきた。一方、表層圧縮の効果を組み込んだクレーター形成モデルは、未だ完全には構築されていない。加えて、小惑星探査機「はやぶさ２」の衝突装置を用いた小惑星 Ryugu 上での衝突実験に向けて、多孔質表層にも適用可能なスケール則が必要である。Ryugu は、その表面はボルダーとレゴリスに覆われているが、バルクで 60%ほどの高い空隙率を持つため、圧縮型のクレーターが形成される可能性がある。

本研究では、標的に平均粒径 0.5μm、真密度(ρ_s)2.2gcm^{-3}のアモルファスシリカを用い、圧密の度合いを変えることで標的のバルク空隙率を 50%から 78%の間で変化させた。標的は固着力により結合し、引張強度(Y_t)は 100～10^{4}Pa である。この標的に対し神戸大学の二段式軽ガス銃を用いてクレーター形成実験を行った。弾丸には直径 1mm と 2mm、質量 1.5mg と 10mg(m_p)のガラス球を用い、衝突速度は 0.8～6.5kms^{-1}である。標的を設置したチャンバー内は 20Pa 以下まで真空引きをした。

まず、標的の空隙率を 50%から 78%の間で変化させ、衝突速度 3.6kms^{-1}で実験を行った。クレーターの形状は標的空隙率の増加に伴って変化し、50%では浅い皿型のクレーターが形成されたが、空隙率が増加すると皿型クレーターの下部に球形の空洞が形成され、その空洞が徐々に成長するという結果になった。空洞の半径(R)とクレーター深さ(d)を計測した結果、膨張率$\alpha=\rho_s/\rho_{bulk}$と規格化空洞半径$\pi_R=R(\rho_{bulk}/m_p)^{1/3}$の関係は$\pi_R=1.9\alpha^{0.7}$となり、一方で膨張率と規格化クレーター深さ$\pi_d=d(\rho_{bulk}/m_p)^{1/3}$の関係は$\pi_d=3.0\alpha^{1.0}$となった。ここで、$\rho_{bulk}$は標的のバルク密度である。次に、速度依存性を調べるために 70%、60%および 50%の標的に対して、それぞれ衝突速度を 0.8～6.5kms^{-1}の範囲で速度を変化させて実験を行った。70%と 60%の標的ではクレーターの形状は衝突速度の増加に伴って変化し、0.8 kms^{-1}では皿型クレーターの下部に人参型の貫入孔が形成されたが、衝突速度の増加に伴って球形の空洞が形成されて、さらに成長するという結果になった。一方で、50%の場合では衝突速度に依らず皿型のクレーターであった。皿型クレーターのサイズ(Rs)について、規格化半径$\pi_{Rs}=Rs(\rho_{bulk}/m_p)^{1/3}$とスケーリングパラメーター$\pi_{Yt}=Y_t/\rho_{bulk}v_i^2$を用いて$\pi_{Rs}=A\pi_{Yt}^{b}$と整理すると空隙率の増加に伴って A が増加し b が減少するという結果となった。

K3

巨大氷惑星の衝突現象における自転速度の影響

○ 黒崎健二 [1]，犬塚修一郎 [1]

[1] 名古屋大学

宇宙望遠鏡による観測データの蓄積により，多数の系外惑星の発見が報告されているが，その中でも海王星サイズの天体の報告数が最も多く，これらの天体は固体成分のコアに分厚い大気をまとった惑星か，氷成分を多く持った惑星であると考えられている．太陽系内の巨大氷惑星の一つである天王星は，形成時に巨大衝突を受けその後の自転軸の変動や水素大気の損失，さらには衛星形成への示唆も考えれれる．(Kegerreis et al. 2018; Kurosaki & Inutsuka 2018)．衝突現象による影響は惑星系の起源やその後の熱進化を理解する上で重要であるが，巨大衝突によって惑星内部の初期条件がどのような影響をうけるかまだよくわかっていない．形成時において惑星が自転速度を持っていた場合にどのような影響が考えられるかを，SPH 法を用いて検証し，衝突による自転軸の傾きを計算した．本研究では，SPH 法によって，水素エンベロープと氷コアからなる天体に氷天体が衝突するような状況を考え，天体が初期に自転していた場合での，衝突前後の角運動量輸送の効率などを議論する．

K4

巨大衝突によるガス惑星の低密度なコア形成

堀　安範[1]，Shangfei Liu[2]，D.N.C. Lin[3]，Andrea Isella[2]

1 アストロバイオロジーセンター／国立天文台

2 Rice University

3 University of California, Santa Cruz

木星探査機Junoによる高次の重力場計測から、木星は低密度で非常に大きなコアを持つ可能性が示唆されている。今回、惑星形成の最終段階に想定される、原始木星と(原始)惑星の天体衝突の3次元流体計算を実施した。巨大衝突によるコア同士の合体と乱流混合によって、木星コアは外層の水素・ヘリウムと大規模に混合し、広がった低密度なコアとなることが分かった。コアと外層境界では急峻な組成勾配の存在で二重拡散対流が生じ、コア内部は数10億年間、高温に維持されるとともにコア侵食も阻害される。

Forming Jupiter's Dilute Core by a Giant Impact

Yasunori Hori[1]，Shangfei Liu[2]，D.N.C. Lin[3]，Andrea Isella[2]

1 Astrobiology Center/National Astronomical Observatory of Japan

2 Rice University

3 University of California, Santa Cruz

The Juno spacecraft has measured Jupiter's gravitational field to an unprecedented precision. A recent study on Jupiter's interior suggests that a diluted (low mean density) core expanding to over the half of Jupiter's radius. Here we present a series of 3D hydrodynamic simulations of collisions between massive protoplanetary embryos and newly emerged Jupiter with primordial solid cores. We show that an energetic collision would shatter Jupiter's initial solid core and dredge heavy elements up into its envelope. The resulting turbulent diffusion would lead to Jupiter's observed internal structure. The steep compositional gradient between the core and its surrounding gaseous envelope would suppress the efficiency of heat transfer and mass diffusion across their boundary and preserve the hot diluted-core structure over billions of years.

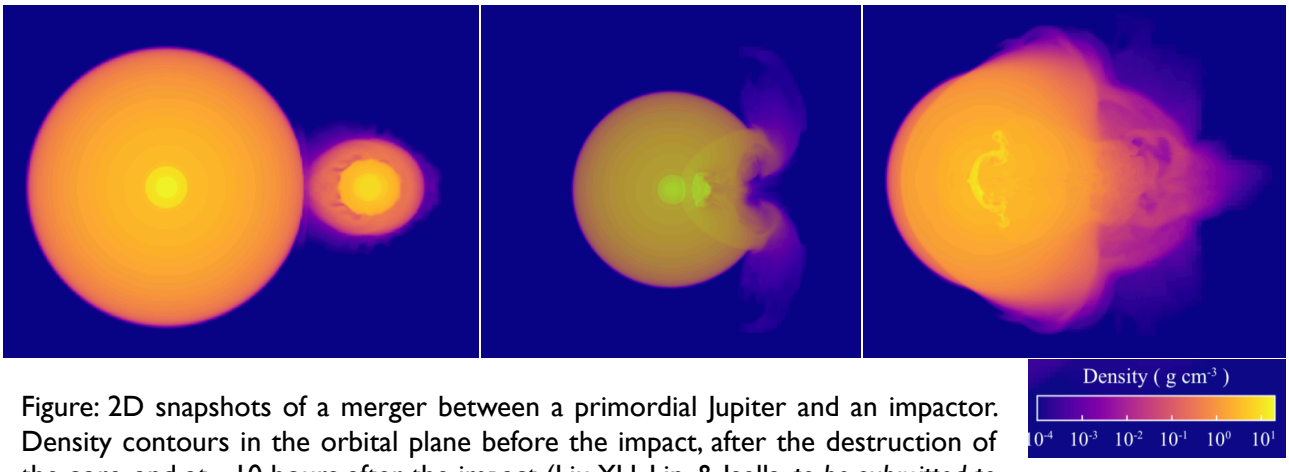


Figure: 2D snapshots of a merger between a primordial Jupiter and an impactor. Density contours in the orbital plane before the impact, after the destruction of the core, and at ~10 hours after the impact (Liu, YH, Lin, & Isella, *to be submitted to Nature*).

K5

固体天体衝突シミュレーションによる蒸発の理論的研究

◯ 伊藤広大[1]，小林浩[1]

[1] 名古屋大学理学研究科理論宇宙物理学研究室

近年では実に多様な惑星の存在が確認されている。一般的に惑星は、ダストから成長し、微惑星・原始惑星を経て、最終的には原始惑星に大小様々なサイズの天体が衝突することにより合体及び破壊を繰り返しながら形成されると考えられている。天体同士の衝突は軌道・自転軸の変化や天体自身の構造の変化など、天体自身に非常に大きな影響を与える現象である。その中で衝突にともなって生じる温度上昇は、物質の蒸発を引き起こす可能性がある。蒸発現象は物質の化学変化や衝突脱ガスなど、組成に大きな影響を与える。特に氷を主成分とする天体では、氷の蒸発に必要なエネルギーが比較的小さいため、小さな衝突速度でも蒸発を十分に起こしやすい。以上から、蒸発現象は惑星の多様性を理解する上で重要な物理的素過程であると言える。そこで我々は数値シミュレーションを用いて蒸発現象について理論的に理解することを目指す。

O'Keefe et al. (1982) では、二次元円柱座標系で天体衝突シミュレーションをおこない、蒸発量を求めている。数値計算の結果から蒸発量が衝突速度の二乗に比例することを明らかにした。一方で、二次元円柱座標系では天体の正面から衝突する場合の計算しかおこなうことができないという問題がある。しかし、実際の天体同士の衝突では正面からの衝突よりも斜めから衝突する頻度のほうが明らかに多いため、斜めからの衝突に対する場合も考慮した 3 次元シミュレーションをおこなう必要がある。

そこで本研究では数値計算方法として Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いて 3 次元の衝突シミュレーションをおこなった。さらに、固体天体の蒸発を扱うために、物質の気体から固体まで扱える Tillotson 状態方程式 (Tillotoson 1962) を導入し、状態方程式に従って物質が蒸発するかどうかの判別をおこなう。衝突する天体に対して十分大きなターゲット側の天体に衝突する場合に、パラメータを様々に変えて衝突計算をおこない、その際に生じる蒸発量を求めた。(図 1:プロット点)

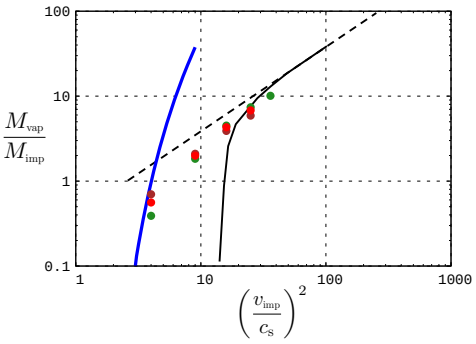


図 1: 衝突速度に対する蒸発量.
横軸はマッハ数の二乗, 縦軸は衝突天体の質量で規格化したターゲット天体の蒸発量.
(黒線：O'Keefe et al. (1982)
青線：理論的見積もり
プロット点：数値計算結果)

数値計算の結果、O'Keefe et al. (1982) と同様に速い衝突速度では蒸発量が速度の二乗に比例して増加する関係性が分かった。一方で、2 倍の音速程度の衝突速度でも十分に蒸発が生じる結果が得られた。このことは一次元の衝撃波加熱の理論から理解することができ、簡易的に衝突条件と蒸発量の関係を見積もった (図 1:青線)。本研究の結果から O'Keefe et al. (1982) よりも低速で蒸発が起こり、衝突速度が上がると衝突速度の二乗に比例して蒸発量が増加する関係性があることが示唆できる。

K6

物質強度を考慮した微惑星の衝突破壊

○末次竜[1]、田中秀和[2]、小林浩[3]、玄田英典[4]
[1]産業医科大学、[2]東北大学、[3]名古屋大学、[4]東京工業大学・ELSI

太陽の周りの公転している惑星や小天体は天体同士の衝突による合体及び破壊で形成されたため、衝突現象は太陽系形成において非常に重要な過程といえる。天体は様々な規模の衝突を経験しており、破壊規模は衝突エネルギーQ_R（初期のインパクターの運動エネルギーを標的天体の質量で割った単位質量あたりのエネルギー）に依存する。特に、衝突によって標的天体の質量が元の半分となる時のエネルギーは臨界衝突エネルギーQ_{RD}^*と呼ばれ、重力支配域のQ_{RD}^*の値や性質は衝突シミュレーションを用いて研究されてきた(e.g., Benz & Asphaug 1999)。その結果、Q_{RD}^*の値は衝突速度、標的天体のサイズ、物質強度、さらに計算解像度にも依存することが明らかとなった(Jutzi 2015, Genda et al. 2015)。こうした結果は、主にSPH法で得られていたが、最近、我々はメッシュ法による衝突シミュレーションを行い、高解像度で行った場合、SPH法によって得られたQ_{RD}^*の値とよい一致を示すことを明らかにした(Suetsugu et al. 2018)。この研究では天体の物質強度などの組成の効果は入れていなかったが、天体の組成による効果もQ_{RD}^*の値に影響を与えうることが知られている(Jutzi 2015)。しかし、こうした天体組成とQ_{RD}^*の値の詳細な関係は不明である。

本研究では、衝突シミュレーションコードの一つで、弾性・塑性モデル, 破壊モデル, 空隙モデルなどが導入されているiSALE(Amsden et al. 1980, Ivanov al. 1997, Wunnemann et 2006) を用いて微惑星破壊の計算を行い、Q_{RD}^*の値の物質強度および摩擦への依存性について調べた。その結果、物質強度を考慮した場合においてもQ_{RD}^*の値は計算解像度に依存することがわかった。各解像度から得られたQ_{RD}^*の値をフィッティングすることで得られた収束値は、天体組成の効果がない場合の約5倍の値となり増加したが、その値はBenz & Asphaug (1999) の結果よりも低いものであった。またQ_{RD}^*の値は摩擦係数に大きく依存することも明らかとなった。

鉱物および隕石粒子の摩耗実験：イトカワ表面でのレゴリス粒子の形状変化

○土山 明[1]，小川 倫弘[1]，中村昭子[2]，中野 司[3]
[1]京都大学理学研究科，[2]神戸大学理学研究科，[3]産総研

小惑星イトカワや月のレゴリス粒子は、その３次元外形や粒子表面観察により、これらの粒子が機械的な摩耗を受けたことが指摘されている[1-3]。このような大気のない天体のレゴリス粒子の摩耗プロセスを理解するために、我々の研究グループは鉱物や隕石粒子の摩耗実験をおこない、特定の粒子や多数の粒子の平均的な３次元形状の変化を、X 線 CT を用いて求めた[4]。これにより、摩耗には粒子エッジが徐々に丸くなるような緩やかなモードと、粒子のエッジが欠けることにより粒子形状が変化する激しいモードがあることがわかった。本研究ではこれらの実験結果に基づき、強度の異なる物質の摩耗速度を比較し、その結果をイトカワや月粒子の摩耗に適用した。また、はやぶさ２で持ち帰られるリュウグウ粒子についても考察した。

摩耗実験は、1-2 mm サイズの粒子について、振動粉砕機を用いて振動速度, ω, を変えておこなった(ω = 1000~3000 rpm) [4]。サンプルは、石英、かんらん石、コランダム、大理石および SaU 001 隕石(L5), Murchison 隕石(CM)である。振動の最初の１分で生成した粉（<0.25 mm）の量を出発物質の量で規格化した値，P_1, を、摩耗速度の目安とした。各サンプルにおいて、P_1 はωの増加に従ってほぼ冪状に増加した（冪指数:2~3）。摩耗速度は、コランダム＜かんらん石～石英＜大理石の順となり、用いた物質の強度と整合的であった。また、L5 隕石はかんらん石～石英と大理石との中間、CM 隕石は大理石と同程度の摩耗速度を示した。

イトカワや月粒子およびリュウグウ粒子の摩耗を議論するために、それぞれ L5 隕石および CM 隕石の摩耗速度を低ω側に外挿するとともに、ωに対応する振動時の速度や加速度の平均値を、各天体表面のレゴリス層における粒子運動モデル（小天体衝突により励起された粒子対流、衝突によるクレータ生成時の粒子の相対運動）と比較した。これにより、月ではクレータ生成時に摩耗が起こり得るのに対して、イトカワでは摩耗は期待されないことがわかった。すなわち、摩耗を受けたイトカワ粒子は、イトカワ母天体でのあるいはイトカワ形成時の衝突によるものである。一方、リュウグウ表面でもわずかに摩耗が起こるかもしれないことが示唆された。

[1] Tsuchiyama A. et al. 2011. Science, 333: 1121. [2] Matsumoto T. et al. 2016. GCA 187: 195. [3] Tsuchiyama A. et al. 2016. 4th Symp. Solar System Materials. {4} Tsuchiyama A. et al. 2018. Abstract #1844. 49nd LPSC.

L1

SLIM マルチバンドカメラ観測運用検討のための観測シミュレーション

○佐伯和人[1]、本田親寿[2]、大竹真紀子[3]、白石浩章[3]、仲内悠祐[3]、
石原吉明[3]、佐藤広幸[3]、前田孝雄[4]
[1]大阪大学、[2]会津大学、[3]宇宙航空研究開発機構、[4]中央大学

月着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) に搭載される近赤外マルチバンド分光カメラ (Multi Band Camera : MBC) の開発・運用のための、様々な検証結果を紹介する。月・惑星の着陸探査の際、着陸時の太陽高度や、着陸姿勢、周辺の岩石分布状況によって、観測の成果は大きく左右される。また、マルチバンドカメラによる観測においては、観測波長の選択によって観測能力が大きく変化する。今回は、主に、SLIM 着陸機の 3D-CG モデルを用いた観測環境の検討と、バンドパスフィルターの波長組み合わせに関する検討について発表する。

１．SLIM 着陸機の 3D-CG モデルを用いた観測環境の検討

SLIM では、意図せぬ転倒をすることなく斜面に確実に着陸するための方式として、「2 段階着陸方式」を採用している。この方法では、最終姿勢が、メインスラスタを下にした「立った姿勢」ではなく、横倒しの「寝た姿勢」となる。そのため、急斜面への到達の場合などに有効であると期待されている。新しい着陸姿勢を採用するため、カメラの搭載位置や着陸姿勢が観測に与える影響を着陸機開発メンバーと詳細に議論する必要がある。その過程で MBC 開発チームでは SLIM の 3D-CG モデルを用いて、以下の３つの検討を行った。一つは、SLIM の運用期間中に SLIM 本体が月面の観測領域に投影する影（不可視領域）の影響の検討、二つ目は、周辺に分布する岩石の期待されるサイズ分布の検討、三つ目は、着陸時に着陸脚付近から放出されるダストの影響の検討である。これらの検討をもとに MBC の設計や運用計画の最適化を図っている。

２．バンドパスフィルターの波長組み合わせに関する検討

SLIM 計画では、SLIM で実証する重力天体へのピンポイント着陸技術を活かす観測として、月マントル物質が露出している可能性が高い場所への着陸をし、MBC を用いた月マントル物質の Mg#の推定を試みる計画である。岩石種の特定とかんらん石の Mg#計測のために選択したバンドパスフィルタの波長は、750 nm, 920 nm, 950 nm, 970 nm, 1000 nm, 1050 nm, 1100 nm, 1250 nm, 1550 nm, 1650 nm の 10 波長である。これらの離散的な波長をスプライン関数でフィッティングすることによって、かんらん石の Mg#の変化による Fe^{2+}の吸収のピーク位置や形状の微妙な変化を検出する。この検出能力についての検証結果を紹介する。

L2

月極域における水氷の資源利用可能性評価のための探査

Lunar polar landing mission for deriving information
to evaluate possibility of utilizing water ice on the Moon

◯星野健，大竹真紀子，唐牛譲，白石浩章
（JAXA/国際宇宙探査センター）

近年行われた複数の月探査機によるデータの解析から，月極域（約 85 度以南，以北の領域）の表層ないしは地下数ｍの深さには水（H_2O や水酸基を含む広義の意味での水）が存在する可能性が報告されている．ただし，例えば中性子観測のように水素の観測であるなど，多くのデータは直接水を観測しているわけでは無く，水の存在自体，H_2O なのか水酸基の形で存在するのか，存在形態（氷の層・塊なのか，霜の状態なのか），存在量など不明なことが多い．本当に水氷が存在するならば，それは科学的に水の供給源や過程を知る上で重要であるのみならず，水を電気分解してロケットの燃料として使うなど，資源としての利用価値も高い．実際そのような観点から，近年，米国，ロシア，中国など複数の国において月極域で水や揮発性成分の探査を行う検討が進められている．

日本でも JAXA では国際宇宙探査の枠組みで，各国と協働で月極域において水氷が本当に存在するのか，またそれが資源として利用可能な量・質であるのかを評価するための探査を 2020 年代前半に行う検討を実施している．今年 7 月より JAXA 内に国際宇宙探査センターを設け，これを母体として検討を進める．

この探査機は着陸機とローバより構成され，月極域に着陸して 6 ヶ月の間ローバで移動しながらの地表からの観測を行うとともに，複数箇所において地下 1.5m までレゴリスを掘削して試料をローバ搭載の観測機器に運び，月面その場観測を行う．これにより水氷の有無，存在量，存在形態，純度，水氷の濃集機構について調査することを想定している．

発表では，これまでの月の水を含む揮発性成分に関する研究成果と，それらに基づいて今後明らかにすべき課題，それらを踏まえて検討している“水氷の資源利用可能性評価のための月極域探査”の目的と概要，検討状況について紹介する．本探査の最大の目的は水氷の資源としての利用可能性を評価することにあるが，そこから得られるデータを用いて地球・月周辺に供給される水の起源に関する科学的な知見を得ることができる．

月サンプルリターン計画 HERACLES の紹介

Introduction for lunar sample return mission “HERACLES”

○唐牛譲，安部正真，春山純一，大竹真紀子
宇宙航空研究開発機構　国際宇宙探査センター

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

HERACLES ミッションのサイエンスワーキンググループ (SWG) において，月着陸地点や採取するサンプルの種類，採取方法およびローバに搭載する科学観測機器などの「科学」に関する議論を行っており，著者らは JAXA 側担当として議論に加わっている．SWG では，月科学の議論を行うにあたり，国際的な月科学コミュニティからの意見を求めるため，国際科学定義チーム (International HERACLES Science Definition Team; iSDT) を組織して議論を進めている．著者らは iSDT の活動に先立ち，日本月科学コミュニティの意見を集約する目的で，HERACLES 着陸地点検討を開始し，科学提案を募集，およびコアメンバーによる優先順位の高い着陸探査候補地点の検討を行ってきた．ここで検討された着陸探査候補地点は日本月科学コミュニティからの推薦地域として iSDT にインプットされる．最終的な HERACLES ミッションでの着陸探査候補地点は，12 月中旬までに iSDT によって最大 3 地点まで絞られ，報告書としてまとめられる．

L4

火星生命探査のための生命探査顕微鏡の開発

吉村義隆[1]、○山岸明彦[2]、佐藤毅彦[3]、宮川厚夫[2]、今井栄一[4]、佐々木聰[5]、小林憲正[6]、癸生川陽子[6]、薮田ひかる[7]、長沼毅[7]、三田肇[8]、藤田和央[3]、臼井寛裕[3,9]

1.玉川大学、2.東京薬科大学、3.宇宙航空研究開発機構、4.長岡技術科学大学、5.東京工科大学、6.横浜国立大学、7.広島大学、8.福岡工業大学、9.東京工業大学

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

日本のグループもまた、微生物を含む有機物を検出するため、蛍光顕微鏡を利用した生命探査装置（LDM: Life Detection Microscope）の開発を行っている。この装置は、試料（表面を掘削した土）に、核酸やタンパク質などの生体成分と結合する蛍光色素を添加し、レーザーダイオードを励起光源として用いて、試料から発する蛍光を映像化する。特徴としては、（１）非生物起源を含む有機物を検出できること、（２）膜構造や触媒活性を持つ有機物（微生物細胞）を検出できること、（３）1 μm/pixelの分解能により有機物の他、レゴリスなどの鉱物粒子の微小な形態を映像化できること、などがあげられる。使用する蛍光色素としては、有機物を染色する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、染色液添加機構などの装置設計、有機物と鉱物との識別法などの課題に取り組んでおり、本講演では、LDMの開発状況を報告する。

L5

火星における hot oxygen 密度測定に向けた探査機搭載用質量分析装置のイオン化源の開発

○沖津 由尚[1], 笠原 慧[1], 杉田 精司[1], 齋藤 義文[2], 平原 聖文[3], 横田 勝一郎[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.名古屋大学, 4. 大阪大学

本研究では，希薄ガス測定に向けてこれまでより高感度な質量分析器のイオン化源を開発している．惑星の高高度大気や小天体の周りの揮発性物質など，感度不足ゆえにこれまでの探査では測定できなかった分子種を測定できる可能性がある．その一例として火星での酸素原子高度分布観測があげられる．火星は，現在は寒冷乾燥な環境だが，火星表層の地形から，かつては温暖湿潤な環境だったといわれている．しかし，水を液体として保持できるような温暖湿潤な環境が長期間維持されたかどうかはよくわかっていない．それらの過去の存在量を推定するためには，水や温室効果ガスである二酸化炭素の宇宙空間への散逸量が手掛かりとなる．これらの分子は原子に分解されて散逸するため，例えば酸素原子の散逸量を理解することが鍵となる．酸素の散逸量を見積もるには外圏領域での酸素の高度分布を測定することが重要であるが，これまでの探査では高度方向の網羅範囲が限定的である．計測領域をより高高度の希薄大気領域まで広げるためには，より高感度を持つ質量分析器が必要である．中性粒子質量分析器の感度はイオン化効率で制限されるため，本研究では，従来の 10 倍の強度(1mA)を持つイオン化源を実現する二つの方法を考えた．一つは従来の探査で用いられてきたレニウムタングステンのフィラメントを用いる方法である．数値計算で消費電力が少なくなる線径や線長の条件を探し，実際に測定した．その結果，消費電力 9W で放出電流 1mA を得た．もう一つの方法として，仕事関数の低く，地上での実績がある素材として多孔質タングステンに酸化バリウムを含浸させたものを選び，飛翔体搭載に適した小型化を図った．現在実験室でその性能を評価中で，結果を報告する．

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

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

現在, 日本の深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUSt science)が提案されており, イプシロンロケットで打ち上げる小型探査機により, 小惑星 3200 Phaethon(以下 Phaethon)のフライバイ探査を実施予定である. DESTINY⁺は, 工学と理学の連携ミッションであり, 理学目的は, 宇宙から地球へ飛来するダストの実態解明および地球飛来ダストの特定供給源である流星群母天体の実態解明である. 打ち上げは 2022 年, Phaethon のフライバイは 2026 年に実施される予定である. Phaethon は三大流星群の 1 つであるふたご座流星群の母天体として知られている地球近傍小天体で, ダスト(宇宙塵)を放出し, そのダストが地球に供給されている非常に興味深い天体であるが, 地上からの光学観測では空間分解して観測することができず, その実態はまだよくわかっていない. 特に, Phaethon は大量の水氷を含む彗星ではなく岩石質の小惑星ではないかと考えられているが, そのような天体からなぜ大規模な流星群を発生させるほどのダストが放出されている(された)のか, その放出機構は不明である. 一般的に宇宙塵には有機物が含まれており, 宇宙塵は地球上における生命の起源の鍵となる有機物の, 宇宙から地球への供給の重要な媒体であると考えられている. Phaethon はそのような宇宙塵の供給源の 1 つであり, Phaethon を探査してその素性を明らかにすることにより, 地球への物質供給, 特に有機物供給機構の解明のための手掛かりを得ることができると期待される.

本発表では, DESTINY⁺探査機に搭載される 2 台の理学観測カメラの検討状況を報告する. 望遠カメラ TCAP(Telescopic CAmera for Phaethon)は, 高空間分解能のモノクロカメラで, Phaethon を追尾しながら主に Phaethon 表層の高空間分解能撮像(≦10 m/pixel, 最接近時約 5 m/pixel)を幅広い太陽位相角(0° ～90°)において行い, 特に Phaethon 上のダスト放出地形の検出を目指す. Phaethon と探査機のフライバイ相対速度は打ち上げ時期にもよるが 30～40 km/s と非常に高速であり, 追尾しながらぶれずに撮像する事が重要である. マルチバンドカメラ MCAP(Multiband CAmera for Phaethon)は, Phaethon 表層を多波長(400, 480*, 550, 700, 850, 950* nm, *はオプション)で撮像して, 表層の物質分布を観測する. これまでに両カメラについて行った概念検討の結果を報告する.

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) ー 概要および日本チーム開発状況

Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission ー Overview and Japanese development status

○ 塩谷圭吾,[1,2] 並木則行,[3,2] 小林正規,[4] 木村淳,[5] 荒木博志,[3,2] 野田寛大,[3,2] 田澤誠一,[3] 押上祥子,[3] 鹿島伸悟,[3] 宇都宮真,[3] 石橋高,[4] 小林進悟,[6] 山脇敏彦,[1] 東原和行,[1] 尾崎正伸,[1,2] 水野貴秀,[1,2] 斎藤義文,[1] 鎌田俊一,[7] 松本晃治,[3,2] 佐々木晶,[5] 倉本圭,[7] 佐藤祐貴,[8] 畠山千尋,[8] 横沢剛,[8] 小島健太郎,[8] 水野博行,[8] 谷本和夫,[8] 中川寛之,[9] 今井久人,[9] 桐野宙治,[9] 岩村哲,[10] 藤代尚文,[11] 飯田光人,[12] 松本吉昭,[12] 藤井雅之,[13] Kay Lingenauber,[14] Christian Althaus,[14] Simone Del Togno,[14] Judit Jänchen,[14] Belinda Borgs,[14] Thomas Behnke,[14] Horst-Georg Loetzke[14], Harald Michaelis[14], Reinald Kallenbach,[14] Hauke Hussmann[14]

宇宙科学研究所[1], 総研大[2], 国立天文台[3], 千葉工大[4], 大阪大[5], 放医研[6], 北海道大[7], 明星電気[8], クリスタル光学[9], MRJ[10], アストロオプト[11], PTI[12], FAM サイエンス,ドイツ航空宇宙センター[14]

We present an introduction for the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) mission, and development status of the GALA-Japan team. JUICE is a mission of ESA to be launched in 2022, and GALA is one of the payloads of JUICE. Major objectives of GALA observation are to obtain detail topographic data of Ganymede and its time variation. GALA's data will provide us new sciences for Ganymede, potentially including detection and characterization of the underground ocean of Ganymede via tidal deformation.

For the laser altimetry, GALA emits laser pulses of 1064 nm wavelength, at ~500 km altitude. Reflected beam from the Ganymede surface is received by the receiver telescope with 25 cm diameter aperture, re-focused by the BEO including a narrow band-pass filter, and then detected by the APD detector.

GALA is developed in international collaboration by Germany (PI), Japan, Switzerland, and Spain. GALA-Japan will develop the Backend Optics (BEO), the Focal Plane assembly (FPA) including an avalanche photo-diode (APD) detector, and the Analog Electronics module (AEM) in the receiver chain. For these modules, design, manufacturing, and tests for the STM (structural and thermal model), the Simulator, EM1#1 (Engineering model 1#1) are ongoing. Progress of these developments for the delivery will be shown in the presentation.

JUICE（Jupiter Icy Moons Explorer） 搭載ガニメデレーザ高度計（GALA: the Ganymede Laser Altimeter）のプロジェクト概要および日本チームの開発状況について示す。JUICE は ESA が主導する 2022 年打ち上げ予定の木星氷衛星探査ミッションであり、GALA はその搭載機器の一つである。 GALA による観測の第一の目標は、ガニメデ表面の詳細な 3 次元形状およびその時間変動データを取得することである。これまでにない、ガニメデの詳細な 3 次元データは新しい地形のサイエンスをもたらし、特に時間変動データは潮汐応答を通じての地下海の存在や特徴を調べる等の科学研究に有用である。

GALA 基本的には高度約 500 km のガニメデ周回軌道にて運用する。GALA は高度測定のためレーザ光（波長 1064 nm）を射出し、ガニメデ表面による反射光を口径 25 cm の受光望遠鏡で受ける。その後、受信光は狭帯域フィルターを含む後置光学系（BEO）を経て検出器（APD）に到達する。得られた送受信光の時間差から高度を算出する。

GALA の開発はドイツを PI とし、日本、スイス、スペインによる国際協力によって推進している。日本チームは BEO、（APD を含む）焦点面モジュール（FPA）、アナログエレクトロニクスモジュール（AEM）を担当する。日本チームでは、BEO、FPA、AEM について STM（熱構造モデル）, シミュレーター、EM1#1（エンジニアリングモデル 1 の 1）、要素検証モデル等の開発を進め成果を得ている。講演ではこれらの出荷に向けた進捗について、最新の状況を紹介する。

L8

放射光 4 次元 CT による、コンドリュール形成過程の高分解能その場観察の手法開発と現状

○上椙真之[1], 上杉健太朗[1], 竹内晃久[1], 星野真人[1]
[1]高輝度光科学研究センター

コンドリュールはコンドライト隕石を特徴付ける重要な要素の一つであり、その形成過程を調べる事で、固体惑星進化だけでなく、太陽系の進化そのものの鍵となる重要な情報を得ることが期待されている。このコンドリュールの加熱・溶融・再結晶化過程はこれまでに数多くの加熱実験によって検証が進められてきたが、その場観察の例が非常に少なく精度も足りないため、特徴的な結晶組織の形成過程、及びその制約条件を説明するための情報は、十分には得られてこなかった。

本発表では、隕石中のコンドリュールの形成過程の詳細を調べるために開発を進めている、放射光を利用した加熱・冷却プロセスの 4 次元その場観察システムの現在までの開発状況について報告する。本研究で開発を進めている加熱実験装置は、放射光観察を用いることにより、加熱・溶融・結晶化の過程における試料内部の様子および結晶成長の詳細を 2 次元・三次元の時系列で観察する事が可能である。これまでの可視光を使ったその場観察と異なり、ミクロンオーダーの極めて高分解能の観察が可能であることに加え、X 線透過光観察を利用しているため、試料を 180 度回転させることで CT=3D 観察も可能になっている。これまでの研究で、コンドリュールのサイズとしては最大レベルの、3mm 程度の模擬試料を加熱し、その結晶組織の形成過程の観察を 10μm 程度の分解能で行ってきた。この結果、岩石鉱物の溶ける過程、溶融時の気泡の発生、結晶化における固液界面の移動や、それらの結果として形成される結晶組織の様子などを観察する事に成功した。

今回、新しく BL20XU で、Ca-pyroxene である diopside の溶融・結晶化の過程を 3 次元 CT ＋時間発展の 4D 観察を、1mm 程度の試料を用いて 1μm 程度の高分解能光学系で行った。この結果、これまでは一様な面としてとらえられていた固液界面において、樹枝状結晶の形成・成長の様子をとらえることに初めて成功した。さらに、これまでの分解能の結晶化過程の分析結果と合わせることにより、その結晶化の条件について、より詳しい描像を得ることに成功している。

今後は、天然のコンドリュールの組成である、Ca を含まない Enstatite を用いて同様の実験を行い、より実際の現象に近い条件での実験を行う予定である。また、このシステムをアップデートし、2000℃を越える、より高温の条件での加熱実験を可能にする。これにより、これまでは難しかった forsterite 組成の結晶化実験等、より詳しいコンドリュール形成の様子を調べる事が可能になる。

Study of ion escape mechanisms from Mars based on MAVEN observations and multi-species MHD simulations

火星探査機 MAVEN の観測と多成分 MHD シミュレーションに基づく火星からの電離大気散逸機構に関する研究

○関 華奈子[1], 堺 正太朗[1], 乾 彰悟[1], 坂田 遼弥[1], 寺田 直樹[2], 品川 裕之[3], David A. Brain[4], James P. McFadden[5], Takuya Hara[5], David Mitchell[5], Jasper S. Halekas[6], Gina A. DiBraccio[7], Bruce M. Jakosky[4]

[1]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, [2]東北大学大学院理学研究科, [3]情報通信研究機構電磁波研究所, [4]LASP, University of Colorado, Boulder, [5]SSL, University of California, Berkeley, [6]University of Iowa, [7]GSFC, NASA

Mechanisms of atmosphere escape from Mars to space is one of important problems to understand drastic climate change in the ancient Mars. Observations by NASA's Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN) have provided new insights about the atmospheric escape processes in operation at Mars. Among them, the cold ion escape is a promising candidate to enable a large number of heavy ions to escape from the ionosphere. In this study, we present an overview of the results of a statistical analysis of the ion composition measurements by MAVEN as well as global multi-species MHD simulations of solar wind-Mars interactions with a focus in effects of the intrinsic magnetic field.

約 40 億年前の火星は海を持ち現在より温暖湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥した気候を持つ惑星である。このような気候変動を引き起こすには、1 気圧分程度の CO_2 大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要があるが、火星で大量の炭酸塩は見つかっておらず、CO2 大気が宇宙空間に散逸した可能性が高いと考えられている。一方で、火星宇宙気候研究の重要課題として、CO_2 大気を宇宙空間に逃がすことができる物理機構の解明が挙げられる。現在の火星はグローバルな固有磁場を持たず、太陽風と大気が直接相互作用しているが、南半球に残る残留磁化から過去の火星は固有磁場を保有していたと考えられており、磁場を失った時期と気候変動が起こった時期が近いこともあり、火星からの大気散逸を理解するためには、固有磁場の影響を考慮する必要がある。これまでに、NASA の火星探査機 MAVEN 等によって火星大気散逸現象を含む火星圏環境について多くの基本的描像が得られつつある。

その中で、低エネルギーイオン流出は、重イオンを含む大量の電離大気を散逸させられるメカニズムとして注目されている。本研究では、MAVEN の観測データの統計解析に基づいた火星からの低エネルギーイオン流出機構に太陽風と地殻残留磁場がおよぼす影響の研究、および、太陽風-火星相互作用系のグローバル多成分磁気流体(MHD)シミュレーションに基づく弱い惑星固有磁場がイオン散逸におよぼす影響の研究について報告する。また、これらの結果から、過去の火星において、電離大気散逸が気候変動に果たした役割について議論する。

P2

火星のCoprates Catenaの地下構造
Underground structure of Coprates Catena, Mars

◦野口里奈[1], 石山謙[1], 臼井寛裕[1], 熊本篤志[2]
[1]宇宙航空研究開発機構, [2]東北大学大学院

火星のマリネリス峡谷の周辺領域には，円状の凹地地形の直線的な連なりであるcatenaが複数存在する．マリネリス峡谷を含めこれらのcatena壁にはrecurring slope lineae（RSL）と呼ばれる筋地形が発見されている．季節変化による消長が観察されることから，地層中の氷の融解・流出による形成可能性が検討されている（例えば，Stillman et al., 2017 Icarus）．

Coprates Catenaは，マリネリス峡谷の南東（–15.3°N, 300°E）に位置する東西300 kmに延びるcatena地形である．Coprates Catenaの内部には，ジャロサイトやモンモリロナイトなどの粘土鉱物が存在することがCRISMデータの解析によって示唆されている（例えば，Weitz and Bishop, 2016 JGR; Grindrod et al., 2018 Icarus）．これらの粘土鉱物の形成には，ある程度の期間を通じての岩石-水接触変質作用が必要であるため，火星の地質史，水環境分布史およぎ現在の表層環境を知る上で重要な研究対象領域となっている．

SHARAD（Mars SHAllow RADar sounder）による地下レーダーデータを調査したところ，Coprates Catena周辺領域の地下に二次反射面が認められた（Fig.1）．この二次反射面は経度方向に連続する複数測線で認められることから，擬似エコー等でなく実在する地下境界面からの反射である可能性が高い．そこで本研究では，複数測線のSHARADデータを用いて当該反射面の分布領域を調べた．Weitz and Bishop, 2016やGrindrod et al., 2018で示されている地質観察結果や可視画像，地形データ，スペクトルデータなどのリモセンデータを合わせて，当該反射面がどの地層と対応しているのか検討する．

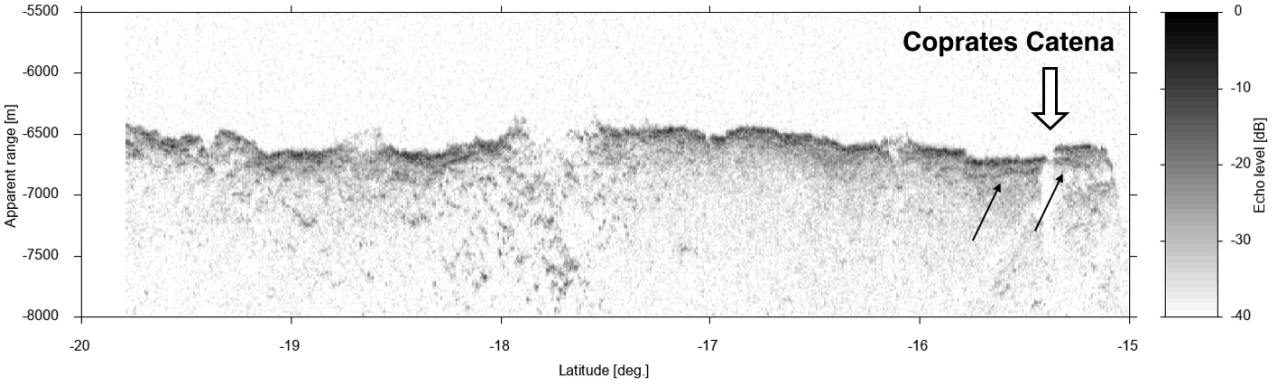


Fig.1: Coprates Catenaの地下レーダーグラム．
地下120 m 付近に二次反射面（黒矢印）が確認された．
(SHARAD data ID: s_04388301, data credit: SHARAD Science Team).

古火星における温室効果気体リサーチ：過酸化水素の影響

○伊藤 祐一[1]、倉本 圭[1]、はしもと じょーじ[2]、高橋 芳幸[3]、石渡 正樹[1]
[1]北海道大学大学院　宇宙理学専攻、[2]岡山大学大学院　地球生命物質科学専攻、
[3]神戸大学大学院　惑星学専攻

火星には、約 40 億年前に液体の水が存在したことを示す地形がある。一方で、その頃の太陽は現在よりも 25%ほど暗い。大気モデルを用いた検討から、古火星が液体の水を維持する温暖な環境であるためには、二酸化炭素・水だけでない温室効果ガスが大気に存在していたと考えられている(Kasting 1991)。近年は、大気中の水素と二酸化炭素の衝突誘起吸収によって、古火星が温暖化した還元的環境シナリオが提唱されている（Ramirez et al., 2014 など）。その一方、ローバーの探査からは、火星の表層が還元的環境と酸化的環境の両方をかつて経験したことを示唆する結果が報告されている(Lanza et al., 2016, Eigenbrode et al., 2018 など)。特に、高濃度の酸化マンガンの検出(Lanza et al., 2016)は、古火星で著しく高い酸化的雰囲気下で液体の水が存在していたことを示唆している。これまで、酸化的な大気成分の一つである過酸化水素は、火星の表層を極度に酸化させていった物質として着目されてきた。ただし、その量が現在の火星大気で極微量であるために温室効果気体としては着目されてこなかった。しかし、過酸化水素の持つ遠赤外の吸収は非常に強く、仮に古火星大気が非常に酸化的であった場合、過酸化水素が地表面を温暖化させた可能性がある。

本研究では、Line by Line の輻射輸送計算を用いた鉛直１次元大気のエネルギーバランスモデルに基づき、二酸化炭素大気中の過酸化水素の量をパラメータとし、古火星の表面温度がどれだけ上昇するか推定した。古火星の大気中に飽和蒸気圧分の過酸化水素があったと仮定した場合、表面温度は最大でも 3K しか上昇しないことが分かった。一方で、大気上層では凝縮核が少ないために過酸化水素が過飽和状態にあった可能性が考えられる。過酸化水素が高度に依らず 1ppm の濃度で含まれている場合、2bar 以上の大気で表面温度が 273K を超える。また、10ppm の場合は 1bar の大気量で表面温度が 273K を超えることが可能であった。過酸化水素を含まない場合と比較すると、2bar の大気については、濃度が 1ppm の場合には約 40K、10ppm の場合には約 80K の表面温度上昇がおきた。発表では、光化学反応などによる過酸化水素生成過程及び凝縮核の数密度やサイズなどに依存する凝縮過程によって、古火星の大気中の過酸化水素量が過飽和となりうるかも含めて議論する。

還元型原始火星大気の流体力学的散逸

○吉田 辰哉，倉本 圭
北大理

微惑星が集積し惑星が形成される過程で，衝突脱ガスや周囲に存在する星雲ガス成分の捕獲により，原始火星は脱ガス成分と星雲ガス成分の双方から成る原始大気を獲得したと予想される (Saito and Kuramoto, 2017)．金属鉄を含む微惑星が高速で衝突する際に放出される脱ガス成分は，ガス-マグマ-溶融金属鉄間の熱化学反応によって決定され，大気組成は H_2，CO，CH_4 などの還元的な分子種に富むと推定されている (Kuramoto and Matsui, 1996)．一般的に還元的な環境下では生命前駆物質が生成されやすい (Schlesinger and Miller, 1983)．そのため，還元的な原始大気が形成された場合，原始大気は生命前駆物質の生成場として重要だった可能性がある．

還元的な原始大気はそのままの状態で維持されず，流体力学的散逸によって形成直後に大規模に散逸したと考えられている．流体力学的散逸とは上層大気が加熱され静水圧平衡が維持できなくなって大気が宇宙空間に流出する現象のことで，初期火星においては初期太陽の強力なEUV放射によって上層大気が加熱されることで起きていたと考えられている．Lammer et al. (2013), Erkaev et al. (2014)は火星形成時期とEUV強度進化の新たな知見を用いて大気散逸量を求め，EUV強度が現在の強度の 100 倍で，分子は全て解離し大気は H，C，O から成るという仮定のもと，100 bar 相当の大気が質量分別を起こさずに 10 Myr 程度で散逸することを示している．しかし，この結果は大気中の分子が全て解離しているという仮定に強く依存している可能性がある．火星大気の流体力学的散逸は，それほど大きな昇温を必要としないため，実際には分子も存在すると考えられる．大気流出時に分子が存在したとすると，原始大気には赤外活性分子が多く含まれていたと考えられるため，それらの分子の放射冷却によってエネルギーが失われ，大気散逸量が減少する可能性がある．しかし，これまで分子の放射冷却が原始火星大気の流体力学的散逸に及ぼす影響についてはほとんど検討されてこなかった．大気散逸量が減少する場合，従来の推定よりも集積時に獲得した水素が保持される期間が延び，還元的環境が長期間持続した可能性が生じる．

そこで本研究では，光化学過程と分子の放射冷却過程を考慮した多成分大気における流体力学的散逸モデルを構築し，流体力学的散逸による大気散逸量を求め，原始火星の還元的環境の持続期間を明らかにすることを目的とする．数値モデルは球対称一次元流体方程式を解き定常流を求めるモデルであり，波長に依存したUVならびに赤外放射の放射伝達と光解離・光電離過程を考慮している．EUV強度は現在の強度の約 100 倍とした．脱ガス成分組成はガス-マグマ-溶融金属鉄間の熱化学反応によって決定されると考え，Saito and Kuramoto (2017) を参考に $H_2 : H_2O : CO : CH_4 = 0.45 : 0.15 : 0.20 : 0.20$ とした．ただし，H_2O はコールドトラップのため熱圏での存在量は非常に小さいと考えられるため無視している．今回はさらに星雲ガス成分と脱ガス成分が混合した場合を想定し，H_2 の混合比は 90 % 以上と高めに設定している．

CO と CH_4 の混合比を大きくするにつれて質量散逸率は減少し，CO と CH_4 がそれぞれ H_2 に対して数密度比で 5 % 含んだ段階で，水素の質量散逸率が純粋な水素大気の場合から一桁ほど減少し，~10^{19} kg/Myr となった．火星では大気の流速が大きく，移流のタイムスケールが光解離のタイムスケールを上回るため，大気中の分子の存在割合が大きい．その結果，CO と CH_4 の放射冷却によって大気流出に用いられるエネルギーが減少し，質量散逸率が減少する．林モデルから推定される星雲ガス成分 (~10^{22} kg) と，二成分モデル (Dreibus and Wanke, 1987) から推定される材料物質中に 1 % 揮発性物質を含んでいた場合に獲得する脱ガス成分 (~10^{21} kg) が混合し，H_2 の混合比が 90 % 程度の原始大気が形成されたとすると，H_2 が全て散逸するためには少なくとも 10 億年程度かかることになり，これは初期火星の還元的環境が長期間続いた可能性を示唆する．

炭素流出が火星大気組成進化に及ぼす影響

○ 八木亮輔[1], 寺田直樹[1]

[1]東北大学大学院理学研究科

本研究では、水素や酸素の宇宙空間への流出だけでなく、炭素の流出も考慮し、過去火星における大気組成の進化を調べることを目的としている。過去の火星は、現在よりも強い太陽紫外線放射の影響を受けていた。そのため、質量の小さい水素だけでなく、酸素や炭素についても流出効果を考える必要がある。またこれらの大気成分が熱的に流出する際の指標となる、エスケープパラメータの成分による違いも、当時の大気組成を理解する上で重要である。先行研究によると、41 億年前の火星大気における炭素原子のエスケープパラメータは酸素原子の 0.8 倍で、両者の上層大気中の密度も同程度であったと見積もられている（Tian et al., 2009）。このことから、当時の火星では、酸素原子に比べ炭素原子の熱的な流出が卓越し、大気中により多くの酸素が残った可能性が考えられる。仮に炭素原子と酸素原子が同じ割合で流出するとして見積もりを行うと、1 bar の二酸化炭素大気から 1 千万年ほどで炭素が流出しきってしまい、およそ 0.4 bar の酸素大気のみが残るという結果を得ることができる。炭素原子の熱的流出の割合が大きい過去に遡るにつれ、炭素が流出しきるまでの時間が短くなり、42.5 億年前では、およそ 500 万年で酸素大気になると見積もることができる。また、キュリオシティの探査結果から、およそ 35 億年前の火星大気には数 mbar 以上の酸素分圧が存在した可能性があることが示唆された(Noda et al., 2018)。本研究で扱う 35 億年前以前の時代の酸素分圧が、上記の見積もりの通り高ければ、その後の比較的穏やかな流出が続く時代においても暫くは酸素分圧を高く保つことが期待され、先行研究を支持する可能性があると考える。本研究では、さらに詳細な大気組成分布をとその進化を調べるため、1 次元光化学モデルを構築した。このモデルでは、水素、酸素、炭素の流出効果に加え、酸素の地表面堆積による消失や、脱ガスによる効果を考慮し、計算を行った。先行研究において、水素や酸素だけでなく炭素の流出効果も考慮した大気組成進化モデルの例はなく、本研究の特徴である。本発表では、炭素の流出が過去火星大気の酸素分圧とその長期変遷に与える影響について発表する。

火星古気候モデルに向けた積雲対流スキームの定量的評価

○鳥海克成[1], 鎌田有紘[1], 黒田剛史[1,2], 笠羽康正[1],寺田直樹[1], 中川広務[1], 村田功[1], 青木翔平[1,3]

1.東北大学大学院理学研究科, 2.情報通信開発機構 (NICT), 3.BIRA-IASB

火星では流水活動を示す地形が多数発見され、38 億年程度前の火星は液体の水が長期に渡って存在できる環境だったことが示唆されている。一方、当時の太陽放射強度は現在の７０～８０%程度であったとされ(暗い太陽のパラドックス)、強い温室効果をもつ CO_2 が 2～7bar 程度存在したとしても、流水環境を生み出すために前提となる温暖な環境を維持することは難しいことが幾つかのモデル研究で示されてきた[*Kasting(1991), Forget et al.(2013)*]。

我々は、太古の海洋存在下における水蒸気や雲による放射効果、土壌熱力学、海洋熱力学、水文過程を考慮に入れた火星古気候モデルを新たに開発し、液体の水が存在可能な温暖な火星環境および大部分の流水地形を再現することに成功してきた[*Kamada et al.,submitted to Icarus*] 。しかしこのモデルでは、ノアキス大陸などの一部の地域で流水地形が再現されていない。この原因としては、タルシス山地の形成前後による風系の変化、氷河流の未考慮などの要因が考えられる。その中の一つとして、このモデルにおける降水過程は大規模凝結のみを考慮し、積雲対流効果を考慮に入れていないことも考えられる。積雲対流効果は、大気の成層不安定状態を対流活動により解消し、対流性の降水を発生させるため、降水の地域分布と量に影響を与えうる。

本研究では、火星古気候モデルに積雲過程を表現するため、Kain-Fritsch スキーム[*Kain and Fritsch(1993)*]の導入を試みていく。このスキームは、格子中の積雲の効果をひとつの積雲の生成・成長・衰退に代表させて成層不安定性を解消させるものである。地球の大気大循環モデルにおいて広範に用いられている Relaxed Arakawa-Schubert スキーム[*Moorthi and Suarez(1991)*]は、格子中に異なる雲頂をもつ複数の積雲を扱えるが、雲質量フラックスを導出する過程などで地球の経験則を用いており、このまま古火星に適用できるか自明ではない。Kain-Fritsch スキームは、地球の経験的仮定に依存せず積雲内と環境場との温度関係から積雲の鉛直構造を直接計算する点で、火星古環境モデルにはより適していると考えられる。まずは観測データが多く、数値実験に基づいた理解も進んでいる地球の条件を設定した GCM において、Kain-Fritch スキームと Relaxed Arakawa-Schubert スキームによる雲の鉛直構造や降水効果の比較・評価を行う。ここでの全降水分布と降水量（対流性、凝結性含めた）の結果は、両者で類似したものになると考えられる。次いで、このモデルに与える大気圧、大気組成、太陽フラックスなどを[*Kamada et al.*]で適用した過去火星環境条件（0.5 - 2.0 bar の CO_2 大気）へ変更し、両者が与える降水量・分布の特性を定性的・定量的に比較・評価する。この結果は各スキームの特徴を反映したものだと推測される。よってその結果の差異が古火星において妥当であるか考察する。本講演では、この試行結果の総括および今後の展望について報告する。

高解像度火星境界層シミュレーションのデータを用いたダスト巻き上げ過程に関する解析

◯ 村橋究理基[1], 須藤康平[2], 西澤誠也[3], 石渡正樹[1], 小高正嗣[1], 中島健介[4], 竹広真一[5], 杉山耕一朗[6], 荻原弘尭[2], 高橋芳幸[7], 林祥介[7]

[1] 北海道大学・理, [2] 気象庁, [3]RIKEN/AICS, [4] 九州大学・理, [5] 京都大学・数理研, [6] 松江高専・情報工, [7] 神戸大学・理

1. はじめに

火星大気中におけるダストは大気の温度構造に大きな影響を与えている．火星大気大循環モデル (MGCM) では, ダスト巻き上げ過程をパラメタライズすることで表現している (Kahre et al., 2006 など). しかし現在の MGCM ではグローバルダストストームの年々変動の再現などは必ずしも成功していない. ダストの巻き上げ量は地表面応力によって決まるため, 地面付近である大気境界層内の流れ場の構造が重要な役割を果たしていると考えられる. しかし, これまでのパラメタリゼーションスキームは大気境界層内の流れ場の微細構造に基づいた検討がなされてこなかった. 本研究ではラージエディシミュレーション (LES) を用いて火星大気境界層の微細な流れ場の調査を行なっている. 前回の発表 (村橋 他, 2017, 秋季大会) までは 14:30 (地方時) のみについて地表面応力の強い地点における流れ場を調査し, 渦構造を伴う地点とそうではない領域が同数程度存在することを示した. この結果の一般性を調べるには, 本来は多様な条件で LES 計算を実施した結果を検討する必要がある. しかし高解像度設定の再計算は容易ではないため, 今回は同じ計算結果のうち 14:30 以外の時刻について調べることで, より一般性の補強を行うことを試みる.

2. 使用データ

本研究では, Nishizawa et al. (2016) で計算された解像度 5 m のデータを用いて解析を行う. このデータは, RIKEN/AICS で開発された SCALE-LES ver.3 を使用して得られた世界最高解像度の計算結果である. 計算には, 火星を想定したパラメータ値が用いられている. 計算領域のサイズは 19.2 km × 19.2 km × 21 km である. 水平境界条件として周期境界条件を用いる. 初期条件は, Odaka et al. (2001) の鉛直温度分布に微少な温位擾乱を加えた静止大気とし, 0:00 から計算されている. 解像度 5 m のデータは, 解像度 10 m 計算の結果を初期値とし, 14:00 から 15:00 まで 1 時間計算して得られたものである. 本研究の解析では 14:30 から 15:00 までの 5 分おきに出力されたデータを用いた. 地表面応力は Nishizawa et al. (2016) と同様に Louis (1979) と Uno et al. (1995) のスキームから地表面フラックスを計算して求めた.

3. 結果

時刻 14:30 から 15:00 までのデータを調べたところ, 領域内における地表面応力の強度が時間経過に伴って弱まっていく傾向は見られるものの, 水平スケール数 km 程度の対流セルの存在など, 流れ場全体の構造には大きな変化は起きていないことが確認された. 地表面応力が強い地点における流れ場の分布に関しては, 地表面応力が強い地点において, どの時刻でもダストデビルのような渦構造を伴う場合とそうではない場合がおよそ同数程度存在していることがわかった. これより応力が強い地点では, 流れ場が全て渦構造を伴うわけではないという特徴は一時的に生じたものではないということが確認されたといえる. 今後はダスト巻き上げフラックスの診断結果を調べることでダスト巻き上げパラメタリゼーションスキームの問題点を洗い出すことを試みる.

P8/PO8

地球化改造した火星の気候シミュレーション

◯ はしもとじょーじ [1]，清水康嗣 [2]，高橋芳幸 [3]

[1] 岡山大学自然科学研究科，[2] 岡山県庁，[3] 神戸大学理学研究科

惑星改造によって地球と同じような表層環境が実現した後の火星について，大気大循環モデル DCPAM を用いた気候シミュレーションをおこなった．地球化改造後の火星の公転や自転は現在の火星と同じであるが，大気組成は地球と同じであり，平均地表気圧は 1 気圧，大気上端で火星に入射する太陽放射のフラックスは現在の地球と同じ 1370 W/m^2 であるとした．地表を覆う海洋の面積はパラメタとして，海洋面積が火星表面の 85%，51%，35%，14%，という 4 つ場合について，気候シミュレーションをおこなった．地表に氷がない状態を初期状態として 25 火星年の積分をおこない，ほぼ平衡状態に達したと思われる最後の 3 火星年から気候値を作成した．

地球化改造した火星では，海洋の面積が大きいほど全球平均の地表温度は高くなり，降水量は増える．海洋面積が大きいときに地表温度が高くなるのは，海洋のアルベドが陸面のアルベドよりも小さく，海洋面積が大きくなると惑星アルベドが小さくなって太陽放射による加熱が増えるためである．また，海洋面積が大きいときに降水量が増えるのは，温暖な環境では飽和蒸気圧が大きくなって大気中に含まれる水蒸気量が増えることと，海洋は乾燥した陸面よりも多くの水を蒸発させうること，によって説明されると考えられる．

気候シミュレーションの結果に基づいて気候区分図を作成し，地球化改造した火星の利用可能性について検討した．海洋面積が 50%以下の場合に，南半球の広い領域が乾燥地域になった．火星の地形はおおまかに北半球が低く南半球が高くなっているため，海洋面積が 50%以下になると南半球は巨大な大陸となり，海洋から離れた大陸の内部には水蒸気が輸送されず，雨が降らなくなったと考えられる．地球化改造した火星において，利用価値の高い温暖湿潤な気候帯にある陸地の面積を最大化するためには，ほどほどの大きさの海洋が存在している必要がある．

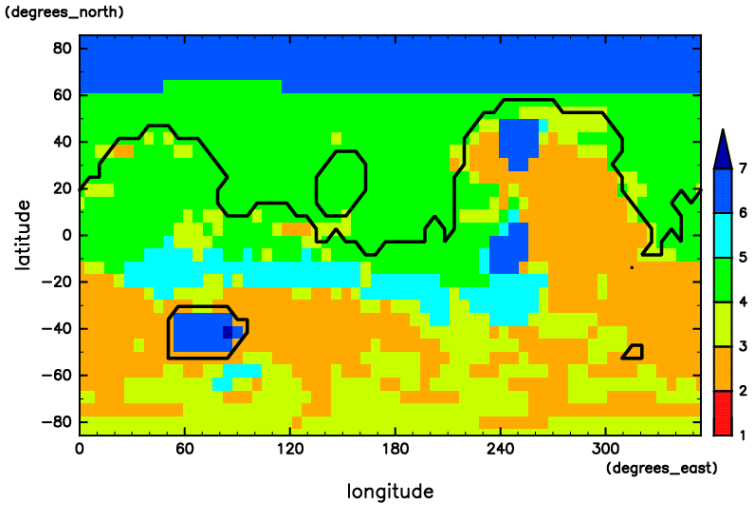


図 : 地球化改造した火星 (海洋面積 35%) の気候区分図．赤色は熱帯気候，橙色は超乾燥気候，暗黄色は乾燥気候，緑色は温帯気候，水色冷帯気候，青色はツンドラ気候，濃青色は氷雪気候．黒線は標高 0m で，北半球の大部分は海洋，南半球の大部分は陸地である．

月レーダサウンダー(LRS)を用いた月の地下空洞の探索

○郭哲也[1,2]，春山純一[2]，三宅亙[1]，熊本篤志[3]，石山謙[2]，山本圭香[4]，道上達広[5]，横田康弘[6]，岩田隆弘[2]

[1]東海大学大学院工学研究科，[2]宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部，[3]東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻，[4]国立天文台，[5]近畿大学工学部，[6]高知大学理学部，

月に存在する地下空洞は，将来の基地建設地の候補や，科学探査の対象として考えられている．2009 年，縦孔がマリウス丘で発見され，その縦孔下に地下空洞が広がっている可能性が挙げられていた，そして，2017 年には，SELENE に搭載された月レーダーサウンダー(LRS)による地下空洞の探索がマリウス丘の縦孔周辺で行なわれ，地下空洞の存在を示していると思われる反射波が確認された．今回は、上記以外での異なる領域の調査を行った．
(191/250)

海洋潮汐波の浅水挙動解析に基づく月の潮汐進化過程の考察

○内田 菜月[1], 島 弘幸[2]
[1]山梨大学 生命環境学部, [2]山梨大学 大学院総合研究部

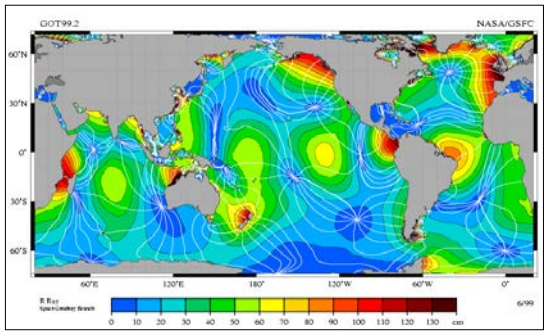


図 1:Tidal pattern from TOPEX/POSEIDON [1]

本研究では、月-地球系の潮汐進化と、地球の海洋で生じる回転潮汐波との相関関係を理論的に考察した。海洋潮汐を扱った先行研究を検索すると、特定の海域に考察対象を限定して、その潮流パターンや潮汐エネルギー収支を解析した例が多くみられる。こうした定量性を重視する各論的な研究アプローチに加えて、一般の天体運動と海洋潮汐との関わりを広く理解するためには、より汎用性のある俯瞰的・定性的な議論が有用だと考える。そこで私たちが注目したのが、海底の凹所で生じる回転潮汐波の存在である。地球の海底には、海盆と呼ばれる大規模な凹所が複数存在する。これら海盆の半径は 10^3km程度、水深は約 4km である。こうした海底凹凸や大陸との衝突によって、海洋の潮汐波は絶えず反射・屈折を繰り返す。さらに海盆内の海水には月の潮汐力と Coriolis 力が作用するため、海盆の内縁を一定周期で回転する回転潮汐波が形成される(図 1 参照)。この回転潮汐波の定常運動と、それに付随する海底摩擦を記述する理論モデルを作ることが出来れば、地球の自転速度の減速及び月の公転軌道の変化に対して、見通しの良い近似理論を提供することができる。

上述の動機のもと本研究では、浅水波方程式を用いて、回転潮汐波の定常周期運動を記述する近似解を導出した。一般に潮汐周期は、天体運動の相対配置に依存した複雑なスペクトルを示すが、本研究では月-地球系で最も寄与の大きい 12 時間周期の潮位変動(M_2分潮)のみに注目した。また、固体潮汐による地殻の扁平化が潮位変動に与える影響は小さいため、本研究では海洋潮汐のみを扱った。回転潮汐波の近似解の導出においては、海盆を閉鎖系とみなし、外界との海水の流出入はないと仮定した。その結果、海盆内の流速分布と潮位分布を、Bessel 関数の線形結合で定式化することができた。この式に従うと、Coriolis パラメーター f と固有振動数ωとの大小関係に応じて、動径方向の潮位分布は大きく変化する。特に沿岸域では、海底地形の傾斜によって地形性β効果が働き、f の値が実効的に強まるために、潮位分布が沿岸 Kelvin 波と同様の指数関数的減衰を示すことが演繹された。

つづいて、導出した近似解に基づき、海盆内の海水に蓄積される力学的エネルギーと、海底摩擦によるエネルギー散逸率を概算した。その結果、回転潮汐波のエネルギー散逸率は、月-地球系の軌道変化率から見積もられるエネルギー散逸率と同じオーダーの値をとることが分かった。さらに、固有振動数ωを海盆の半径の関数として表した結果、半径 10^3km オーダーの海盆は 12 時間周期の潮汐力と共鳴するとの結論を得た。これらの結論はともに、導出した近似解が現実の潮汐進化の解析に有効であることを示すものである。

[1] Richard D. Ray, A Global Ocean Tide Model From TOPEX/POSEIDON Altimetry: GOT99.2, NASA/TM(1999-209478).

P11

シリケイトメルトと水の混合時に放出される液滴のサイズ

◯ 城野信一 [1]

[1] 名古屋大学大学院環境学研究科

普通コンドライトの中にはコンドリュールと呼ばれる大きさ 0.1-1mm 程度のシリケイト球が多数含まれる．コンドリュールが占める体積比率は 8 割程度であることから，太陽系形成時に普遍的に発生したイベントによってコンドリュールが形成されたことが示唆されるものの，その形成メカニズムは未だ明らかになってはいない．溶融したシリケイトが表面張力によって球になるためには，何らかの加熱メカニズムが必要である．Asphaug et al.(2012) では，^{26}Al の崩壊熱によって内部が溶融した岩石微惑星が相互に衝突することでコンドリュールが形成しうることが議論されている．シリケイトの加熱は説明できるものの，サイズが 0.1-1mm 程度までに小さくなることがこのモデルでは示されていない．そこで本研究では，微惑星が水をはじめとする揮発性物質を含みうることに着目した．微惑星の衝突時にシリケイトメルトと水が混合すれば，水は急激に膨張することでシリケイトメルトを吹き飛ばし，小さなサイズを説明できる可能性がある．そこで以下に示す一次元衝撃波モデルを数値的に解き，コンドリュールのサイズが説明できるかどうか試みた．

初期条件として，ある厚さのシリケイトメルトと水の混合層があるものとする．片側の面は閉じられており，もう片方の面は解放されているものとする．この状態からスタートすると，水は急激に膨張し，それに引きずられてシリケイトメルトが運動する．膨張する水とシリケイトメルトの間には速度差が生じる．液体と気体の間に速度差がある場合，ウェーバー数（ガス動圧とラプラス圧の比で与えられる無次元数）が 10 程度になると分裂が生じることが知られている．ラプラス圧は液滴の直径に反比例するため，速度差がわかればそれに応じて液滴のサイズが分かることになる．

数値計算を行ったところ，幅広い水の混合比において液滴のサイズがコンドリュールのサイズと同程度になることがわかった（図 1）．混合層の厚さ，初期温度も幅広く変化させて計算を行ったところ，それらの依存性は小さく，液滴のサイズは 0.1-1mm 程度になることが明らかとなった．また，半解析解を導出し，これらのパラメータ依存性がよく説明できることがわかった．

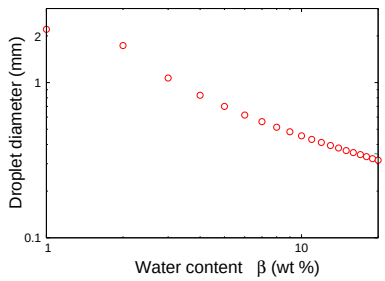


図 1: 水の混合比 β の関数としての液滴のサイズ

気液平衡原始月円盤からの月形成に関する長時間 N 体計算

Long-Term N-body Simulations of Moon Formation from a Protolunar Disk in Vapor/Melt Equilibrium

○佐々木貴教[1], 細野七月[2]
[1]京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室
[2]海洋研究開発機構
○Takanori Sasaki[1], Natsuki Hosono[2]
[1]Department of Astronomy, Kyoto University
[2]Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

月形成に関する数値計算は、ジャイアントインパクト前後についての SPH 計算（～1日）と、原始月円盤が完全冷却した後の N 体計算（～1月）が主に行われてきており、原始月円盤が冷却していく過程を考慮した長時間進化（～100年）の直接計算は過去に例が無い。本研究では、気液平衡二層構造を仮定した原始月円盤について、冷却進化を模擬した N 体計算コードを開発し、PEZY-SC を用いた長時間計算を行うことで、月円盤進化と月形成の過程を初めて同時進行的に解くことに成功した。

The previous studies about Moon formation focused on the first and last stages: the giant impact process (~1 day) has been investigated by SPH simulations, and the lunar accretion process (~1 month) from the circumterrestrial particulate disk has been investigated by N-body simulations. Although the Moon formation process should proceed on the cooling timescale of the protolunar disk (~100 years), there has been no study to simulate the long-term evolution of the disk. In this study, we developed an N-body code to simulate the cooling evolution of a protolunar disk in vapor/melt equilibrium, and executed long-term N-body simulations for the disk evolution and lunar accretion processes simultaneously with PEZY-SC processors.

タンデム惑星形成論から導かれる地球質量の天体形成

○二村徳宏[1]、戎崎俊一[2]
[1]日本スペースガード協会、[2]理研

生命が誕生する惑星の形成進化について解明することが主たる目的である。本研究では、タンデム惑星形成論(Ebisuzaki and Imaeda, 2017; Imaeda and Ebisuzaki, 2017)をもとに地球質量程度の天体の形成過程について明らかにした。

タンデム惑星形成論は、惑星形成の標準モデル(e.g., Safronov, 1969; Hayashi et al., 1985)の枠組みに磁気回転不安定(Balbus and Hawley, 2000)、多孔性粒子成長理論(Okuzumi et al., 2012, Kataoka et al., 2013)、中心星の電離放射線の影響などを組み込んだ惑星形成論であり、微惑星形成までの過程が精密に議論されている。今回は、この後の岩石惑星形成についての発表を行う。

微惑星がさらに成長して、岩石惑星サイズになると重力トルク(e.g., Paardekooper, 2011; Sasaki and Ebisuzaki, 2017)の影響を受ける。このため天体は太陽系の動径方向に移動する。本研究では、一次元定常状態のタンデム惑星形成論による地球質量の惑星形成モデルを構築した。その結果、ダストから徐々に微惑星が形成され、重力崩壊により惑星が形成し、地球質量程度になると動径方向への移動(中心星(太陽)の方向と逆)が顕著になる。そして、最終的には地球質量程度の惑星が形成されることを明らかにした。

加えて、本発表では、この生命惑星(地球)形成論と平衡凝縮論(e.g., Eble and Grossman, 2000; Yoneda and Grossman 1995)を組み合わせ、初期地球を形成した具体的な鉱物、岩石種などを明らかにするための考察を行う。

はじめに岩石惑星形成領域において、ダスト/ガス比が低い環境の中、エンスタタイトコンドライトに近い物質が形成され、数十センチメートルの大きさに成長したときに閉じた系となる。つまり、この時点でエンスタタイトコンドライト的な物質として固定される。その間、円盤の厚さは徐々に薄くなりダストが集積する(ダスト/ガス比が高くなる)。そして、重力崩壊により急成長して最終的に地球を形成する。地球形成の二段階モデル(ABEL モデル)(Maruyama and Ebisuzaki, 2017)によれば、地球はエンスタタイトコンドライトに近い物質で形成されたと説明しており、この提案の理論的な検証を行うことが可能であると考えている。一方、数十センチメートルより小さい成長できなかった残りの物質は、高いダスト/ガス比の中、普通コンドライト的な物質となると考えている。

実際の原始惑星系円盤は、時間とともに進化し中心星(太陽)からの質量放出率は徐々に低下する。今後は、この効果も考慮して、より現実的な生命惑星形成論を構築する。

ガス惑星近傍へのガスの流れと温度構造

○藤井悠里[1,2]，Oliver Gressel[2]，Udo Ziegler[3]

[1]名古屋大学，[2]Niels Bohr Institute，[3]Leibniz Institute for Astrophysics Potsdom

ガス惑星の大気捕獲や規則衛星の形成を考えるには、惑星周辺でのガスの振る舞いについて知る必要がある。ガスは惑星に向かって直接流入するわけではなく、周惑星円盤を形成すると考えられている。しかし、近年の研究により、円盤の温度が非常に高温の場合にはケプラー回転する薄い円盤ではなく、膨張したエンベロープのような構造になることが示されている。よって、正しく円盤の構造を決めるためには温度を正確に計算することが重要となる。高温・高密度の惑星近傍では水素分子の解離や水素およびヘリウム原子の電離等により比熱比が小さくなることが予想されるため、比熱比を1.43に固定した前述の先行研究の計算では、温度を過大評価してしまう可能性がある。

この問題を解決するため、我々は、水素分子の解離や水素およびヘリウム原子の電離等を考慮した状態方程式を用いて輻射流体力学シミュレーションを行った。計算は３次元で、原始惑星系円盤のグローバル計算の中に惑星を置き、その惑星へのガスの流れの様子と惑星近傍の温度構造を調べた。その際の数値計算には NIRVANA 3.5 コードを用いた。

我々の計算では、高温の場合でも円盤のような形状が観測された。惑星近傍では比熱比が1.43より小さい領域がみられ、またオパシティの取り扱いによっても円盤へのガスの流れの様子に違いが見られた。今後さらに、計算結果の解析を進めていく必要がある。

ガス抵抗によって捕獲された微惑星の軌道進化

○末次竜[1]、大槻圭史[2]
[1]産業医科大学、[2]神戸大学

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

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

本研究では軌道計算を用いて、大気に捕獲された微惑星の軌道進化過程を調べた。その結果、大気はガス円盤のようにケプラー回転していないために順行方向、逆行方向のどちらの場合でもガスと微惑星の相対速度が同程度となるため、軌道進化過程はほぼ同じであることが明らかとなった。またその軌道進化過程は、ガス円盤に逆行方向に捕獲された微惑星の軌道進化と非常に似ていることがわかった。

集積末期の地球マントルの酸化還元状態：深いマグマオーシャンにおける第二鉄生成

◯ 村瀬 祐太郎、倉本 圭
北海道大学理学院宇宙理学専攻惑星宇宙グループ

1 はじめに

上部マントルにおける強親鉄性元素群の存在度は、コンドライト的物質の金属相ーケイ酸塩相間の分配実験から予想されたものより高い。これは月形成巨大衝突後の酸化的隕石の集積によると考えられてきたが、近年の研究で地球の後期集積物質が還元的なエンスタタイトコンドライトに近いことが判明した。これにより地球はジャイアントインパクト以前に水を獲得し、少なくとも一部を現在まで保持してきたことが示唆される。しかしこのような還元的な物質の集積により、集積主段階で地球に供給された H_2O は全て還元され、H_2 を主成分とする初期大気を形成し、その後 H_2 は宇宙空間に失われてしまう可能性がある。本研究では、巨大衝突により形成された深いマグマオーシャン (以下 MO) 内で生じた第二鉄が還元的な後期集積物質を酸化した可能性に着目し、高温高圧下での第二鉄の生成量を熱力学的に推定することで地球初期マントルの酸化還元状態の進化と地球の水の起源について考察する。

2 モデル

ジャイアントインパクト直後の MO に覆われた地球においてどれだけ第二鉄ができたのかを推算したい。マグマ相は上部マントルの組成を参照し、FeO が全体の 10wt% を占めていると考える。金属相は金属鉄のみ考えている。MO 中の鉄は金属鉄と第一鉄と微量の第二鉄が共存しており化学平衡状態にあったと仮定する。

温度 T、圧力 P のマグマ相中の FeO と $FeO_{1.5}$ のモル分率の比 $X_{FeO_{1.5}}/X_{FeO}$ は $FeO_{1.5} \leftrightarrow FeO + \frac{1}{4}O_2$ の化学平衡を仮定した熱力学的考察から次式で与えられる。

$$\ln\left(\frac{X_{FeO_{1.5}}}{X_{FeO}}\right) = a + \frac{b}{RT} + \frac{1}{RT}\left(\int_{P_0}^{P} v_{FeO}\,dP - \int_{P_0}^{P} v_{FeO_{1.5}}\,dP\right) + \frac{1}{4}\ln\frac{f_{O_2}}{P_0} \quad (1)$$

ここで v_{FeO}, $v_{FeO_{1.5}}$ は第一鉄と第二鉄のモル体積、a,b は定数、P_0 は標準圧力の 1 気圧、f_{O_2} は $Fe \leftrightarrow FeO + \frac{1}{2}O_2$ の化学平衡条件から求められた酸素フガシティーである。

$$f_{O_2} = P_0 \exp\left[\frac{2}{RT}\left(\mu^{\dagger}_{FeO} - \mu^{\dagger}_{Fe}\right) + \frac{2}{RT}\left(\int_{P_0}^{P} v_{FeO}\,dP - \int_{P_0}^{P} v_{Fe}\,dP\right) + 2(\ln a_{FeO} - \ln a_{Fe})\right] \quad (2)$$

$\mu^{\dagger}_{FeO}$, $\mu^{\dagger}_{Fe}$ は標準生成エネルギーで JANAF のデータを参照している。また a_{FeO}, a_{Fe} は第一鉄と金属鉄の活量で、上部マントルの組成に基づき $a_{FeO} = 0.1$、金属は純鉄で近似し $a_{Fe} = 1$ としている。

(1) 式の右辺の第一項と第二項には低圧下における実験的研究 (Zhang et al., 2017) から推定されたパラメータ値を用いる。(1)(2) 式の金属鉄・第一鉄のモル体積は Komabayashi(2014) の状態方程式を参照している。高圧下における第二鉄のモル体積は、第一鉄のモル体積を低圧化下での実験データに基づき定数倍したものに相転移による体積変化 Bykova et al(2016) を参照して与えた。

3 計算結果

計算の結果、およそ 50GPa まで第二鉄のモル分率は減少するが、それ以上の高圧下では増加傾向になる。これは 50GPa 付近で第二鉄のモル体積が相転移により大幅に減少し、(1) 式のモル体積の圧力積分の項が増加したためである。また表面温度が高いほど低圧下における第二鉄のモル分率が高く、高圧下では小さくなる傾向がある。

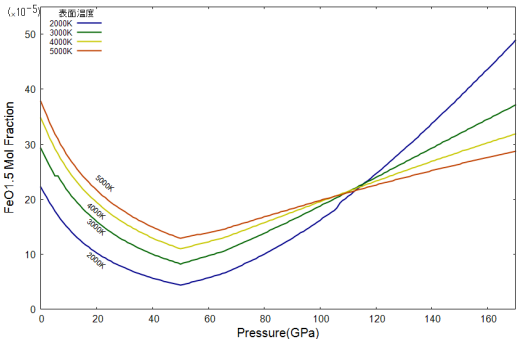


図 1: **MO の表面温度と内部圧力（横軸）と酸化鉄のモル分率 (縦軸) の関係。**MO の温度構造は (Hamano, 2011) をもとに断熱温度勾配で与えている。

4 考察

上記の計算から MO の深部では第二鉄が生成する可能性が示された。このように生成した第二鉄は、MO 内部の対流によって全体に均質化される。しかし今回の定式化では MO 深部で生成した第二鉄の酸化力だけでは、還元的後期集積物質を十分に酸化できない。金属鉄ないし酸化鉄のモル体積の高温高圧への外挿の不確実性や、Al^{+3} と共役した Fe^{+3} のペロブスカイトへの取り込みなど考慮していない別のメカニズムがあることから未だ議論の余地を残している。

短周期スーパーアース形成：
円盤表層降着流による大気獲得への制限

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

従来の理論研究によると、ガス円盤中に存在するスーパーアースは円盤寿命内に暴走ガス捕獲を開始し、ガス惑星へと成長する。一方で短周期スーパーアースと短周期ガス惑星の検出頻度を比較すると、短周期ガス惑星の検出頻度は10倍以上低く、スーパーアースは暴走ガス捕獲を回避したと考えられる。実際に惑星質量と半径の関係から推定されたスーパーアースの大気量は質量で0.1-10%程度であり、多くは大規模な大気捕獲を経験していないことを意味している。

スーパーアースサイズの惑星コアが暴走ガス捕獲を回避する方法について、これまでにいくつかのモデルが検討されてきた（例：高オパシティな大気）。本研究では、磁気流体力学の効果を導入した円盤進化を考える。磁気流体計算によると、原始惑星系円盤の進化には円盤風駆動降着が重要な役割を担っていると考えられる。本研究では、円盤風駆動降着を含めた円盤降着によって惑星コアへの大気降着が制限される効果をモデル化し、大気降着計算に導入した。更に大気降着計算と惑星集積N体計算を連成して実行し、短周期スーパーアースの成長と大気降着を同時に追った。

計算の結果、円盤表層に存在する高速の円盤風駆動降着流は、惑星コアへの大気降着を阻害する可能性があることがわかった。また、最終的に形成した惑星系は観測された短周期スーパーアース系の軌道の特徴（例：軌道周期比）を再現することも示した。

ホットジュピターにおけるスリングショットモデル適用妥当性の検証

Verification of the Slingshot Model in Hot Jupiter

○紀藤准弥[1]　坂東麻衣[2]　外本伸治[2]

[1]九州大学大学院 工学府 航空宇宙工学専攻　[2]九州大学大学院 工学研究院 航空宇宙工学部門

ホットジュピターの形成モデルであるスリングショットモデルは，巨大惑星が太陽系惑星形成モデル（京都モデル）に従って形成されることを仮定している．その後，惑星間の重力相互作用により近点距離の小さな長楕円軌道をもつ惑星へと軌道進化する．その後は，太陽系惑星の形成とは大きく異なり，惑星の重心に働く重力と各部分に働く重力が食い違い惑星の形状が歪むことでそれに付随して起こるエネルギー散逸（潮汐散逸）と，惑星が非軸対称に歪むことで発生するトルク（潮汐トルク）によって中心星との角運動量輸送が起こる．これら２つを合わせた潮汐進化によって最終的には中心星の潮汐作用を考慮することで中心星の極めて近傍を周回する円軌道に収束すると考えられている[1]．スリングショットモデルの再現の為には，重力相互作用と潮汐作用を考慮したシミュレーションモデルを行う必要があるが，現状では段階ごとのシミュレーションしか行われていない．また潮汐進化を再現するモデルは未だ提案されていない．

本研究では太陽質量の中心星と木星質量の３つの惑星を，最も内側の惑星が木星の位置（約 5.2AU）になるように，一直線に並べてそれぞれが中心星を中心に円軌道となる初速度与えた状態を初期状態とする４体問題でシミュレーションを実施した．重力相互作用によって１つの惑星が双曲線軌道に入り，残り２つの惑星のうち片方が近点距離の小さな長楕円軌道を運動して他方は近点距離の大きな長楕円軌道を運動することで軌道が安定化することを確認した[2]．続けて起こる潮汐進化では，第３天体からの重力と潮汐作用を考慮したガウスの惑星方程式を用いた．惑星の変形の程度を表すパラメータで，地表面の変動の記述に使われるラブ数 $k_{2,p}$ や惑星内部の変形に伴う粘性散逸率 Q_p など惑星に固有のパラメータと潮汐進化の関係を明らかにし，最終的にはスリングショットモデルの適用妥当性について検証を行う．

参考文献

[1] 井田茂 ， 系外惑星 , 167-175 , 2007

[2] F.Marzari , Icarus, 156 , 570-579 ,2002

原始惑星系円盤におけるギャップをもつ巨大惑星の動径軌道進化

○金川和弘[1], 田中秀和[2], Ewa Szuszkiewicz[3]

[1] 東京大学 ビックバン宇宙国際研究センター, [2] 東北大学, [3] シュチェチン大学

巨大惑星は円盤ガスとの相互作用によってギャップを開けながら円盤内を移動する(タイプ2移動). 従来のタイプ2惑星移動モデルでは,ガスはギャップによってせき止められ,惑星はガス粘性降着と同じ速度で中心星に落下すると想定されていた.しかし,近年の高解像度数値流体シミュレーションでは,ガスは惑星が作るギャップを容易に横切ることができ,惑星は円盤の粘性ガス降着とは独立に移動するという結果が得られている.このため,従来モデルに代わるギャップを持つ惑星の移動モデルの構築が必要とされている.

我々は様々な惑星質量,円盤パラメータ(スケールハイト,粘性)で数値流体シミュレーションを行い,木星質量よりも小さいな惑星の動径移動速度を調べた.その結果,惑星がガス円盤から受け取る重力トルクは,ギャップ内の低下したガス面密度に比例していることが示された.すなわち,タイプ2惑星移動の減速は単純にギャップ内のガス面密度の低下で説明できる.ギャップによるガス面密度の低下は我々のこれまでの研究で既にモデル化されている.このモデルを用いて,惑星移動速度の経験式を導出した.これは我々のシミュレーションだけでなく,先行研究の結果とも整合的である. 本講演ではこの結果を紹介する.

また木星より重い惑星の場合は, 惑星と円盤との相互作用の結果、惑星軌道よりも外側のガスの離心率が増加することが知られている. しかし、このような場合惑星移動がどのような影響を受けるかは良く議論されてこなかった。本講演では, この場合惑星移動がどうなるかについても議論したい.

P20

原始惑星系円盤における周連星惑星の軌道進化と安定性

山中 陽裕[1] and 佐々木 貴教[1]

[1] 京都大学大学院理学研究科

連星周りでは単独星周りとは異なる惑星系が形成される可能性があるため、単独星のみならず連星周りの惑星形成を理解することは重要である。Kepler 宇宙望遠鏡によって、連星の近くを公転する周連星惑星が見つかっている。それらの惑星は、海王星から土星程度の惑星質量、およそ 1AU 以内の軌道長半径という共通した特徴を持っている。これらの惑星は、周連星原始惑星系円盤の遠方で形成した後に現在の軌道まで移動してきたと考えられる。一方、連星の公転によって時間変動する重力場により、連星の近傍には力学的な不安定領域が存在する (Holman & Weigert, 1999)。実際の周連星惑星は、この不安定領域境界のすぐ外側に位置している。また、連星周りの原始惑星系円盤の内側には空隙が生じる (Artymowicz & Lubow, 1994)。惑星の軌道移動はこの円盤内縁で止まると推測され、円盤内縁が軌道不安定領域の中に位置している場合、円盤ガスの散逸後に惑星軌道が不安定になる。そのため、円盤の散逸前に惑星が外向きに移動し、不安定領域を脱することが必要である。軌道不安定領域では、惑星は連星から角運動量を受け取り、外向きに移動しようとする。一方で、円盤のガス抵抗は惑星から角運動量を奪い内側へ落下させるように働く。我々は、軌道不安定領域の中でも、円盤のガス抵抗が十分に強ければ惑星の軌道発散が抑えられ、円盤の散逸によるガス抵抗の減衰に伴って惑星が外向きに移動して不安定領域を脱出すると考えた。以上の軌道移動が可能な連星系に制限を加えるため、我々は連星の離心率と質量比をパラメータとして N 体計算を行った。結果、惑星の不安定領域内の軌道移動が可能な連星離心率の範囲は、実際の周連星惑星を持つ連星系と調和的であることがわかった。本講演では計算結果の報告と、各パラメータの連星系での惑星の軌道進化の違いについて議論する予定である。

短周期ガス惑星からの大気散逸とその観測的検証について

◯田中佑希[1], Christiane Helling[2], 鈴木建[3], 犬塚修一郎[4]
[1]東京工業大学, [2] University of St Andrews, [3]東京大学, [4]名古屋大学

ホットジュピターやホットネプチューンといった短周期ガス惑星では，大量の大気散逸が発生し，また惑星本体よりも大きく広がった外気圏が存在していることが分かっている．このような特徴は，多波長でのトランジット観測によって得ることができる．特に，紫外線のライマンアルファ線は短周期ガス惑星の外気圏に含まれる中性水素原子に強く吸収されるため，可視光や近赤外線に比べて深い特徴的なトランジットを起こすことが知られている．またこれらの観測からは，散逸していく大気が高速に加速されていることも示されている．

ガス惑星からの大気散逸を駆動する機構として，中心星からの X 線と極端紫外線(XUV)による大気の加熱が有力視されているが，大気の時間変動性の起源など，未解明の点が残されている．我々は磁場を持つ惑星大気中の磁気流体波による大気散逸の駆動モデルを提案している．このモデルを用いて，惑星が固有磁場を持つ場合，大気中の乱流によって励起された磁気流体波が上空へ伝播して散逸し，ガスを加熱することによって，大量の質量放出を駆動されることを示した(e.g., Tanaka et al. 2014)．

しかしこのモデルでは，高層大気構造や質量放出率は，大気の乱流強度や惑星の磁場強度などのパラメータに大きく依存することも分かった．今後大気散逸の観測がさらに進展することで，大気散逸モデルの精緻化や，現時点では未知のパラメータ推定が行えることが期待される．ここでは，モデルのパラメータの違いによる観測的な特徴の違いについて議論する．具体的には，大気乱流が強い場合には XUV 波長での見かけの半径は大きくなるが，散逸する大気は低速になる．逆に，乱流が弱い場合は XUV 波長での半径は小さくなるが，散逸する大気は効率的に加速され，また時間変動性も大きくなることが示された．

また，磁気流体波駆動の大気散逸と，XUV 加熱駆動の大気散逸モデルの比較と，両者を観測的に識別できる可能性についても議論する．

双曲線軌道小天体の起源

○樋口有理可[1]、小久保英一郎[2]
[1]国立天文台 RISE 月惑星探査検討室
[2]国立天文台理論研究部

1I/2017 U1 (‘Oumuamua, 以下 U1)のような双曲線軌道にある天体の起源を考える。U1の軌道は惑星と遭遇するものではなかったため、楕円軌道の彗星が惑星摂動で双曲線軌道に進化したものであるという可能性はない。よって、考えられるU1の起源は、太陽系外からやってきたインターステラー天体か、恒星などの摂動により双曲線軌道に進化したオールト雲彗星のどちらかである。

本研究では、まずインターステラー天体とオールト雲からやってくる彗星の軌道要素分布を独立に求めた。その結果、U1の離心率(e=1.2)はインターステラー天体としては非常に低いことがわかった。一方で、オールト雲からやってくる彗星としてはその離心率は高く、U1は恒星遭遇で引き起こされるコメットシャワーにおいては典型的な軌道の彗星とは言えないこともわかった。ただし、コメットシャワーのピーク手前に発生する彗星のもつ軌道要素としては妥当なものであることを示した。もしU1がコメットシャワーの露払いであれば、今後、コメットシャワーはピークを迎え、U1より速度の遅い彗星が多数観測されることが予想される。

次に、観測可能領域にやってきた双曲線軌道天体がある離心率を持っていた時、その天体がインターステラー天体・オールト雲彗星のどちらである確率が高いかを、離心率の関数として示した。その結果、非常に近い距離(i.e., 1,000 au)の恒星遭遇があれば、離心率が小さければオールト雲彗星である確率が高いことなどを定量的に示した。

小惑星 Ryugu の形状モデル作成

○田中 小百合[1] 、西川 直輝[1]、平田 直之[1]、平田 成[2]
渡邊 誠一郎[3]、野口 里奈[4]、杉田 精司[5]、嶌生 有理[4]
[1]神戸大学、[2]会津大学、[3]名古屋大学
[4]宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、[5]東京大学

小惑星の三次元形状モデルからは、体積や自転情報などの小惑星の基礎情報だけではなく、探査機の運用にも重要な情報を得ることができる。はやぶさ 2 ではタッチダウンやローバの投下、衝突装置を用いた人工クレーターの形成実験も計画されており、これらのミッションを安全に、かつ期待される科学的知見を得ることができるように、小惑星上の地点を選定する必要がある。この地点選定にも、形状モデルは不可欠な情報である。そこで、Stereophotoclinometry(SPC)を用いて、探査機はやぶさ 2 に搭載された光学航法カメラ(ONC-T)による撮影画像をもとに、小惑星 Ryugu の三次元形状モデルの作成を行った。

SPC は、はやぶさ初号機や Dawn、Rosetta など、複数の小天体探査ミッションで使用され、高精度の形状モデルが作成できるソフトウェアである。Stereo 法と Photoclinometry 法を併用し、補足的にリムプロファイリング法を使用している。Stereo 法は、2 枚以上の画像間の視差を用いて特徴点の位置を求める手法で、Photoclinometry 法は、3 枚以上の画像の輝度値の変化を利用して勾配とアルベドを求める手法である。また、SPC では形状モデルの作成を行うと同時に、形状モデル上の特徴点の位置から、探査機の位置、姿勢、小惑星の自転情報の推定値を求めることができる。

データは、観測高度 20km の BOX-A 観測画像(2.0 m/pixel)を 286 枚、観測高度 5-7km の BOX-C 観測画像(0.5-0.7m/pixel)を 124 枚、120 枚のアプローチフェーズ観測画像、中高度観測画像(~0.5 m/pixel)を使用した。加えて、初期形状として半径 450m の球体と、探査機の位置情報としてレーザ高度計 LIDAR のデータも用いている。

作成した形状モデルから、BOX-C 観測画像を使用した時点で、小惑星 Ryugu の体積は 0.37949km^3、平均半径は 0.447km、自転周期は 7.6326 時間、自転軸の方向は赤経 96.379°、赤緯-66.418°とわかった。

画像データを用いた小惑星(162173)リュウグウの形状モデル作成及び物理的諸量の推定

○西川直輝[1], 田中小百合[1], 平田直之[1], 平田成[2],
渡邊誠一郎[3], 野口里奈[4], 杉田精司[5], 嶌生有理[4]
[1]神戸大学, [2]会津大学, [3]名古屋大学, [4]宇宙科学研究所, [5]東京大学

天体の形状は、小惑星の観測・研究の両面においてもっとも基本的な情報のひとつである。例えば、着陸場所の選定(LSS)の際、危険なボルダーの少ない地域を選ぶためには表面の凹凸を含めた詳細な形状モデルが必要不可欠であり、科学的研究においても、体積・密度などの小惑星を理解する上で基礎的な物理量を正確に知るためには形状が詳しくわかっていなければならない。また、小惑星の自転軸の向きや自転周期といった情報も、着陸地点の選定や後続の科学的研究を行う上で重要なものである。そこで我々は、はやぶさ2のリュウグウ到着後に得られる画像データを用いて、リュウグウの形状モデルの作成、並びに自転情報などの物理的諸量の値の推定を行った。

今回の解析においては、はやぶさ2に搭載された光学航法カメラ(Optical Navigation Camera, ONC)により撮像された画像データをもとに、StereoPhotocrinometry(SPC)[1]というソフトウェアを用いて解析を行った。SPCでは、クレーター・ボルダーなどの特徴点の位置を求めるStereo法、ある地点の傾斜・アルベドを求めるPhotoclinometry法が用いられる。まず縁取りで大まかな形状を作り、そこに上記の2つの手法を用いて作成した局所形状モデルを貼り付けることで、リュウグウ全体の形状を再現した。また、画像データの時刻の情報をもとに、形状を作る際に求めた特徴点の位置と、カメラの位置から自転情報を求めた。

小惑星リュウグウの物理パラメータとして、自転軸の向きは、赤経:96.38837[degree]、赤緯:-66.40425[degree]、自転周期:1131.98251185[degree/day]、体積:0.37970[km^3]という値が8月2日時点で得られている。

[1] Gaskell, R.W. et al., 2008. Characterizing and navigating small bodies with imaging data. Meteorit. Planet. Sci. 43, 1049–1061.

小惑星リュウグウにおけるボルダーの空間分布の特徴について

○本田親寿[1]，道上達広[2]，長勇一郎[3]，諸田智克[4]，本田理恵[5]，亀田真吾[6]，巽瑛理[3]，横田康弘[7]，神山徹[8]，鈴木秀彦[9]，山田学[10]，坂谷尚哉[7]，早川雅彦[7]，吉岡和夫[3]，松岡萌[7]，宮本英昭[3]，菊地紘[3]，逸見良道[3]，平林正稔[11]，澤田弘崇[7]，杉田精司[3]
[1]会津大，[2]近大，[3]東大，[4]名大，[5]高知大，[6]立教大，[7]JAXA，[8]産総研，[9]明大，[10]千葉工大，[11]オーバーン大

小惑星リュウグウには多くのボルダーが存在するがその大きさによって空間分布に偏りがある. ボルダーのサイズ頻度分布を緯度帯（低，中，高緯度帯）で分けると高緯度ほど大きなボルダーが存在する. これはリュウグウ表面のレゴリスの移動やリュウグウ内部のレゴリスの対流を表している可能性がある. この傾向は赤道リッジの成因とも関係してる可能性もある. ボルダーのサイズ頻度分布だけでなく，いくつかの観察結果と合わせて議論する.

On June 27th, 2018, the Hayabusa2 spacecraft arrived at the destination, a tiny C-type asteroid 162173 Ryugu. The onboard Optical Navigation Camera - Telescopic (ONC-T) scrutinized the surface from the Home Position (HP, about 20 km sunward of Ryugu) and mid-altitude position. By using ONC-T images, we recognized that the boulder size-frequency distribution around the equatorial area is smaller than that at higher latitude region. The larger boulders at equatorial area seem to be covered by Ryugu's regolith migrated from higher latitude area. On the other hand, it seems to be difficult to accumulate even regolith from the topographic low at middle latitude to the topographic high at the equatorial area. This trend of the observation of boulder spatial distribution may be one of the key characteristics to solve the Ryugu's origin or evolution such as the orbital mechanism including its spin rate.

はやぶさ２搭載可視分光カメラの感度校正

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

小惑星探査機「はやぶさ２」は、C 型小惑星「リュウグウ」からのサンプルリターンを目的とする探査機である。C 型小惑星は始原的な天体であり、初期地球にもたらされたような有機物や含水鉱物が存在すると考えられている。リュウグウ到着後、はやぶさ２は搭載されている光学航法望遠カメラ(ONC-T)でマルチバンド分光観測を行い、リュウグウ表面の反射スペクトルを取得した。これによってリュウグウ表面の物質分布や風化度合いなどを知ることができる。スペクトルを取得する上で重要となる ONC-T の感度は、これまでのミッションで観測した恒星とその既知のフラックスを比較することによって求められている。しかし観測した恒星について、地上望遠鏡で得られている既知のフラックスには系統的な誤差が含まれていると考えられ、ONC-T の感度の精度が低くなってしまっていると考えられる。本研究では、ONC-T の感度の精度向上を目的として複数の文献の調査・比較を行った。また、それによって得られた感度の値を用いて、はやぶさ２の実際の観測データを解析し、妥当性を評価する。

また本発表では、上記の感度校正に加え、はやぶさ２で行われてきた衛星探索についても紹介する。はやぶさ２はリュウグウの衛星が存在できる範囲まで接近し探査するため、探査機と衛星の衝突の回避や今後のミッションでの安全性を確保することなども含め、事前に衛星の有無を確認する必要がある。衛星探索は、はやぶさ２とリュウグウの距離がおよそ 2100 km～6 km の範囲で実施され、結果としてはリュウグウには衛星が存在しないことが確認された。したがって今後の小型ランダの切り離しやリュウグウへのタッチダウンは予定通り実施されることとなる。

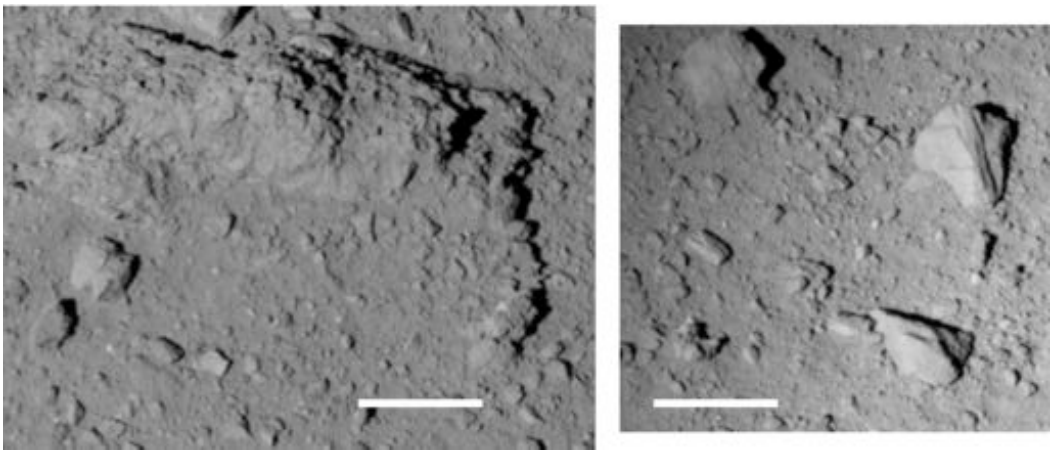
162173 リュウグウ表面の明るさと色の変化：宇宙風化、熱疲労、物質移動

Brightness and Color Variations on the Surface of 162173 Ryugu: Space Weathering, Thermal Fatigue and Mass Movement

○佐々木晶 [1], 杉田精司 [2], 巽瑛理 [2], 宮本英昭 [2], 本田親寿 [3],諸田智克 [4], Olivier S Barnouin[5], 平林正稔 [6], 金丸仁明 [1],平田成 [3], 廣井孝弘 [7], 中村智樹 [8], 野口高明 [9], 本田理恵 [10], 道上達広 [11], 渡邊誠一郎 [4], 並木則行 [12], Patrick Michel[13], 亀田真吾 [14], 神山徹 [15], 鈴木秀彦 [16], 山田学 [17], 菊地紘 [2], D. L. Domingue[18], 長勇一郎 [2],吉岡和夫 [2], 早川雅彦 [19], 松岡萌 [19], 坂谷尚哉 [19], 澤田弘崇 [19], 横田康弘 [19]

[1] 大阪大学, [2] 東京大学, [3] 会津大学, [4] 名古屋大学, [5]Johns Hopkins 大学 APL, [6] オーバーン大学, [7] ブラウン大学, [8] 東北大学, [9] 九州大学, [10] 高知大学, [11] 近畿大学, [12] 国立天文台, [13] ニース天文台, [14] 立教大学, [15] 産業総合研究所, [16] 明治大学, [17] 千葉工業大学, [18]Planetary Science Institute, [19]JAXA/ISAS

ONC on board Hayabusa 2 captured tantalizing feature of 162173 Ryugu, which is a dark body with overall visible albedo is 4.6% and photometry standard reflectance is lower than 2% (Tatsumi et al., DPS, 2018). There is striking brightness (and associated) color difference on the surface. Bright, large boulders are on polar regions and smaller ones with similar brightness are scattered globally. Regionally, the equatorial ridge and some of undulated crater rim zones are brighter. Some boulders shows brightness variation within their surface, suggesting brightness/color difference may not be due to compositional variation but to the differences of space weathering maturity. Two types of space weathering are advocated for carbonaceous asteroids: darkening (and reddening) or brightening (and bluing) with time. On Ryugu, probably thermal fatigue and/or local impacts should have brightened the boulder surface (i.e., large boulders on both poles). Ridge/crater brightness can be ascribed to movement of fine darker materials to potentially lower region. In high-resolution images (<1m), Ryugu's surface is covered with fine (and darker) regolith materials that would cover and bury boulders. Like the large boulders on both poles, bright boulders usually have smooth surface and brightness is affected by darker regolith and shadow. There observed also darker boulders with rough/undulated surface, which would have experienced longer exposure and thus more erosion and weathering. We can observe the relation between brightness and surface roughness also in close-up images (Figs.). In the left, there is a large (40m) relatively darker boulders with rough and layered surface. This is partially covered with much darker regolith materials. In the right, we observe bright layered boulders with smooth surface. Some feature would be explained by conglomerate or breccia, rather than regolith coverage. Acknowledgements: This study was supported by JSPS International Planetary Network (S. Sugita) and Grant-in-Aid for Scientific Research (B) (S. Sasaki).



Figures Two types of boulders on the surface of Ryugu. Length of white scales is 10m.

凸凹表面の熱進化計算－はやぶさ２TIR への応用
Thermal modeling of rough surface, and its applicationto Hayabusa2 TIR data

千秋 博紀[1]，坂谷 直哉[2]，嶌生 有理[2]，マルコ デルボ[3]，荒井 武彦[4]，
出村 裕英[5]，須古 健太郎[5]，田中 智[2]，岡田 達明[2]
Senshu Hiroki[1], Sakatani Naoya[2], Shimaki Yuuri[2], Marco Delbo[3], Arai Takehiko[4], Demura Hirohide[5], Suko Kentaro[5], Tanaka Satoshi[2], Okada Tatsuaki[2]

[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，
[3]コート・ダジュール天文台，[4]足利大学，[5]会津大学
[1]Chiba Institute of Technology Planetary Exploration Research Center,
[2]Institute of Space and Astronautical Science,
[3]Observatoire de la Cote d'Azur, CNRS, Nice, France,
[4]Ashikaga University, [5]University of Aizu

小惑星表面の温度は，リモートセンシングで計測可能であるため，掘削せずに地下の情報を得る有力な手法のひとつと言える．小惑星は大気を持たず，地下からの熱流量も無視できるため，表面温度分布は単純なモデルで表現できると考えがちである．しかし温度変化のエネルギー源は太陽光の入射であるため，局所的な傾斜や，表面の凹凸に起因する影効果によって容易に境界条件が変化する．また，表面に凹凸がある場合には別の場所からの熱輻射によって温められる効果も効いてくる．加えて，表面が凸凹の場合には見た目の温度が観測者の方向に依存する，という効果もある．単純には，朝方に東から見た山と西から見た山とでは表面温度が全く異なる．

これらの影響を評価し，実際にはやぶさ２搭載熱赤外カメラ(TIR)で取得されたとの比較を通じて天体表層および表面直下の熱物性を明らかにするために我々は，凹凸のある地面の熱進化の数値計算を行った．数値計算は天体表面上のごく狭い領域について，凹凸条件，熱物性，緯度，日心距離，太陽直下点緯度を様々に変化させて行った．計算では，エネルギー源としての太陽の移動，凹凸による影効果，局所的な傾斜による単位面積当たりの入射エネルギーの現象，遠方の面からの熱輻射などを全て考慮している．

数値計算によって求まった温度分布は，観測者の方向に応じて可視化（画像化）する．これによって，遮蔽による見た目温度の観測方向依存性が自然に表現できる．画像化された温度分布は，輝度分布に変換したのちに平均化し，再び輝度を温度に変換する．これによって初めて，実際に小惑星の表面を観測した際に得られる輝度温度の予測が可能となる．

このような数値計算を「はやぶさ２」の観測条件ついて応用することで，我々は，凹凸地面の見た目温度の日変化は，滑らかな地面の場合に対して (1) 高緯度で温度が高く見える (2) 緯度に依らず朝夕の温度が高く日照中の温度変化が小さい (3) 最高到達温度は低い (4) 凹凸が卓越する場合は見た目温度の日変化がふたこぶになる (5) 夜間の温度も見る方向に強く依存することなどを明らかにした．

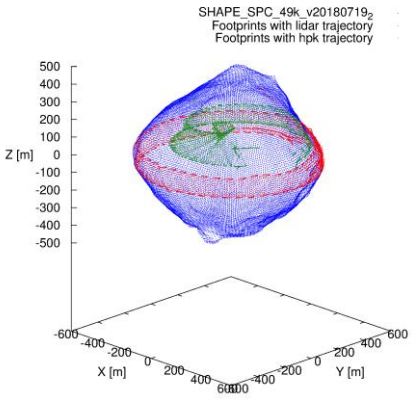
はやぶさ 2/LIDAR 測距データを用いた着陸点選定のための探査機軌道改良

○松本晃治[1]、野田寛大[1]、石原吉明[2]、千秋博紀[3]、竝木則行[1]、山本圭香[1]、渡邊誠一郎[4]、平田成[5]、平田直之[6]、山本幸生[2]、尾川順子[2]、菊地翔太[2]、佐伯孝尚[2]、津田雄一[2]

1: 国立天文台、2: 宇宙航空研究開発機構、3: 千葉工業大学、4: 名古屋大学、5: 会津大学、6: 神戸大学

はやぶさ 2 が 2018 年 6 月 27 日に探査天体であるリュウグウに到着した後、短期間に着陸点選定（Landing Site Selection: LSS）作業が行われ、2018 年 8 月 17 日に 3 つの着陸候補点が選定された。このように、作業時間が限られている中でリモートセンシングデータを正しく解釈するためには、精度の良い探査機軌道が適時に提供される必要がある。そこで、我々は LIDAR データと形状モデルに基づいて速報的に探査機軌道を改良する手法を提案し、早期提供を実現した。具体的には、サイエンス観測の実行から 2〜3 日後には改良軌道を LSS チームに提供した。

小惑星固定座標系における LIDAR フットプリント位置は、(1)慣性系における探査機位置情報、(2)探査機姿勢情報、(3)LIDAR 測距値、(4)小惑星自転情報から計算される。小惑星自転情報は形状モデリングの過程で得られ、形状モデルと共に初期段階から利用可能となった。(1)としてシステムから提供される探査機位置を用いると、計算される LIDAR フットプリントは時に形状モデルから 100 m オーダーで大きく逸脱した。軌道誤差がこの残差の主な原因であると仮定し、2 段階の解析手順を踏んで軌道を改良した。まず、J2000 座標系で計算した残差時系列の（X, Y, Z）成分のそれぞれに多項式をフィットする。次に、単純な多項式フィットでは除去しきれない残差をさらに小さくするような軌道パラメータを Markov chain Monte Carlo 法を用いて探索する。例として、2018 年 7 月 20 日の観測について、軌道改良前後の LIDAR フットプリント位置を形状モデルと共に図に示す。



図：形状モデル（青）と LIDAR フットプリント（緑：軌道改良前、赤：改良後）

JAXA 地球外物質研究グループによる太陽系探査活動：「はやぶさ2」試料受入準備等の最新状況レポート

矢田達[1]，与賀田佳澄[1]，坂本佳奈子[1]，吉武美和[1]，古屋静萌[1]，西村征洋[1,2]，熊谷和也[1,2]
岡田達明[1,3]，安部正真[1]，坏本尚義[1,4]
[1]JAXA 宇宙科学研究所，[2]マリンワーク・ジャパン，[3]東京大学，[4]大阪大学，[5]北海道大学

JAXA宇宙科学研究所の地球外物質研究グループでは，物質科学に軸をおいた太陽系探査関連の活動を展開している．主な活動は，1）サンプルリターンによる帰還試料の採取・記載・分配（Curatorial Work），2）将来のサンプルリターン試料受入設備の開発，3）将来その場観測技術の開発，4）これらに関連した研究や装置開発，5）宇宙物質科学の研究促進，などである．活動1では，「はやぶさ」による小惑星イトカワ試料をカタログ化し，公開（https://www.darts.isas.jaxa.jp/pub/curation/hayabusa/）している．700粒子以上公開し，初期分析研究や公募研究によって科学成果を創出してきた[e.g., 1-4]．活動2では，「はやぶさ2」の試料受入設備の構築を進めている．活動3では，ソーラー電力セイルによるトロヤ群小惑星探査OKEANOSや将来ミッションに向けた質量分析計等の開発を実施している．活動4では関連の研究を進め，活動5では，毎年の国際シンポジウム開催（2018年度は第6回宇宙物質科学シンポジウム：HAYABUSA2018）により，宇宙物質科学研究の促進と宇宙探査ミッションとの融合を図っている．

本報告では，特に「はやぶさ2」の試料受入設備の準備状況について報告する．この設備は「はやぶさ」用の試料受入設備の方式を踏襲しつつ，C型小惑星からの帰還試料に対する改良を加えている．S型小惑星イトカワの試料と混合を回避するため，クリーンルームおよびクリーンチャンバーを独立に製作することとした．「はやぶさ」用クリーンチャンバーは，真空引き可能なサンプルコンテナ開封用と，高純度窒素中でサンプルキャッチャからの試料採取と輸送容器への封入用の2室構成であったが，今回は5室構成とした．C型小惑星は水や有機物など揮発性成分に富み，汚染に弱いと考えられるため，前半のチャンバーを真空中でのサンプルコンテナ開封用，真空中での一部試料の回収・保管用，窒素雰囲気への移送用（エアロック）の3室構成にした．また，後半の試料採取用チャンバーについて，目視可能なサイズの試料を効果的に回収するために上面全面窓のチェンバを追加し，試料採取，光学観察，および秤量を行うこととした．「はやぶさ」用では初期記載にはSEM/EDSによる電子像・元素分析結果をほぼ全粒子で実施したが，「はやぶさ2」用では電子照射による有機物の変質を避けるため，光学観察・赤外分光を併用する予定で準備を進めている．また，ガス採取を帰還カプセルの回収後すぐに実施する．

「はやぶさ2」用試料受入設備は2014年度から仕様検討，2016年度から製作を開始し，現在までにクリーンルームは完成，クリーンチャンバーは納入済みである．個別試験の終了後には，相互噛み合わせ試験を実施し，機能性能を確認し，必要あらば改修を施す．2019年度には全体システムとしての総合試験を実施し，さらにリハーサルを実施して2020年の試料帰還に備える．初期記載は6ヶ月間，以後は初期分析研究，NASAへの分配（NASAからはOSIRIS-REx試料の配布を受ける）に供し，1年後には国際公募を行う計画である．

[1]Special issue, Science 333, 1113-1131 (2011), [2] Special issue, MAPS 49, 135 (2014), [3] Special issue, EPS 67, 116 (2015), [4] Special issue, EPS, 69, 31 (2017), [5]Okada, T. et al., PSS 161, 99 (2018).

木曽広視野カメラ Tomo-e Gozen と重ね合わせ法による高速移動 NEO サーベイ観測計画

○奥村真一郎[1]、柳沢俊史[2]、酒向重行[3]、吉川 真[2]、浦川聖太郎[1]、大澤亮[3]、小島悠人[3]
他、Tomo-e Gozen メンバー
[1]日本スペースガード協会、[2]宇宙航空研究開発機構、[3]東京大学

2000 年前後を境にして様々な NEO（Near Earth Object）サーベイ観測プロジェクトが動き始め、地球接近小天体を含む小惑星の発見数は飛躍的に増加した。その結果、直径がおよそ 1km より大きい NEO（絶対等級<18）に関しては、予想されている数の 9 割以上がすでに見つかっていると考えられている。しかし、100m～数 10m 程度の NEO は予想される存在数にくらべて発見されている数は何桁も少ない。

このような小サイズの NEO は、地球に近づかないと検出できる明るさにならない。ところが距離が近くなると見かけの移動速度が大きくなるため、通常の観測では露出中に検出器の素子間を移動してしまい、露出を長くしても S/N 比が良くならない「トレイルロス」という現象が生じる。このため大型望遠鏡を使用したとしても、このサイズの未知の NEO を新たに発見する事は容易ではない。

Tomo-e Gozen カメラ（以下、Tomo-e カメラ）とは、東京大学木曽観測所で開発中の広視野カメラであり、シュミット望遠鏡の焦点面に CMOS センサを 84 枚並べ、20 平方度の視野をカバーする。CMOS センサを使用しているため 2-fps（露出時間 0.5 秒）で連続高速撮像が可能である。Tomo-e カメラはピクセルスケールも比較的大きめであるためトレイルロスの影響を受けにくく、地球に接近した NEO のような高速移動天体の観測に適している。

一方、ここでいう重ね合わせ法とは移動方向・移動速度のわかっていない移動天体に対する S/N 比を改善させるために、比較的短時間露出の画像を多数枚、あらゆる方向・あらゆる速度を仮定してずらしながら足し合わせる手法の事を指す。この手法はトレイルロスの影響を軽減させる効果が強く、JAXA が 2017 年 1 月に実施した試験観測では口径わずか 18cm の望遠鏡を用いて絶対等級が 24 等と 25.6 等の NEO をそれぞれ一つずつ発見している。

本研究計画ではトレイルロスの影響を受けにくく高速移動天体に対して有効な Tomo-e カメラと重ね合わせ法という二つの技術要素を組み合わせる事により、さらに小さい 10m～数十mサイズの高速移動 NEO の検出を試みる。Tomo-e カメラは、重ね合わせ法と組み合わせて未知の移動天体をサーベイする目的には最適の観測装置であると言え、この組み合わせにより 2”/s 移動する天体に対しては実に 8m クラスの望遠鏡に匹敵する感度を有する。10m～100m サイズの NEO を多く発見することによりサイズ分布や軌道情報のデータを提供し、太陽系小天体の軌道進化やその起源の解明にせまる議論を推進する事が本研究の目的である。

「あかり」遠赤外線全天画像がとらえた小惑星ダストバンドの形成過程

○ 大坪貴文[1], 臼井文彦[2], 土井靖生[3], 他「あかり」チーム

[1]ISAS/JAXA, [2] 神戸大学 CPS, [3] 東京大学総合文化

太陽系の惑星間空間には粒径が μm〜mm 程度の固体微粒子（惑星間塵）が広く分布しており、太陽光を散乱あるいは吸収・熱再放射して、黄道光・黄道放射として特に赤外線波長域で明るく光っている。黄道放射は、黄道面が明るく黄緯が高くなるにつれ暗くなり、黄道面に対して対称な大局構造を持つ。これまで、IRAS や COBE/DIRBE など過去の赤外線衛星の全天観測により、黄道放射の空間的構造の中でも小〜中規模な構造として、黄道面付近で黄経方向に帯状に広がった小惑星ダストバンド構造が中間赤外線で検出されていた。しかし、黄緯 $\pm1.4°$, $\pm2.1°$, $\pm10°$ の主要な 3 つのダストバンド以外の微細な構造に関しては、まだ十分な研究がなされておらず、また、遠赤外線波長域でどのような分布になっているかもよく分かっていなかった。

日本の赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ観測は、中間赤外線波長域 (9, 18 μm) と遠赤外線波長域 (65, 90, 140, 160 μm) を計 6 つの測光バンドでカバーし、1 年以上に渡るミッション期間中に全天の 97% 以上の観測を達成した。「あかり」の遠赤外線全天画像データ (Doi et al. 2015, Takita et al. 2015) は広く一般に対し公開されているが、IRAS や DIRBE よりも空間解像度が良く、これは黄道放射研究にとっても重要なデータである。これまでの我々の解析で、「あかり」の遠赤外線画像の短波長側 2 バンド (65, 90 μm) でも明るさ数 MJy/sr 以下のダストバンド構造が検出できている (Ootsubo et al. 2016)。我々は、さらに「あかり」の遠赤外線全天画像にハイパスフィルタなどの画像処理を施すことで、主要 3 バンドに加え、微細で淡い小惑星ダストバンド構造の抽出をおこなっている。この処理により、過去の観測でもその存在を示唆されていた黄緯 $\pm6°$、$\pm13°$、$\pm17°$ 付近の淡いバンド構造を、「あかり」の観測でも 3σ レベルで検出できている。これらは、ダストバンドの形成途中に対応すると考えられ、「あかり」全天画像により複数の形成途中の若いダストバンドを遠赤外線で初めて検出することに成功した可能性が高い。これらのダストバンドは、現在から ~ 1 Myr 以内の衝突で形成された比較的新しい小惑星族に由来すると考えられる。例えば $\pm17°$ バンドは Emilkowalski cluster、$\pm6°$ バンドは Datura cluster に由来する可能性があると推定される。本講演ではこれら若いダストバンドに関して、「あかり」の観測で明らかになった構造を紹介し、ダストバンドの形成時期と対応する小惑星族について議論する。

メインベルトおよび地球近傍小惑星のアルベドと可視近赤外反射スペクトルの関係

○洪鵬[1]、新原隆史[2]、宮本英昭[2]
[1]千葉工業大学、[2]東京大学

小惑星は反射スペクトルの形状に基づいて小惑星の型が分類されており、いくつかの小惑星タイプと隕石のグループの類似性も指摘されている。近年は特に主成分分析を用いたスペクトル分類が主流であるが(DeMeo et al., 2009)、解析するサンプルに応じて主成分が変動するため、主成分と物理量の対応関係は一般的には明らかでない(Hapke, 2001)。また、黒い普通コンドライトと炭素質コンドライトが極めて似たスペクトルを示すように、全く異なる種類の岩石であっても見かけ上は似たスペクトルが生じることがある(Britt et al., 1994)。このように、従来の反射スペクトルの形状のみに依存した小惑星の分類方法には限界があることが示唆されている。一方、小惑星のアルベドは 80 年代までは分類に組み込まれていたが(e.g., Tedesco et al., 1989)、連続分光が盛んになった 90 年代以降は、あまり分類には使われなくなっている。本研究ではアルベドを小惑星の分類体系に組み込むことによって分類を改善すること、および隕石との比較によるアルベド—スペクトル間に潜在する物理量を抽出することを試みた。

既存の文献から小惑星の反射スペクトルとアルベドのデータベース(e.g., Bus & Binzel, 2002)を構築した上で、反射スペクトルに関しては 0.45—2.45 μm のデータを 3 次スプライン補間し、波長分解能が 0.05 μm の形式に統一した。隕石についても同様に、反射スペクトルと 0.55 μm での反射率をデータベース化した(Pieters & Hiroi, 2004)。反射スペクトルは各々の平均値で引き算した上で、以下のようなスペクトル型指数 R を定義した。

$$R = \frac{\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{C}}}{\|\boldsymbol{t}\|\left\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{C}}\right\|} - \frac{\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{r}_{\mathrm{S}}}{\|\boldsymbol{t}\|\left\|\boldsymbol{r}_{\mathrm{S}}\right\|}$$

ここで、$\boldsymbol{t}$ は注目する小惑星または隕石の、$\boldsymbol{r}_{\mathrm{C}}$ は C 型小惑星（または炭素質コンドライト）の平均、$\boldsymbol{r}_{\mathrm{S}}$ は S 型小惑星（または普通コンドライト）の平均スペクトルである。

得られたアルベドとスペクトル型指数を図示すると、(1)V、S、および C 型小惑星がそれぞれのクラスターに分離され、直線状に並ぶように見える、(2)隕石についても HED 隕石、普通コンドライト、炭素質コンドライトがそれぞれ分離され、直線状に並ぶように見える、(3)炭素質コンドライトは、グループおよび変成度に応じて分離される、(4)普通コンドライトは、グループごとの違いは明瞭ではないが、変成度とアルベドに相関関係がある、ことがわかった。本発表では、これらの結果が(1)鉱物量比および元素組成比、(2)レゴリスの粒径、(3)宇宙風化、(4)岩石中の結晶サイズ、といったパラメータで説明可能か考察する。

国際宇宙ステーション搭載シリカエアロゲルで捕獲された微粒子の高速衝突トラックの３次元形状

○西 瑞穂[1]　土`山 明[1]　矢野 創[2]　薮田 ひかる[3]　奥平 恭子[4]　松野 淳也[1]　上椙 真之[5]
上杉 健太郎[5]　中野 司[6]　野口 高明[7]　三田 肇[8]　山岸 明彦[9]
[1]京都大学理学研究科　[2]宇宙航空研究開発機構　[3]広島大学理学研究科　[4]会津大学企画運営室
[5]JASRI/SPring-8　[6]産業技術総合研究所　[7]九州大学基幹教育院
[8]福岡工業大学工学部生命環境科学科　[9]東京薬科大学生命科学部分子生命科学科

日本初のアストロバイオロジー実験「たんぽぽ計画」では、生命起源物質が地球外から供給されたとの仮説[1]を実証する目的で、国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」に超低密度シリカエアロゲルを設置し、宇宙塵を捕獲する試みがなされている[2]。シリカエアロゲルは、NASA による彗星塵サンプルリターン計画「スターダスト」で彗星塵の捕獲のために用いられた物質であり[3]、彗星塵がシリカエアロゲルに高速衝突して生じた痕（衝突トラック）の形状は彗星塵の密度や衝突速度などの情報をもっている[4]。そこで本研究では、たんぽぽ計画で得られた衝突トラックについて、X 線 CT 撮影をおこない、その 3D 画像データを解析し、捕獲微粒 子の起源の推定を試みた。

簡易曝露実験装置の宇宙側に設置されたシリカエアロゲルに発見された 8 つの衝突トラック（D1-231, D1-298, D1-362, E1-200, E1-304, F1-328, F1-389, F1-623）を用いた。放射光施設 SPring-8 の BL47XU において結像型吸収 CT 撮影(7, 8, 9 keV)をおこない、8 keV の CT 像(吸収コントラスト像：0.24 または 0.465 μm/画素)からトラックの形状を抽出し、トラック長、幅、体積を求め、これらの値をスターダスト衝突トラックと比較した。また、7, 8, 9 keV の CT 像から dual-energy tomography (DET)[5]を用いて、トラック中に見られる微粒子の線級数係数を調べ、物質の推定をおこなった。さらに、いくつかのものについてはトラックを押しつぶし、トラック中の微粒子の光学顕微鏡観察をおこなった。

たんぽぽトラックのトラック長と最大トラック幅は、ボウル型の二つ（D1-362, F1-623）を除いて、スターダストのものとほとんど変わらなかった。しかしながら、具体的な形状はスターダストトラックに比べて非対称かつ歪であり、またトラック表面から伸びたクラックの形状は衝突速度が小さいことを示唆している。DET の結果からは、トラック中に見られる微粒子は Fe や Ni などを含まず、その線級数係数は宇宙塵が持つ線吸収係数よりもはるかに小さいものが多かった。また、微粒子の光学顕微鏡観察からも、宇宙塵と思われるものは見つからなかった。従って、CT 像で見られた微粒子は、固着度の低い物質が衝突の衝撃で砕けエアロゲルを巻き込むように生成したもの(condenced aerogel)であると考えられる。以上より、今回観察したトラックは宇宙塵起源のものではなく、人工的なものと思われるが現時点ではその起源は不明である。

[1] Chyba C. & Sagan C. 1992. Nature, 355, 125. [2] Yamagishi A. et al. 2012. Space Utiliz Res, 28, 220. [3] Brownlee D. et al. 2006. Science, 314, 1711. [4] Tsuchiyama A. et al. 2009. Meteoritics & Planetary Science, 44, 1203. [5] Tsuchiyama A. 2013. Geochimica et Cosmochimica Acta 116, 5.

国際宇宙ステーションからの長期流星観測プロジェクト「メテオ」の概要と観測状況

○荒井朋子、小林正規、山田学、千秋博紀、前田恵介、大野宗祐、石橋高、石丸亮、
和田浩二、松井孝典
千葉工業大学　惑星探査研究センター

Overview and the current status of METEOR: ISS-based meteor observation project

○Tomoko Arai, Masanori Kobayashi, Manabu Yamada, Hiroki Senshu, Keisuke Maeda,
Ohno Sosuke, Ko Ishibashi, Ryo Ishimaru, Koji Wada, and Takafumi Matsui
Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

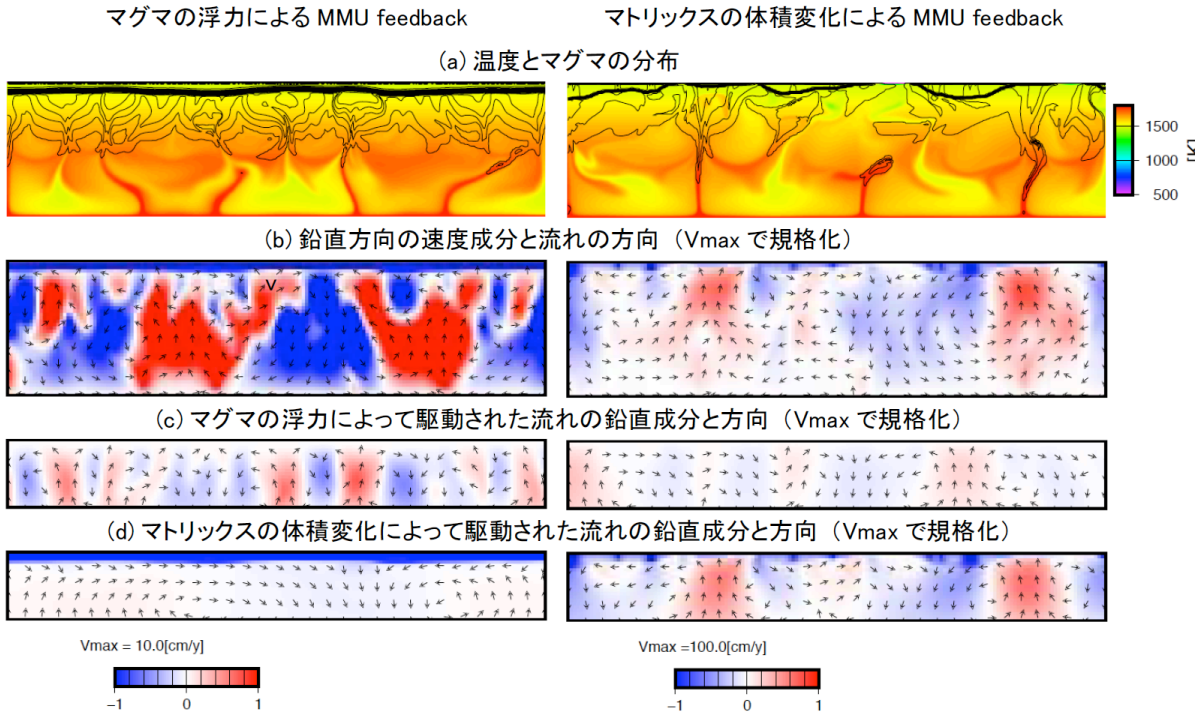
PERC/ChiTech has conducted meteor observation onboard ISS, using high sensitive HDTV camera installed in front of observation window in the US pressurized module, DESTINY for two years. The METEOR was delivered to the ISS in March, 2016. The observation started in July, 2016 and is still on-going. Main targets of observation are major meteor shower, such as Geminids and Perseids. Photometric observation was conducted in the first year and spectroscopic observation is currently conducted in the second year. Here, we report an overview and the current status of METEOR project.

千葉工大惑星探査研究センターでは、国際宇宙ステーション（ISS）の米国実験棟デスティニーに高感度ハイビジョンカメラを搭載し、地球側に面した観測窓越しに２年に渡り宇宙から流星を観測する「メテオ」プロジェクトを進めている。ISS は高度約 400ｋｍを飛んでいるため、雲や大気に影響されることなく、地球に落ちて行く流星を観測することができる。科学目的は、ISS という安定した観測環境の下、同一の観測カメラを用いて、主要流星群の流星塵のサイズや化学組成の分布を調べることで、流星群ダストや流星群母天体の物理化学特性を正確に理解することである。メテオカメラは 2016 年 3 月に ISS に届けられ、実験ラックへの設置と初期動作確認を経て、2016 年 7月から観測を開始し、現在も観測中である。観測目標はふたご座流星群やペルセウス座流星群などの主要流星群。一年目はそれらの流星の輝度分布や到来方向を調べるため、測光観測を行った。2 年目は流星ダストの主要元素（鉄、マグネシウム、カルシウム、ナトリウム）の存在度を調べるため、レンズの前に透過型回折格子を取り付け、可視の分光観測を行っている。来年１月のしぶんぎ座流星群まで観測を行った後、カメラは地球に帰還する予定である。本講演では、メテオプロジェクトの概要と最新の観測状況について報告する。

火成活動･マントル湧昇流フィードバックの二つの型

○小河正基[1]
[1]東京大学大学院総合文化研究科

マントル湧昇流によって引き起こされる火成活動は、湧昇流の空間スケールが十分大きいとき湧昇流それ自身を加速する。この火成活動･マントル湧昇流フィードバックは、地球のような大型の惑星で、洪水玄武岩を形成した火山活動など Large Igneous Province として知られる激しい火山活動を引き起こすと考えられることをこれまで示してきた。さらに詳しい数値実験を行った結果、このフィードバックには、（１）生成されるマグマの浮力を介したものと（下図左）（２）マグマの移動に起因するマトリックスの体積変化を介したもの（下図右）、の二種類があることが解った。（１）のタイプはマントルの粘性率が低いときに卓越し、例えばマグマオーシャン期の最終段階からその直後の、マントルが高温だった時期に強いマントルの撹拌を引き起こすと期待されるのに対し、（２）のタイプは、その後のマントルがある程度冷えて、粘性率がある程度高くなった時期に火成活動をパルス的にするなどの効果を及ぼしたと期待される。



(b)はマトリックスの流速の鉛直成分を色で、流れの方向を矢印で示す。(c)は(b)で示した流れのうちマグマの浮力で駆動された部分のみを、(d)はマグマの移動によるマトリックスの体積変化により駆動された部分のみを、抽出したもの。

風成砂丘から探るパンゲア超大陸パンゲア時代の地表風系：火星とのアナロジー

○庄崎弘基[1]，長谷川精[2]
[1]高知大学理学部，[2]高知大学理工学部

風成砂丘は，地球以外の惑星や衛星（金星，火星，タイタンなど）の表層にも普遍的に見られ，その形態や配列方向は直接観測できない地表風系や大気循環系に関する重要な情報を提供する（長谷川，2012，*地質雑*）．本研究では，米国中西部に分布するジュラ紀とペルム紀の風成層を広域的に調査し，超大陸パンゲア時代の地表風系の復元を行った．そして現在の地表風系や，気候モデルで再現されたパンゲア時代の風系と比較検討を行い，海陸分布が大きく異なる時代において，大気循環パターンがどのように異なっていたのかを考察した．さらに，火星に見られる現在や過去の風成砂丘記録と比較することで相違点・類似点を検討した．

まず Google Earth を用いて，地球の現生の風成砂丘がどのように分布・配列しているのかを解析した．現在の地球では，砂漠環境はハドレー循環の下降域に当たる南北 30 度付近の亜熱帯高圧帯に分布し，偏西風と貿易風の風系を大局的に反映して縦列砂丘が北東-南西方向に配列している．超大陸パンゲア時代の風成層を調査した結果，北東風・北西風・南西風の 3 方向の風系により形成された北北西-南南東方向の縦列砂丘が，ジュラ紀では北緯 30 度，ペルム紀では北緯 10 度付近で発達していたことがわかった．本研究で復元された風系パターンは，気候モデルの結果（Peyser & Poulsen, 2008, *Paleo-3*; Rowe et al., 2007, *Science*）と比較すると，冬季に卓越する北東風と，夏季に卓越する南西風によって，南東方向に縦列砂丘が配列していたと考えると整合的であった．つまり，パンゲア時代には，季節毎にハドレー循環が赤道をまたいで大きく反転する南北非対称の大気循環パターンが発達しており，風成砂丘は数十年～数万年スケールでの卓越風系の変化を反映していると考えられる．

次に HiRISE 画像を用いて火星表層の風成砂丘の分布や配列方向を解析した．火星では南北 45 度以内の範囲に縦列砂丘が散逸的に見られ，南東-北西方向，南-北方向，東北東-西南西方向に配列していた．その配列方向は地球のものに比べて多様であり，また 2 方向の縦列砂丘が交差しているような場所も見られ，長期的な風系変化の履歴を被っている可能性が示唆された．ただし赤道域付近に分布する縦列砂丘の配列方向に関してはパンゲア時代との類似性がみられ，南北に反転する風系を示していた．また *Opportunity* により探査された 37 億年前頃の赤道域の風成砂丘も同様な南北反転の風系を示していた（Hayes et al., 2011, *JGR*）．このことは，現在および過去の火星は南北温度勾配が大きく，季節毎に大きく反転するハドレー循環が発達していたとする大気循環モデルの結果と整合的であり，地球のパンゲア時代の風系との類似性が見られることが明らかになった．

冥王星表面の氷の昇華と凝結による反射率の変化

○松井弥志[1]，木村淳[1]

[1]大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

2015 年、冥王星に接近した探査機ニューホライズンズの観測によって、冥王星表面に H_2O, N_2, CH_4, CO の氷が共存することや、全体として低緯度帯に暗い領域が広がり、中緯度帯が最も明るいという反射率の傾向を持つこと、スプートニク平原と呼ばれるひときわ明るい領域が存在することなど、その表面に強い明暗のコントラストがあることが明らかになった。しかし、その明暗コントラストの起源については、いまだ明らかになっていない。

木星や土星の衛星における反射率変化を扱った先行研究では、日射による氷の昇華が天体表面の反射率変化に影響することが示されている。さらに冥王星はN_2を主成分とする表面大気圧約 1Pa の大気を持つことから、大気からの凝結も反射率に影響すると思われる。このように、昇華や凝結などの氷の振る舞いが、冥王星表面の反射率変化に大きく影響している可能性がある。しかしこれまでのところ、その定量的な考察は行われていない。

そこで本研究では、冥王星表面の明暗分布の起源を探ることを目的として、日射の変化に伴う様々な氷（固体 H_2O, N_2, CH_4, CO）の昇華・凝結といった振る舞いと、表面の反射率の変化の関係を数値シミュレーションを用いて調べた。

モデルでは、明るい氷と暗い非氷物質が均一に混ざって存在し、その体積比に従った反射率を持つ表面状態を初期条件として仮定した。続いて緯度ごとの日射角の変化と表面の熱慣性を用いて表面温度とその時間変化を計算し、それに伴う氷の昇華量を見積もった。昇華した氷は気体（大気）として存在し、表面温度が凝固点を下回った時には、大気から再凝結し表面に沈着する効果も考慮した。その上で、微小隕石衝突などによって混合されていると考えられる深さまでに含まれる氷と非氷物質の体積比から、次の時間ステップの表面の反射率を計算した。この過程を繰り返し計算することで、数冥王星年間における表面の反射率の時間変化を調べた。

その結果、自転軸傾斜角が約 120 度ある冥王星では、一日中太陽が昇らなくなる冬の期間に氷が凝結して反射率が増加し、逆に太陽が沈まなくなる夏の期間に氷が昇華して反射率が減少するという反射率の季節的な変化が起きることが分かった。また、低緯度ではこの季節変化は起こらず、常に反射率が低いまま保たれ、中緯度（図 1）と高緯度（図 2）における反射率を比較すると中緯度の方がより高い反射率に達する。以上のことから、緯度ごとの日射角の違いによって、現在の冥王星表面の明暗分布の傾向である低緯度帯と極付近が暗く、中緯度が明るくなっていることを説明できる可能性があることが分かった。

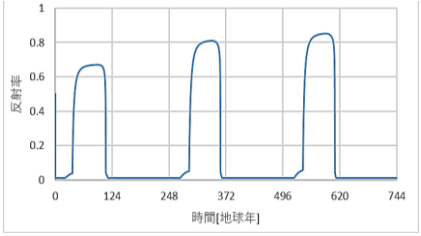


図 1 冥王星緯度 45 度における反射率の時間変化

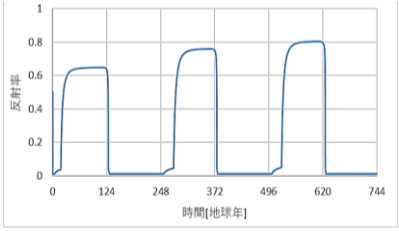


図 2 冥王星緯度 75 度における反射率の時間変化

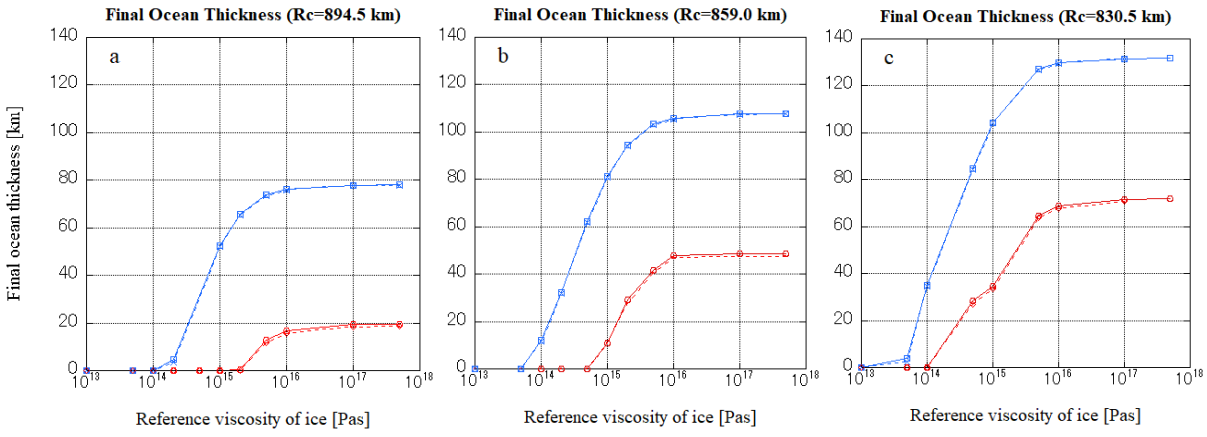
冥王星地下海の安定性と進化

Stability of the subsurface ocean of Pluto

○木村淳（大阪大学），鎌田俊一（北海道大学）

冥王星が現在も地下海を持つために必要な内部構造および組成的条件を，数値モデルによって調べた．2015 年に New Horizons 探査機が行ったフライバイ探査により，スプートニク平原と名付けられた広大な凹地が，衛星カロンとの潮汐変形バルジの長軸付近に存在することが明らかとなった。この位置に巨大な盆地が存在することは，ここが正の重力異常を示す場所であり，地下に氷より高密度のものがあることを示唆している。これまでの研究で，それが液体の水であることが指摘されており，冥王星においては，現在ないしは比較的近い過去にまで地下海が存在した可能性がある．このことは，全球膨張を示唆する正断層の存在や，柔らかな内部状態を反映した扁平の無い全球形状からも支持される．

地下海の存否や進化については，Robuchon and Nimmo (2011, Icarus) によるモデル計算を用いた考察があるが，初期熱構造や内部層構造の仮定が限定的なため，本研究では，岩石コアと H_2O 層の体積比や，氷粘性率，熱源元素存在量（CI コンドライト的/普通コンドライト的），初期熱構造（H_2O 層全溶融/全固化），溶存アンモニアの有無など幅広いパラメタ設定を採用し，地下海の進化に関する網羅的なモデル計算を行った．特に内部層構造に関しては，岩石と H_2O が完全に分化していると仮定すると，想定する岩石密度に従って内部の岩石コアと外部の H_2O 層の体積比が変わり，岩石コア半径が小さい場合は厚い H_2O 層の底部に高圧氷が出現する．一方で大きな岩石コアの場合は，低圧相の氷のみが出現し，物性の大きく異なる相の氷が現れることは，熱進化に大きな影響を与えるものと予想される．このような視点に立ち，46 億年間の内部熱構造の変化と海の厚さの変化を数値シミュレーションによって追跡し，現在の冥王星が地下海を保持するためのパラメタ条件を見出した．



図：計算開始から 46 億年後の冥王星地下海の厚さと，氷の基準粘性率の関係．大半径・低密度の岩石コア(a)，中程度の岩石コア(b)，小半径・高密度な岩石コア(c) のそれぞれにおいて，普通コンドライト的な熱源元素濃集度（青線）と CI コンドライト的な濃集度（赤線）を与えた．実線は初期 H_2O 層全溶融，点線は初期 H_2O 層全固化を仮定した時の結果である．

フォボスおよび炭素質小惑星のレゴリス模擬土壌の作成

○宮本英昭、新原隆史、茂木勝郎[1]、小川和律[2]、和田浩二[3]、
兵頭龍樹、玄田英典、中村智樹[5]
[1]東京大学、[2]神戸大学、[3]千葉工業大学、[4]東京工業大学、[5]東北大学

固体天体の表層は、一般にレゴリスと呼ばれる岩石の破砕物で覆われている。そのためリモートセンシングによる観測結果を解釈したり、天体表面に見えられる構造や天体の形成過程を議論したりする上で、レゴリスの状態を正しく把握することが重要となる。また、はやぶさ２や火星衛星探査計画（MMX）のような天体表面に接触するミッションの設計においても、対象天体のレゴリスの特性を事前に推定する必要がある。特にレゴリスの機械的特性の把握は、着陸機やサンプル取得機構の開発に必須といえるが、その直接観測を行う機会が極めて限られているために、着陸実績のない天体について予想することは難しい。

フォボスとダイモスは、MMX による比較的長時間にわたる着陸が計画されていることに加え、将来の有人飛行も検討されていることから、表面特性を正しく把握することが求められている。NASA や ESA の火星探査機によってリモートセンシングのデータがある程度蓄積されているとはいえ、過去に類似した天体への着陸実績が無いために、レゴリスの機械的特性は未知である。レゴリスの粒径分布や粒子組成を制約するには、過去のデータ解析とレゴリス進化過程の理論的検討に基づきながら進める必要があるが、たとえこれを正しく推定できたとしても、機械的特性を決定する要素は他にも粒子形状や帯電状態など多岐にわたるため、機械的特性を理論的に制約することは極めて困難である。

そこで講演者らは、探査機の観測結果や火星衛星の形成に関する理論的な検討結果、さらに隕石の物質科学的な研究を参考にしながら、フォボスや炭素質小惑星のレゴリスシミュラントを作成している。本講演ではその進捗と関連した物理計測の結果について報告するとともに、今後の科学的な利用法について議論したい。

月極域探査に向けたレゴリスシミュラントの岩石比誘電率測定

○小林 真輝人[1], 堀 浩一[2], 新原 隆史[2], 西堀 俊幸[3], 熊本 篤志[4], 宮本 英昭[1,2]
[1]東大・理 [2]東大・工 [3]JAXA [4]東北大・理

大気を持たない固体天体上で、揮発性成分がどのように分布しているかを知ることは、その天体の形成・進化過程を知る上で重要である。月においても、極域においてさまざまな揮発性成分の存在が観測結果から議論されているが(e.g., Paige et al., 2010; Colaprete et al., 2010)、観測結果の解釈には問題点もあり懐疑的な意見も多い。月面にもたらされた揮発性成分の量は多いが、この移動と分解の時間スケールが理論的にはかなり類似していることが知られるため、実際のところ揮発性成分が本当に捕獲されているのか、どのような形態で存在しているのか把握するには、地表面の詳細な探査が望まれる。しかし揮発性成分は、あったとしてもレゴリス粒子間のマトリックポテンシャルに支配される狭い領域に少量が捕獲されている程度であると考えられるため、これを検出するには工夫が必要となる。

私たちの理論的な見積もりによれば、レゴリス中の空隙（典型的には 30~40%）の中の 5%程度という極めて小さな領域であっても、揮発性成分が付着していれば付着の無いレゴリスと比較すると有意に比誘電率が変化するため、電磁波反射法を用いればその分布が把握できることになる。しかしこれまで、低温真空下における岩石／レゴリスの比誘電率を測定した例が存在しないため、これを実験的に検証することにした。

比誘電率の測定には幾つもの手法が提案されているが、粉体であるレゴリスについて高周波数帯(1MHz-20GHz)で計測するには、同軸プローブ法が現実的と考えた。これに基づき、常温常圧下で月シミュラントの比誘電率測定システムを構築し、その後真空槽内に同システムを設置して測定を行った（図 1,2）。さらに真空槽内部に GM 冷凍機を接続し、試料容器から排熱させることで、2.5×10^{-7}Torr で-30℃以下を達成することができた。本発表では、この比誘電率測定システムの紹介と、実際に計測されたレゴリスシミュラントの比誘電率の初期データを報告する。

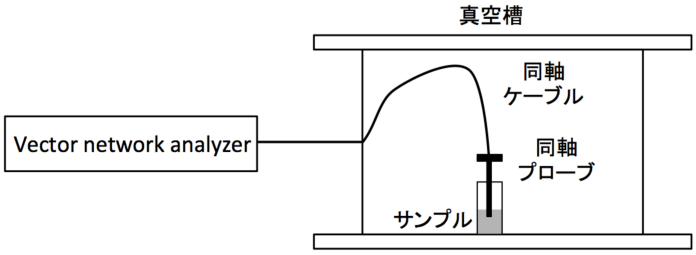


図 1. 真空槽内での比誘電率測定システム

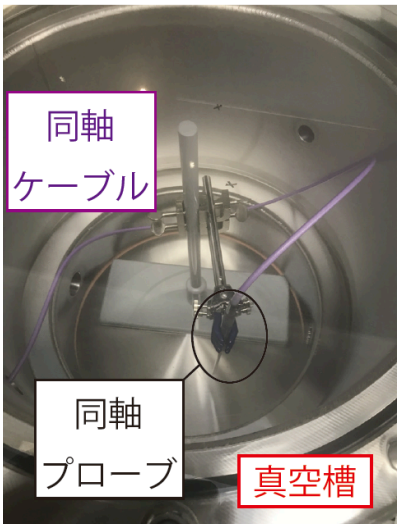


図 2. 真空槽内の様子

粉体流における凝集体成長過程のフラッシュ X 線観測

○長足 友哉[1]，中村 昭子[1]，長谷川 直[2]，和田 浩二[3]
[1]神戸大学，[2]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所，[3]千葉工業大学惑星探査研究センター

はじめに：

粉体流は粒子間の非弾性衝突で離散構造を形成することが知られている。たとえば、粉体層からの衝突放出物の高速度カメラ観測は、その放出物カーテンにメッシュ状パターンを明らかにし、そのプロセスは月や他の大気をもたない天体における新鮮なクレーターまわりの光条線の起源に関連する可能性がある[1]。

最も単純な粉体流の一つは自由落下する粒子の流れであり、自由落下粉体流においても離散構造として凝集体が形成することが知られている。粒子形状の異なる粒子を用いて、凝集体の形状、サイズ、密度を測定することで、自由落下粉体流中に形成する凝集体に対する粒子形状の効果が示されている[2, 3]。そこで今回は、フラッシュ X 線による撮像を異なる高さで行うことで、自由落下粉体流の成長プロセスを密度（内部構造）の時間変化を含めて３次元的にとらえる。

実験方法：

粉体流は、粒子を入れた漏斗を真空チャンバー内の底面からの高さ 160 cm に設置し、電磁石により塞き止められていた開口部を開くことで、粒子が流れ始め作られる。宇宙科学研究所のフラッシュ X 線による撮像を異なる高さ（開口部から 0、40、70、115、135 cm）で行うことで、密度の時間変化を調べる。実験は減圧下（0.1 atm）で行なった。粒子には球形の 45 μm、55 μm のガラスビーズと不規則形状の 45 μm、80 μm のシリカサンド、45 μm のガラスパウダーを用い、それらを直径 12 mm の流出口から落下させて行った。

結果：

漏斗中のガラスビーズ 55 μm の充填率は 0.45 程度、漏斗開口部直下でのガラスビーズ粉体流の空隙率は 0.5 程度、130 cm 流れ下ったガラスビーズ粉体流の推定空隙率は 0.65 程度と、自由落下中の粉体流の密度の時間変化が観測された。さらに、開口部直下では急激な粉体流の幅の変化も観測された。発表ではさらに詳細な粉体流の時間変化について報告、議論をする。

[1] Kadono et al., 2015, Icarus 250: 215-221. [2] Nagaasi, et al., 2018, PEPS, in press. [3] 長足他、JpGU Meeting 2018

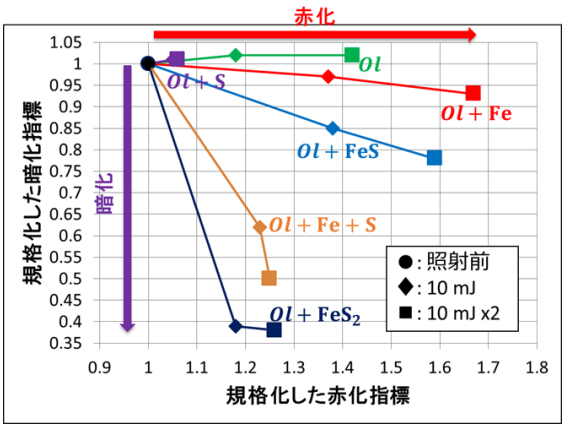
硫黄に富んだ環境下での宇宙風化の模擬実験と分光計測

○田中宏和[1]、佐々木晶[1]、岡崎瑞祈[1]、廣井孝弘[2]
[1]大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻、
[2]Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University

宇宙風化作用は大気のない天体表面で光学的性質の変化を引き起こし、月などの岩石質天体では反射スペクトルの暗化、赤化、吸収バンドの減衰といった変化が表面にさらされていた時間に従って見られる。このような変化は、太陽風の照射や微小隕石の衝突などによるナノ鉄微粒子の生成が原因であるということが知られている。しかし、こうした変化は天体表面の構成物質（元素組成）によって異なると考えられる。水星の表面は他の岩石質天体に比べて硫黄を多く含んでおり、より強い暗化が観察されている。また、小惑星由来の石質隕石中にはトロイライト（FeS）が普遍的に含まれており、宇宙風化を模擬して与えた普通コンドライト表面や宇宙風化を受けた小惑星イトカワからのリターンサンプルの表面に、鉄微粒子に加えて硫化鉄の微粒子が発見された。これらのことから、従来のようなナノ鉄微粒子だけでなく硫化鉄の微粒子のような他の要素も寄与するなどして、硫黄が宇宙風化による変化に影響を与える可能性が示唆されている。したがって、硫黄に富んだ環境下での宇宙風化によるスペクトルの変化の様子を調べる必要がある。

そこで本研究では、硫黄やその化合物を混ぜたかんらん石の粉末試料に対して真空下で微小隕石の衝突による宇宙風化を模擬したナノ秒パルスレーザーの照射実験を行った。そしてその前後で可視・近赤外の二方向性拡散反射スペクトル（波長範囲 250–2500 nm）を分光器で測定し、どのような変化が起きるのか調べた。

レーザー照射後、硫黄やその化合物を含んだ試料では、それらを含まないものとは異なるスペクトルの変化が観察できた。特に、硫化鉄や二硫化鉄を混合した試料では暗化が顕著だった。こうした結果から、鉄と硫黄の両方が存在する環境では、宇宙風化によって非常に大きな暗化が見られる、つまり暗化がより効率的に（短期間で）進行すると考えられる。こうした変化を示すとき、試料のごく表面には黒色の蒸着層が見られ、従来のナノ鉄微粒子以外の要素がスペクトルの変化に大きな影響を及ぼしている可能性がある。



↑　レーザー照射による各試料の変化の比較

海洋への隕石落下による津波の定量的な評価に向けて

Toward the quantitative evaluation of tsunami caused by the meteorite impact into the ocean

○近貞（山本）直孝[1]、布施哲治[2]
○Naotaka YAMAMOTO CHIKASADA[1], Tetsuharu FUSE[2]
[1]防災科学技術研究所（NIED）、[2]情報通信研究機構（NICT）

海洋に隕石が落下すれば、少なからず津波が発生する。本研究では、隕石落下によってどのような津波が生じるのか、定性的な仮説を用いず隕石衝突と津波伝播を数値シミュレーションによって高精度に再現するための数値モデルの構築を行う。衝突の計算には iSALE（Wünnemann et al., 2006）、津波伝播計算には JAGURS（Baba et al., 2017）を用いる。iSALE を用いることで多層のターゲットを定義することが可能となり、海水の動きと海底に対するクレーターの形成を同時に計算することが出来る。iSALE の出力である海底変動（クレーター形成）や海面変動、流速を JAGURS の初期条件として入力することで落下地点に応じて沿岸部にどのような津波が到達するか予測することを可能にする。

隕石津波の評価はこれまでにも行われてきたが、海底に形成されたクレーターに海水が再流入することで生じる津波のみが考慮されている場合（藤本・今村、1997）や、隕石が海底まで到達せず海水面の擾乱によって生じる津波のみが評価されているものがほとんどであり（Ward and Asphaug, 2000；後藤他、2013）、衝突時に立ち上がる海水のリバウンドと流速が考慮されていないという問題がある。また、津波伝播計算に於いても、実際には生じている短波長津波を考慮していない線形長波近似の計算のみが行われているため沿岸での津波を正しく評価出来ていないという問題もある。

さらに近年では、2018 LA のように、地球に衝突する前の小惑星を発見することが出来るようになってきている。ここに、リアルタイム流通している地震波形データに長沢＆三浦（1987）等の手法を合わせて運用すれば、地球大気圏内での軌道、すなわち落下地点を即時推定できる可能性も考えられる。隕石津波の数値モデルを精密に構築することで、任意の地点に落下する隕石による津波の即時予測が可能となると期待される。本発表では、特に衝突時のリバウンドの影響と短波長津波（分散波）の影響について報告する。

【謝辞】iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します。本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04674 の助成を受けたものです。iSALE の計算は国立天文台 CfCA の計算サーバで実施しました。記して感謝致します。

高空隙率焼結体の高速度衝突破壊実験

○村上雄一[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

背景と目的

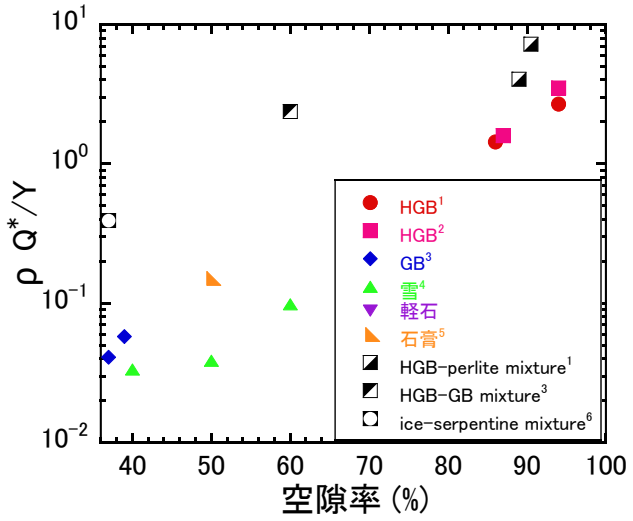
太陽系初期の小天体はかなり高い空隙率を持つと考えられ、最大で86%になる天体もあると考えられている（Consolmagno et al., 2008)。また、短周期彗星や木星の氷質の衛星の表面では焼結が起こっているかもしれない（Gundlach et al., 2018)。このような天体の衝突現象を模擬するために、低密度の標的を用いた衝突実験が行われてきた（e.g. Okamoto et al., 2015)。本研究では、従来よりも低密度の弾丸も用いて異なる強度の標的に対する実験を行い、衝突破壊強度と標的強度や標的の空隙率の効果を調べる。

実験方法

試料は中空ガラスビーズ焼結体（HGB）と、中空ガラスビーズ（GB）とパーライトの混合物の焼結体を、混合比を変えて二種類用意した。試料をそれぞれ輪切りにすることにより、圧縮強度の分布を求めた。衝突実験は宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃を用いて衝突速度2〜7 km/s で行った。また、弾丸には直径3 mm のナイロン球（密度1.1 g/cm^3）と直径3 mm で高さ2.5 mm の木（密度0.74 g/cm^3）の円柱を用いた。衝突による破壊の様子をハイスピードカメラにより毎秒5400 コマ撮影した。

結果と議論

空隙率と $\rho Q^*/Y$ の関係は右図のようになった（ρは標的密度，Q^*は衝突破壊強度、Y は標的圧縮強度)。右図より空隙率が大きくなると $\rho Q^*/Y$ が大きくなることが分かった。また混合物標的（図中の黒いシンボル）は他の試料と異なる傾向を持つかもしれないということが分かった。



空隙率と，規格化した Q*の関係。
1）本研究，2）Okamoto et al.（2015)，3）Love et al.（1993)，4）Shimaki and Arakawa（2012)，5）Okamoto et al.（2009)，6）Arakawa and Tomizuka（2004)

多孔質小天体模擬標的の衝突点下の密度解析

○山崎祐太朗[1], 中村昭子[1], 長谷川直[2], 鈴木絢子[2]
[1]神戸大学理学研究科惑星学専攻, [2]宇宙科学研究所

はじめに

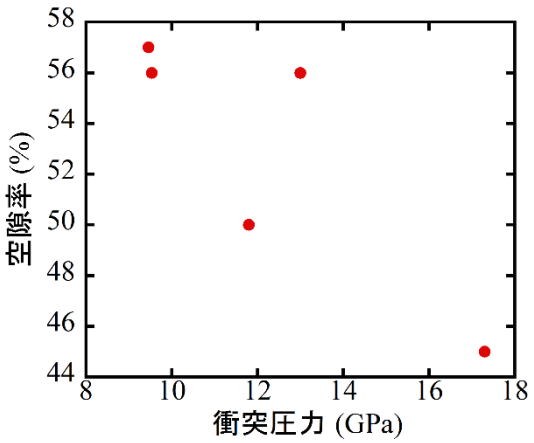
小惑星は高い空隙率を持つことが知られており、C 型小惑星では 30~60%の空隙率を持つと考えられている。衝突を受けた表面下は空隙率が減少すると考えられ、空隙率約 23%の砂岩（Buhl et al., 2014）や約 43%の凝灰岩（Winkler et al., 2016）に対して衝突実験が行われており、衝突表面下の変形や空隙率を観察している。また、空隙率約 50%（Yasui et al., 2012）の石膏に対しては、フラッシュ X 線画像で表面下の圧密領域を観察している。本研究では、衝突を受けた表面下の密度を調べるために空隙率約 60%の石膏標的に対して衝突速度と弾丸の種類を変えて実験を行った。

実験方法

実験は宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には球形のガラス（直径 3.2 mm）、SUS（1.6 mm）、ナイロン（3.2 mm, 7.1 mm）を使用し、石膏標的（空隙率 57.9±0.6%）に対して衝突速度 1.5~5.5 km/s で衝突させた。衝突過程は高速度カメラで撮影し、クレーター表面下の圧密領域の X 線透過画像を撮影した。X 線画像からクレーター表面下の密度変化を求めた。また、圧密度合いを考えるために、クレーター体積のうちでエジェクタとして飛んでいかずに圧密された体積を衝突前後の質量変化分の体積とクレーターにガラスビーズを充填させた体積から求めた。

結果・議論

クレーター体積の圧密された体積を弾丸体積で規格化した値は衝突圧力とともに増加した。クレーター体積とクレーター体積に対する圧密された体積の割合はほとんどの実験で 25~50%となった。ガラス弾丸を用いた実験の X 線画像から求めた圧密領域の厚さは、圧力によらず、弾丸直径の 0.7~2 倍となった。最も圧密された領域の空隙率は 58%から 43%と約 13%減少している。



図：衝突圧力と衝突後圧密領域空隙率の関係

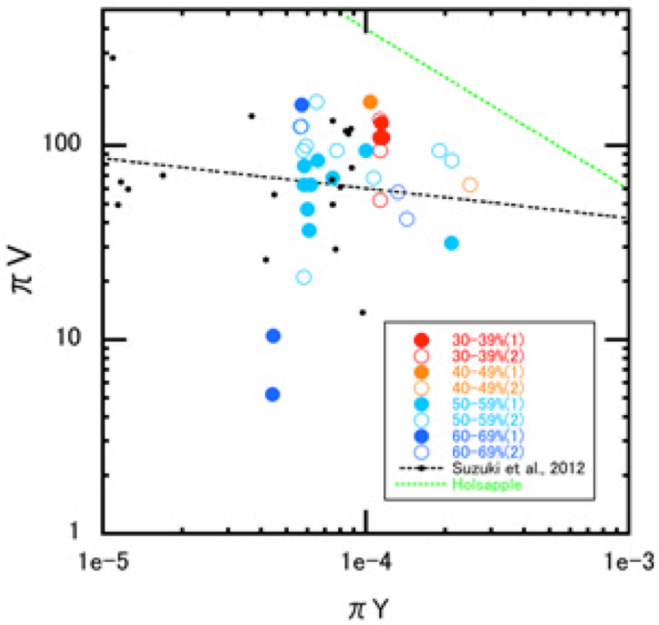
クレーターサイズへの衝突履歴効果：多孔質標的での衝突実験

○横山康喜[1]、中村昭子[1]、鈴木絢子[2]、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

天体表面の年代はクレーターの数密度から推測できるが、天体表面が衝突を経験することでその強度が低下する場合は同じサイズの天体との衝突でも徐々に大きいクレーターが形成されると予測される。実際に衝突を経験することでクレーターサイズへどのような影響があるかを室内実験で調べる。

今回の実験ではメインベルト中の多孔質天体を模擬するために、35~65 %の空隙率を持つ石膏を標的として衝突実験を行った。宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて衝突速度を 5.28±0.15 km/s とした。弾丸は直径 3.2 mm ナイロンで垂直衝突に限定した。標的は二種類のサイズのものを用いた（直径 7.49±0.07 cm、厚さ 6.80±0.91 cm、及び、直径 11.91±0.01 cm、厚さ 4.09±0.04 cm)。今回の実験では、一つの石膏標的に対して二度の衝突実験を行い、形成された二つのクレーターのサイズについて比較した。クレーター体積は生成されたクレーターにガラスビーズを充填し、その質量変化分から計算して求めた。

その結果、直径・深さ、体積、圧密量に関して一度目の衝突と二度目の衝突で顕著な違いは見られなかった。今後は標的物質を変えることで、物質への依存性を確認する。



衝突条件とクレーター体積の関係

$\pi_V=\rho V/m$、$\pi_Y=Y/\rho v^2$、ρ:標的密度、V:クレーター体積、m:弾丸質量、Y:標的引っ張り強度、v:衝突速度、(1)一度目、(2)二度目の衝突を表わす。

P49/PO49

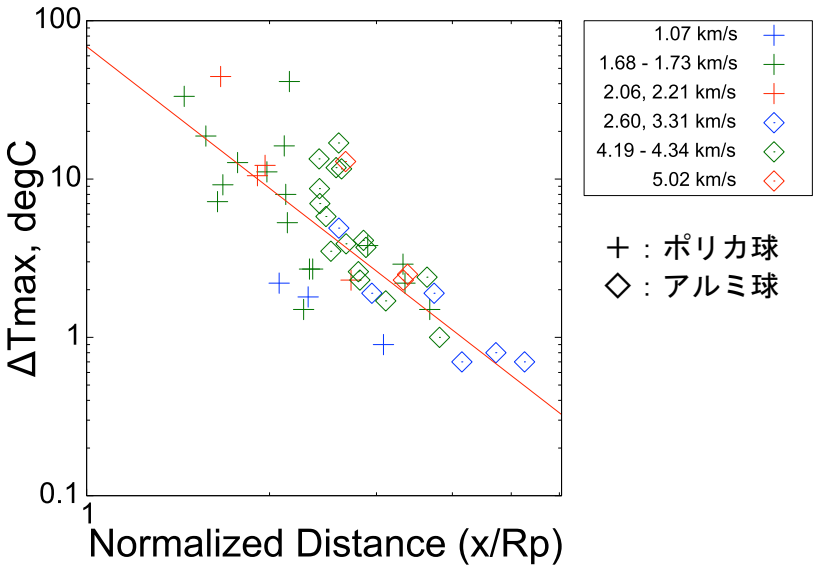
多孔質天体上に形成する衝突クレーター周囲の衝突残留温度に関する実験的研究

○田澤 拓[1], 橋本 涼平[1], 小川 和律[1], 荒川 政彦[1], 保井 みなみ[1]
[1]神戸大学大学院理学研究科

【はじめに】C型小惑星は，炭素質コンドライト隕石の母天体と考えられている．この隕石には水質変成が起きた証拠が残されており，その水質変成には150℃以上の温度に加熱する熱源が必要とされる．この熱源として有力なのは，短寿命放射性元素 ^{26}Al である．一方，天体衝突による衝突残留熱も熱源として提唱されているが，これまで実験的に衝突残留熱による水質変成の可能性を確認した例はない．そこで本研究では，小惑星模擬試料を用いた高速度衝突実験により，クレーター周囲の衝突残留温度を計測して，水質変成の可能性を検討した．

【実験手法】衝突実験は，神戸大学に設置した二段式軽ガス銃を用いて行った．弾丸には直径4.7 mmのポリカーボネート球と直径2 mmのアルミ球を用いて，それぞれ 1.7 km/s，2〜5 km/sの速度で衝突させ，その時のクレーター形成過程はハイスピードカメラで撮影した．小惑星模擬試料としては空隙率 50%の多孔質石膏（幅 7 cm，高さ 4 cmの直方体）を用い，試料内部の温度履歴を計測するために試料表面下1 cm，および1.5 cmの同一平面上に熱電対（クロメル・アルメル熱電対）を4〜5個設置した．また，平面中心からの距離を様々に変化させて熱電対を設置することで，クレーターからの距離が熱履歴に与える影響を調べた．温度履歴は，データロガー（GRAPHTEC GL700）を用いて100 μs毎に記録した．なお，熱電対の設置位置は，衝突実験の後に石膏試料を上面から削り，その位置を確かめた．さらに，一次元熱拡散モデルを用いた数値シミュレーションを行い，熱電対で計測された熱履歴からクレーター内壁の初期温度を推定した．

【実験結果】今回の衝突実験で形成されたクレーターは，すべて周囲にスポール領域を伴うピット型クレーターであった．また，すべての実験において，衝突残留温度が確認され，衝突クレーターの形成に伴って試料内部が非可逆的に加熱されることを確認した．最高温度到達時間は，衝突点からの距離が遠いほど長く，最高温度は衝突点からの距離が近いほど高かった．図1は最高温度と，ピット半径で規格化した衝突点からの距離の関係である．規格化距離が〜3以上では弾丸の種類や速度に関係なく，ほぼ一致している．それよりも近いところではばらつきが大きいが，これはクレーター形状の再現性や，熱電対の位置決定誤差などが原因として考えられるため，再検討が必要である．規格化距離が大きくなるのに伴い，最高温度が距離の-3乗程度で減少していくように見える．今回の実験で最も小さい規格化距離1.4では，最高温度が33 ℃であった．



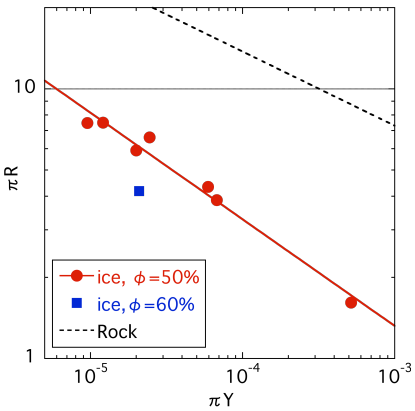
多孔質氷への高速度クレーター形成実験：クレーターサイズスケール則に対する衝突溶融の影響

○宮野加菜[1]，保井みなみ[1]，荒川政彦[1]
[1]神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

はじめに：太陽系外惑星領域では、H_2O 氷を主構成物質とする氷衛星や彗星核、そして太陽系外縁天体等の氷天体が、広い速度範囲で衝突している。特に巨大ガス惑星の近傍を公転する氷衛星では 1km/s を超える高速度で衝突が起こるため、衝突点及びその周囲が圧縮・加熱され、クレーター底部では衝突溶融層が形成される。一方、その衝突溶融層の広がりは、衝突速度や天体表面の物性(構成物質の種類や空隙率)によって変化する。特に小中氷衛星を構成する多孔質氷は、緻密な岩石と比較して容易に衝突溶融が起こるので、より広範囲の衝突溶融層が形成される可能性が高い。そこで本研究では、多孔質氷天体上で起こる衝突クレーター形成過程において、衝突溶融層の有無がクレーターサイズやその形状に与える影響を明らかにすることを目的に実験を行った。

実験方法：多孔質氷天体の表層を模擬した雪標的は、粒径数 10μm 以下の氷粒子を容器に詰めて作成した。この氷粒子は液体窒素に水を噴霧・急冷して作成した。この実験での雪の空隙率は 50%、60%である。雪試料は、実験前に-25℃の冷凍庫で十分焼結させ(最大 6 日)、その引張強度は空隙率毎に一定である。弾丸は、直径 2mm のアルミニウム球と、直径 4.7mm のポリカーボネイト球を用いた。衝突実験は、神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。衝突速度は 1.0~5.5km/s であり、試料を設置したチャンバーの真空度は 120Pa 以下で、温度は-15℃である。衝突の様子は、高速カメラで撮影した(撮影速度 10^5fps、露出時間 380ns)。衝突実験後は、雪試料を切断してその断面を観察し、クレーターの形状(直径・深さ)や衝突溶融の様子、さらに弾丸の変形や破壊の程度を観察した。

実験結果：クレーターの形状は空隙率によらず、スポール領域を伴うピット型クレーターであった。このスポール領域の直径は空隙率によらず、衝突速度と共に大きくなった。Housen and Holsapple(2011)のクレータースケール則を用いて岩石と雪の結果を比較すると、同じ規格化強度π_Yでも雪の方が規格化半径π_Rが小さくなった。また、ピットの入り口径は、同じ衝突速度では空隙率 50%よりも 60%の方が大きくなった。一方、クレーター深さは、1.0km/s で最も深く、衝突速度が 2.5km/s で浅くなるが、さらに高速度では衝突速度に比例して深くなった。衝突溶融層に関しては、空隙率 50%では衝突速度 2.5km/s 以上で観察されたが、空隙率 60%では衝突速度 4km/s でのみ観察された。さらに、高速カメラの観測から、空隙率 50%では、衝突直後に逆円錐型のエジェクタカーテンが現れ、その後、衝突面にほぼ垂直に伸びるピラー型のエジェクタが現れた。このピラー型エジェクタを構成する大きな破片の飛翔速度を計測したところ、Kadono *et al*(2005)で予想されるスポール破片の飛翔速度より 1 桁大きくなった。



規格化強度π_Yと規格化半径π_Rの関係

多孔質氷の圧縮変形における圧密速度と空隙率の関係：氷微惑星の密度構造への応用

○矢部みなみ，荒川政彦，保井みなみ

神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻

【はじめに】

近年の地上観測や探査機観測によって、氷衛星や彗星、カイパーベルト天体などの氷天体の密度範囲は 400～3000 kg/m^3 と非常に幅広いことがわかってきた。氷天体の平均密度を決定する要素は主として構成物質である。即ち、氷天体は主に氷と岩石から構成されるため、岩石含有率が大きくなるほど天体の平均密度は大きくなる。そして、岩石には放射性元素が含まれるため、氷天体の岩石含有率は熱進化を考える上で重要な要素になる。

一方で、氷天体の中には H_2O 氷より低い平均密度をもつ天体もあり、高い空隙率が推測される。従って、観測された平均密度だけから岩石含有率を推定することは危険であり、空隙率分布を考慮することが必須である。この氷天体内部の空隙率分布は、その熱進化過程における圧密焼結によって徐々に変化してきたと考えられる。そこで、現在の平均密度と整合的な岩石含有率と空隙率分布を決めるには、様々な岩石含有率を持つ氷微惑星の熱進化に伴う空隙率分布を再現することが必須である。そのためには、氷微惑星の圧密焼結過程を明らかにする必要がある。

【研究目的】

Maeno & Ebi-numa,1982 によると、初期空隙率が 40%以下の多孔質氷の塑性流動による圧密速度と応力の関係は以下のように表される。

$\dot{\varepsilon} = \frac{2A(1-\rho_r)}{\{1-(1-\rho_r)^{1/n}\}^n}\left(\frac{2\tau}{n}\right)^n$　($\dot{\varepsilon}$：圧密速度，ρ_r：密度，τ：応力，n,A：定数)。

本研究では、氷微惑星に応用する上で必要な、先行研究よりも高い空隙（40%以上）を持つ多孔質氷の圧密速度と空隙率の関係（経験式）を求めることにした。

【実験方法と結果】

多孔質氷の変形実験は、すべて-15 ℃の低温室内で行った。氷微惑星を模擬した多孔質氷試料は、平均粒径 20 μm の H_2O 氷粒子を用いて作成した。試料は円筒形（直径 20 mm，長さ 40 mm）で、この試料に一定荷重をかけたクリープ試験を行い、変形速度と空隙率の関係を調べた。試料の初期空隙率は 50～70%、クリープ試験の圧縮応力範囲は 7.6～59 kPa、また、試料温度は、断熱箱内でヒーターにより温度調整して-10 ℃とした。試料はその圧縮変形時を撮影したタイムラプスビデオの解析の結果、直径の変化はなく、高さのみが変化することがわかった。これは、試料の体積変化が直接その試料の圧密量を表すことを示している。そこで圧密速度と空隙率の関係を調べたところ、空隙率の減少とともに圧密速度は遅くなり、さらに応力の増加とともに圧密速度が大きくなることがわかった（図 1）。この関係は、$\dot{\varepsilon} = B\tau^n \exp\{-C\cdot(1-\rho_r)\}$と書ける。また、この関係は初期空隙率に依存しないが、クリープ実験を開始するまでの試料の焼結時間には大きく依存することがわかった。そこで試料の焼結時間を変化させてクリープ実験を行い、その影響を定量化した。

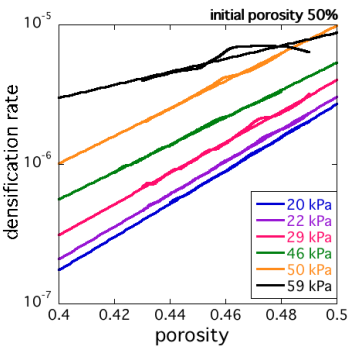


図 1:圧密速度と空隙率の関係
初期空隙率 50%の場合

異なる粒径をもつ粒子の混合層へのクレーター形成実験：小惑星 Ryugu 上のクレーター地形との比較

○保井みなみ，荒川政彦
神戸大学大学院理学研究科

背景：小惑星 Ryugu の表面は，100 m サイズの巨礫から 10 cm オーダーの岩塊まで，様々なサイズのボルダーで覆われていることがわかってきた．このようなボルダーで覆われた天体上のクレーター形成過程を考えるには，衝突天体のサイズと天体表面を覆うボルダーのサイズ分布との関係が重要となる．特に，衝突天体よりも大きなボルダーに衝突した場合，極端に小さなクレーターとなるか，ボルダーが破壊するのみでクレーターが形成されなくなると考えられる．本研究では，幾つかの粒径をもつ粒子の混合層へのクレーター形成実験を行い，クレーターサイズと標的の粒子サイズ分布との関係を調べた．

実験方法：実験は，神戸大学に設置した小型縦型一段式軽ガス銃を用いた．標的には直径 0.1，1，3，10 mm のガラスビーズを用いて，各ビーズの質量を等量として混合した．弾丸には直径 2 mm の鉄球を用いて，衝突速度は 53～143 m/s とした．衝突の様子は高速カメラで撮影し，弾丸の跳ね返りや破壊したビーズの有無を確認した．

結果：実験で得られたクレーター半径は，Holsapple & Schmidt (1986)のクレータースケール則を用いて整理した．図 1 は規格化半径π_R（$= R(\rho/m)^{1/3}$でRはクレーター半径，ρは標的密度，mは弾丸質量）と規格化重力π_2（$= ga/U^2$でgは重力加速度，aは弾丸半径，Uは衝突速度）の関係を示している．比較のために 0.1 mm ビーズのみの結果も示した．この図から，0.1 mm ビーズ（赤）の結果と比較して，混合ビーズ（青）の結果は近似線の傾きがほぼ同じだが，クレーター半径は小さくなることがわかった．この結果は 3 mm ビーズに弾丸が衝突して運動量が分配され，弾丸と 3 mm ビーズがより低速で標的に潜り込むことで説明できる．一方，10 mm ビーズに衝突した（水色）場合，クレーター半径はさらに小さくなった．この場合，弾丸が跳ね返っていることから，反発係数を入れたスケール則で説明できることがわかった．

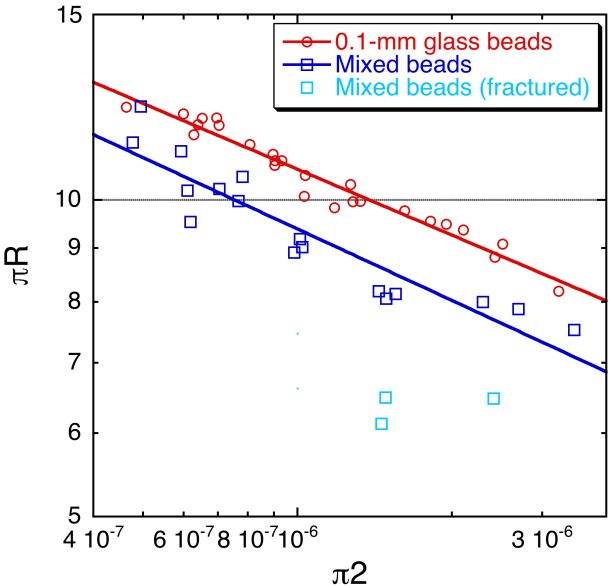


図 1　クレータースケール則の無次元パラメータπ_Rとπ_2の関係．

低強度粗粒レゴリスを用いた衝突実験：クレータースケール則と衝突励起振動に対する粒子強度の影響

○山本 裕也[1], 荒川 政彦[1], 保井みなみ[1]
[1]神戸大学大学院理学研究科,

【はじめに】衝突クレーターの形成は、太陽系の形成・進化において普遍的な現象である。そのため、微惑星の衝突と進化過程や小惑星上での衝突流動過程を明らかにするためには様々な規模で起こるクレーター形成過程を再現するためのスケール則や衝突励起振動の研究が必要となる。クレータースケール則は、その形成を支配する物理メカニズムによって 2 種類のものが提案されているが、そのうちレゴリス層で覆われる微惑星上に見られるクレーターは、重力でによって支配されたメカニズムにより形成されると言われる。一方、このレゴリス層を構成する粒子の破壊強度が小さい場合、クレーター形成時には衝突時点付近の粒子が破壊される。従って、重力以外にも構成粒子の破壊強度がクレーター形成過程に影響を与える可能性が高い。しかしながら、レゴリス構成粒子の破壊強度を考慮した実験的研究は少なかった。そこで本研究では、粗粒低強度粒子からなる標的に対してクレーター形成実験を行い、クレータースケール則と衝突励起振動に対する構成粒子の破壊強度の影響を調べた。

【実験方法】クレーター形成実験は神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。標的には直径 1～4 mm の細粒鹿沼土を用いたが、この粒子の圧壊強度は約 60kPa であった。弾丸には直径 3 mm の密度が異なる 5 種類の球(鉄, ジルコニア, アルミナ, ガラス, ナイロン)を用いた。それらの弾丸を速度 40～200 m/s まで加速して標的表面に対して垂直に衝突させた。衝突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、その動画を用いてイジェクタとして放出される個々の粒子の軌跡を求めた。軌跡からイジェクタ速度分布(粒子の飛翔速度と初期位置の関係)を求めた。ま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を計測した。また、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)を設置することで計測した。なお加速度の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(取り込み速度:100 kHz)で記録した。

【実験結果】

クレーターサイズと弾丸の運動エネルギーの関係を調べた結果、低運動エネルギーでの関係と高運動エネルギーでの関係にオフセットが生じることがわかった。このオフセットの結果、0.14 J から 0.63 J の領域ではクレーターサイズは運動エネルギーとともに変化せず、ほぼ一定となった。また、πスケーリング則を用いて規格化クレーター半径(π_R)と規格化重力(π_2)の関係を調べた所、砂やガラスビーズ標的等の先行研究と比較してπ_Rがかなり小さくなることがわかった。さらに詳しく調べると、π_Rとπ_2の関係は弾丸の種類や衝突速度によって上下２つに分離していることがわかった。このようなオフセットや分離が見られるのは、衝突の運動エネルギーが標的である低強度粒子の破壊に使われているからだと考えられる。一方、イジェクタ速度は粒子毎のばらつきが大きく明確な衝突点距離と放出速度の関係は見られなかった。さらに、加速度計のデータからは衝突励起振動の伝搬速度が 30±3 m/s であり、先行研究のガラスビーズ標的の伝搬速度の約 1/3 倍であることがわかった。また、衝突点からの距離とその場所での最大加速度の関係はガラスビーズ標的で得られた同じ衝突条件の結果と比較すると 1/10 程度とかなり低くなっていることがわかった。

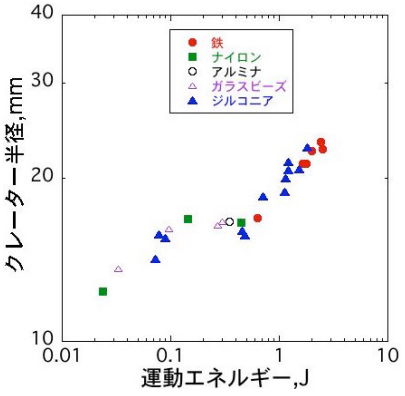


図 1:弾丸の運動エネルギーとクレーター半径の関係。オフセットが見られる。

多孔質氷球の反発係数の空隙率依存性：土星リング粒子の衝突過程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　保井みなみ　荒川政彦

はじめに：土星のリングは、サイズ数 m までの水氷の粒子で構成されており、その粒子は数 cm/s の速度で互いに衝突している。その相互衝突の結果、リング粒子は凝集・反発・破壊を起こし、土星リングの力学的進化やその構造に影響を及ぼしている。また、土星リングが非常に薄い円盤（厚さ 100-200 m以下)を保っているのは、土星リングを構成する水氷粒子が非弾性衝突を起こし、その結果、エネルギーを効果的に散逸しているためと考えられている。そのため、土星リングの起源や進化過程を明らかにするためには、リング粒子の衝突特性を調べる必要がある。特に、非弾性衝突を特徴付ける反発係数に対するリング粒子の構造や衝突速度依存性が重要となる。

これまでの地上望遠鏡や惑星探査などの観測から、土星リングの粒子構造は、均質な氷、多孔質な氷（雪)、表面が霜で覆われた氷などが提案されている。先行研究では、均質な氷と表面が霜に覆われた氷の反発係数（ε）については調べられているが、多孔質氷球(雪球)の反発係数については詳しく調べられていない。そこで本研究では、土星リング粒子の空隙率に着目し、反発係数と衝突速度の関係に対する空隙率の依存性を調べた。

実験方法：リング粒子の模擬物質には、表面をなめらかにした均質な氷球（空隙なし）と、空隙率を 45、50、60%とした多孔質氷球を用いた。直径は 3cm とした。この氷球の表面をなめらかにした氷板および花崗岩の板に自由落下させた。その際の落下速度は 1.8cm/s～265cm/s である。板は氷球に比べて十分に大きいものを使用した。反発係数の測定は、圧電素子センサーを板に設置し、氷球が板に衝突する際に発生する弾性波を測定することで行った（AE 法)。氷球が複数回板に衝突するとその度に弾性波が発生するので、その弾性波の計測から氷球の衝突間隔を求めることができる。この時間間隔から衝突前後の氷球の速度変化を調べることができる。

実験結果：氷球と氷板の衝突実験では、衝突速度が小さいと反発係数がε=0.9 でほぼ一定となったが（準弾性領域)、ある速度を超えると衝突速度が大きくなるにつれ、反発係数は急激に低下した（非弾性領域)。２つの領域の境界速度を限界速度v_cと呼びv_c=24.5cm/s となった。また、非弾性領域では、先行研究で示された経験式 $\varepsilon = \varepsilon_{qe}(v_i/v_c)^{-\log(v_i/v_c)}$（$v_i$は衝突速度，$\varepsilon_{qe}$は定数）を用いて整理することができた。一方、氷球と花崗岩板の実験でも、上記の氷板への衝突と同様の振る舞いを示したが、v_cは 11.2cm/s と約半分となった。

雪球の反発係数は花崗岩板・氷板ともに、衝突速度が大きくなるにつれて減少し続け、準弾性領域と非弾性領域の境界は確認できなかった。この衝突速度と反発係数の関係は、ヘルツの衝突弾性理論に基づく塑性変形モデル $\varepsilon = a \cdot v_i^{-1/4}$（$a$は定数）によって説明できることがわかった。雪球の空隙率が 45%から 60%に上がると、aの値は氷板の場合は 0.55 から 0.3、花崗岩板の場合は 0.6 から 0.35 へと低下した（図 1)。このことから、雪球の反発係数は空隙率が大きくなると減少し、さらに花崗岩板の方が氷板よりも反発係数が全体的に大きくなることが分かった。

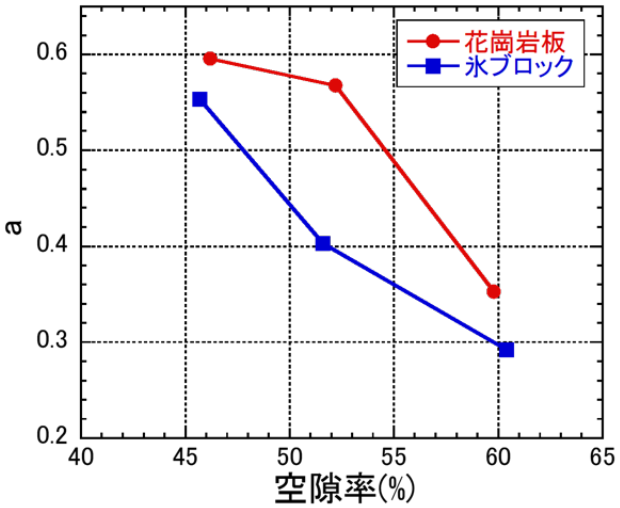


図 1：雪球の反発係数を表す定数aと空隙率の関係

粉体実験及び N 体計算による 放出物カーテン中での粒子衝突の研究

○岩澤聖徳[1], 黒澤耕介[2], 奥住聡[1], 長谷川直[3], 村主崇行[4]

[1]東京工業大学, [2]千葉工業大学, [3]宇宙航空研究開発機構, [4]理化学研究所

多くの固体惑星･衛星の表面地形を支配する衝突クレータは、太陽系天体が高頻度の天体衝突にさらされてきたことを物語る。衝突天体が起こると表面地殻物質が上空に向けて放出される. これを放出物カーテンと呼ぶ。我々はこのカーテン内で火山雷と同じような放電現象「衝突雷(しょうとつらい)」が起こる可能性に着目し研究を進めている。 火山雷は噴煙中の微粒子同士の相互衝突により電荷分離が起こり、最終的に絶縁破壊が起こる現象として理解されている。衝突雷も同様の過程で起こると期待される。

ところが、放出物カーテン中の構成粒子の相対速度分布は理解されておらず、帯電過程を予測することができない。 最近、Kadono et al. (2015)は粉体への衝突実験を行い、放出物カーテン中の粒子同士の非弾性衝突によって放出物カーテンに特徴的な網目パターンが形成されることを示した。網目パターンの有無や形成された場合の特徴長さは、構成粒子の相対速度や粒子同士の反発係数に依存すると期待される。

そこで本研究では、衝突雷の実証に向けた第一歩として、N 体数値計算による網目パターンの再現シミュレーションを行い、放出粒子の現実的な相互衝突速度の範囲を探ることを目指した。まず、N 体数値計算の初期条件を用意するため、数値衝突計算用のメッシュコードである iSALE を用いて、室内衝突実験をシミュレートし、放出物カーテンを構成する各粒子の速度データを取得した。次に、各粒子にランダムな相対速度を加えたものを初期条件とし、粒子計算の公開コードである REBOUND コードを用いて粒子の運動および非弾性衝突を追跡した。後者の粒子計算では、粒子の反発係数 ε と、粒子に付加するランダム速度と初期粒子速度との比 $\Delta v/v$ をフリーパラメータとした。

計算の結果、完全非弾性衝突($\varepsilon=0$)を仮定した場合は、$\Delta v/v>0.05$ ときの放出物カーテン内のパターン形成が起こるが、$\Delta v/v>0.2$ のときは形成されたパターンが次第に崩れることがわかった。より弾性衝突に近い $\varepsilon=0.8$ の場合は、$\Delta v/v=0.05$–0.15 の場合にパターン形成が起こることがわかった。さらに、カーテン内において粒子同士が衝突する時刻を調べたところ、相互衝突のほとんどは放出直後の短時間に起こっており、放出物カーテンが飛散する段階では粒子は基本的に無衝突で運動することがわかった。本発表では、これらの結果の解釈についても議論する予定である。

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏と、REBOUND の開発者である Hanno Rein, Shangfei Liu, David S. Spiegel, Akihiko Fujii, Dan Tamayo の各氏に感謝いたします。

iSALE に基づいた月の盆地の衝突条件

○石山謙[1]
[1]ISAS/JAXA

身近な天体である月には、表と裏側の領域があり、表と裏側では、地殻の厚さが異なっていたり、火山活動の活発さが異なっていたりしていることが知られている[e.g., Ishihara et al., 2009; Morota et al., 2011]。そのような表と裏の間には、スミス盆地という領域が存在しており、月の盆地の大きさは、衝突天体の直径、衝突時の月内部の温度勾配が強く影響することが知られている [e.g., Potter et al., 2012]。したがって、スミス盆地の形成時の月内部温度の解明は、月の火山活動史を解明する上で重要となる。

これまでの月の研究では、東の盆地やアポロ盆地などにおける iSALE を利用した研究が進められているが[Potter et al., 2013; Potter et al., 2018]、全て同じ温度勾配条件が使われている。例えば、Potter らは、温度勾配を 10K/km、リソスフェア厚を 144km で固定する条件を採用している。しかし、リソスフェア厚は、月の冷却により時間と伴に増加し、また、場所によっても厚さが異なる[Solomon and Head, 1980]。本研究では、2 次元の衝突シミュレーションコード(iSALE [Amsden et al., 1980; Ivanov et al., 1997; Wünnemann et al., 2006])を利用して、リソスフェア厚の影響を評価し、スミス盆地(半径 180km, 深さ 5km)が形成できる衝突条件(衝突天体の直径・衝突速度・リソスフェア厚)を推定する。

iSALE の計算領域では、1km/cell で、x 軸方向に 700km、y 軸方向に 900km の空間を準備した。y 軸上では、真空(400km)・地殻(60km)・マントル(740km)とした。衝突天体の物質は Dunite であり、衝突速度は 15〜20km/s、直径は 50, 70, 90km とした。月地殻は Gabbro、月マントルは Dunite である。これらの物質パラメータは、Potter et al. [2013]に基づいた。また、計算領域の設定は、Potter et al. [2012; 2013]とほとんど同じ大きさである。月の内部温度については、月表面温度を 273K とし、温度勾配を 10K/km とした。この時、リソスフェア厚を 80, 100, 120, 144km とした。ポスター発表では、iSALE シミュレーション結果の初期結果を示す。

P57

SLIM マルチバンドカメラのオートフォーカス機能開発

○佐藤広幸[1]、石原吉明[1]、佐伯和人[2]、仲内悠祐[1]
[1]JAXA 宇宙科学研究所、[2]大阪大学

小型月着陸ミッション SLIM に搭載予定のマルチバンドカメラ（MBC）は、着陸地点周辺の眺望撮像、および視野内転石中の鉱物を複数波長で撮像し、鉱物組成（特にかんらん石・輝石の Fe/Mg 比）の推定を行うことを目標としている。想定している被写体までの距離は数メートルから無限遠に渡るため、MBC はオートフォーカス（AF）機能を搭載しており、FPGA 上で動作する AF アルゴリズムを現在開発中である。ピントが合っている状態で撮像された画像は、シャープネスが最大となり、故に jpeg 圧縮後の画像ファイルサイズが最大となる。この傾向を利用し、圧縮後ファイルサイズが最大となるフォーカスレンズ位置を自動的に探す仕組みを基本概念として設計している。現在市販されているコンパクトデジタルカメラが採用している一般的な方式である。ただし、MBC では全ての処理を FPGA 上で行うため、使える演算の種類が限られる。また、フォーカスレンズの移動には時間がかかるため、極力レンズ移動に無駄がなく高速にピントが合うアルゴリズムを開発する必要がある。

撮像画像の jpeg 圧縮後のファイルサイズ（y）はレンズ位置（x）に伴ってガウス関数に似た変化を示す。本研究ではこの傾向を利用し、レンズ初期位置（x0）から y の最大値までの距離の関係を幾つかのパラメタを用いた数値マップとして予め作成しておく。実際の観測時にはこのマップを参照し、x0 付近の数回の撮像から y 最大位置近傍まで直接移動し、その後、レンズを微小に動かしつつ y 最大位置を探す。シミュレーション上では想定した挙動を示しているが、実際に撮像された画像を用いてこのアルゴリズムを検証する必要がある。MBC 試作機作成前の為、実際のカメラにこのアルゴリズムを組み込んだ試験は現段階では不可能である。代わりに市販の一眼レフカメラを用い、月面を模擬した室内実験場（宇宙科学研究所探査フィールド）で岩石サンプルを撮像した画像を用意し使用した。フォーカスレンズを細かく等間隔で移動しながら、全レンズ位置において撮像を行い、任意のピント状態を模擬した。これらの画像を使用し AF アルゴリズムを適用すると、限られた画角内の単一被写体に対しては有効であったが、全画角（異なる距離にある複数の被写体を含む）では機能しない場合があり、改善が必要であることがわかった。発表では、数値マップ作成や実画像を用いた実験結果の詳細を報告する。

SLIM-MBC 搭載 InGaAs 検出器の放射線耐性評価データに基づく観測性能検討

○仲内悠祐[1],佐伯和人[2],石原吉明[1],大竹真紀子[1],白石浩章[1],大槻真嗣[1],
佐藤広幸[1],本田親寿[3],前田孝雄[4],山中千博[2],五十嵐優也[2],萩島葵[2]
[1]宇宙航空研究開発機構,[2]大阪大学,[3]会津大学,[4]中央大学

JAXA は国内の大学と協力し、月着着陸実証機 SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) による重力天体へのピンポイント着陸に関する様々な技術の実証を計画している。SLIM プロジェクトによる精密航法制御アルゴリズム、画像認識航法、衝撃吸収脚などの技術実証により、重力天体への「降りやすい所に降りる」探査から「降りたい所に降りる」探査が可能となることが期待される。この技術を活用し、SLIM プロジェクトでは近赤外マルチバンド分光カメラ（Multi Band Camera：MBC）を用いた月マントル物質の Mg#の推定を試みる（関連発表：B2, B3, L1, P57）。

MBC は指向用ミラーを持つ望遠カメラである。検出器は、短波長側で 750nm 付近まで感度のあるインジウムガリウムヒ素の半導体イメージングセンサ（Vis-InGaAs imaging sensor）である Xenics 社製 XFPA-1.7-640_TE1 とし、10 枚のバンドパスフィルターをホイールにより駆動させ切り替えつつ撮像することでマルチバンド画像を得る（詳細：表 1）。MBC では Mg#の決定を念頭に、目標 S/N 比を 100 以上としている。

MBC の S/N 比を決める支配的要因の一つは検出器の性能である。宇宙空間において、MBC は放射線の影響を受け、検出素子の性能劣化が発生することが懸念される。我々は、高崎量子応用研究所、大阪大学産業科学研究所量子ビーム科学研究施設を用い、MBC への搭載を計画している Vis-InGaAs imaging sensor の放射線耐性試験（トータルドーズ試験）を行なった。試験ではガンマ線を段階的に照射し、トータル 162 ± 28 krad を照射し、明暗時のデータを取得した。本発表では、検出器性能の劣化を考慮し、ミッションで実際に得られるであろう MBC の S/N 比について検討した結果を報告する。

分光撮像性能	観測波長	750 nm, 920 nm, 950 nm, 970 nm, 1000 nm, 1050 nm, 1100 nm, 1250 nm, 1550 nm, 1650 nm バンド幅 30 nm
	分光方式	バンドパスフィルタ （フィルタホイールにより交換）
	検出器	VIS-InGaAs 撮像素子（冷却不要）
光学性能	FOV	4° 反射鏡を２軸ジンバルで駆動
	空間分解能	0.13 cm/pix@10 m

表 1）MBC 性能概要

月ペネトレータ探査APPROACHミッション

公募型小型ミッションの選定結果と今後の方針について

Lunar penetrator mission APPROACH
M-class mission proposal result and future plans

○田中 智[1]，後藤 健[1]，村上 英記[2]，山田 竜平[3]，川村 太一[4]，白石 浩章[1]，石原 吉明[1]，阿部 新助[5]，小野寺 圭祐[1]，早川 雅彦[1]，白井 慶[1]

Satoshi Tanaka[1], Ken Goto[1], Hideki Murakami[2], Ryuhei Yamada[3], Taichi Kawamura[3], Hiroaki Shiraishi[1], Yoshiaki Ishihara[1], Shinsuke Abe[5], Keisuke Onodera[1], Masahiko Hayakawa[1], Kei Shirai[1],

1,宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2, 高知大, 3, 会津大, 4, パリ地球物理学研究所, 5, 日本大

1, JAXA, 2,Kochi Univ., 3, Univ. Aizu, 4,Institute de Phisique du Globe de Paris, 5, Nihon Univ.

APPROACH(Advanced Penetrator Probe Applied for a Challenge of Hard landing) は，月面にペネトレータと呼ばれる貫入型プローブを周回軌道から投下して地中1−2mに設置し，月震観測による地殻構造決定と熱流量観測による温度構造および不揮発性元素量を決定することを主目的としたミッションである．本ミッションの前身となるLUNAR-Aミッションが2007年に中止となったが，イプシロンロケットでの打ち上げを前提とした小型公募ミッションに適合するように検討を行ってきた．その結果，ペネトレータ搭載を1機とし，震源情報として利用するインパクトフラッシュを地上観測ネットワークに加えて、小型衛星（EQUULEUS）に搭載予定のインパクトモニタカメラ（DELPHINUS）の改良モデルを搭載することとした．ペネトレータについては開発リスクが高いことからLUNAR-Aで設計開発したものを基本的に踏襲した．このミッションで得られたデータと「かぐや」，「GRAIL」，「LRO」などのリモートセンシングデータから月の不揮発性元素であるAlやUのバルク組成を高い精度で決定し，ジャイアントインパクトの初期条件（衝突速度や温度など）に制約を与えることが第一の科学目的である．

APPROACH-WGは2018年1月に公募型小型ミッション提案書を提出した．3月と5月の2回にわたりレビュー審査が実施され，7月に評価委員会からの報告書が発行された．結果的には本ミッションは不採用であった．

科学的な意義について一定の評価は得たものの，科学目標達成についての説明（準備）不足な点が多々指摘された．またシステム構成についても月面小型着陸機であるSLIMミッションのヘリテージを流用することを前提としていることもあり，十分な検討がされていなかった．適切な理工検討メンバーも十分とは言えず，議論不足であった．

3年間継続を基本的に限度とするワーキンググループ（WG）としては評価結果を踏まえ、さらにペネトレータ技術の持続性，検討メンバーの刷新に関して自己評価も行いWGを本年度で終了することに決定した．今後，外部資金によるペネトレータ技術の開発，ペネトレータ技術の持続性の検討は継続的に実施する．また，独立的に科学的価値のあるインパクトフラッシュの観測ネットワークの構築についても継続的に活動を行っていく所存である．

本ミッションを支援していただいた惑星科学会，特に工程表の改訂に携わっていただいた方々のご尽力に深く感謝する．

月サンプルリターンミッション“HERACLES”の着陸地点検討結果報告 ～HERACLES が目指す月科学～

A progress report on evaluation of a landing site for lunar sample return mission, HERACLES: Scientific Objectives of HERACLES

○長岡央[1]、石原吉明[1]、鹿山雅裕[2]、山本聡[3]、安部正真[1]、春山純一[1]、唐牛譲[1]
1）宇宙航空研究開発機構、2）東北大学、3）宇宙システム開発利用推進機構

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、欧州宇宙機関 (ESA)、カナダ宇宙庁 (CSA)、の 3 機関共同で検討を進めている有人月探査ミッションのプリカーサミッションが HERACLES (Human-Enhanced Robotic Architecture and Capability for Lunar Exploration and Science)である。HERACLES のミッション目的は、将来の有人月面探査の為の技術実証および月面からのサンプルリターンである。これには月近傍ステーション (Lunar Orbital Platform-Gateway; LOP-G) からの有人支援を前提としている。HERACLES ミッションのサイエンスワーキンググループ で議論を行う上で、国際的な月科学コミュニティからの意見を集約する目的で、国際科学定義チーム (International HERACLES Science Definition Team; iSDT)が組織された。iSDT は、１）着陸地点、２）採取試料の種類、採取方法および３）ローバーに搭載する科学観測機器のそれぞれの検討を行う 3 つのサブグループで構成され、ミッションで遂行すべき科学テーマの議論を行う。

iSDT の活動に先立ち、日本では、まず 2018 年 5 月 8 日に日本の月科学コミュニティの意見を集約する目的で、月サンプルリターンワークショップ（WS）を開催した。この WS ではサンプルリターン計画の“科学目的”とその“ターゲットとなる回収試料”、“着陸地点”、“その場観測”に関して、月惑星科学コミュニティから広く提案を募集した。集まった全 31 通の提案書に記載された 42 におよぶ科学テーマに対して、優先度の高い科学テーマの抽出と着陸地点選定を目的として、HERACLES 着陸地点検討会コアメンバーにより議論が行われた。その暫定結果を、8 月 21 日に開催された中間報告会において報告した。その後、中間報告会で出された意見や提案をもとに、コアメンバーおよび日本側の iSDT メンバーにより一次選考を通過した 17 テーマに対する順位付けが行われ、最終的に優先度の高い月科学テーマを 5 つに絞り込んだ。この選定プロセスの中では、提案された科学の実現性、目的となる試料の回収実現性（もしくはその場観測の実現性)、提案された科学が実現した場合の波及効果を、それぞれ詳細に評価することで科学テーマに順位づけを行った。本ポスター発表ではその選定プロセス並びに選定結果について報告する。

月サンプルリターンミッション“HERACLES”の着陸地点検討結果報告 ～着陸候補地点の紹介～

A progress report on evaluation of a landing site for lunar sample return mission, HERACLES: Introduction for landing site candidates

○山本聡[1]、石原吉明[2]、鹿山雅裕[3]、長岡央[2]、安部正真[2]、春山純一[2]、唐牛譲[2]
1）宇宙システム開発利用推進機構 2）宇宙航空研究開発機構　3）東北大学

現在、欧州宇宙機関（ESA）リードの元、カナダ宇宙庁（CSA)、宇宙航空研究開発機構(JAXA）の 3 機関共同で検討が進められている有人月探査ミッションのプリカーサミッション HERACLES (Human-Enhanced Robotic Architecture and Capability for Lunar Exploration and Science)は、月近傍ステーション（Lunar Orbital Platform-Gateway; LOP-G）からの有人支援を前提とした月面無人探査計画である。基本的ミッション目的は、将来の水極域資源探査等も見据えた有人月面探査ミッションの為の技術実証および月面からのサンプルリターンである。現在、HERACLES ミッションのサイエンスワーキンググループ（SWG)において、月着陸地点、採取サンプルの種類、採取方法およびローバに搭載する科学観測機器等の「科学」に関する議論を行っている。一方 SWG で月科学の議論を行うにあたり、国際的な月科学コミュニティからの意見を求めるため、国際科学定義チーム（International HERACLES Science Definition Team; iSDT）を組織して議論を進めている。その iSDT の活動に先立ち 2018 年 5 月 25 日において、日本の月科学コミュニティの意見を集約する目的で、HERACLES 着陸地点検討会が発足した。HERACLES 着陸地点検討会コアメンバーにより、8 月 3 日までに月科学コミュニティから提案された全 31 通の提案書に記載された 42 におよぶ科学テーマの中から優先順位の高いテーマの抽出が行われ、8 月 21 日の中間報告会において、第一選考として選ばれた優先順位の高い 17 テーマについての結果報告が行われた。その後、中間報告会で出された意見や提案を集約し、コアメンバーおよび日本人 iSDT メンバーにより 17 テーマに対する順位付けが行われ、最終的に 5 サイト候補地点までの絞り込みを行った。本ポスター発表では、最終的に選ばれた 5 サイト候補地点について、かぐや搭載の地形カメラ・マルチバンドセンサーやハイパースペクトルセンサーなどのリモートセンシングデータを基にした地質的特徴の紹介を行う。

FDTD 電磁界シミュレーションに基づくレーダによる月表層の氷検出可能性の検討

Feasibility study of the detection of the lunar subsurface ice based on electromagnetic simulation using FDTD method

○熊本篤志[1]，宮本英昭[2]，西堀俊幸[3]，土屋史紀[1]，石山謙[3]
[1]東北大学大学院理学研究科,[2]東京大学大学院工学系研究科
[3]宇宙航空研究開発機構

ローバ搭載高分解能地中レーダによる月極域での地下氷探査を想定して，月表層での電波伝搬を FDTD 法 (Finite-difference time-domain method) を用いた電磁界シミュレーションによって再現し，空隙率が連続的に変化するような媒質中での氷の検出可能性を検討した．月面にもたらされた水は光解離によって約 20 時間で宇宙空間に失われるが，それまでに極域の永久影の領域に跳躍移動できた成分は消失を免れ，地下等に存在している可能性が理論的に示されていた [1]．また LCROSS による南極 Cabeu クレータでの衝突実験 [2] や Chandrayaan-1 の SAR 偏波観測 [3] からも氷の存在が示唆されている．ローバ搭載高分解能地中レーダ(1～15 GHz)は，氷の有無に加えて，氷がある場合にその分布形状を明らかにすることができる点にメリットがある．仮に氷の存在が確認された場合，次に課題となってくるのは集積メカニズムの解明である．具体的な氷の深さ・形状・サイズ等は，これらの議論には欠かせない基本的パラメータである．

本研究では，FDTD 電磁界シミュレーションに Meep コード [4] を使用した．幅 5 cm，高さ 1 m の２次元空間を 0.5 mm×0.5 mm のグリッドに分割し，上半分を真空，下半分を玄武岩 soil とした．玄武岩 soil の空隙率は Apollo の観測をもとにした経験式 [5] で与え，各グリッドで 0～1 の乱数を発生させ，空隙率より小さい場合は真空 ($\varepsilon_r = 1$)，大きい場合は玄武岩 ($\varepsilon_r = 7.3$)の誘電率を設定した．玄武岩 soil の上端（月表面）から 25 cm の深さに厚さ 0.5 cm の層を置き，この層内では空隙を氷($\varepsilon_r = 3.2$)で満たした．月表面より 25 cm 上方に波源を置き，1～15 GHz の帯域を 1.33 ns で掃引するようなガウス関数状のチャープパルスを生成し，全グリッドの電磁場を(1.67/8) ps の時間間隔で時間発展させた．波源の位置で電場を記録し，これを地中レーダ観測の模擬データとした．波形振幅の変化では地下エコー成分の識別が難しいため，レンジ圧縮を適用して地下エコー成分の識別可否の確認を進めた．発表では，波長スケール以上の氷塊を含む場合，減衰率を考慮した場合，氷層の構造がランダムな場合など，さらに現実的なケースについても報告を行う．

References

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

月火星の地下空洞直接探査 UZUME 計画　その３

○春山純一（JAXA）　月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ。

一昨年 6 月、宇宙理学委員会により、「月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ」の設立が承認されたことはこれまでも当学会秋季講演会で紹介してきたとおりである。UZUME 計画として研究を重ねてきたものが、正式にプロジェクト化へ向けて開始するように容認されたことになる。

この一年では、月火星の地下空洞直接探査の科学目標を惑星科学の動向の中で位置づける議論を深めてきた。

惑星科学会の RFI 回答で記されている「生命の存在や存在可能環境の探索」すなわち、「ハビタビリティ（生命圏、居住圏）の理解」に資するデータを取得するという惑星科学の目的から起こして各種課題の整理をし、その課題解決に対する月地下空洞探査の位置づけを明確にすることとし、添付の「補足」の様に、①物質、②エネルギー、③環境の観点から、科学目標（目的）・課題を整理しているところである。

更に科学課題の整理に並行して、探査のモデルミッションを策定し、開発項目の洗い出しを開始した。モデルミッションとしては、3 つのタイプ①小型探査（ペイロード PL 数 kg）、②中型（PL 数 kg～10kg 程度）、③大型 S/R 探査（PL 数 10kg 超）といった各種ミッションレベルへの対応を整理検討し始めている。これら検討をもとに、年内には、RG から WG 化へと進もうしている。

なお、最近では、国際的にも、関連研究成果が取り上げられるなど、月火星の地下空洞直接探査の重要性、意義の理解は確実にそして急速に広まってきている。例えば、国際宇宙探査の方向性議論に影響力がある 2018 年 2 月発行の「International Space Exploration Coordination Group」による「Global Exploration Roadmap」の第三版（ISECG/GER3）では、月地下空洞（溶岩チューブ）の科学的重要性が強調されている。また、米国議会公聴会でも「放射線の観点から、（月の）溶岩チューブは、基地建設場所の候補」と NASA も明言した。月火星地下空洞の「科学探査」の検討も海外でも本格的になってきた。例えば、米国ジェット推進研究所（JPL）を中心として、二輪ローバによる縦孔探査を目指す「Moon Diver」チーム（来年の NASA/Discovery 公募に応募出来るように準備中）がある。我々のグループも、Moon Diver チームとどのような協力ができるかを検討開始し、議論を開始している。

本講演では、月火星の地下空洞直接探査をとりまく内外の情勢をふまえ、我々の活動を報告する予定である。

火星衛星探査計画 MMX とそのサイエンス 2018

○倉本 圭[1,2], 川勝 康弘[2], 藤本 正樹[2], 玄田 英典[3], 平田 成[4], 今村 剛[5], 亀田 真吾[6], 松本 晃治[7], 宮本 英昭[5], 諸田 智克[8], 長岡 央[2], 中川広務[9], 中村 智樹[9], 小川 和律[10], 大嶽 久志[2], 尾崎 正伸[2], 佐々木 晶[11], 千秋 博紀[12], 橘 省吾[5], 寺田 直樹[9], 臼井 寛裕[2], 和田 浩二[12], 渡邊 誠一郎[8], MMX study team

1.北海道大学, 2.JAXA, 3.東京工業大学, 4.会津大学, 5.東京大学, 6.立教大学, 7.国立天文台, 8.名古屋大学, 9.東北大学, 10.神戸大学, 11.大阪大学, 12.千葉工業大学

火星衛星探査計画 MMX(Martian Moon eXploration)は, フォボスとダイモスの近傍観測と, フォボスからのサンプルリターンにより, 火星衛星の起源を明らかにし, 内外太陽系接続領域における惑星形成過程と物質輸送に制約を与えるとともに, 火星圏進化史に新たな知見を加えることを主目的とする. 2024 年の打ち上げと約 5 年の往還期間の設定の下, 探査機システム, 搭載機器, 観測運用と着陸運用等について, 現在精力的な Phase-A study が進行中である. 本稿ではその結果について, 科学観測機器の役割に絞り紹介する.

望遠カメラ (TENGOO), 広角分光カメラ (OROCHI), 近赤外分光カメラ (MacrOmega), 中性子γ線分光計 (MEGANE), イオン質量分析器 (MSA), レーザー測距装置 (LIDAR), 火星圏ダストモニター (CMDM) からなる搭載観測機器群は, 試料分析と相補的に火星衛星の起源を判別する独立指標を明らかにするとともに, サンプル採取地点の選定, 特徴付け, そして火星圏の変遷・進化過程の解明のための観測データを得ることを目的とする.

まず観測を組み合わせ, 衛星の全球組成について多角的な制約を得ることにより, 衛星の起源の判別につなげる. mスケールの空間分解能で, 宇宙風化の影響が限定的な新鮮な露出面を探索し, それらについて特に水和鉱物の特徴の有無に着目した分光撮像を行う. もし大量に水和鉱物が見いだされれば, 揮発性物質に富む始原的小惑星の捕獲説が支持される. 中性子γ線分光計は, 衛星全体の表層数十 cm の深さで均した元素組成を決定する. 例えば Fe/Si 比がコンドライト組成より顕著に小さければ, 衛星構成物質への火星マントル物質の寄与, つまり巨大衝突説が支持される. イオン質量分析器は衛星から放出される水分子に由来するイオンの検出を試みる. もし大きな水放出フラックスが導かれれば, 衛星内部の氷の存在が示唆され, これは捕獲起源を支持する. レーザー測距と撮像を組み合わせた探査機の軌道の精密決定と, そこから導かれる詳しい衛星重力場と秤動からは, フォボス内部の質量分布が制約できる. これも内部の氷の有無の判定に寄与する.

衛星軌道から, ほぼ火星全球を視野に入れた可視・赤外撮像を行う. これによって, 大気進化の一端を担う表面リザーバー間の水・ダスト交換過程に着目した, 火星大気の動態を明らかにする. 火星大気から流出するイオンのフラックスをイオン種別に測定し, 火星大気の散逸過程を調べる. また, 周火星空間でダストフラックスの測定を行い, 衛星由来のダストリングの検出を試みるとともに, 宇宙塵の衝突による衛星表面の変質過程に迫る. 衛星全球の詳細撮像データを用い, 特色ある地形の成因に迫るとともに, クレーター年代学の精度を高め, 衛星地質史の解明を進める. 衛星固有物質だけでなく, 後天的に付与された火星表層由来物質を微量含むと予想される帰還試料の多角分析と併せて, 火星圏の進化過程の解明を推し進める.

リモートセンシング機器から得られる全球にわたる詳細地形と物質分布は, 安全面と科学面を併せた試料採取点の選定の検討材料にも用いる. また採取点とその近傍のクローズアップ観測も行って, これと全球データを照らし合わせることにより, 採取サンプルの衛星固有物質としての代表性を担保する.

ローバーなど分離機の搭載についても検討がなされている. 具体的な観測装置は未定だが, 着陸安全性の確認, 分光観測データやサンプル分析の解釈に資する衛星表層の粒子堆積構造や熱環境の計測, その場での表層物質組成の計測などが, 果たしうる重要な役割として議論されている.

発表では, ミッションシナリオ, 探査機システム, サンプリング手法なども交え, MMX 計画の進捗状況と最新の検討結果について, サイエンス面を中心に紹介したい.

火星衛星探査計画における 望遠カメラ(TENGOO)性能評価装置の開発

○加藤博基, 長田直也, 亀田真吾[1], 塩谷圭吾[2]

[1]立教大学, [2]JAXA

火星の衛星であるフォボスとダイモスの起源については捕獲した原始小惑星である説と、火星への巨大衝突による破片が集積し形成された説の２つが存在する。この火星衛星の起源を明らかにするために、JAXA はフォボスからサンプルリターンを行う火星衛星探査計画(Martian Moon eXploration)を 2020 年前半に打ち上げを検討している。

この計画に搭載される望遠カメラ(Telescopic Nadir imager for Geomorphology, TENGOO)はフォボスの地形を撮像し、平坦な着陸地点や宇宙風化の影響が少ない地点を発見するという目的を持っている。この目的を果たすため、高度 20km での観測において空間分解能が 24cm となるように、角度解像度が 5.79urad/pix、MTF>0.3(ナイキスト周波数)と光学設計が行われた[長田直也,2016]。

この光学設計の段階で得られた性能が製造された際にも確保されているか評価する必要がある。従って本研究では TENGOO の性能評価を行うために、平行光が入射したときの点像関数の広がりを十分な精度で求める。そのため平行光の角度広がりが 11.6urad 以下の平行光源を作成した。またこの装置を使用し検証用の望遠鏡の点像関数の測定を行った。

本発表では、これらの研究開発の成果を報告する。

撮像データを用いたDePhineミッションにおけるPhobosフライバイ軌道の復元のシミュレーション

○山本圭香[1], Konrad Willner[2], Ramona Ziese[3], Jürgen Oberst[2], 松本晃治[1]
[1]国立天文台, [2]ドイツ航空宇宙センター, [3]ベルリン工科大学

本研究では、カメラの画像データを探査機の精密軌道決定に用いるためのソフトウェアを開発し、そのソフトウェアを用いた軌道および天体の物理パラメータ復元のシミュレーションをおこなった。テストケースとして、火星衛星Phobosを対象天体とし、フライバイ時の探査機軌道からの撮像を仮定した。

まず、シミュレーションに使用するモデルデータセットの作成をおこなった。探査機軌道は、火星を軌道積分の中心とし、火星の引力加速度（20次まで）、惑星の3体加速度、Phobosの3体加速度、太陽輻射圧による加速度を考慮し、軌道積分をおこなうことにより生成した。次に、Phobosの形状モデルからカメラによる画像を生成した。続いて、この画像データを軌道決定に導入するために、形状モデルを用いてPhobos固定座標系で複数の表面特徴点座標の定義をおこない、これら特徴点の各時刻における画像平面上での位置座標をテキストファイルとして出力した。そして、形状モデル上での位置座標と、画像平面上での位置座標を関係付ける式、およびその偏微分を計算し、軌道決定ソフトウェアを画像データ入力に対応できるよう整備した。このソフトウェアを用い、シミュレートされた画像データを観測データとして、最小二乗法による探査機軌道の初期状態ベクトル、天体の物理パラメータの推定をテストした。使用する特徴点の数と空間分布、使用する撮像の数、カメラの焦点距離と視野角、イルミネーションの効果等の条件を変えたさまざまなシミュレーションによって、各種パラメータ推定にとって理想的な観測条件について検討した。

特徴点の数については、点ができる限り全球に均一に分布していることが望ましく、その数については、数10個以上ではそれ以上増やしても特に大きな改善は望めないこと、５個程度であっても、反復改良の回数は要するものの、解が収束することがわかった。カメラについては、視野角が狭いものほどピクセル座標上での点同士の分離が良いため短い反復改良回数で解が収束する一方、イルミネーションの変化を考慮する場合は視野角の広いものが有利であり、そのトレードオフが必要であることがわかった。

DESTINY+によるふたご座流星群母天体 Phaethon の高速フライバイとダストその場分析

○荒井朋子[1]、小林正規[1]、石橋高[1]、吉田二美[1]、木村宏[1]、平井隆之[1]、洪鵬[1]、Ralf Srama[2], Harald Kruger[3], 渡部潤一[4,5]、伊藤孝士[4]、石黒正晃[6]、薮田ひかる[7]、大塚勝仁[8]
豊田裕之、西山和孝[5]、高島建[5]、DESTINY+サイエンスチーム
[1]千葉工大・惑星探査研、[2]University of Stuttgart、[3]Max Planck Institute、
[4]国立天文台、[5]JAXA・ISAS、[6]ソウル大学、[7]広島大学、[8]東京流星観測網

DESTINY+ mission: High-speed flyby observation of Geminids parent asteroid (3200) Phaethon and in-situ dust analyses

○Tomoko Arai[1], Masanori Kobayashi[1], Ko Ishibashi[1], Fumi Yoshida[1], Hiroshi Kimura[1], Takayuki Hirai[1], Peng Hong[1], Ralf Srama[2], Harald Kruger[3], Junichi Watanabe[4,5], Takashi Ito[4], Masateru Ishiguro[6], Hikaru Yabuta[7], Katsuhito Ohtsuka[8], Hiroyuki Toyota[5], Kazutaka Nishiyama[5], Takeshi Takashima[5], DESTINY+ Science Team
[1]PERC, Chiba Institute of Technology、[2]University of Stuttgart、[3]Max Planck Institute、
[4]National Astronomical Observation of Japan、[5]JAXA・ISAS、[6]Seoul University、
[7]Hiroshima University、[8]Tokyo Meteor Network

DESTINY+ (Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUst Science) is a joint mission of technology demonstration and science observation. The science objective is twofold, first to conduct high-speed flyby imaging of Geminids-parent, active asteroid Phaethon and second, to perform in-situ dust analyses of interplanetary dust, interstellar dust around 1 au during cruising phase and dust around Phaethon. The onboard payloads include panchromatic telescopic camera, visible-NIR multiband camera, and dust analyzer. The cameras are developed by PERC, Chiba Institute of Technology and dust analyzer by University of Stuttgart. Here, we present the overview and the latest status of DESTINY+ science mission.

現在フェーズ A 検討中の深宇宙探査技術実証機 DESTINY+は理工合同ミッションである。工学ミッションでは、小型ミッションによる深宇宙探査を実現するため、電気推進による宇宙航行技術を発展させ、電気推進の活用範囲を拓くと共に、フライバイ探査技術を獲得し、小天体探査の機会拡大を目指す。理学ミッションでは、ふたご座流星群の母天体である活動小惑星(3200)Phaethon の高速フライバイ撮像を行うと共に 1au 付近の惑星間ダスト・星間ダスト、Phaethon 周辺ダスト粒子毎の質量、到来方向、化学組成をその場分析を行う計画である．搭載予定機器は、高速追尾機能を有する望遠カメラ、可視近赤外マルチバンドカメラ及びダストアナライザ。カメラ二台は千葉工大が、ダストアナライザはシュツットガルト大学が開発する。本稿では，理学ミッションの概要と検討の最新状況を報告する．

木星トロヤ群探査 OKEANOS の現状

岡田 達明[1,2], 岩田 隆浩[1], 中条 俊大[1], 松本 純[1], 癸生川 陽子[3], 青木 順[4], 伊藤 元雄[5],
松岡 彩子[1], 森 治[1], OKEANOS 検討チーム
[1]JAXA 宇宙科学研究所, [2]東京大学, [3]横浜国立大学, [4]大阪大学, [5]JAMSTEC 高知コア研究所

ソーラー電力セイルによる外惑星系探査計画OKEANOS（Oversize Kite-craft for Exploration and AstroNautics in the Outer Solar-system）が提案されており，木星トロヤ群小惑星がその到達目標になっている．OKEANOSは次期中型宇宙探査ミッションの候補の一つであり，宇宙工学を主体とする先進的かつ挑戦的な工学実験ミッションであり，そこに理学観測を加えたものである．一辺約40mの大面積薄膜太陽電池によって太陽距離5.2AUの木星軌道でも3kW以上の発電を行い，低燃費のイオンエンジンを駆動するハイブリッド推進により，外惑星系の探査の実現を目指す[1].

木星トロヤ群小惑星は太陽・木星系のラグランジュ点付近に分布し，その多くが揮発性に富むD型またはP型小惑星に属する．木星トロヤ群小惑星には太陽系史の解明につながる証拠が残っている可能性があり，探査対象としての重要性が高い．太陽系の惑星形成後の惑星移動による物質攪拌の可能性がNICEモデル[2]等で考えられているが，木星トロヤ群小惑星の素性を調べれば，TNO領域起源か小惑星帯起源かどうか，判定できるかもしれない．例えば構成物質が小惑星的か彗星的かは岩石質と有機物の比率，平均密度（C型小惑星＞1000kgm^{-3}＞彗星），同位体比（H/D，^{15}N/^{14}N）のが指標となる．また含まれる有機物の種類や重合度もまた，天体形成後の物質進化の状況を知る指標となる．

米国Lucy[3]が木星トロヤ群小惑星6個をフライバイすることで，トロヤ群小惑星の多様性を調査するが，OKEANOSは一つの天体をランデブーと着陸によって詳細に観測するという，相補的なミッションである[4]．OKEANOSは赤外背景放射，ガンマ線バースト天体位置同定などの宇宙物理探査，黄道光観測や太陽系内磁場やダストの動径分布など太陽系内部を計測しながら，片道13年かけて木星トロヤ群小惑星にランデブーする．到着時の距離は，対象天体サイズの10～20倍の距離に相当する250～350kmである．先ずリモセン観測によって，小惑星の全体形状，自転状態，表面地形，含水鉱物や有機物分布，熱物性分布，鉱物分布，重力（平均密度）を調査する．搭載機器は近赤外Imaging Spectrometer，熱赤外マルチバンドカメラ，航法兼用の光学カメラ（フィルタ付き望遠，単色広角）とレーザ距離計のほか，磁力計やダスト検出器である．降下運用によって高度50km，続いて1kmまで降下し，表層状態を高解像度で調べ，着陸地点を選定する．高度1kmまで降下して着陸機を分離し，着陸して表層探査を実施する．着陸機搭載機器は，サンプル採取装置，質量分析計，分光顕微鏡，パノラマカメラ，熱放射計，および磁力計，元素分析装置（APXS等）が想定されている．観測装置の過半数は国際協力によって提案される予定である．推薬に余裕があれば，1.5年の滞在期間終了後に2つ目の木星トロヤ群小惑星を訪問する予定である．現在は，ミッションの更なる最適化と搭載機器の先鋭化に努めている．

[1]Mori O. et al., Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan.16, 328, (2018), [2]Morbidelli, A et al., Nature 465, 362 (2005), [3] Levison, H.F. et al., LPSC 48, 2025, (2017), [4]Okada, T. et al., PSS 161, 99 (2018).

小惑星探査計画 OKEANOS：その場質量分析機器開発の現状

○伊藤元雄[1]，松本純[2]，癸生川陽子[3]，青木順[4]，河井洋輔[4]，渡邊元樹[2]，池田崚太[2]，久保勇貴[2]，岡田達明[2]，Noel Grand[5]，Arnaud Buch[6]，横田勝一郎[4]，圦本尚義[2,7]，豊田岐聡[4]，森治[2]

[1]JAMSTEC，[2]JAXA，[3]横浜国大，[4]大阪大，[5]LISA，CNRS，[6]Centrale Paris，LGPM，[7]北海道大

OKEANOS (Oversize Kite-craft for Exploration and AstroNautics in the Outer Solar system)は、ソーラー電力セイルとイオンエンジンを搭載した探査機による外惑星領域探査ミッションである。このミッションでは、木星軌道上のラグランジュポイント（L4，L5）上にある木星トロヤ群小惑星（D/P 型）のランデブーと着陸探査を両立する。本探査の科学目標は（1）木星・土星の太陽系内動径方向移動モデルの検証、（2）原始惑星系円盤における揮発性物質の分布と進化、（3）太陽系内有機物の起源と進化、（4）スノーライン以遠の小天体の起源と進化に対する新たな知見を得ることにより、太陽系の形成・進化過程への理解を飛躍的に向上させることにある。これらの目標を達成するために、クルージング、および着陸探査時の分光観測以外に、小惑星最表面および深さ１m 程度から得られるレゴリスに含まれる揮発性物質（氷や有機物）の同定とこれらの軽元素同位体比のその場質量分析を行う。

そこで我々の研究グループでは、惑星探査機に搭載可能な小型、高精度と高分解能を可能とする質量分析システム（High Resolution Mass Spectrometry，HRMS）の開発を行なっている。HRMS は、得られるレゴリス中の有機物、含水鉱物、揮発性物質（H_2O，CO_2，NH_3 等）中の水素、酸素、炭素と窒素の同位体比、m/z~300 程度までの有機物を測定対象とする。質量分析可能範囲は m/z で１~300、質量分解能は 30,000@m/z~300 と質量誤差 <10 ppm が開発目標である。同位体比測定では、水素同位体比±10%、酸素は$\delta^{17}O$ で±5%以下、窒素±5%、炭素±1%の誤差範囲内での測定を目標としている。

システムの質量分析部は大阪大学で開発が進んでいるマルチターン飛行時間型質量分析計（MULTUM）を据えることで必要な小型、高精度と高質量分解能を実現させる[1]。ランダー搭載の検討案では、総重量 5kg 程度、装置サイズは 20×20×10 cm 以下、そして消費電力 60W 程度が提示されている。HRMS 本体だけではなく、小惑星表面と地下からのサンプリングを可能とするサンプリングシステム、熱分解するためのパイロライザー、ガスクロマトグラフィー、イオン化するための電子衝撃型イオン化機構、検出器、高速パルス高圧電源・スイッチング回路、高速読み出し処理などの要素技術も同時に検討を進めている。

本講演では、その HRMS と周辺機器群の開発状況について報告する。

[1] Shimma S. et al. (2010) *Anal. Chem.*, **82**, 8456.

太陽風を利用した周回軌道での小天体表面同位体質量分析手法の開発

○横田 勝一郎[1], 寺田 健太郎[1], 齋藤 義文[2], 加藤 大羽[2], 綱川 秀夫[3]
[1]大阪大学, [1]宇宙科学研究所, [1]東京工業大学,

天体表面物質分析では着陸機探査によって著しい成果が出ているが、周回探査機に比べると着陸機は開発や観測運用においてコストとリスクを要する。我々は、太陽風照射によって発生する天体起源二次イオンの計測により周回軌道上から天体表面の質量同位体分析を行う手法の確立を目指している。

周回探査機による科学観測では日本でも多くの実績があり、その中で宇宙（惑星磁気圏）プラズマ物理研究を目指した宇宙機用プラズマ観測器は数多く開発されている。月周回探査「かぐや」搭載の質量分析器では月の表面から発生したイオンが観測されている。大規模な大気・固有磁場を持たない月・小惑星などの小型天体では、太陽風の直接照射によって表面から二次イオンが発生すること（スパッタリング）が室内実験等で知られている。「かぐや」による月起源イオン観測は、実績豊富な技術だけで小型天体表面物質の遠隔同位体質量分析が可能であることを示している。

「かぐや」など既存のプラズマ観測データを利用して、太陽風によって発生する天体表面起源二次イオンフラックスの評価を行った。最終的には太陽風による二次イオン放出の特性を検証し、汎用的な表面物質情報を得る解析手法を確立することを目指している。「かぐや」では太陽風やUVの直接照射を受ける月周辺のプラズマ環境が1.5年観測されている。質量分解能M/ΔM～20は重イオンの分別に十分ではないが、月面物質を構成する金属イオン相当のカウントは得られている。観測データから太陽風パラメータに対応した二次イオン放出率を求めて、周回軌道上でのイオン観測から月面組成比を導出する手法について考察する。スパッタリング現象として見る場合、太陽風のエネルギー帯（～1 keV）では実験室プラズマで典型的な高エネルギー領域（>10s keV）と比較してモデル化が遅れている。追加のスパッタリング実験や、最近のスパッタリングモデル（SDTrimSP）を利用して、太陽風による天体表面での二次イオン放出のモデル化に迫る。本発表では、「かぐや」観測データから得られた月面組成を紹介し、二次イオンを用いた月表面の「天然」SIMS 分析について評価する。本研究成果は火星衛星探査計画MMX等の将来月惑星探査への展開を考えている。

月の海が常に地球を向く真の理由，

マルチインパクト仮説を用いて地球と月の起源[2014 U06-P24(3)]から進化のAbduction で検証．

True Reason *why the front of Moon always faces to Earth,*

I verified ***the Origin of Earth and Moon[2014 U06-P24(3)], by Abduction using the result of evolution***

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2018 -9

月の幾何学的中心は、質量中心から約 2km ずれていることが知られている[1]。此の原因として **Y. Toda and Y.阿部**は、特別なメカニズムは不要であり表側と裏側のランダムな衝突数 N の差として説明でき,その結果として地殻のアシンメトリーの確立後に月の潮汐ロックが起きる仮説[2]を述べている。しかし,その N 数差の原因を述べていないので**結果論に過ぎない。**クレーター数の差は観測結果では実証出来ない。何故なら，潮汐ロックにより内側ほど衝突確率は地球の影の分だけ**確実に減る。**

逆に，*偏芯の真の原因が別に有り，共通重心の周りを互いに巴回転する場合，月の重い部分が**常に中心(地球内部の共通重心)に向いた状態と成る**ことが(**Y.阿部先生のご指摘の様に**)説明できる。*

◎マルチインパクト仮説[3]は，*月と地球の起源仮説*として既に Abduction で検証し発表している。

再現実験の不可能な**起源仮説の検証は,進化の複数結果を全て統一的に説明する Abduction と云う方法で検証できる**。***初期状態は不明でも，現実に一度限りの進化は起きて現状と云う結果は，太陽系の惑星や，特に地球や月の複数の特徴の全ての謎を説明する事で，仮説の検証が可能である。***

今回,***追加の月の特徴(偏芯)を説明できる事で,更に月の起源仮説[3]の真実性を増すことができた。***

Cf. ジャイアントインパクト仮説シミュレーション[4]は，**軌道エネルギーさえ説明が困難である。**

<月偏芯(2kma)の起源メカニズム>　・・・・月が偏芯しないと，公転と自転の同期は起きない.

マルチインパクト仮説では,小惑星帯位置に形成された原始惑星 CERRA がその外側に集積された巨大質量惑星(木星)の摂動で,軌道エネルギー(長半径)は保存されて木星近点側に偏平化して,木星と太陽の引力が釣り合う地点で潮汐断裂し,トレーンマントル断裂小惑星が楕円軌道を廻る。

地球のマントルは地表付近 6g/cm³～コア付近 7g/cm³ と内部程高密度です。*衝突時には溶融減圧により膨張するが，急冷されても密度差は差として残るため,ニュートンの揺り篭の様に射出された月は，溶融し球形と成るが完全に混合されず偏芯する。表面は軽密度の溶融したマントルでカバーされるが，後から隕石が表面(重い側)に衝突すると内部の高密度マントルが再溶融し膨張し流出し月の海(玄武岩)が形成され兎の模様と成った。*マグマオーシャン時の衝突[4]では偏芯は起きない。

<マルチインパクト仮説の検証結果>　・・・全ての特徴が統一的に説明でき，起源の謎が解消.

月の起源として①マントルインパクターなので**月がマントル成分。**②衝突速度と角度 12.3km/s, 36.45 度　③月軌道 Rm エネルギー(軌道半径)**60×Re**；(Re=6400km)　④必然複数衝突(**大絶滅**起源)　⑤40 億年前の隕石重爆撃期の謎=軌道偏芯の時間　⑥<今回のテーマ>**月の海が常に地球を向く理由(地球コア偏芯(≒500km)の起源メカニズム)　・・・コアの偏芯はバンアレン帯の偏芯を説明.**

⑦*月射出マントル欠損のアイソスタシ隆起*　⑧*深海洋底の起源*　⑨*環太平洋背弧海盆と海溝の起源*

[1] Bills B. G. and Ferrari A. J. (1977) Icarus, 31, 244-259.

[2]The Giant Impact and the Formation of the Moon P46.Des.1-3, 1998 MONTEREY,LIFORNIA

[3]種子彰　月形成仮説(マルチインパクト仮説) Sep.2014 P1-22　日本惑星科学会　秋季講演会

[4] Benz W. et al. (1986) Icarus, 66, 515-535., Benz W. etal. (1987) Icarus, 71, 30-45.

起源仮説の検証は,進化の結果を利用したアブダクションで検証可能

Verification of Origin Hypothesis can be verified with Abduction using evolution resuls.

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2018 -

1. テーゼ　SCIENCEの目的,　それは宇宙の謎,太陽系の謎を説明することにある。

2. 進化の結果を利用した創造的推論 (Abduction)で物理的に意味のある仮説を検証可能.

タイムマシンも無く再現実験や実証が困難な起源の検証は,物理的に意味が有り独創的な仮説を仮定し,一度限りの進化の複数結果を統一的に全て説明できればAbductionで検証できたと云える。

•••••マルチインパクト仮説[1]は下記の全てを統一的に説明できる事が**Abduction**で検証できたと云える。••••••••

3. マルチインパクト仮説[1],--小惑星帯と月と地球深海洋底とプレートテクトニクスの起源--

小惑星帯位置に集積した分化した原始惑星CERRAが、その後に集積した巨大惑星JUPITERの摂動で，軌道がJUPITERの近点に向かう楕円軌道と成った。　木星と太陽の引力による潮汐破壊によって、①マントルの断裂片は②トレーン小惑星になり、太陽の周りを廻り地球と③時間差衝突することで生物種の大絶滅が衝突で生じた。④マントル欠損となり⑤4kmの深さの七つの海はアイソスタシーで形成された。断裂片の太平洋位置への衝突は,⑤マントルだけの⑱偏芯した月の射出と、⑥環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源と成る。⑦高緯度への衝突はティチス海の形成と⑧プレート移動方向の急変と⑨地軸移動と傾斜の起源と成った。　⑩凹プレートと凸プレートが押し合うと、凹プレートの下に凸プレートが変形して潜り込み始める。⑪駆動力は地球の慣性モーメント偏芯を最小にする偶力であり、⑫高緯度への衝突による自転軸の傾斜は⑬移動方向の急変を引き起こす理由である。

4. マルチインパクト仮説,--月の起源--　　3D•N体シミュレーションでは,初期条件の証明が不可能 !

(1) 月の起源の謎　:①CERRAのマントル断裂片が地球の太平洋位置に衝突し,⑭地球マントルの月を射出.

(2) マントルだけの月の謎　:①CERRAのマントル断裂片の衝突で,⑭ニュートン揺篭の様に地球マントル射出.

(3) 月軌道の謎　:衝突速度⑮12.4kmと角度⑯36.5度で,現状の⑰月軌道位置(60×Re)まで射出.

(4) 月が常に地球に表面だけを向ける謎　:⑱地球のマントルは内側ほど高密度で,射出されたマントルの月は密度差で偏芯(2km)しており,共通重心の周りを廻る月は重い側が常に中心側(地球)に向く.に成る.(P69)

5. マルチインパクト仮説,--地球の起源--　　ジャイアント•インパクト仮説では範囲外で対応が不能 !

(1) 地球の表面積7割を占める平均深さ5kmの海洋底の起源　:①マントル小惑星の衝突剥離とアイソスタシーで平均深度⑤4kmの深海洋底の起源と成り,　②複数マントルインパクター衝突で⑤七つ海の起源と成った.

(2) プレートテクトニクスと駆動力の起源:　⑲衝突によるマントル亀裂発生=プレート境界形成,⑩陸プレートと海凸プレートのアイソスタシーによる慣性モーメントの偏芯は,地球自転で⑪偶力発生=プレート駆動力となった.

更に,太平洋位置への①巨大マントル断裂片の衝突で⑭地球マントルの月射出は,⑥環太平洋弧状列島と背弧凹海盆と海溝の起源に成り,⑳プレート発散境界は,マントル亀裂から融出したトランスフォーム断層起源となる。

6. マルチインパクト仮説,--その他の起源--　　アブダクションでは,全ての謎を統一的についでに検証が可能.

(1) 木星大赤斑の謎:⑲CERRAの断裂片が木星に衝突し,異なる材質のソリトンと成った.

(2) 水星が他の地球型惑星のコア/マントル比が約2倍★の謎:CERRAのコア+マントルがエネルギー等分配の法則で速度低下して禁制帯の端,水星軌道に踏み留まったので二倍コアマントル比に成った.★次回に発表予定.

(3) 小惑星帯の起源の謎:◎CERRA の断裂片の残りであり,エネルギー分布は元の惑星位置を中心に分布。

[1]*種子彰　月形成仮説(マルチインパクト仮説)　・・9,2014. P1-22　日本惑星科学会　秋季講演会*

ご連絡

会場案内

会場案内図をご覧ください

- 講演会の会場は旭川市科学館の「学習・研修室」です。受付は会場前です。
- ポスター会場は旭川市科学館「特別展示室」です。
- 正面入口が南側出入口で，裏側（プラネタリウム側）が北側出入り口です。
- 非常の際は学習・研修室を出てすぐの「北側出入り口」をご利用ください。
- トイレは学習・研修室のすぐ横です。
- 館内禁煙ですので，喫煙は 1 階木製デッキ（屋外）にてお願いします。

懇親会

- 懇親会は「旭川市市民活動交流センターCoCoDe」のホール棟（本館・市民活動支援棟の隣）に 10 月 18 日 18:45（2 日目の受賞講演終了後）から開始します。科学館サイパル学習研修室横の北側出入り口から右手に見える隣の建物です（旭川市宮下通 1 条 3 丁目 3-30，電話: 0166-39-2131）。

旭川市科学館サイパル周辺　お食事マップ

飲食店は南6条通りを駅と反対方向の東（南東）に向かうと複数ありますが，11番以上は多少歩きます(右下に縮尺)。懇親会会場は科学館北側出口すぐの隣の施設です。

1) ファイヤーバーグ（ハンバーグ・ザンギ）
2) 笑場庵（そば）
3) 鷹の爪（ラーメン）
4) とっぴ～ (回転寿し)
5) クラップスダイナー (ハンバーガー)
6) 焼肉楼ばくだん (ランチはラーメン)
7) マクドナルド
8) ドトール (大型書店内)
9) 北彩都（合同庁舎1階 食堂，平日昼)
10) 大笑家 (ラーメン)

11) き花の杜 (洋菓子・和菓子・土産)
12) 金花郎 (焼肉)
13) 無々色（カフェ）
14) Lune café（カフェ）
15) キッチン ヒマール（ネパールカレー）
16) なりゆき (お好み焼き・鉄板焼き 予約制)
17) ボン マルシェ (ビストロ)

7-Eleven，ローソンはあまり近くはありません
スーパー・ホームセンター・ツルハがあります

夜の中心地は「買い物公園通り(歩行者天国通り)」から「3-6街(3条6丁目界隈)」，ホテルはJR駅周辺です。飲みも帰りもタクシー相乗りをオススメします（2,3 メーター（初乗り570円））