日本惑星科学会
2017 年秋季講演会
予稿集

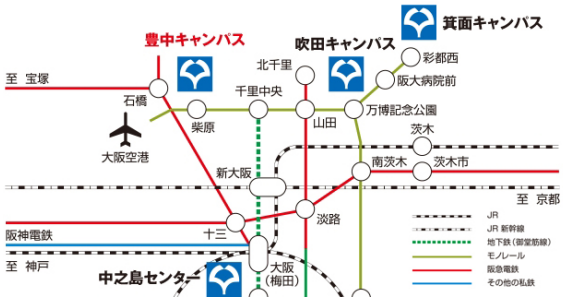
2017 年 9 月 27 日(水) - 29 日(金)

大阪大学　豊中キャンパス

日本惑星科学会2017年秋季講演会プログラム

2017年日本惑星科学会秋季講演会実行委員会

会場は，大阪大学豊中キャンパスです．
吹田・箕面キャンパスではありません．



●一般講演会（申し込みは締めきりました）

日時：2017年9月30日(土)14:00－16:00
開場・受付開始13:30

場所：アートエリアB1（京阪電車中之島線・なにわ橋駅地下1階コンコース）

一般講演会テーマ：「月の科学の最前線」

講演1：「月の風　～月と地球の不思議な関係～」
講演者：寺田健太郎(大阪大学大学院理学研究科・教授)

講演2：「月の起源　～巨大衝突説～」
講演者：玄田英典(東京工業大学ELSI・特任准教授)

講演3：「月の探査　～過去、現在、未来～」
講演者：佐伯和人(大阪大学大学院理学研究科・准教授)

主催：大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻，日本惑星科学会，アートエリアB1(大阪大学+NPO法人ダンスボックス+京阪ホールディングス(株))

共催：大阪大学21世紀懐徳堂

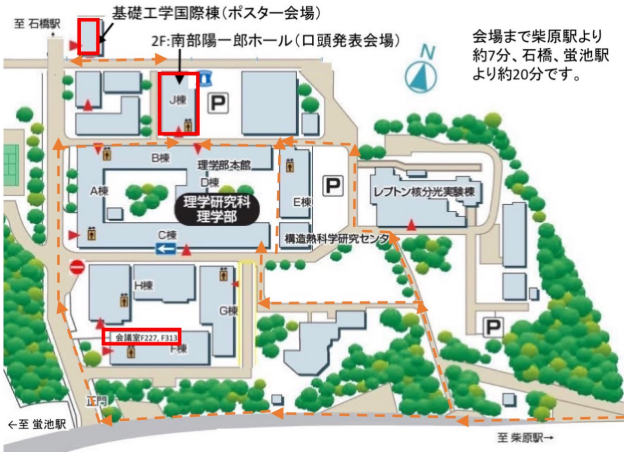
企画制作：大阪大学21世紀懐徳堂，NPO法人ダンスボックス

●秋季講演会

日程：2017年9月27日(水)～29日(金)

場所：大阪大学豊中キャンパス(〒560－0043大阪府豊中市待兼山町1－1)

口頭発表：理学研究科J棟(教育研究交流棟)2F南部陽一郎ホール



ポスター会場：基礎工学国際棟(南部ホールの北側)

講演数：口頭110件，ポスター72件(それぞれ最優秀発表賞選考9件を含む)
最優秀研究者賞受賞講演1件

●プログラム概要

○9月27日(水)

8：30　開場・受付（南部陽一郎ホール）
8：55　挨拶
9：00　**特別セッション**　最優秀発表賞選考
11：30　**口頭発表セッション**　超小型探査機
12：50　昼食
13：50　**口頭発表セッション**　系外惑星
15：00　**口頭発表セッション**　原始惑星系円盤
16：30　**ポスターセッション1**

○9月28日(木)

8：30　開場・受付
8：50　**口頭発表セッション**　衝突
10：20　**口頭発表セッション**　月
11：20　昼食
12：10　**ポスターセッション2**
13：20　**口頭発表セッション**　探査
16：40　**総会**
17：40　**最優秀研究者賞特別講演**
18：50　懇親会

○9月29日(金)

8：30　開場・受付
8：50　**口頭発表セッション**　アストロバイオロジー，

惑星表層・大気
11：30　昼食
12：30　**口頭発表セッション**　惑星形成
14：00　**口頭発表セッション**　衛星・小天体
17：50　閉会

●口頭発表

最優秀発表賞応募者は15分講演(3分間の質疑時間を含む)．一般講演は10分(2分間の質疑時間を含む)．時間厳守でお願いします．次ページ以降のプログラムでは講演番号，開始時間，表題，第一著者名を掲載しています．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27日(水)正午から29日(金)の正午までです．次ページ以降のプログラムでは，講演番号，表題，第一著者名を掲載しています．コアタイムは講演番号で決められています．最優秀発表賞応募ポスターのコアタイムは27日(水)16:30－18:00，一般ポスターのコアタイムは，奇数番号が27日(水)16:30－17:30，偶数番号が28日(木)12:20－13:20です．

《口頭発表プログラム》

9月27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　千秋 博紀

S1　9：00　**古海洋・厚いCO_2大気環境のもとでの火星古気候シミュレーション－水循環・熱慣性の及ぼす影響**　鎌田有紘(東北大)

S2　9：15　**ALMA分光観測による原始惑星系円盤のH_2Oスノーラインの同定可能性**　野津翔太(京大)

S3　9：30　**原始惑星系円盤上における巨大渦の構造と性質**　小野智弘(京大)

S4　9：45　**小惑星の衝突破壊・自己重力再集積による細長い形状の形成条件**　杉浦圭祐(名大)

S5　10：00　**「かぐや」連続スペクトルデータを用いた月の後期火成活動における玄武岩の鉱物量比の推定**　加藤伸祐(名大)

10：15　休憩(5分)

S6　10：20　**中性pHにおけるFe^{2+}光酸化反応の実験的研究：初期火星の表層酸性化イベントに対する示唆**　田畑陽久(東大)

S7　10：35　**多面体重力場計算モデルを用いた太陽系小天体内部の密度分布推定**　金丸仁明(阪大)

S8　10：50　**エウロパ内部海の熱水環境における硫酸還元反応**　丹秀也(東大)

S9　11：05　**土星衛星エンセラダスのプリューム組成に対する氷・クラスレートハイドレート形成の影響**　西谷隆介(阪大)

11：20　休憩(10分)

超小型探査機　座長　藤本正樹，杉田精司

I1　11：30　**超小型探査機による惑星探査技術の開発**　杉田精司(東大)

I2　11：40　**超小型大気圏突入探査機の可能性：EGGからsuperEGG，さらにその先へ**　鈴木宏二郎(東大)

I3　11：50　**東京大学における超小型深宇宙探査ミッションの成果と将来：PROCYON・EQUULEUS**　船瀬龍(東大)

I4　12：00　**超小型宇宙探査機用推進系のこれまでと今後の展望**　小泉宏之(東大)

I5　12：10　**超小型深宇宙探査機EQUULEUSによる月面衝突閃光を通した太陽系小天体探査**　阿部新助(日大)

I6　12：20　**超小型探査機による光学観測手法の惑星科学への応用**　吉岡和夫(東大)

I7　12：30　**超小型探査機による火星大気散逸科学へのアプローチ ～火星大気Ne同位体測定に向けた超小型質量分析装置の研究・開発**　奥野衛(東大)

I8　12：40　**超小型探査機による惑星観測に向けた粒子計測器の開発**　笠原慧(東大)

12：50　昼食

系外惑星　座長　田中佑希

A1　13：50　**岡山188cm望遠鏡/MuSCATを用いた多色トランジット観測の成果と展望**　福井暁彦(国立天文台)

A2　14：00　**新しい4色同時撮像カメラMuSCAT2の開発と今後の小型低質量系外惑星探索の展望**

成田憲保(東大)

A3　14:10　**紫外線宇宙望遠鏡WSO-UVによる系外惑星サイエンス**　生駒大洋(東大)

A4　14:20　**短周期ガス惑星の質量放出と大気構造の惑星磁場強度への依存性**　田中佑希(鹿児島大)

A5　14:30　**中心星近傍をまわる岩石惑星の質量損失：ミネラル大気の散逸**　伊藤祐一(東大)

A6　14:40　**大気海洋海氷結合モデルを用いた全球海惑星気候の太陽定数依存性に関する研究**
河合佑太(神戸大)

14:50　休憩(10分)

原始惑星系円盤　座長　瀧哲朗

B1　15:00　**始原的炭素質コンドライトMIL090657マトリクスにおける水質変成度の異なる岩相のTEMによる微細組織観察**　杉本美弥茉(京大)

B2　15:10　**粉体流中のアグリゲイト形成実験**
長足友哉(神戸大)

B3　15:20　**氷マントルダストのサイズ分布とダスト付着成長への影響**　田中秀和(東北大)

B4　15:30　**原始惑星系円盤内のダスト・クランプ形成と個々のダスト粒子の運動**　関谷実(九大)

B5　15:40　**スノーライン近傍におけるコンドリュールの形成**　城野信一(名大)

B6　15:50　**磁気流体計算に基づいた原始惑星系円盤の降着加熱**　森昇志(東工大)

B7　16:00　**デッドゾーン内縁における岩石ダストの濃集不安定性**　植田高啓(東工大)

B8　16:10　**磁場駆動円盤風によって進化する原始惑星系円盤中でのダスト面密度進化**　瀧哲朗(国立天文台)

B9　16:20　**デブリ円盤の化学構造**　岩崎一成(阪大)

16:30　**ポスターセッション1**

18:00　終了

9月28日(木)

衝突　座長　末次竜

F1　8:50　**Ivuna隕石(CI)に見られる複数の岩相中のマトリクスの3次元構造の研究**　北山晃(京大)

F2　9:00　**天体表面でのレコリス粒子の摩耗を模擬したコンドライト隕石粒子の摩耗実験：3次元外形の変化**　小川倫弘(京大)

F3　9:10　**数10 μmサイズ微小衝突破片の3次元形状分布～イトカワ粒子との比較**　門川隆進(京大)

F4　9:20　**無隔膜開放系における衝突蒸発実験手法の開発**　黒澤耕介(千葉工大)

F5　9:30　**フラッシュX線を用いた衝突破壊現象の観測**　岡崎昌志(神戸大)

F6　9:40　**クレーターイジェクタのスケール則に対する衝突速度依存性**　松榮一真(神戸大)

F7　9:50　**インドシナ半島における，79万年前の小天体衝突イベント起源の衝撃変成石英の発見**　多田賢弘(東大)

F8　10:00　**iSALEによる重力支配域での微惑星の衝突計算**　末次竜(産業医科大)

F9　10:10　**月面衝突閃光候補の超低分散スペクトル観測**　柳澤正久(電通大)

10:20　休憩(10分)

月　座長　熊本篤志

G1　10:30　**SELENEレーダサウンダ観測に基づく月地下構造データベースの構築**　熊本篤志(東北大)

G2　10:40　**衝突盆地周辺の岩石組成から推定する月マントル化学組成の推定**　大竹真紀子(JAXA/ISAS)

G3　10:50　**月の地形が月震波の伝搬に及ぼす影響の評価**　小野寺圭祐(総研大)

G4　11:00　**珪酸塩鉱物中におけるOH/H_2Oの温度安定性の実験的検証**　仲内悠祐(会津大)

G5　11:10　**月における地下空洞の構造の解析～月レーダーサウンダー(LRS)を用いた地下空洞の探索～**　郭哲也(東海大)

11:20　昼食

12:10　**ポスターセッション2**

探査I　座長　小川和律

H1　13:20　**月火星の地下空洞直接探査UZUME計画 その2**　春山純一(JAXA/ISAS)

H2　13：30　**Direct Altimetryデータを用いる新手法による「かぐや」の精密軌道決定と精度評価（序報）**　石原吉明（JAXA/ISAS）

H3　13：40　**月周回衛星「かぐや（SELENE）」データの長期保存対応**　山本幸生（JAXA/ISAS）

H4　13：50　**SLIM観測運用検討のための着陸地景観シミュレーション**　佐伯和人（阪大）

H5　14：00　**月面水の同位体分析に向けた宇宙機搭載用光学分析装置の開発**　山中千博（阪大）

H6　14：10　**DESTINY+ミッションが目指す流星群母天体Phaethonのフライバイ観測と惑星間ダストのその場観測**　荒井朋子（千葉工大）

H7　14：20　**DESTINY+ミッション搭載用超望遠モノクロカメラ（TCAP）およびマルチバンドカメラ（MCAP）**　石橋高（千葉工大）

H8　14：30　**DESTINY+搭載用ダストアナライザ**　小林正規（千葉工大）

H9　14：40　**JUICE搭載ガニメデレーザ高度計（GALA）－概要および国内開発状況**　塩谷圭吾（JAXA/ISAS）

探査II　座長　石原吉明

H10　14：50　**火星表面での現場顕微鏡観察のための生命探査顕微鏡（LDM）開発の現状**　山岸明彦（東京薬科大）

H11　15：00　**火星探査の新しい戦略と火星探査技術実証**　藤田和央（JAXA）

H12　15：10　**火星着陸探査に向けたLIBS-QMS法を用いたその場K-Ar年代測定装置の開発**　堀内美沙（立教大）

H13　15：20　**火星衛星探査機搭載用望遠カメラと広角分光カメラの設計**　長田直也（立教大）

H14　15：30　**火星衛星探査計画のための分離カメラ（MMX-DCAM5）の検討状況**　小川和律（神戸大）

H15　15：40　**はやぶさ2着陸地点選定運用訓練のための仮想Ryuguデータ作成**　田中智（JAXA/ISAS）

H16　15：50　**はやぶさ2着陸点選定訓練：データ解析・検討**　渡邊誠一郎（名大）

H17　16：00　**はやぶさ2可視カメラの撮像模擬実験**　諸井圭市（立教大）

H18　16：10　**地球外物質研究グループによるはやぶさ２試料受入準備**　安部正真（JAXA/ISAS）

H19　16：20　**「宇宙科学の今後20年の構想を検討する委員会」活動報告**　今村剛（東大）

16：30　休憩（10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　中本泰史）

観測が明かす原始惑星系円盤と惑星系の姿　秋山永治（国立天文台）

18：30　会場移動

18：50　懇親会

9月29日（金）

アストロバイオロジー・惑星表層・大気　座長　山本聡，大野宗祐

D1　8：50　**水惑星学の創成**　関根康人（東大）

D2　9：00　**地球型水惑星における暴走温室効果発生に対する表層水分布依存性**　小玉貴則（東大）

D3　9：10　**高解像度金星大気シミュレーションで再現された惑星規模のストリーク構造**　樫村博基（神戸大）

D4　9：20　**地球型惑星最初期進化の惑星サイズ依存性**　小河正基（東大）

D5　9：30　**火星隕石ナクライト・シャシナイト起源岩体の関係について**　三河内岳（東大）

D6　9：40　**火星の地軸傾斜の変動に伴う火星二酸化炭素システムの応答の解析**　渡辺泰士（東大）

D7　9：50　**放射冷却が原始火星大気の流体力学的散逸に与える影響**　吉田辰哉（北大）

D8　10：00　**高解像度の火星大気ラージエディーシミュレーションで得られた地表面応力**　村橋究理基（北大）

10：10　休憩（10分）

D9　10：20　**大気球による成層圏微生物採取実験：Biopauseプロジェクト**　大野宗祐（千葉工大）

D10　10：30　**原始惑星大気中でのアミノ酸前駆体生成におよぼす恒星エネルギー粒子の役割**　小林憲正（横浜国大）

D11　10：40　**隕石母天体での星間有機物変成に関する実験的研究**　平川尚毅（京教大）

D12　10：50　**南極微隕石中の可溶性有機物の検出を目指して**　山本康太(東大)

D13　11：00　**粘土鉱物存在下の低温での核酸塩基とリボースからのヌクレオシド合成**　橋爪秀夫(物質・材料研究機構)

D14　11：10　**観測衛星による連続分光データを使った月面上のD型類似スペクトルの全球捜索**　山本聡(国立環境研)

D15　11：20　**火山噴火準備過程における脱ガス現象の機構の提案 ーしゃぼん液による脱ガスアナログ実験ー**　桶間千遥(阪大)

11：30　昼食

惑星形成　座長　藤井悠里

C1　12：30　**小石集積による巨大惑星の形成**　森島龍司(カリフォルニア大)

C2　12：40　**ペブル集積によるガス惑星周りの衛星形成**　芝池諭人(東工大)

C3　12：50　**磁場駆動円盤風の影響下で進化する円盤中でのスーパーアース系形成**　荻原正博(国立天文台)

C4　13：00　**惑星移動する原始惑星へのガス降着**　堀安範(自然科学研究機構)

C5　13：10　**高解像度N体計算による月形成シミュレーション**　佐々木貴教(京大)

C6　13：20　**周惑星円盤の形成と温度構造について**　藤井悠里(名大)

C7　13：30　**星雲ガス中で集積する岩石惑星内部のD/H**　齊藤大晶(高知工大)

C8　13：40　**還元的な大気下での惑星初期進化の軌道依存性**　濱野景子(東工大)

13：50　休憩(10分)

衛星・小天体　座長　寺居剛，樋口有理可

E1　14：00　**土星系氷衛星の熱進化：エンセラダスとディオネの内部海**　鎌田俊一(北大)

E2　14：10　**土星中型衛星の軌道進化とエンケラドスの潮汐加熱**　中嶋彩乃(東工大)

E3　14：20　**ガニメデ上のFurrow構造の起源に関する研究**　平田直之(神戸大)

E4　14：30　**惑星に一時捕獲された小天体の捕獲軌道滞在時間**　樋口有理可(国立天文台)

E5　14：40　**巨大衝突説から予測される火星衛星の構成粒子について**　兵頭龍樹(東工大)

E6　14：50　**火星原始大気の回転を考慮した火星衛星の捕獲説**　鈴木智浩(東工大)

E7　15：00　**フォボスの形成仮説に応じた模擬土壌の開発**　宮本英昭(東大)

E8　15：10　**フォボスのBlueUnitと三次元形状モデルを用いたイジェクタの分布**　菊地紘(東大)

E9　15：20　**誘導熱プラズマ装置を用いたSi-Fe-Mg-O-S系での微粒子合成実験：GEMS模擬粒子の合成に向けて**　河野颯(京大)

E10　15：30　**エンスタタイトへの1 keV水素イオン照射による太陽風宇宙風化模擬実験**　浅田祐馬(京大)

E11　15：40　**宇宙風化作用に対する硫黄の影響**　田中宏和(阪大)

15：50　休憩(10分)

E12　16：00　**Juvinas隕石の変成履歴**　金丸礼(総研大)

E13　16：10　**すばる望遠鏡HyperSuprime-Camによる木星トロヤ群サーベイ**　寺居剛(国立天文台)

E14　16：20　**ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査計画における着陸その場高分解能質量分析**　癸生川陽子(横浜国大)

E15　16：30　**ソーラー電力セイル(SPS)ミッションによるトロヤ群小惑星の科学観測**　岡田達明(JAXA/ISAS)

E16　16：40　**木星トロヤ群小惑星からのサンプル採取装置の開発**　岡本千里(法政大)

E17　16：50　**小惑星イトカワの表面に見られる白色地域の成因**　北里宏平(会津大)

E18　17：00　**小天体表層の振動圧密特性に関する実験的研究ー粒子間力の効果**　大村知美(神戸大)

E19　17：10　**凹凸表面のボンドアルベドの数値計算**　千秋博紀(千葉工大)

E20　17：20　**地球とほぼ同じ公転周期を持つ小惑星の軌道運動と探査の可能性**　吉川真(JAXA/ISAS)

E21　17：30　**地球衝突天体を発見した時、我々はどのように対応すべきか**　浦川聖太郎(日本スペ

ースガード協会）

E22　17：40　**小惑星帯の起源（マルチインパクト仮説による）～木星の重力により惑星に成れなかったと云う迷信を排し，イトカワ等の分化した小惑星の謎を解明**　種子彰（SEEDSCIENCELabo.）

17：50　終了散会

《Poster発表プログラム》

ポスター展示は9月27日12：00から9月29日12：00まで

最優秀発表賞応募ポスター

コアタイム　27日（16：30 − 18：00）

PS1　**古海洋・厚いCO_2大気環境のもとでの火星古気候シミュレーション－水循環・熱慣性の及ぼす影響**　鎌田有紘（東北大）

PS2　**ALMA分光観測による原始惑星系円盤のH_2Oスノーラインの同定可能性**　野津翔太（京大）

PS3　**原始惑星系円盤上における巨大渦の構造と性質**　小野智弘（京大）

PS4　**小惑星の衝突破壊・自己重力再集積による細長い形状の形成条件**　杉浦圭祐（名大）

PS5　**「かぐや」連続スペクトルデータを用いた月の後期火成活動における玄武岩の鉱物量比の推定**　加藤伸祐（名大）

PS6　**中性pHにおけるFe^{2+}光酸化反応の実験的研究：初期火星の表層酸性化イベントに対する示唆**　田畑陽久（東大）

PS7　**多面体重力場計算モデルを用いた太陽系小天体内部の密度分布推定**　金丸仁明（阪大）

PS8　**エウロパ内部海の熱水環境における硫酸還元反応**　丹秀也（東大）

PS9　**土星衛星エンセラダスのプリューム組成に対する氷・クラスレートハイドレート形成の影響**　西谷隆介（阪大）

一般ポスター

コアタイム　27日（奇数番号16：30 − 17：30）

28日（偶数番号12：10 − 13：10）

A 系外惑星

P1　**TRAPPIST-1系地球型惑星からの水蒸気大気の流体力学的散逸**　渡辺健介（北大）

B 原始惑星系円盤

P2　**CAIのAl-MgおよびLi-Be-B同位体比から探る原始太陽系円盤進化**　福田航平（東大）

P3　**原始惑星系円盤での乱流拡散によるダストアグリゲイトの焼結**　児玉季里子（名大）

P4　**高解像度三次元流体シミュレーションによる周惑星円盤のサイズ推定**　波々伯部広隆（九大）

C 惑星形成

P5　**GPUを用いた超高解像度の惑星形成N体シミュレーション**　岩澤全規（自然科学研究機構）

P6　**惑星の集積メカニズム　太陽系惑星の起源とティティウス・ボーデの法則の検証**　種子彰（SEEDSCIENCELabo.）

P7　**コンドリュールの衝突放出過程による形成と集積**　松本侑士（みずほ情報総研）

P8　**地球型惑星形成：水星・金星・地球・火星の同時形成の条件の解明**　ソフィア　リカフィカ　パトリック（近大）

P9　**周惑星円盤が微惑星の軌道とサイズの分布に与える影響**　樋口有理可（国立天文台）

D アストロバイオロジー，惑星表層・大気

P10　**たんぽぽ計画における有機物曝露実験報告（第1報）**　小林憲正（横浜国大）

P11　**弱還元型惑星大気中でのアミノ酸生成のエナジェティックス**　青木涼平（横浜国大）

P12　**水質変成におけるアミノ酸前駆体形成に対するガンマ線の影響**　三澤柊介（横浜国大）

P13　**How diverse is macro molecular organic matter in the Solar System?**　癸生川陽子（横浜国大）

P14　**金星探査機あかつきの初期成果**　今村剛（東大）

P15　**金星探査機「あかつき」のデータアーカイブの現状とこれから**　村上真也（JAXA/ISAS）

P16　**地上電波望遠鏡SPARTによる金星中層大気における一酸化炭素の変動起源の研究**　原口大輝

(大阪府大)
P17 **金星探査機「あかつき」とALMAによる金星の連携観測プロジェクトの進捗報告** 青木亮輔(大阪府大)
P18 **市民参加型の画像解析による現在の火星におけるダークパッチの形成率** 宮本英昭(東大)
P19 **球殻状鉄コンクリーションの形成数値シミュレーションと形成環境の制約** 柴田拓真(名大)
P20 **高分解能大気大循環モデルを用いた現在火星環境における水循環とHDO/H_2O同位体分別のシミュレーション** 黒田剛史(情報通信研究機構)
P21 **地球気候の太陽定数依存性:海陸分布を考慮した大気大循環モデル実験** 松田幸樹(神戸大)
P22 **高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞帯状構造の消滅** 佐々木洋平(京大)
P23 **着陸機による火星環境探査計画の検討** 臼井寛裕(東工大)

E 衛星・小天体
P24 **外縁天体表面のH_2O氷結晶度測定** 寺居剛(国立天文台)
P25 **氷・シリカ混合物の塑性変形・脆性破壊遷移に関する実験的研究** 保井みなみ(神戸大)
P26 **世界初の流星群の4次元ダストトレール計算** 佐藤勲(日本大)
P27 **低温高圧下におけるH_2O-$MgSO_4$/NaCl系の相境界観察** 原田啓多(阪大)
P28 **分裂候補地球近傍小惑星(1566) Icarusと2007MK6の分光観測** 船橋和博(日本大)
P29 **フォボスのクレーター緩和評価と他天体との比較に基づく表層進化過程の検討** 森田晟也(名大)
P30 **フォボスの高解像度画像の解析と数値シミュレーションによる表面のラフネスの評価** 小島平(東大)

F 衝突
P31 **焼結アグリゲイトの低密度弾丸による高速度衝突実験** 村上雄一(神戸大)
P32 **高空隙石膏標的に形成されたクレーターの表面下観察** 山崎祐太朗(神戸大)
P33 **衝撃圧力分布から推定する重力支配クレータサイズ** 黒澤耕介(千葉工大)
P34 **巨大氷惑星に対する衝突現象の考察** 黒崎健二(名大)
P35 **雪標的に作られる衝突クレーター地形** 鈴木絢子(JAXA/ISAS)
P36 **隕石衝突に起因する金属-ケイ酸塩鉱物の分化過程を模擬した衝撃回収実験** 藤川勇志(阪大)

G 月
P37 **危難の海盆地エジェクタ層中の鉱物分布** 我妻雄史(会津大)
P38 **月周回衛星「かぐや」による地球起源酸素の観測** 寺田健太郎(阪大)
P39 **月面氷探査のための霜付き鉱物の近赤外反射スペクトル測定と機械学習による最適な観測バンド 組み合わせの決定** 五十嵐優也(阪大)
P40 **ディープラーニングを用いたMI画像中の影領域検出手法の検討** 伊東里保(産総研)
P41 **危難の海から回収されたルナ24号レゴリス試料の地球化学的考察** 諸本成海(阪大)
P42 **月の雨の海におけるコペルニクス紀の断層活動** 嵩由芙子(京大)
P43 **かぐや観測データによるスミス海の地下構造** 石山謙(JAXA/ISAS)
P44 **MULTUM-SNMSを用いたMurchison SiCの同位体分析** 宮晃平(阪大)

H 探査
P45 **月面のレゴリスサンプリング法の開発** 山中千博(阪大)
P46 **JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)で目指すサイエンス** 木村淳(阪大)
P47 **SMILES-2を用いた火星/金星大気のTHz帯リモートセンシングを見据えた放射輸送シミュレーション** 西田侑治(大阪府大)
P48 **超小型火星探査機搭載THzヘテロダイン分光装置の開発検討** 松本怜(大阪府大)
P49 **火星衛星探査計画MMXとそのサイエンス2017** 倉本圭(北大)
P50 **MMX搭載近赤外分光撮像器MacrOmegaによるPhobosおよびDeimos観測計画** 岩田隆浩(JAXA/ISAS)

P51 **宇宙線ミュー粒子を用いたトモグラフィー観測による火星の浅部地下構造探査：超小型検出装置の検討** 小池幸人（東大）
P52 **火星衛星探査機（MMX）搭載火星周回ダスト観測装置** 小林正規（千葉工大）
P53 **はやぶさ2着陸点選定訓練における小惑星形状復元** 平田成（会津大）
P54 **形状復元ソフトPhotoscanのはやぶさ2着陸点選定訓練における活用の成果と課題** 杉山貴亮（会津大）
P55 **「はやぶさ2」中間赤外カメラTIRの軌道上運用と近傍運用計画** 岡田達明（JAXA/ISAS）
P56 **はやぶさ2着陸地点選定訓練データを用いた熱慣性決定手法の評価** 坂谷尚哉（明治大）
P57 **はやぶさ2ONCデータによるRyugu表面ラフネスの推定：着陸点選定訓練データを用いた検討** 諸田智克（名大）
P58 **はやぶさ2ONCデータの処理システムとプロダクト：着陸点選定訓練データの例** 杉田精司（東大）
P59 **はやぶさ2着陸候補地点選定における地上系整備** 山本幸生（JAXA/ISAS）
P60 **磁気並進運動を用いた２成分粒子の質量比の計測** 山口若奈（阪大）
P61 **宇宙望遠鏡搭載用高効率紫外線分光器の開発** 亀田真吾（立教大）
P62 **局所U-Pb年代分析に向けたレーザーポストイオン化SNMSの開発** 松田貴博（阪大）
P63 **超小型深宇宙探査機EQUULEUS搭載「月面衝突閃光カメラDELPHINUS」の性能評価** 増田陽介（日本大学）

Global climate simulation of early Mars with a paleo-ocean and a dense CO_2 atmosphere: Impact of water circulation and thermal inertia

○**A. Kamada** [1], T. Kuroda [1,2], Y. Kasaba [1], and N. Terada [1]
[1] Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University
[2] National Institute of Information and Communications Technology

There are many fluvial traces which are supposed to be made before ~3.8 billion years ago on the Martian surface. If those traces were made by the flow of liquid H_2O, the environment of the ancient Mars should be suitable for huge amount of liquid water. There have been several studies using 3-dimensional Mars Global Climate Models (MGCMs) to reproduce such environment of early Mars, assuming the solar insolation of ~75% of today and denser CO_2 atmosphere. However, previous studies have not reproduced the surface temperature above 273 K even under the surface pressure up to ~5 bars, regardless of the existence of saturated H_2O vapor [*Forget et al*., 2013; *Wordsworth et al*., 2013].

In this study, we use a MGCM named DRAMATIC (Dynamics, RAdiation, MAterial Transport and their mutual InteraCtions) to reveal the nature of early Martian climate, focusing on the sensitivity of surface parameters. In addition to the physical processes for Martian paleoclimate similar to *Forget et al*. [2013], we have implemented the virtual ocean and lakes in the northern lowlands and wet soil in the southern highlands, making high thermal inertia of between 1,000 and 3,000 ($J\ s^{-1/2}\ m^{-2}\ K^{-1}$) which have never been implemented in the preceding studies. Also we have implemented a water cycle scheme assuming the phase changes among ice, liquid and vapor, including the frost of ocean below the melting point. The obliquity in the simulations is set to be the same as today's Mars (25.19 degrees), and the orbit is assumed to be circular with the radius of 1.523 AU.

We performed the simulation with the averaged surface pressure (hereafter $\overline{p_s}$) of 0.1-2.0 bars, for two cases (1) with ocean/lakes and wet soil (hereafter 'wet surface') and (2) without them (hereafter 'dry surface', assuming the dry soil which is the same as today's Mars globally). As a result, we produced higher surface temperature in 'wet surface' at all pressures, dT ~ +30 K at $\overline{p_s}$ = 2.0 bars, in comparison with 'dry surface'. In the 'wet surface' simulation, the annual mean surface temperature was ~230 K at $\overline{p_s}$ = 1.0 bar and ~260 K at $\overline{p_s}$ = 2.0 bars. Although there were little precipitation and the paleo-ocean quickly froze in $\overline{p_s} <$ 0.5 bar, the paleo-ocean was maintained throughout the year in low-to-mid latitudes area in $\overline{p_s} \geq$ 0.5 bar with the precipitation of 1,000-3,000 mm in one Martian year was shown alongside the shoreline, e.g. in the north-east of Hellas basin and at the foot of tall mountains such as Mt. Elysium, where large fluvial traces of outflow channels have been observed. Furthermore, the distribution of the amount of flowing water of the river, which is calculated by a 3-layers tank model [*Ishihara and Kobatake*,1979] was also in a good consistency with the existence of fluvial traces of outflow channels on Martian surface.

ALMA 分光観測による原始惑星系円盤の H_2O スノーラインの同定可能性

○野津翔太[1], 野村英子[2], C.Walsh[3], 本田充彦[4], 廣田朋也[5], 秋山永治[5], T. Millar[6]

[1]京都大学, [2]東京工業大学, [3]Univ. of Leeds, [4]久留米大学, [5]国立天文台, [6]Queen's Univ. Belfast

原始惑星系円盤(以下、"円盤")において、中心星近傍は高温のため H_2O はダスト表面から脱離し気体となるが、遠方では低温のためダスト表面に凍結する。この境界が H_2O スノーラインであり、固体微粒子の合体成長で惑星を作る際 H_2O スノーラインの内側では地球型の岩石惑星が形成される。一方外側では固体微粒子の総量が増加する。このため固体微粒子の合体成長で巨大な岩石コアが形成され、それらが重力で周りのガスを大量に集める事で、木星型のガス惑星が形成される (e.g., Hayashi et al. 1981, 1985)。そのため 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。

太陽質量程度の前主系列星周りの円盤の場合、円盤赤道面における H_2O スノーラインは、中心星から数天文単位の位置に存在する。しかし撮像観測によってこの様な円盤の H_2O スノーラインを検出する事は、空間分解能が足りない為に困難である。一方で円盤はほぼケプラー回転している為、円盤から放射される輝線はドップラーシフトを受け広がっている。この輝線のプロファイル形状の解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。

そこで我々は、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、ortho-$H_2{}^{16}O$ 輝線プロファイルの観測から円盤内の H_2O 分布、特に 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)。具体的にはまず円盤の化学反応ネットワーク計算を行い、H_2O の存在量とその分布を調べた。すると H_2O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤外側の上層部高温領域や光脱離領域でも H_2O ガスの存在量が多い事が分かった。

したがって、H_2O 輝線を用いて H_2O スノーラインを同定するためには、主に円盤内縁から放射される輝線を選ぶ必要がある。そこで、化学反応計算の結果を元に、円盤から放出される ortho-$H_2{}^{16}O$ 輝線のプロファイルを多数の輝線について計算した。その結果、アインシュタイン A 係数(放射係数) が小さく(~10^{-6}-10^{-3} s^{-1})、励起エネルギーが比較的高い(~1000K)輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べる事で、H_2O スノーラインを同定できる可能性がある事が分かった。そしてこの様な特徴を持つ ortho-$H_2{}^{16}O$ 輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短い程、また中心星の温度が高く H_2O スノーライン位置が中心星から離れている程大きい事が分かった。

さらに我々は最近、新たに para-$H_2{}^{16}O$ 輝線や $H_2{}^{18}O$ 輝線に対しても計算を行い、ALMA (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) で観測可能な周波数領域に H_2O スノーライン観測に適した輝線を多数発見した。また、サブミリ波帯の H_2O 輝線は放射係数が赤外線帯の輝線より小さい傾向にあり、円盤外縁表層部からの放射強度がより小さくなる傾向が見えた。そして $H_2{}^{16}O$ 分子と比べ $H_2{}^{18}O$ 分子の数密度は 1/560 程度なので、ダストの光学的厚みが非常に大きい円盤でなければ、$H_2{}^{18}O$ 輝線の方がより赤道面に近い領域の H_2O ガスを捉える事ができ、赤道面の H_2O スノーライン位置を同定するのにより適している事が分かった。

本発表では、これまでの解析結果の紹介と今後の ALMA 高分散分光観測での H_2O スノーラインの同定可能性の議論を行う。

原始惑星系円盤上における巨大渦の構造と性質

◯ 小野 智弘 [1], 武藤 恭之 [2], 富田 賢吾 [3], Zhaohuan Zhu[4]

[1] 京都大学宇宙物理学教室, [2] 工学院大学, [3] 大阪大学宇宙地球科学専攻, [4] ネバダ大学

近年、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) などによる観測によって、原始惑星系円盤が多様な物理構造を持つことが明らかにされてきた。ダストが円盤の片側に偏在する円盤三日月状構造もその一つであり、この構造が円盤進化や惑星形成とどのように関連するのかについて注目が集まっている (図 1: Fukagawa et al. 2013)。三日月状構造の成因として有力なのは、ガス巨大渦を用いるモデルである。円盤内に渦が形成されると、mm サイズのダスト粒子はガス抵抗によって渦内に捕獲されていく (Inaba & Barge 2006)。そこにおいて、ガス渦の成因として有力なのが円盤物理状態が動径方向に急激に変化する際に渦形成を引き起こすロスビー波不安定性 (RWI: Lovelace et al. 1999) である (図 2)。その理由として、三日月状構造が観測されている円盤は全て中心近傍に穴を持つ遷移円盤であり、穴の外縁では密度や温度の分布が動径方向に急激に変化すると期待できることが挙げられる。しかし、RWI によって形成される渦についての知見は未だ十分ではなく、渦の構造や性質から観測に対して制限を与えるまでは至っていない。

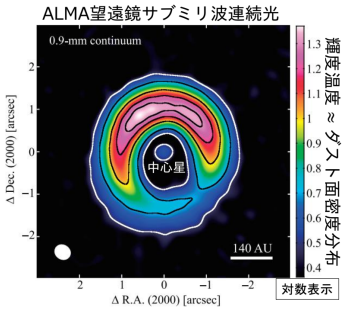


図 1: 三日月状構造を持つ HD142527 天体の ALMA 連続光観測 (Fukagawa et al. 2013)。

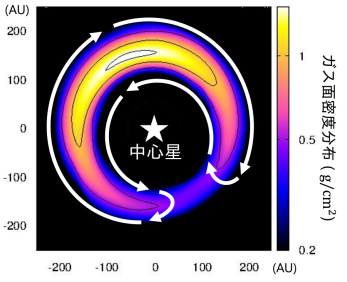


図 2: RWI によって円盤中に形成されたガス巨大渦。

我々は数値流体計算を行うことで、RWI の時間発展と最終的に形成される渦について調べた。数値流体計算は Athena++コードを利用し、二次元・順圧を仮定した。RWI の時間発展は大まかに三段階に分けられる。第一段階においては RWI が線形成長する。十周程度で線型成長が飽和し、最大成長モードに対応する個数の渦が形成される。第二段階では数周–百周の間に渦同士が合体していく。そして、最終段階では一個の渦が準定常的に存在するようになる。最終段階の準定常的な渦を RWI と呼ぶことにし、講演では RWI 渦が持つ密度・速度構造について詳述する。また、本研究では多様な初期条件を採用し、多くの数値流体計算を行うことで RWI 渦が持つ多様性についても調べた。その際、線形安定性解析によって求めた RWI の臨界条件 (Ono et al. 2016) を活用し、RWI に対して不安定となるパラメータ領域を網羅するようにした。講演では RWI 渦の動径幅・軸比・密度コントラストといった観測に繋がることが期待される物理量に着目し、各物理量の円盤初期条件に対する依存性や取り得る値の範囲を紹介する。

得られた RWI 渦の構造・性質を活用することで、ALMA などによる三日月状構造を持つ円盤の将来観測に対して定量的な予測を与え得る。また、RWI 渦の性質は不安定が起こる前の円盤初期状態に依存する。そのため、観測的に渦の性質を明らかにすることで円盤進化の解明、特に遷移円盤の成因の究明に繋がることが期待できる。

S4

小惑星の衝突破壊・自己重力再集積による細長い形状の形成条件

○杉浦圭祐[1]，小林浩[1]，犬塚修一郎[1]

[1]名古屋大学理学研究科

惑星探査機のその場観測や天文観測のライトカーブの詳細な解析により 900 個以上の小惑星の形状が得られ，小惑星の形状を用いた統計的な議論も可能となってきた．小惑星イトカワのラッコのような形状に見られるように多くの小惑星は不規則な形状をしており，約 60%の小惑星が短軸-長軸比が 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ともなう破壊や合体により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つけることで，形状から過去の衝突環境に制限を付けられることが期待される．

そこで本研究では，弾性体 SPH 法による数値シミュレーションを用い，衝突条件とその結果できる天体の形状に関係をつけることを目指す．小惑星の衝突破壊と自己重力再集積による形状形成を再現するため，数値計算コードに自己重力，岩石のひび割れ破壊，粉々に砕けた岩石間に生じる摩擦の効果を導入した．開発したコードを用いて，まずは簡単のため半径 50km の球形状の岩石小惑星どうしの衝突に限り，衝突速度と衝突角度を系統的に変化させて衝突計算を実行した．衝突速度を 50m/s から 400m/s まで 25m/s ごとに，衝突角度を 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 に示されるように，最大天体の形状は衝突速度 v と衝突角度 θ に応じておおまかに 5 通りに分類できることが分かった．

多くの小惑星で見られる細長い形状は，高速で中角度の場合（$v > 100$m/s，$\theta < 30°$，$v\sin\theta > 30$m/s）で形成されることが分かった．この速度-角度領域で細長い形状が形成される理由を理論的に説明することにも成功したので，以下で解説する．

細長い形状は，衝突速度のうちで小惑星の中心を結んだ線に垂直な成分の方向に 1 次元的に引き伸ばされて形成される．このような引き伸ばしによって細長い形状を形成するためには，
(i)変形を可能にする程度に衝突速度が大きいこと，
(ii)衝突角度が高いと端のみ削る衝突になるので全体を変形させる程度に衝突角度が低いこと，
(iii)正面衝突に近いと引き伸ばしに使える速度成分が小さくなるのでその分速度が大きいこと，が必要である．これらのそれぞれの条件から
(i)$v > 100$m/s, (ii) $\theta < 30°$，(iii)$v\sin\theta > 30$m/s
という条件が得られる(図 1 参照)．

図 1 から分かる通り，衝突条件と形成される小惑星の形状は密接に結びついている．衝突天体の質量比や自転など考慮していない点はあるものの，本研究のような小惑星の形状と衝突条件を繋ぐ研究は太陽系の歴史を紐解く鍵になる．

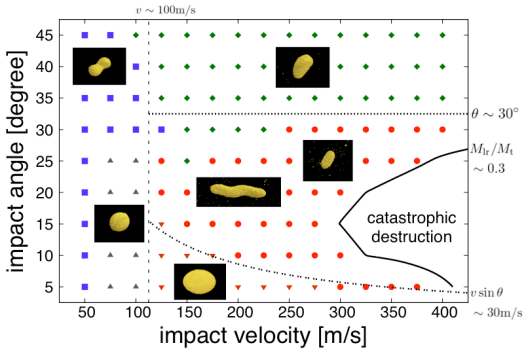


図 1: 衝突条件と形成された最大天体の形状の関係を，典型的な形状の図とともに表したもの．衝突角度は 0°が正面衝突である．青い四角は頭が２つある形状，灰の三角は球形状，茶の逆三角は平たい形状，赤い丸は細長い形状，緑の菱形は半球形状を表す．四本の線はそれぞれ細長い形状とその他を大まかに分ける線である．実線の右側は破壊の度合いが大きく形状を調べなかった領域を表す．

「かぐや」連続スペクトルデータを用いた月の後期火成活動における玄武岩の鉱物量比の推定

○加藤 伸祐[1] 諸田 智克[1] 山口 靖[1] 渡邊 誠一郎[1] 大嶽 久志[2] 大竹 真紀子[2] 二村 徳宏[3]

[1]名古屋大学大学院 環境学研究科 [2]宇宙航空研究開発機構 [3]日本スペースガード協会

月マントルの熱進化を理解するためには，月の海の火成活動史を復元することが重要である．火成活動史を理解するためには，玄武岩組成を調べることが重要であり，玄武岩組成と年代との関係からマントルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性がある．そのため，玄武岩組成に関する研究はこれまでにも活発に行われてきており，特に液相濃集元素であるチタンはマグマオーシャン固化後の月内部の構造進化を追うトレーサーとして特に調べられてきた元素である(e.g. Pieters et al., 1980; Morota et al., 2011)．我々はこれまでに「かぐや」によって得られた高解像度画像データを用いて，玄武岩の年代とチタン量との関係を調査しており，その結果から，約 23 億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇したことが明らかになった (Kato et al., 2017)．このチタン含有量の変化はマグマソースが変化したことを示唆している．そこで我々は 23 億年前より前の活動を「Phase-1 火成活動」, 23 億年前以後を「Phase-2 火成活動」と呼ぶこととする．そして，Phase-2 火成活動は月の表側の一部の領域(嵐の大洋・雨の海)で集中して起きていること，Phase-2 火成活動の開始と同期してマグマ噴出量が一時的に増加したこと，選択的に高いチタン含有量であることから，我々は約 20 億年前に月深部に起源を持つホットプルームが発生したという仮説を提唱している．

この仮説を検証するためには，チタン量でけでなく，月の海の玄武岩組成をより詳しく調査する必要がある．玄武岩組成に関する詳細な情報を得るためには，連続スペクトルデータを用いることが有効である．鉱物はそれぞれ特徴的な反射スペクトルを持っているため，これまで様々な研究で鉱物の組成とスペクトル形状が議論されてきた(e.g. Sunshine et al., 1990)．しかし，月面の反射スペクトルは様々な鉱物の混合によって複雑な吸収帯の形状を示すため，個々の鉱物の寄与に分離することが難しく，月の玄武岩の鉱物量比の正確な推定にはまだ成功していない．そこで，二村 (2008)では月の主要鉱物であるカンラン石，高 Ca 輝石，低 Ca 輝石，斜長石の反射スペクトルの吸収帯の形状を組成によって定式化することで推定パラメータを大幅に減らす方法が考案され，小惑星の構成鉱物の推定に適用されている．本研究では，この手法の校正関数を新たに鉱物サンプルを増やして再決定した．また，この手法が月の海の玄武岩のスペクトルに対しても有効であるか確認するために，アポロの玄武岩試料を用いて試料分析によって求められた鉱物量比が連続スペクトルから推定できるか検証を行った．結果として，本研究の手法はアポロの玄武岩試料の鉱物量比をおよそ正確に推定できることが分かった．次に本研究では，月の表側の Phase-2 火成活動が集中して起こった領域で，海の玄武岩の反射スペクトルに対してこの手法を適用した．その結果，月の Phase-2 火成活動は Phase-1 活動に対して有意に多いという結果を得た．チタン含有量，カンラン石含有量が共に多いという事実はマグマオーシャン固化後の上部に濃集したチタンと下部に集積したカンラン石が何らかのメカニズムで混合した物質が Phase-2 火成活動の玄武岩のソースである可能性が示唆される．本発表では，得られた結果を元にして，月マントルの進化過程に関して議論を行う．

中性 pH における Fe^{2+}光酸化反応の実験的研究: 初期火星の表層酸性化イベントに対する示唆

○田畑陽久[1]、関根康人[1]、菅崎良貴[2]、杉田精司[1]、村上隆[1]、
[1]東京大学 地球惑星科学専攻 [2]Department of Earth Sciences, University of California, Riverside

近年の火星の詳細な分光観測および着陸探査で得られた鉱物組成データから、火星の地表付近に存在した水(地表水)の pH は、約 35 億年前を境に中性から強酸性へ変化する ”酸性化イベント” を経験したことが示唆されている(e.g., Bibring et al., 2006)。この酸性化イベントの原因の一つとして、地表水中の溶存 Fe^{2+}が光酸化されたことによる酸性化が提唱されている(Hurowitz et al., 2010)。水溶液中の溶存 Fe^{2+}は、太陽紫外光の照射によって酸化鉄(III)を形成すると同時に H^+を放出する(eq. 1)。火星の地表水は地下水湧出で供給されていたと考えられているため(e.g., Andrews-Hanna et al., 2007)、岩石から地下水へ溶出した Fe^{2+}が地下水とともに湧昇し、地表で太陽光によって光酸化されて地表水を酸性化した可能性がある。

$$Fe^{2+}_{aq} + 2H_2O \rightarrow Fe(III)O(OH)\downarrow + 0.5H_2\uparrow + 2H^+ \qquad \text{(eq. 1)}$$

この反応の反応速度には pH 依存性があることが報告されているが(Jortner et al., 1962)、pH 3 以上での反応速度はこれまで調べられていない。一方、火星地殻を構成する苦鉄質岩石と化学平衡にある地下水 pH は中性からアルカリ性と推定されており(Zolotov & Mironenko, 2016)、Fe^{2+}の光酸化反応の酸性化への寄与を定量的に評価するためには pH 3 以上での反応速度を求める必要がある。

そこで本研究では、Fe^{2+}溶液に光照射実験を行い、中性 pH における Fe^{2+}光酸化反応の反応速度を測定した。また、中性ーアルカリ性条件下で主要な溶存種となる $FeOH^+$に関しても、その光酸化反応(eq. 2)による反応速度を測定した。

$$FeOH^+_{aq} + H_2O \rightarrow Fe(III)O(OH)\downarrow + 0.5H_2\uparrow + 2H^+ \qquad \text{(eq. 2)}$$

Fe^{2+}は溶存酸素によっても酸化されるため、実験では Ar で置換した低酸素グローブボックス内で反応溶液を調製した。光源は連続紫外光を発する Xe ランプを用い、波長 300 nm 以下の光を遮光する光学フィルタを併用することで光酸化過程の波長依存性を調べた。溶液 pH は、硝酸と水酸化ナトリウムで pH を調整した非緩衝液と、緩衝液を用いて一定に保った条件の 2 種類で実験を行った。Fe^{2+}量は紫外可視分光による吸光光度法で定量した。

非緩衝液の実験の結果、光学フィルタを用いた場合は弱酸性 pH (~5)で pH の低下が停止したのに対し、光学フィルタを用いなかった実験では溶液の pH は強酸性まで変化した。これは、波長 300 nm 以上の光でも光酸化される $FeOH^+$の濃度が酸性化に伴い低下することにより反応が停止したためと考えられる。このことは、大気による太陽紫外光の遮蔽効果が弱まることで、酸性化イベントがトリガーされた可能性を示唆する。発表では、酸性ー中性 pH 条件での Fe^{2+}光酸化反応の反応率と、酸性化をトリガーし得る大気組成について議論する。

多面体重力場計算モデルを用いた太陽系小天体内部の密度分布推定

○金丸 仁明[1]、佐々木 晶[1]
[1]大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

小惑星や彗星をはじめとした太陽系小天体（以下、小天体）は、微惑星どうしの衝突・破砕・再集積といった過程を経験しながら進化してきた。母天体の破片が自己重力によって緩く結合した天体は「ラブルパイル天体」と呼ばれ、その内部構造を理解することは、小天体がたどってきた形成過程の制約につながる。

天体の地下構造を直接的に知るには、周回する探査機の軌道から重力場を測定する手法が一般的である。しかしながら、小天体探査において重力場を精度よく測定することは容易ではない。はやぶさによる小惑星イトカワの重力測定では、そもそもの重力が小さいことに加え、太陽光圧やスラスタ出力の影響から、小惑星内部の密度不均質を検出できる精度には至っていない。

そこで本研究では、小天体の３次元形状モデルから重力場を計算し、「重力ポテンシャルの分散」を指標として、内部の密度分布を推定する手法を考案した。小天体上においても、表面物質の流動により地形が緩和し、天体の形状が等ポテンシャル面に近づくことが考えられる（Richardson & Bowling, 2014）。この仮定に基づき、重力ポテンシャルの分散が最も小さくなるように密度分布を与え、推定解とした。

小惑星イトカワは、535×294×209 m の大きさの岩石質天体であり、その平均密度は 1.95 g/cm^3 である（図１）。「頭」と「胴体」に異なる密度を与えて、密度分布推定を行なったところ、「頭」の密度がおよそ 2.8 g/cm^3、「胴体」の密度が 1.9 g/cm^3 という大きな密度差を持つことが示唆された。その際イトカワの重心は、内部が均質な場合に比べて「頭」の方におよそ 16 m ずれる。これは Lowry et al. (2014) による重心位置の見積もりと調和的である。

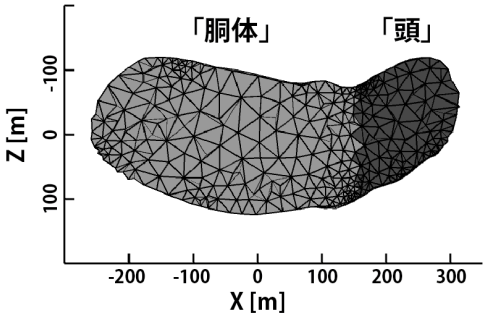


図１：小惑星イトカワの形状モデルの断面図。「頭」と「胴体」に異なる密度をもつモデルを仮定した。

現在は、異なる密度分布モデルや他の小天体の形状モデルを用いて本手法の検証を行っている。今後の小天体探査において、内部構造の制約をはじめとした科学成果の創出に貢献することが期待できる。

エウロパ内部海の熱水環境における硫酸還元反応

○丹秀也[1]、関根康人[1]、渋谷岳造[2]、宮本千尋[1]、高橋嘉夫[1]
[1]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, [2]海洋研究開発機構

木星の衛星エウロパは表面を氷地殻に覆われており、内部には液体の内部海を持つことで知られる。エウロパ表面は活発な更新を伴うことから、表面と内部海の間で物質交換が生じうる（Hand et al., 2007）。したがって、この内部海の化学的な性質（pH, 酸化還元状態, 組成）や岩石コアでの熱水環境の有無といった情報を知る手がかりとして、氷地殻表面の塩物質の組成が重要となる。近年の大型望遠鏡観測によって、木星の衛星イオから飛来する硫酸がエウロパの公転後面を汚染していること、汚染の少ない公転前面にはナトリウム塩などの内部海由来の物質が存在していることが示された（Ligier et al., 2016）。このことは、内部海に外因的な硫酸が常に供給されている一方、内部では何らかの化学反応により硫酸が活発に消費されている可能性を示唆する。しかしながら、その具体的な反応や必要となる温度、pH 条件、硫酸消費が維持されるメカニズムなどはよくわかっていない。そこで本研究では、エウロパ内部での熱水環境における、水素による硫酸還元反応が硫酸消費過程として働く可能性を室内実験で検証し、温度や pH 条件を制約することを目的とする。

本研究では、まずエウロパ海底条件 1300 気圧下で溶液のオンライン採取が可能なステンレス製オートクレーブ装置を新規に構築した。これまでの熱水反応実験は、主に地球の海洋底での圧力条件（圧力 100〜500 気圧）で行われてきたが、厚い内部海を持つエウロパ海底での圧力条件（1000〜1500 気圧）に、その結果を直接外挿することはできなかった。

本研究では、世界初のエウロパ海底圧力下での熱水実験装置を構築することで、硫酸還元反応率を直接求めることに成功した。そして、このオートクレーブ装置を用いて、水素による硫酸還元反応の速度の pH 依存性を調べた。実験では、硫酸ナトリウム水溶液と水素ガスを純金製反応バッグ中へ封入し、高圧下におくことで水素を溶存させた。溶液の初期 pH は塩酸により調整した。採取溶液の硫酸、水素濃度をそれぞれイオンクロマトグラフ、ガスクロマトグラフにより測定し、硫酸濃度の時間変化から反応速度を算出した。

硫酸還元の反応速度は、280℃, 1300 気圧, pH = 5.2 において $5.0\pm0.5\times10^{-7}$ (/s)という値が得られた。これは 100 気圧での同様の温度、pH 条件での先行研究の結果（Truche et al., 2009）と比較して約 10 倍速い値である。このような圧力依存性は圧縮による溶存成分の衝突頻度の増加、あるいは中間生成物である HSO_3^-の濃度増加により生じたものと考えられる。また、硫酸還元の反応率は pH が小さいほど速くなる。これは、硫酸イオンのうち反応に寄与する状態である HSO_4^-の割合が低 pH で増加するためだと考えられる（Truche et al., 2009）。

このような硫酸還元反応速度の pH 依存性を踏まえると、まず１）エウロパ内部海の熱水環境における pH が強酸性〜弱酸性であること、２）硫酸濃度と pH を自己調整的に安定化させる可能性があることが示唆される。前者は、pH が中性以上では HSO_4^-が安定して存在できなくなるためである。この結果は、アルカリ性熱水環境をもつ土星衛星エンセラダスとは対照的であり、内部海の化学的多様性を示す初めての結果である。後者については、何らかの理由で硫酸濃度が上昇（あるいは減少）したとき、pH が減少（増加）することで、硫酸還元反応が促進（抑制）される。そして結果的に、硫酸濃度が減少（増加）することで pH が調整されうる。このような熱水環境の持つ負のフィードバック作用は、地球において炭素循環が大気・海洋の状態を安定に保つのと同様に、内部海を持つ天体の水環境の長期的進化を考える上で重要となると考えられる。

土星衛星エンセラダスのプリューム組成に対する氷・クラスレートハイドレート形成の影響

○西谷隆介[1]、谷篤史[2]、佐々木晶[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
[2]神戸大学大学院人間発達環境学研究科人間環境学専攻

土星の氷衛星エンセラダスには氷殻の下に内部海が存在するとされており、南極付近からは海水がプリュームとして噴出している。探査機カッシーニのその場観測によって、その成分は90%を超えるH_2OのほかにCH_4、CO_2、NH_3などが含まれていることが分かった（Waite Jr, J. H. et al., 2009）。これら化学種の組成は、プリュームが噴出するまでの間に氷やクラスレートハイドレートが形成されるために、海水中の組成とは異なると想定される。クラスレートハイドレートとは、ゲスト分子と呼ばれるガス分子が水分子でできた籠状構造に包接された化合物のことであり、エンセラダス内部海においても安定に存在できることが知られている（Bouquet, A. et al., 2015）。これまでの研究により、CH_4やCO_2といったガス分子だけでなく、アンモニウムイオンもクラスレートハイドレートに取り込まれることがわかっている（Shin, K, et al., 2014）。プリューム組成からエンセラダス内部海の化学種組成を知るにはこうした氷やクラスレートハイドレート形成の影響を考慮する必要がある。

本研究では、生命活動に必要な窒素原子を含むアンモニウムイオンに着目し、内部海のアンモニウムイオン濃度推定を試みた。アンモニウムイオン濃度推定のため、氷・クラスレートハイドレート形成に伴うアンモニウムイオン取り込み量の実験による評価、プリューム噴出までの氷・クラスレートハイドレート形成モデルの構築、噴出までの氷・クラスレートハイドレート形成に伴うアンモニウムイオン濃度変化の計算を行った。

実験の結果、クラスレートハイドレートは氷の3倍近くアンモニウムイオンを取り込みやすいことが分かった。この結果とカッシーニの探査データから、氷およびクラスレートハイドレートの生成率などをパラメータとして、内部海から表面に噴出するまでのアンモニウムイオン濃度の時間変化を計算した。計算の結果、探査データを再現しうる内部海のアンモニウムイオン濃度の範囲を求めることができた。この時、プリューム噴出までに氷のみが形成した場合とクラスレートハイドレートも形成した場合を比較すると、氷のみができた場合では、内部海のアンモニウムイオン濃度を過小評価してしまうことがわかった。

I1

超小型探査機による惑星探査技術の開発

杉田精司[1]、鈴木宏二郎[2]、中須賀真一[3]、吉川一朗[2]、今村剛[2]、船瀬龍[3]、小泉宏之[3]、
笠原慧[1]、吉岡和夫[2]、永田晴紀[4]、藤本正樹[5]

[1]東京大学・理学系研究科、[2]東京大学・新領域創成科学研究科、[3]東京大学・工学系研究科、
[4]北海道大学・工学研究院、[5]宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

日本の惑星探査プログラムに関する最大の問題は、探査を直接支える人材が絶対的に不足していることである。根本原因は、惑星探査機の打上げ頻度が少なすぎるために技術実証もプロジェクト経験を得る機会が十分に得られないことである。この問題は、惑星探査機１機あたりの予算が巨大であるから生じる。例えば、最も近い天体である月への着陸実証機でも100億円規模の予算が必要となる。新しい科学研究を行おうとして最低限の理学装置を搭載しようとすれば、すぐに３００億円規模の予算が必要となる。さらに、惑星探査の真髄は、実際に研究対象の惑星に接近したり大気突入したり着陸したりして「その場観測」をすることにあるため、実際に惑星に行かずして有意義な実証試験を行うことは極めて難しい。世界最先端のデータ取得にも技術実証にも惑星への到達が必要である。

超小型探査機PROCYONの成功は、圧倒的な低コストで惑星探査を実現する道を示した点で画期的である。この超小型バス技術を、柔構造展開型エアロシェル技術やハイブリッドロケット技術と結び付ければ、相乗り方式で火星や金星の大気突入探査を実現できる可能性がある。このような超小型機による惑星探査は、様々な理学目標実現や搭載装置実証に資するものであり、惑星探査のあり方を革新する可能性を持つ。

本講演では、このような日本独自の技術の組合せによる超小型機を用いた継続的な惑星探査を実現するスキームを提案する。

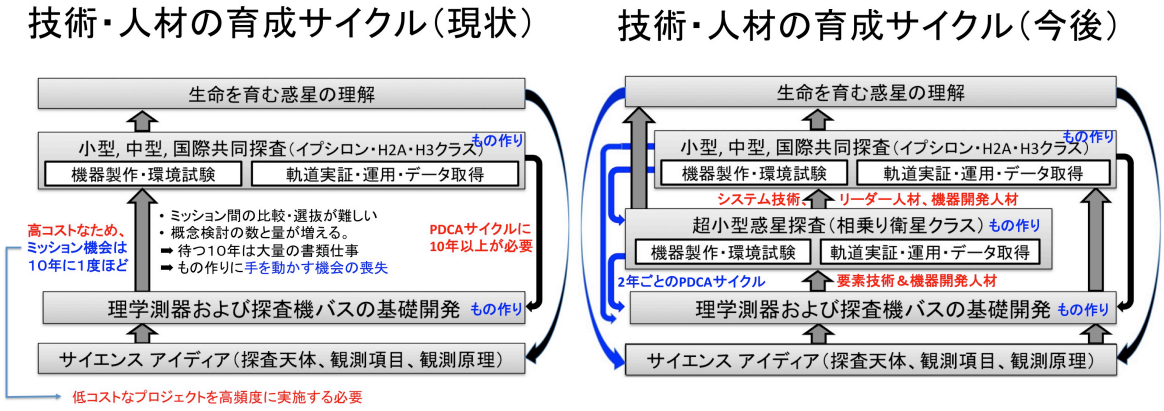


図１．惑星探査の技術・人材の育成サイクルの現状と超小型惑星探査機を取り入れた今後のスキームの概念図。新スキームでは、技術開発のPDCAサイクルを大幅に短縮できる。

超小型大気圏突入探査機の可能性：EGG から superEGG、さらにその先へ

○鈴木宏二郎[1]
[1]東京大学大学院新領域創成科学研究科

火星への着陸探査は、生命探査との関連もあり、社会的関心も高いため、機体の超小型化による低コスト化と探査の高頻度化が求められる。筆者の研究グループでは、展開型の柔構造膜面エアロシェルの持つ、１）軽量大面積の低弾道係数飛行による空力加熱環境の緩和、２）アブレータのような特殊材料不使用による製造の低コスト化、３）折り畳みよる高い収納性、３）低弾道係数により火星のような低密度大気でも必要な減速が得られる、などの利点に着目し、飛行実証を主体とした研究開発を行ってきた。2017 年 1 月から 5 月にかけ、国際宇宙ステーション(ISS)放出の超小型衛星 EGG による膜面エアロシェル衛星の軌道崩壊と大気圏突入実験を実施した。図１に衛星の概要と搭載 GPS による軌道落下履歴（エラーを含む全受信データ）を示す。なお、EGG の飛行実験結果の速報サマリについては、宇宙科学技術連合講演会（2017 年 10/25～27、新潟、http://branch.jsass.or.jp/ukaren61/）で OS 講演が企画されている。EGG 衛星はスラスタなどによる姿勢や軌道の制御系を持っておらず、自然落下に任せていた。探査では着陸地点の選択が重要である。EGG の欠点を克服するため、エアロシェルをさらに軽量化し、ナノスラスタを搭載した super EGG 衛星とも言うべき BEAK ミッションが JAXA 宇宙研の小規模計画に採択されており、2020 年の飛行実験を目指して機体開発が始まっている。EGG 同様、BEAK も 3U で 4kg の機体であり、多数の超小型着陸探査機の集合的運用による分散的探査（FSLander=Flock of Scattered Landers）構想に必要な技術の確立につながるものと期待される。ただし、超小型衛星が惑星探査においても活躍するには、その前提条件として、EGG におけるイリジウム、GPS に相当するような通信と測位のインフラ整備が必要となろう。

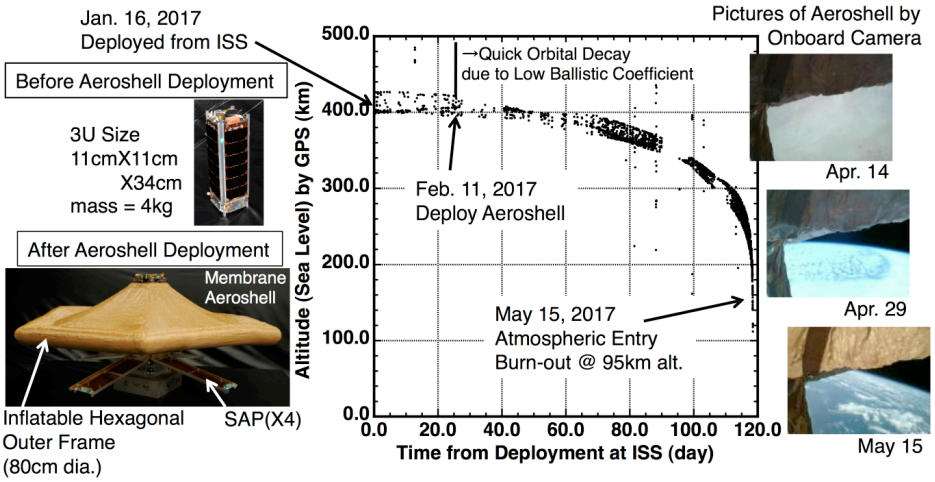


図１ EGG 衛星と高度履歴

EGG ミッションの実施に際し、JAXA 有人宇宙技術部門には、J-SSOD を利用した「きぼう」からの超小型衛星放出の機会を無償で提供頂き、また、衛星の開発においても多大なる支援、助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

東京大学における超小型深宇宙探査ミッションの成果と将来：PROCYON・EQUULEUS

○船瀬龍[1]

[1]東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

政府機関，企業，大学等により，深宇宙探査のためのナノ衛星（1-10kg）・マイクロ衛星（50kg 程度以内）が計画・開発されてきている．このような取り組みの第一歩として，東京大学と JAXA は共同で 50kg 級の深宇宙探査技術実証機 PROCYON (PRoximate Object Close flYby with Optical Navigation)を開発し，2014 年 12 月に小惑星探査機はやぶさ２との相乗りで打ち上げた．PROCYON は，深宇宙からの通信能力や自ら軌道変換する能力をもった衛星として，深宇宙を航行した世界初のマイクロ衛星である．PROCYON は，メインミッションである 50kg 級の超小型深宇宙探査機バスの実証に成功し，その他の工学技術実証・理学観測ミッションの一部にも成功した[1]．これにより，超小型衛星が深宇宙探査のための有効なツールとなり得ることを示した．

近年，世界中でさらに多くの超小型深宇宙探査ミッションが検討されてきており，その中で，NASA が開発している次世代大型有人ロケット SLS (Space Launch System)の初号機に，14kg 以内の 6U CubeSat（約 10x20x30cm）13 機が月フライバイ軌道へ相乗りすることになった．JAXA と東京大学は，この打上げ機会に，EQUULEUS (EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)を提供することになった．EQUULEUS の主ミッションは工学技術実証ミッションであり，太陽-地球-月圏での軌道操作技術をナノ衛星として世界で初めて実証することである．太陽の重力や月スイングバイを利用することにより，地球-月系のラグランジュ点（L2 点）周りの周期軌道へ，CubeSat でも十分達成できるような非常に小さな ΔV（deterministic な ΔV としては 10-20m/s 程度）で航行することを目指している．工学ミッションの他に，地球磁気圏プラズマの撮像ミッション（PHOENIX），月面衝突閃光観測ミッション（DELPHINUS），シス・ルナ空間のダスト環境計測ミッション（CLOTH）の３つの科学観測ミッションも EQUULEUS で実施する．

[1] Ryu Funase, et al., "One-year Deep Space Flight Result of the World's First Full-scale 50kg-class Deep Space Probe PROCYON and Its Future Perspective", 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, Utah, USA, 2016.

超小型宇宙探査機用推進系のこれまでと今後の展望

小泉宏之[1]，浅川純[2]，柳沼和也[2]，中川悠一[2]，船瀬龍[2]
[1]東京大学　大学院新領域創成科学研究科　先端エネルギー工学専攻
[2]東京大学　大学院工学系研究科　航空宇宙工学専攻

現在，小型宇宙機（ここでは 100 kg 以下を指す）の実利用が急速に拡大し，小型機を用いた宇宙探査・宇宙科学観測が実現する時代に突入した．2014 年には，東京大学が世界初となる超小型深宇宙探査機，PROCYON を開発し深宇宙における運用ならびに科学観測を成功させた．また，2019 年打ち上げ予定の NASA の大型基幹ロケット SLS には，相乗り衛星として 13 機の 6U キューブサットが乗り，月付近において様々な探査・観測を実施する．

このような小型宇宙機を利用した探査・観測を本格化させるためには，小型推進系の適用が不可欠である．現在，いくつかの小型推進系の搭載は始まっているが，多くは極めて比推力が低いスラスタに限られている．この中で，2014 年，東京大学は世界に先駆けて小型イオンスラスタの軌道上実証を果たした[1]．同基は推力 0.20–0.35 mN，比推力 700–1000 s，推進系全質量 8.1 kg，推進剤質量 1.0 kg の推進システムである．さらに，上述の PROCYON には，小型イオンスラスタとコールドガススラスタを統合した推進システム，I-COUPS，が搭載・実用された．I-COUPS は，深宇宙における 223 時間のイオンスラスタ作動および 1 年間に渡るコールドガススラスタ姿勢制御（RCS 機能）を達成している[2]．さらに，これらの推進系実証を皮切りに，今後数年以内に，ヨウ素イオンスラスタ，RF プラズマスラスタ，インジウム電界放出型スラスタ，など多くの高性能スラスタの実証が様々な組織により計画されている．

また，小型推進系においては，従来の大型推進系が性能最重視という姿勢と異なり，安全性・取扱性の重要性が相対的にあがる．これは相乗り打上の調整，短期間開発，射場への空輸性，射場充填の困難さ等が理由である．したがって，小型推進系にとって高圧ガスや毒劇物からの脱却は推進性能と同等なほど重要と言える．このため，東京大学ではこれまでのキセノン（高圧貯蔵が必要）を利用したスラスタから，水を推進剤としたイオンスラスタおよびレジストジェットスラスタの統合推進系研究を進めている．水は安全性・取扱性という観点で他の推進剤とは一線を画す存在である．現在，水イオンスラスタは性能を高める研究が進められており，水レジストジェットスラスタは，2019 年打上予定の EQULEUUS に搭載・実証をするため開発が進められている．この統合推進系は，将来的に 6U キューブサットに 1 km/s 速度増分による軌道遷移能力と 50 m/s の速度増分もつ RCS を提供し，今後の小型宇宙機による宇宙探査の幅を大きく広げるものであると期待している．

[1] Koizumi, H. Komurasaki, K., Aoyama, J., and Yamaguchi, K.,“Engineering Model of the Miniature Ion Propulsion System for the Nano-satellite,“Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 12, pp.Tb_19-Tb_24, 2014.

[2] Koizumi, H., Kawahara, H., Yaginuma, K., Asakawa, J., Nakagawa, Y., Nakamura, Y., Kojima, S., Matsuguma, T., Funase, R., Nakatsuka, J., and Komurasaki, K., Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System installed on Small Space Probe: PROCYON, Transactions of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sci., Aerospace Technology Japan, Voll. 14, Pb_13-Pb_22, 2016.

超小型深宇宙探査機EQUULEUSによる月面衝突閃光を通した太陽系小天体探査

Solar System Small Bodies Exploration using Lunar Impact Flash Camera on Deep Space 6U-class Spacecraft EQUULEUS

○阿部 新助[1]，柳澤 正久[2]，矢野 創[3]，船瀬 龍[4]

[1]日本大学理工学部, [2]電気通信大学, [3]JAXA/ISAS, [4]東京大学

EQUULEUS (EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft) will be the world's smallest spacecraft to explore the Earth—Moon Lagrange point. The spacecraft is being jointly developed by the University of Tokyo and JAXA which will be launched by NASA ' s SLS (Space Launch System) EM-1 (Exploration Mission-1) as one of thirteen secondary payloads in 2019. The primary objective of the mission is the demonstration of the trajectory control techniques within the Sun-Earth-Moon region (Cislunar space) for the first time by a nano-spacecraft. For this purpose, the spacecraft will fly to a libration orbit around the Earth-Moon L2 point (EML2) that are stable in position in reference to the Earth and Moon.

Cislunar space is the area around the Earth extending out to just beyond the Moon's orbit which includes the five Lagrangian points. In particular, the two Lagrangian-points, EML1 and EML2, roughly 60,000 km from the lunar surface, are the most important for deep space transport purposes because spacecraft can be kept there with minimal propellant use for station-keeping.

DELPHINUS (DEtection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft) is one of the scientific instruments onboard deep space 6U-class spacecraft EQUULEUS to observe Lunar Impact Flashes (LIFs) and near-Earth Asteroids (NEAs) from the EML2 halo orbit.

When a meteoroid impacts the moon at several 10s of km/s, a 0.1-0.01 second, flash in visible and near-infrared region can be observed. LIF monitoring has a great advantage to detect large meteoroids in the mass range between 10s of grams and few kilograms corresponding to centimeters and tens of centimeters or meter size depending on impact velocity, which is as a bridge between visual meteors (mm size) and small asteroids (meter size).

It is also essential for human space activities to understand the size distribution and the influx rate of meteoroids onto the lunar surface and the Cislunar space including the Earth. In this paper, we will introduce the first space observation of LIF that will give a new insight to investigate solar system small bodies.

超小型探査機による光学観測手法の惑星科学への応用

吉岡和夫[1]、桑原正輝[1]、吉川一朗[1]、今村剛[1]、 田口真[2]、亀田真吾[2]、船瀬龍[3]、小泉宏之[1]、鈴木宏二郎[1]、笠原慧[4]、杉田精司[4]

[1]東京大学・新領域創成科学研究科、[2]立教大学・理学部、[3]東京大学・工学系研究科、[4]東京大学・理学系研究科

近年 100kg 未満の超小型探査機による太陽系天体の観測計画が国内外の大学・研究機関で進められている。複数の観測装置を駆使して総合的な科学成果の創出を目指す大型ミッションとの相補性を確保するために、一点に特化した観測技術の応用が超小型ミッションにとっては極めて重要である。超小型計画は、大型計画の相乗り機会などを利用することで、その間口を広げられる。しかし、一般的に予算や開発期間に厳しい成約があるため、効率よく遂行するためには即応性と柔軟性が要求される。

光を用いた遠隔観測は、着陸や周回軌道投入を必ずしも必要としないため、相乗り機会を用いた超小型探査において強力な手段である。観測対象に近づくだけでも地球周回からの観測よりは数桁高い観測効率を実現できる。また、観測対象との距離や位置関係を最適化する軌道を自由に選べるという点でも、超小型ミッションは光学観測に向いている。

本発表では、2019 年の打上を目指して開発が進められている超小型探査機（EQUULEUS）に搭載される光学観測装置の仕様と開発状況を紹介する。このミッションでは地球と月の第２ラグランジュ点から、地球周辺に広がるプラズマ大気を広角に捉える光学観測を行なう。電気回路部、光検出部、望遠鏡部を全て含めても 1kg 以下という極めて小さな望遠鏡であるが、ヘリウムイオンが発する極端紫外光（波長 30.4nm）を効率よく観測する工夫が施されており、各要素において試作機の性能評価を終えた段階である。

また本発表では、遠隔的に天体の同位体組成を調べる従来とは異なる手法の原理について、基礎実験の結果を基に説明する。この手法が実現すれば、極めて小型（1kg 以下）ながら、10kg を超える大型分光器にも勝る波長分解能を実現できるため、超小型探査ミッションの意義に合致する。現在遂行中のミッションを通して得る知見と、新しい観測技術を融合することで、次世代の超小型ミッションを創出する足がかりを作れると考えている。

超小型探査機による火星大気散逸科学へのアプローチ
−火星大気 Ne 同位体測定に向けた超小型質量分析装置の研究・開発−

○奥野衛[1]、吉岡和夫[2]、三浦弥生[3]、長勇一郎[4]、 齋藤義文[5]、 笠原慧[1]、 杉田精司[1]
[1]東京大学理学系研究科、[2]東京大学新領域創成科学研究科、[3]東京大学地震研究所
[4] NASA Marshall Space Flight Center、[5]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

火星は過去に厚い大気を持っていたと考えられているが、現在では希薄で、乾燥した環境である。形成時から現在に至るまでの数十億年にわたる大気進化の過程では、宇宙空間への散逸が重要な役割を果たしてきたと考えられている。このような大気の進化過程を理解するための鍵となるのが Ne や Ar などの希ガスの同位体である。希ガスは化学的に不活性で、地表物質との相互作用もほとんどなく、また、上層大気での光化学反応なども起こさないため、その大気組成は太陽風・太陽放射による大気散逸や惑星内部からの脱ガス、天体衝突による供給などの歴史を反映していると考えられる。なかでも質量の軽い Ne は、これら大気進化の過程に強く影響される重要な指標である。

しかし、火星大気の Ne 同位体組成は、多量に存在する Ar の二価イオンが測定の妨げとなることから、これまで直接測定されたことはない。質量分析の際、$^{20}Ne^{+}$に対して、多くの $^{40}Ar^{++}$が存在する場合、それらの質量電荷比(m/z)はほぼ等しいため、四重極型質量分析計（QMS）のような一般的な小型質量分析計では Ne と Ar を分離できないという潜在的な問題を抱えている。

そこで我々は、将来のローバーなどによる火星表層の直接探査を念頭において、火星大気中に含まれる Ne の同位体測定を可能にすべく、簡便な分別膜を併用した質量分析装置の開発を進めている。本研究では、^{20}Ne を測定する際に妨げとなる $^{40}Ar^{++}$を、分別膜を用いて QMS 導入前に物理的に排除する仕組みを検討し、軽量かつ高効率の観測装置の実現を目指している。

これまでに、分別膜として厚さ 1 mm のバイトンを用い、分別膜に対して地球大気を透過させると、地球大気中では 10^{-3} 程度の $^{20}Ne/^{40}Ar$ 存在比を、3 桁程度向上させられるとの結果を得た。また、質量分析計のイオン化部において、70 V という典型的なイオン化電圧では、$^{40}Ar^{+}$に対して約 10%の $^{40}Ar^{++}$が生成されることを確認した。

この結果は、分別膜によって $^{20}Ne/^{40}Ar \sim 1$ に向上させれば、$^{40}Ar^{++}$の補正をすることで ^{20}Ne の計測を誤差 10%以下で実現できることを意味する。本研究は地球大気を用いた実験であるため、組成や分圧の異なる火星大気条件での膜に対する透過特性は今後詳しく検証する必要がある。しかし、分別膜の素材、厚み、透過時間等のパラメタを最適化することで分別効率をさらに向上できる余地もあるため、本研究の結果は火星大気中での Ne 同位体測定の実現可能性を強く示唆するものである。発表では、膜に対するガス透過の理論式を基に、実験結果と比較して議論した結果も報告する。

超小型探査機による惑星観測に向けた粒子計測器の開発

○笠原慧[1], 沖津由尚[1], 平原聖文[2], 齋藤義文[3], 横田勝一郎[3], 三浦弥生[4], 奥野衛[1], 吉岡和夫[5], 杉田精司[1]

[1]東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, [2]名古屋大学 宇宙地球環境研究所, [3]宇宙科学研究所, [4]東京大学 地震研究所, [5]東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻

人工飛翔体を用いた探査は，宇宙・惑星科学を進める上で不可欠な手法となっている．深化していく科学要求に応じて，飛翔体は必然的に大型化する傾向にあるが，それはコスト・開発期間の増大を意味している．そこで我々は，より機動的な惑星探査，具体的には，超小型と呼ばれる 100kg 以下のバスの利用を検討している．超小型バスへの搭載に向けて，質量分析器のような観測器の小型化が必要になるが，これは将来のフラッグシップミッションへの搭載可能性を高めるうえでも有用なアプローチである．

惑星探査において，粒子分析器による大気の同位体比計測・表層物質の年代計測は，惑星進化の解明の鍵となる．ところが，そのような惑星探査向け中性粒子分析器の開発実績は、国内では極めて乏しいのが現状である．このため我々は新たに，惑星探査機に搭載可能な中性粒子の質量分析器の開発を実施している．質量分析器には，目標とする質量分解能に応じていくつかの種類があるが，同位体の分析が可能な程度の分解能を持ちつつ小型化に適した原理として，四重極型質量分析が考えられる．現在テストモデルの設計を進めており，数値シミュレーションでは,100㎜程度のフライト長で,150 程度の質量分解能が得られている．信号検出にはチャネルトロンを用いる想定である．また，中性粒子を分析するには，質量分析器の前段でイオン化する必要があるため，電子銃の開発も大きな課題である．カソード材料の工夫により，従来に比して希薄な大気でも計測が可能な，大電流の電子銃を検討している．今後，これらの設計を進め，テストモデルを製造し，実験室内で試験する予定である．

A1

岡山188cm望遠鏡/MuSCATを用いた多色トランジット観測の成果と展望

◯福井暁彦[1], 成田憲保[1,2,3], 日下部展彦[1,3], 笠嗣瑠[1,4],
平野照幸[5], John Livingston[2], Jerome de Leon[2], 渡辺紀治[1,4], 川島由依[2], 生駒大洋[2],
泉浦秀行[1], 柳澤顕史[1], 田村元秀[1,2,3], 山室智康[6]

[1]国立天文台, [2]東京大学, [3]アストロバイオロジーセンター, [4]総合研究大学院大学,
[5]東京工業大学, [6]オプトクラフト

ケプラー宇宙望遠鏡はその第一期探索（2009-2013年）において、トランジット法を用いて地球型ハビタブル候補惑星を含む4千個以上の惑星および惑星候補を発見し、短周期の小型惑星が宇宙に豊富に存在することなどを突き止めた。しかし、その大半は太陽系から遠方に位置し、主星が暗いために、個々の惑星系のより詳細な情報を引き出すことは困難である。そこで現在、太陽系により近いトランジット惑星を探索する地上およびスペースのプロジェクトに注目が集まっている。特に、2018年に全天トランジット惑星探索衛星TESSが打ち上げられる予定であり、多数の太陽系近傍の小型トランジット惑星の発見が期待されている。

一方、このよう広域トランジット惑星探索では、通常小型かつ広視野（低解像度）の望遠鏡が用いられ、多くの惑星候補を発見することは出来るものの、本物の惑星かどうかの判別や、惑星の大気を調べるといった詳細観測は困難である。そのため、地上の中口径望遠鏡を用いたフォローアップ観測が不可欠である。特に、地上から多色でトランジットを捉えることが出来れば、惑星候補の偽検出を容易に判別したり、惑星大気の大まかな情報を引き出すことが可能である。

そこで我々は、トランジット惑星候補の発見確認や大気観測を目的として、国立天文台岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡用に3色同時撮像カメラ「MuSCAT」を開発し、2015年より運用を開始した。同カメラは6.1'×6.1'の視野を持つ3つのCCDカメラを有し、可視域3バンド（g, r, zバンド）で系外惑星トランジットを同時かつ高精度に観測することが可能である。

我々はこれまでにMuSCATを用いて、ケプラー宇宙望遠鏡の第二期探索（K2）や、地上のトランジット探索プロジェクトKELTで発見される惑星候補についてフォローアップ観測を実施し、いくつかの重要な惑星の発見に貢献を果たした（K2-26b, K2-105b, KELT-9b）。特に、2017年6月に発見を報告したKELT-9bは、1万Kを越える高温の恒星をまわる史上最も高温（約4,600K）のホットジュピターであり、極限環境をもつ系外惑星として今後の重要な研究対象と目されている。

また、MuSCATを用いてトランジットが起こる時刻を精確に測ることで、複数惑星系の重力摂動効果を観測して外側惑星の質量を決定したり（K2-19b）、ハビタブル惑星候補の公転周期を正確に求め、将来のトランジット時刻予測精度を改善することにも成功した（K2-3d）。

A2

新しい4色同時撮像カメラMuSCAT2の開発と今後の小型低質量系外惑星探索の展望

○ 成田憲保[1,2,3], 福井暁彦[2], 日下部展彦[2,3], 渡辺紀治[2,4], 田村元秀[1,2,3], 山室智康[5]

[1] 東京大学, [2] 国立天文台, [3] アストロバイオロジーセンター,
[4] 総合研究大学院大学, [5] オプトクラフト

2018年3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) が打ち上げられる予定となっている。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の観測成果については福井暁彦氏の講演を参照)。

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、天体からの光を3枚のダイクロイックミラーで波長分割し、4つの波長帯 (gバンド: 400-550nm、rバンド: 550-700nm、iバンド: 700-820nm、zバンド: 820-920nm) で同時に撮像観測を行うことができる装置である。MuSCAT2は視野7.4分角と装置ローテータを備えており、約10分角離れた場所にある天体との相対測光観測ができる。そのため、MuSCAT2は比較的明るいターゲットに対しても参照星を得られる視野を持ち、4色で同時に高精度なトランジット観測を実施することができる。これによりMuSCAT2はトランジット惑星の発見確認観測のほか、トランジット惑星の可視波長域での透過光スペクトルの特性を調べることも可能である。

2018年に打ち上げ予定のTESSでは、太陽系近傍にあって詳細なフォローアップ観測が可能な地球の4倍以下の半径を持つ小型トランジット惑星が数百個以上発見されると見込まれている (Sullivan et al. 2015)。MuSCAT2はこの4色同時撮像機能と、豊富な観測時間、そして良好な晴天率によって、TESS打ち上げ後のトランジット惑星の発見確認観測や惑星大気の特徴付けの観測において、世界をリードすることができると期待できる。

本講演では2017年8月24日にファーストライトを迎えたこのMuSCAT2の詳細と、来るTESSの時代の小型低質量系外惑星探索の展望について発表する。

A3

紫外線宇宙望遠鏡 WSO-UV による系外惑星サイエンス

◯ 生駒大洋[1]，亀田真吾[2]，村上豪[3]，成田憲保[1]，小玉貴則[1]，
西川淳[4]，塩谷圭吾[3]，田村元秀[1,5]

[1] 東京大学，[2] 立教大学，[3]JAXA 宇宙科学研究所，[4] 国立天文台，[5] アストロバイオロジーセンター

系外惑星科学は，地球のように水を保持し 生命兆候を示す惑星を発見し，それらの多様性および起源の解明に向けて，これまで着実に進展してきた．宇宙望遠鏡 Kepler 等による系外惑星サーベイによって，惑星系の普遍性と多様性が明らかになった．特に，中心星近くの系外惑星に関して得られたサイズ分布は，惑星形成過程に重要な観測的制約となっている．いっぽう最近では，Proxima Centauri や TRAPPIST-1 などのように，低温度星まわりに 地球と同程度のサイズで 同程度の中心星光照射を受ける（いわゆるハビタブルゾーンにある）惑星が発見されはじめた．これらの惑星系は我々から比較的近くにある．そのため，惑星の特性を詳細に調べること（特徴づけ）が可能である．このように，これまで仮想的な惑星に対する理論研究をベースに進展してきたハビタブル惑星研究が，いよいよ実在の惑星を対象とした実証的な研究となる時代が到来したと言える．こうした動きは 来年以降に打ち上げ予定の TESS や PLATO による太陽近傍の系外惑星サーベイによって加速する と期待される．

次なる大きな課題は，上述のような生命保有惑星候補の大気の特性を調べ，水や生命の兆候を検出することである．一方，それらの形成過程を解明するために鍵となるのは，Kepler や TESS, PLATO では未開拓の領域であるスノーライン付近やそれ以遠の惑星を検出し その存在確率を得ることである．そうした目標のために，我々はロシアとの国際共同ミッションとして，2022 年頃に口径 1.7m の宇宙望遠鏡（WSO-UV）の打ち上げを計画している．

まず，独自に開発した紫外線分光器を搭載し，低温度星まわりのハビタブルゾーン付近に存在する地球型惑星に対して，紫外線トランジット観測を行う．それによって，高層大気に存在する酸素と水素を検出し，その広がりを測定することを目指す．酸素は言うまでもなく有力なバイオマーカーであるが，これまでに系外惑星で検出された例はなく，現在計画されている他の観測プロジェクトでもその検出は現実的ではない．また，本プロジェクトでは，酸素と水素の双方を同時に観測することによって，水の有無や大気散逸過程に関する重要な制約を得ることができる．さらに，高層大気の広がりは CO_2 の存在に影響を受けるため，この観測から CO_2 の有無も制約され，結果として地表付近の気候状態に関する情報を得ることも期待される．

次に，我々が基礎開発を行ってきた技術を発展させ 高感度・高解像度・高コントラストの可視光コロナグラフを実現し，太陽型星のスノーライン付近やそれ以遠の木星級〜海王星級惑星を世界で初めて直接に検出することを目指す．スノーライン付近は惑星材料物質が濃集する領域であり，そのあたりの惑星の存在度が惑星形成過程の解明に極めて重要であるが，現在計画中の他の観測プロジェクトで，その領域の惑星を検出できるものは 2020 年代後半に予定されている WFIRST のみである．つまり，我々V は WFIRST に先駆けて，その領域を開拓する．他にも，ガス集積中の巨大ガス惑星から放たれる Hα 線の検出や，残骸円盤の直接撮像など画期的な観測も可能であり，さらに有益な情報が得られると期待される．

本講演では，こうした WSO-UV のサイエンスについて概説する．

A4

短周期ガス惑星の質量放出と大気構造の惑星磁場強度への依存性

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

太陽系外惑星の多波長でのトランジット観測からは，惑星大気の様々な情報を得ることができる．例えば紫外線，特にライマンアルファ線でのトランジット観測からは，ホットジュピターやホットネプチューンのような高温のガス惑星から，大量の大気散逸が起きている事を検出することができる．これまでの観測からは，複数のホットジュピターやホットネプチューンから，高速で大気が流出している様子が分かっている．

ガス惑星からの質量放出を駆動する機構としては，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，質量放出現象の詳細に関してはまだ不明な点も多い．我々はこれまでに，ホットジュピターの大気中における磁気流体波動の散逸によって駆動される質量放出モデルを提案してきた（e.g., Tanaka et al. 2014)．惑星が固有磁場を持ち，大気に乱流が存在する場合，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することができる．このモデルでは，観測と整合的で，XUV 駆動とも同程度の質量放出率が実現される．

一方で，系外惑星が持つ磁場については，現時点で得られている情報は非常に限定的である．しかし観測と理論を組み合わせて系外惑星の磁場に制約を与える試みも行われている．我々の提案している質量放出モデルは，惑星の磁場が鍵を握る現象である．そのため，質量放出率や高層大気構造が惑星磁場強度にどう依存するかは，観測からの惑星磁場の制約に役立つ可能性がある．

ここでは，惑星の磁場強度をパラメータとしてシミュレーションを行い，質量放出率や構想大気構造が惑星磁場強度に対してどのような依存性を持つかを調べた．その結果，磁気流体波動によって駆動する質量放出率は，磁場強度が木星磁場の 0.1 ～ 3 倍程度の範囲内においては，桁で変化するほどの強い依存性は示さないことが分かった．しかし惑星の磁場強度と質量放出率は単純な比例関係にあるわけではなく，質量放出率が極大になるような磁場強度が存在することも判明した．

A5

中心星近傍をまわる岩石惑星の質量損失：ミネラル大気の散逸

◯ 伊藤祐一[1]、生駒大洋[1]

[1] 東京大学 地球惑星科学専攻

現在までに、2 地球半径以下の惑星半径を持つ、小サイズの系外惑星は 1000 個以上発見されている。それらの約半数は、岩石の融点温度を超えた放射平衡温度を持つほど中心星近傍に存在しており、中心星からの強烈な X 線や紫外線の照射によって、大規模な大気散逸を経験したはずである。仮に原始惑星系円盤由来の大気（以下、水素大気という）が元々存在したとしても、それらは惑星から速やかに除去されてしまうと推定される (Valencia et al.2010)。そのため、中心星近傍の岩石惑星は、マグマ由来の蒸気で構成された大気（以下、ミネラル大気という）を保持すると考えられている (Schaefer & Fegley 2009, Ito et al. 2015)。このミネラル大気も、もし紫外線によって効率よく散逸するならば、中心星近傍の岩石惑星はその惑星質量の大部分を失うような進化をたどったことになる。これまで、このミネラル大気の散逸については、水素大気よりも大気組成の観点から放射冷却効率が高いことや、平均分子量が大きいことを理由に、散逸効率が低いと想定され、詳細に検討されてこなかった。

本研究では、ミネラル大気の主成分である Na と O で構成された大気での放射過程、化学反応を考慮した 1 次元の流体計算コードを開発し、中心星近傍をまわる岩石惑星の質量損失過程を調べ、中心星から紫外線を照射されたミネラル大気の流出率を推定した。紫外線が強い、若い年齢（0.1Gyr）の G 型星の中心星による紫外線照射環境（恒星スペクトルモデル：Claire et al., 2012）では、スーパーアースサイズの岩石惑星（$10M_\oplus$ 、$2R_\oplus$ 、0.02AU）は $0.1M_\oplus$/Gyr で大気が流出することが判明した。これは、ミネラル大気の最も主要な成分である Na を惑星全体から散逸させる流出率である。また、同様の条件での火星サイズの岩石惑星（$0.1M_\oplus$ 、$0.5R_\oplus$ 、0.02AU）は $25M_\oplus$/Gyr で大気が流出することが判明した。これは、惑星質量全てを 4×10^{-3}Gyr で失わせる流出率である。また、Na はミネラル大気中の最も強力な冷却材として機能していいたため、Na が散逸した後のミネラル大気では散逸率は上昇する可能性が高い。したがって、長時間スケールでの惑星の進化を考える上で、大気散逸に伴った大気組成変化による散逸率への影響は重要となるであろう。この大気組成変化による散逸率への影響を理解するには本検討のみでは乏しいが、大気散逸によって惑星サイズと軌道長半径の平面で惑星の存在限界が生じる可能性を議論する。

A6

大気海洋海氷結合モデルを用いた 全球海惑星気候の太陽定数依存性に関する研究

○河合 佑太[1,2], 高橋 芳幸[1], 石渡 正樹[3], 西澤 誠也[2], 竹広 真一[4], 中島 健介[5], 富田 浩文[2], 林 祥介[1,6]
[1]神戸大学・理, [2]理化学研究所・AICS, [3]北海道大学・理,
[4]京都大学・数理研, [5]九州大学・理, [6]惑星科学研究センター

はじめに

系外惑星で実現される気候の多様性の理解を深めるために，我々は大気大循環モデルを用いて全球が海で覆われた惑星(海惑星)の気候を調べてきた．例えば， Ishiwatari *et al.* (2007，以後 INTH07)では，伝統的な南北 1 次元エネルギー・バランスモデル(EBM)による研究(Budyko, 1969 等)の発展として，惑星放射の射出限界や大気大循環が陽に考慮される系で海惑星気候の太陽定数依存性を調べた．数値実験から，現在地球の太陽定数近傍で全球凍結解・部分凍結解・氷なし解・暴走温室解が得られ，それらの解が同じ太陽定数に対して共存することを示したが，海洋大循環は全く考慮しなかった．しかしその後，海洋熱輸送が気候に与える影響を考慮するために，海惑星の気候研究において海洋大循環が陽に扱われるようになってきた（Marshall *et al.*, 2007 等）．特に, Rose (2015) (以後 R15)は，大気海洋海氷結合モデルを用いて海惑星気候の太陽定数依存性を調べ，海洋熱輸送により新たな安定平衡解(赤道非凍結解)が生じることを示唆した．しかし，太陽定数が大きい場合には焦点が当てられず，暴走温室解は調べられていない．本研究では，INTH07 の発展として，INTH07 の大気設定のもとで，大気海洋海氷結合モデルを用いて海惑星気候の太陽定数依存性を調べる．また，海洋大循環の有無による気候レジームの変化にも注目し，海惑星気候に対する海洋の役割を考察する．

モデルと実験設定

実験には，系外惑星の気候探索を念頭に我々が開発している大気海洋海氷結合モデルを用いる．大気モデルは惑星大気大循環モデル DCPAM* である．力学過程では, 3 次元プリミティブ方程式系が擬スペクトル法によって解かれる．放射過程は Nakajima *et al.* (1992)の灰色大気放射スキーム，凝結過程は Manabe *et al.* (1965)の湿潤対流調節スキームと大規模凝結スキーム，鉛直乱流混合過程は Mellor and Yamada level 2 スキームによって表現される．海洋海氷モデルは軸対称モデルである．海洋の力学過程では，静力学ブジネスク方程式系が擬スペクトル法によって解かれる．海洋の中規模渦や対流による混合は, Gent and McWilliams (1990)や Marotzke (1991)のパラメタリゼーションにより表現する．海氷モデルは Winton (2000)の鉛直 3 層熱力学モデルであり，海氷輸送は水平拡散で表現する．表面アルベドは表面温度が-10 度以下では 0.5，それより高い場合は 0 にする．海洋の影響を調べるために，海洋熱輸送なし・海洋熱容量なし(swamp ocean)，海洋熱輸送なし・海洋熱容量あり(60 m slab ocean)，海洋熱輸送あり・海洋熱容量あり(海洋大循環モデルを結合; dynamic ocean)の 3 種類の海洋設定を考える．太陽定数 S は約 900~1600 W/m^2 の範囲で約 50 W/m^2 ごとに指定する．大気モデルの解像度は, S≦1450 W/m^2 の場合は水平格子幅約 6 度・鉛直 16 層，それ以外の場合は水平格子幅約 6 度・鉛直 32 層である．海洋モデルの解像度は南北格子幅約 3 度・鉛直 60 層，海氷モデルの南北格子幅は約 3 度である．多くの実験で初期に 280 K 等温の静止した大気海洋を与えるが，解の多重性を調べるために各パラメータ実験に対して幾つかの初期条件を与える．時間積分は swamp/slab ocean 実験で約 300 年間, dynamic ocean 実験では周期的同期結合(Sausen and Voss, 1996)により約 3 万年間行う．

計算結果

標準実験(S=1380W/m^2)に対する統計的平衡状態は，現在地球の基本的な大気大循環パターンや Marshall *et al.* (2007)が得た海惑星の海洋大循環場を定性的に再現した. dynamic ocean 実験において，全球凍結解・部分凍結解・暴走温室解が得られ，約 S=1200~1500 W/m^2 に渡ってこれらの解の共存が確認された．本実験では，R15 が示唆した，海洋熱輸送によって生じる新たな安定平衡解は見つからなかった. swamp ocean 実験と dynamic ocean 実験の結果を比べると，両者の部分凍結解のブランチは近い位置にあることが分かった．一方で, slab ocean 実験は他の海洋の扱いより初期値依存性が強く，初期に 280 K の等温大気海洋から始めた場合には，他の海洋の扱いより温暖な気候に落ち着いた. dynamic ocean 実験と swamp ocean 実験の部分凍結解を比較すると，海洋熱容量と海洋熱輸送の考慮は，太陽定数が大きい場合は気候を寒冷にする方向に働くのに対し，太陽定数が小さい場合は気候を温暖にする方向に働くことが示唆された．

---

* URL : https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam

B1

始原的炭素質コンドライトMIL090657マトリクスにおける水質変成度の異なる岩相のTEMによる微細組織観察

○杉本美弥茉[1]、土`山明[1]、松本恵[1]、伊神洋平[1]、三宅亮[1]、
Keiko Nakamura-Messenger[2], Aaron S. Burton[2], Scott Messenger[2]
[1]京都大学、[2]NASA/JSC

始原的炭素質コンドライトMIL090657隕石(CR2.7[1])のマトリクス中には、多様な岩相が存在する。岩相1は大きさも組成もほぼ均質なサブミクロンサイズの無水珪酸塩粒子が支配的であり、岩相2には惑星間塵CP-IDPの主要構成物であるGEMSに類似した非晶質組織が豊富に存在する[2,3]。岩相2はさらに組成の違いでサブ岩相2-B(bright)、2-D(dark)に分けられ、前者の方がややFeOに富む[4]。一方で、岩相3～6は含水珪酸塩が支配的であり、それぞれFeの含有量や包含鉱物の違いで区別できる[5]。このような多様な岩相の形成・集積過程を考えることは、始原的炭素質コンドライトの形成過程を知る上で重要である。

先行研究[5]の課題として、岩相4、5、6はX線CTによる観察しか行われておらず、構成相の同定は、CT画像の吸収コントラストや位相コントラスト（DET法、SIXM法[6,7]）に基づいたものであることが挙げられる。この手法では、誤差を考えると含水珪酸塩と炭酸塩の判別が難しく、また、画素サイズは40～100nm程度のため、サブミクロンサイズの構成物を多く含む岩相同士の境界の詳細な観察も難しい。

本研究では、(1)X線CTで推定した相を確かめること、(2)岩相境界の詳細な観察を行うことを目的として、X線CT試料からFIBによって薄片を切り出し、岩相2-B、2-D、5、6、およびそれらの境界に注目してTEM観察を行った。

(1)岩相5、6について。岩相5は結晶性の悪い含水層状珪酸塩が支配的であり、マグネタイトや炭酸塩鉱物、燐酸塩鉱物を含み、水質変成を被った岩相であることが確認された。岩相6は弱いリング状の電子線回折パターンを示したが、高分解能での層構造や繊維状組織は確認できなかった。(2)岩相境界について。岩相5と岩相2-Dは明瞭な境界を持つ一方で、岩相5の中にも岩相2-Dに特徴的なGEMS様組織が点在しており、集積過程において何らかの混合作用が働いたものと推測される。また、岩相6と岩相2-Bの境界は明瞭でギザギザしており、これは両者が集積したことを示唆している。

参考文献 [1] Davidson et al. 2015, 46th LPSC, 1603. [2] Cao et al. 2016, 47th LPSC, 2427. [3] Sugimoto et al. 2016, Goldschmidt WS on Experimental Cosmochemistry, 15. [4] 杉本ほか 2016, 日本鉱物科学会講演要旨集 [5] Sugimoto et al, 2017, JpGU, PPS10-P09. [6] Tsuchiyama et al. 2013, GCA, 116: 5-16. [7] Takeuchi et al. 2013, J. Synch. Rad., 20: 793-800.

B2

粉体流中のアグリゲイト形成実験

○長足 友哉[1], 大村 知美[1], 木内 真人[1], 中村 昭子[1], 和田 浩二[2], 長谷川 直[3]
[1]神戸大学大学院理学研究科,[2]千葉工業大学惑星探査研究センター,[3]宇宙航空研究開発機構

はじめに:ダスト粒子の付着成長によるアグリゲイト形成は惑星形成への最初のステップであり、その付着成長が可能かどうかは惑星形成論において非常に重要となる。一方、真空チャンバー内に設置された漏斗から流れ落ちる粉体流は重力下で加速され、落ちるにつれて鉛直方向の速度勾配が流れを引き伸ばすと同時に、流れにネックが生じ、最終的にクラスターが形成される。これが粒子の表面凹凸間の van der Waals 力と毛細管力の組み合わせから生じる固着力によりもたらされることが先行研究により示唆されている [1]。我々は、アグリゲイト形成の素過程の理解のため、粉流体実験を行い、粒子の固着力の測定も併せて行なった。

実験方法:粉体流実験は、大気中および宇宙航空研究開発機構の縦型真空チャンバー内で行なった。粒子には、直径 100 μm 及び 50 μm のガラスビーズを用いた。漏斗には、足径 4 mm のガラス漏斗と足径 8 mm のプラスチック漏斗を用いた。アグリゲイト形成の様子は、粒子とともにチャンバー内で落下するデジタルカメラを用いて毎秒 600 コマで撮影した。チャンバー内は~3 Pa で真空引きしている。さらに、流出口付近及びアグリゲイト形成時の詳細な観察のため、固定した高速度カメラを用いて毎秒 5400 コマでの撮影も行った。これらの動画の解析から、粉体流の速度場を求めた。これとは別に、ガラス平板に付着させた粒子に遠心力をかけていき、粒子が平板から離れたときの遠心力がその粒子の固着力であるとする測定を行なった。また、粒子の表面形状は、レーザー変位計を用いて測定した。

実験結果:粉体流の実験では、ガラスビーズ 100 μm に比べ、50 μm の方がクラスターを形成しやすいことがわかった。また、固着力の測定結果から、ガラスビーズ 100 μm は粒子ごとで固着力にばらつきが大きく、理論値よりも小さい値を示すものが多い一方で、ガラスビーズ 50 μm はばらつきが小さく、理論値に近い値を示すものが多いことがわかった。さらに、レーザー変位計による測定から、ガラスビーズ 50 μm に比べ、100 μm の方が、表面が粗いことから、表面粗さが固着力のばらつきと低下をもたらし、それがクラスター形成を阻害することが示唆される。しかし一方で、真空中と比べ、大気中の方がクラスターを形成しやすいこともわかった。これは先行研究[1]の結果とは異なっており、また、表面粗さでは説明できない。発表では、このことについても議論する。

[1] Royer et al., 2009, Nature, Vol 459

B3

B4

原始惑星系円盤内のダスト・クランプ形成と個々のダスト粒子の運動

○関谷実[1], 大西勇武
[1]九州大学

原始惑星系円盤において磁気回転不安定性などの乱流源がないデッドゾーンでのダストとガスの運動について調べた。原始惑星系円盤の動径r方向の圧力勾配$\partial P/\partial r$が負であり、かつ、ダストに及ぼすガス抵抗力の反作用が無視できる場合、ガスはケプラー速度v_Kと比べて$\eta v_K = -r(\partial P/\partial r)/(2\rho_g v_K)$だけゆっくり公転する。ここで$\rho_g$はガス密度である。円盤の中心面付近にダストが沈殿により濃集すると、薄いダスト層が形成される。ダスト層内の流れが層流である場合のダストとガスの終端速度解がNakagawa, Sekiya & Hayashi(1986)により求められている（以下ではNSH解と呼ぶ）。NSH解を特徴づけるパラメータの１つは、ストークス数$\tau_S = t_{stop}\Omega_K$（ガス抵抗が効く時間$t_{stop}$をケプラー角速度$\Omega_K$で無次元化したもの）である。ストークス数が小さいほど、ダストとガスの相対速度は小さくなる。もう１つのパラメータは、ダストの体積密度ρ_d（円盤の単位体積に含まれるダストの総質量）とガス密度ρ_gの比である。$\tau_S \ll 1$の場合は、密度比ρ_d/ρ_gが大きくなるにつれてダストとガスの速度は共にケプラー速度に近づいていく。

本研究では、ガス抵抗力で相互作用をするダストとガスの運動を３次元数値シミュレーションで調べた。Bai and Stone (2010) によるAthenaコードを用い、局所的な領域でshearing box近似を用いてシミュレーションした。Athenaコードでは、ダスト粒子の集団をsuper-particle（以下では粒子と呼ぶ）として扱う。Johansenのグループによる数値シミュレーションで示されている通り、（ダスト面密度／ガス面密度）が臨界値より大きい場合は、動径方向にいくつかの粒子のクランプ(リング)が形成されていく。面密度比をさらに上げると、方位角方向にも分裂する。

シミュレーションの結果を用いて、個々の粒子の運動を調べた。特に粒子とガスの相対速度と、NSH解から計算した相対速度との比較を行った。発表ではこの結果について紹介する。

B5

スノーライン近傍におけるコンドリュールの形成

◯ 城野信一 [1]

[1] 名古屋大学大学院環境学研究科

コンドリュール形成は未だに解決されていない惑星科学上の重要問題の一つである．HED 隕石の母天体であるベスタの加熱メカニズムとして放射性元素 ^{26}Al の崩壊が有力視されている．ここから，内部が溶融する程に温度が上昇するのはベスタだけでなく始原的な天体で普遍的に起こったものと考えられる．コンドリュールの加熱メカニズムについては様々なものが提案されてきた．近年，溶融した始原天体同士の衝突によって内部からメルトが放出され，そのしぶきがコンドリュールとなったとするモデルが提案されている（Asphaug et al. 2011, EPSL **308** 369, Sanders and Scott 2012, MAPS **47** 2170, Dullemond et al. 2014, ApJ **794**:91 など）．様々な観測事実が整合的に説明できるとされているが，中でも重要な点であるコンドリュールのサイズ（0.1-1mm 程度）が説明されていない．Asphaug et al.(2011) において議論がなされているものの，実験的な裏付けはなされていない．

そこで本研究においては，このシナリオに従った上でコンドリュールのサイズを整合的に説明するモデルを提案する．Asphaug et al.(2011) においては，衝突する二天体のサイズはそれぞれ直径が 70km と 30km の岩石微惑星である．内部はシリケイトメルトで構成されており，このメルトが衝突後外部に放出されることでコンドリュールが形成されるとしている．数値シミュレーションで km サイズの天体から 0.1mm サイズのコンドリュールまで空間分解することは非常に困難である．

もし衝突がスノーライン近傍で起こったとすると，一方は溶融岩石微惑星，もう一方は溶融氷微惑星となる可能性がある．Wakita and Sekiya(2011, EPS 63, 1193) によれば，微惑星の半径が 10km よりも大きければ氷が溶融することが示されている．このような二天体が衝突すると，シリケイトメルトと水が混合する可能性がある．すると何が起こるであろうか？シリケイトメルト内部に混合した水の球は周囲から熱を受け取ることで急激に膨張する．これに伴い周囲のシリケイトメルトが押し出され，レイリーテイラー不安定が発生しシリケイトメルトは分裂する．状況としては火山におけるマグマ水蒸気爆発と類似している．Zimanowski et al.(1997, JGR **102** 803) はシリケイトメルトに少量の水を今後する実験を行い，0.1mm サイズの球が放出されることを実験的に示した．ここから，溶融岩石微惑星と溶融氷微惑星との衝突によってコンドリュールが形成される可能性があると言える．

二天体が衝突した後，シリケイトメルト中に取り残される水の体積分率が重要なパラメータとなる．シリケイトメルトを吹き飛ばすのに必要な水の体積分率を見積もったところ，0.4%以上となった．一方で水の量が多すぎるとシリケイトメルトが冷却しすぎてしまう．この上限値は実験的に明らかにする必要がある．また，内部が溶融している岩石微惑星において，表面から厚さ 1 km 程度は固体となっている．衝突する溶融氷微惑星がこの層を貫通できるかどうかも数値シミュレーションによって検証が必要である．

B6

磁気流体計算に基づいた原始惑星系円盤の降着加熱

○ 森昇志[1], Xue-ning Bai[2], 奥住聡[1]

[1] 東京工業大学, [2] Harvard-Smithsonian Center

原始惑星系円盤の温度構造を理解することは、惑星形成を解明する上で欠かせない。特に円盤内側の温度構造は、氷ダストの昇華境界付近 (スノーライン) で氷ダストの空間分布が大きく変わるため、重要である。円盤が光学的に厚い時、円盤内側の温度構造は、降着ガスが解放する重力エネルギーが熱に変換され、円盤に蓄積することで決定されると考えられている。このとき、解放されるべき重力エネルギーは粘性によって熱へと変換される。この加熱機構は降着加熱と呼ばれ、この降着加熱によって円盤赤道面付近の氷ダストの昇華境界の位置が支配されている。

降着加熱を考慮する際、加熱率が赤道面に集中する分布がよく仮定される。しかし、このような仮定は必ずしも現実的ではない。例えば、乱流の駆動源である磁気回転不安定は、電離度が低い円盤赤道面付近では発生せず、円盤上層で乱流が発生する。そのような場合、エネルギー散逸も円盤上層で起きるために、円盤内部に熱が蓄積せず、降着加熱は非効率的になる。一方で、近年の磁気拡散を考慮した磁気流体計算からは、上層の乱流も安定化された、磁気遠心力円盤風が駆動するガス降着 (円盤風駆動降着) が示唆されている。このような円盤では、乱流によるエネルギー散逸に代わって、磁気拡散によるエネルギー散逸がおきると予想される。また、円盤風によるエネルギー流出もおこると予想されるが、詳細は不明である。

本研究では、これらの効果に着目し、磁気流体計算からエネルギーの散逸領域と散逸量を求め、磁気流体力学に基づいたガスの加熱率から円盤の温度構造を調べる。円盤モデルは、最小質量円盤を想定し、より現実的な磁気流体計算を行うために磁気拡散の効果 (オーム散逸・ホール効果・両極性拡散) を考慮した。計算の結果、ある円盤パラメータにおいて、円盤赤道面から 3 スケールハイトの高さでエネルギー散逸率が最大値をとり、降着エネルギーの 70%が熱に変換されることが分かった。この場合、上層でエネルギー散逸が起きるために、従来考えられていたよりも降着加熱は非効率的であると考えられる。

B7

デッドゾーン内縁における岩石ダストの濃集不安定性

◯ 植田高啓[1], 奥住聡[1]

[1] 東京工業大学理学院地球惑星科学系

岩石惑星形成の困難の 1 つに衝突破壊問題がある。岩石惑星の種となる岩石微惑星は、原始惑星系円盤と呼ばれるガス円盤の中で、岩石ダストが衝突合体して形成されたと考えられる。この際の衝突速度は、理論的に最大 ~ 100 m/s になると推定される。一方で、室内実験や数値計算から推定される岩石ダストの限界付着速度は $\sim$1–10 m/s であるため (Blum & Wurm 2000, Wada et al. 2013)、円盤中の岩石ダストは衝突しても合体できず破壊されてしまうことが示唆される。

この問題の解決策の 1 つに、デッドゾーン内縁におけるダスト層の重力不安定が挙げられる。デッドゾーンとは、円盤ガスの電離度が低いために磁気回転不安定性に伴う乱流が駆動されず、乱流強度が低い領域のことを指す (Gammie 1996)。デッドゾーンの内縁は、円盤ガスが熱電離する温度 1000K 程度の場所に位置し (Desch & Turner 2015)、この場所では円盤ガスの熱電離に伴い乱流強度が大きく変化する。この変化に伴い、ガス面密度が変化することで圧力極大地点が形成され、デッドゾーンの内縁に岩石ダストが濃集することが期待される (Whipple 1972, Kretke et al. 2009)。

本研究では、円盤動径方向 1 次元のガス円盤の粘性進化を解き、同時に、ダストの付着成長・破壊・移流・拡散および粘性加熱による円盤温度進化を解くことで、デッドゾーン内縁におけるダスト濃集過程を調べた。ダスト成長の計算では、シングルサイズ近似 (Sato et al. 2016) を行い、質量の大部分を占める代表サイズの粒子の進化を計算した。また、円盤温度の計算では、円盤赤道面での円盤ガスの重力エネルギーの解放による加熱、円盤表面からの輻射による冷却、動径方向のガスの移流に伴う熱輸送を考慮して計算を行った。

計算の結果、ダストの限界付着速度が 10 m/s のとき、デッドゾーンにおける乱流の強さを表すパラメータ α が 3×10^{-3} 程度よりも小さいときにダストが濃集可能であることがわかった。この α の上限値はダストの限界付着速度に比例する。さらに、ダスト濃集が起こる場合には、ダスト面密度の急勾配によって駆動される不安定が生じ、デッドゾーン内縁の外側に縞状のダスト分布が生じうることがわかった。円盤赤道面の温度が粘性加熱によって決まるとき、ダスト面密度が大きいほど鉛直方向の熱輸送が妨げられ、赤道面の温度は上昇する。デッドゾーン内縁などのダストが濃集する領域では、この効果によって動径方向に急激な温度勾配が生じる。この温度勾配によって、動径方向の圧力勾配が増大し、圧力勾配に由来するダストへのガス抵抗力が増加し、ダストの動径方向落下を促進する。落下の促進は、さらなるダスト濃集を促し、結果としてデッドゾーン内縁周辺で物理的な不安定が生じる。本発表では、これらの計算結果を紹介した上で、本研究で見られた不安定性が原始惑星系円盤のダスト分布に与える影響を議論したい。

B8

磁場駆動円盤風によって進化する原始惑星系円盤中でのダスト面密度進化

◯ 瀧 哲朗[1], 荻原正博[1], 小久保英一郎[1]

[1] 国立天文台

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

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

本研究では，円盤風によって進化する原始惑星系円盤の内部におけるダスト面密度分布の進化を，半解析的なモデルを用いて調べた．落下してくるダストはバンプ状構造で捕獲されるが，ダストは圧力の極大点に向かって移動するため，円盤進化による極大点の外側移動に伴って一部のダストも外側へ引きずられていく様子が見られた．一方でバンプ状構造が通り過ぎた後にはダスト – ガス面密度比の高い領域が残りうることも分かった．本講演では，このようなダスト面密度の進化がその後の微惑星形成過程に与える影響についても議論する．

B9

デブリ円盤の化学構造

◯ 岩崎一成 [1]，小林浩 [2]

[1] 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻
[2] 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻

主系列星の周囲に観測される光学的に薄いダスト円盤は，デブリ円盤と呼ばれている。既に惑星形成を終えた原始惑星系円盤が，ガス散逸を経てデブリ円盤へと進化すると考えられている。従来デブリ円盤にはほとんどガスが残っていないと考えられていたが，小さなダストの存在 (Ishihara et al. 2016) によりガスの存在が示唆されている。実際に CO や CII・OI などの観測により複数のデブリ円盤で薄いガスが存在することが明らかになってきた。ガスの起源について，大きく以下の二つの説があるが，未だ明らかになっていない。一つは，原始惑星系円盤を構成していたガスが残っているという説 (始源ガス説) で，もう一つは，ダスト同士の衝突による脱ガスが起源であるという説 (二次ガス説) である。この二つの説では，ガスの組成に違いが出る。始源ガス説の場合，星間組成に近いと考えられ，二次ガス説では，重元素量が星間組成に比べ優位に大きいと予想される。したがって重元素に対する水素の量が推定できれば，ガスの起源についての情報が得られる。

Higuchi et al. (2017) は，β Pic と 49 Ceti を観測し，CI と CO の検出に成功した。CI/CO の柱密度比はともにおおよそ 50 である。CO は中心星からの遠紫外線や星間輻射場により解離されると同時に，気相で形成される。その際，CO は水素分子との反応を経由して形成されるため，CI/CO が水素の量に依存すると予想される。したがって，CI/CO から水素の量に対する制限が得られる可能性がある。そこで本研究では，化学平衡と熱平衡・輻射輸送を考慮した Meudon コード (Le Petit et al. 2006) を用いて，デブリ円盤 (β Pic) 環境下における化学構造を調べ，CI/CO の水素柱密度依存性を明らかにした。CO は主に C^+ と H_2 の反応を起点として進行し，最終的に OI と反応して形成される。その結果，CO の数密度は，C^+ と H_2，OI の数密度の積に比例することがわかった。CI と C^+ の存在比は，再結合と遠紫外線による電離との平衡で決まるので水素の数密度には依存しない。ダストの光学的厚みを 0.01 と固定すると，CI/CO の柱密度比は水素数密度だけで決まる。Higuchi et al. (2017) で観測された CI/CO との比較から，水素と重元素の組成比は，星間ガスと同程度であることが示唆される。

Ivuna 隕石(CI)に見られる複数の岩相中のマトリクスの３次元構造の研究

○北山晃[1], 土`山明[1], 三宅亮[1], 中野司[2], 竹内晃久[3], 上杉健太朗[3],
松本恵[1], 松野淳也[1], 伊藤正一[1]
[1]京都大学大学院理学研究科, [2]産業技術総合研究所, [3]JASRI/SPring-8

CI コンドライトは、バルク組成が揮発性元素を除いて太陽大気の化学組成と類似している一方、非常に強い水質変成を受け、その大部分は層状珪酸塩などの含水鉱物からなるマトリクスにより構成されている。層状珪酸塩は、サーペンティンとサポナイトからなり、粗粒なものと、フェリハイドライトを伴う細粒なものがある[1]。複数の CI コンドライトの SEM 観察と TOF-SIMS 分析によりマトリクスの組織と化学組成に基づいて８種類の岩相に分類され、それらの集積・水質変成モデルが提案されている[2]。これらの複雑な組織の３次元観察を行うことにより、SEM などによる２次元観察では得られない情報が手に入り、より詳細な水質変成のプロセスの理解につながることが期待される。北山ら[3][4]は、Ivuna 隕石の１つの岩片-1 についての詳細な SEM 観察、X 線 CT と FIB シリアルセクショニングによる３次元観察と TEM 観察を行い、密度が比較的小さく粗粒な層状珪酸塩からなるコアと、密度が比較的大きく粗粒な層状珪酸塩または細粒な層状珪酸塩からなるリムを持つ、不規則な楕円体の形状を持つ構造物をマトリクス中に見出した。また、マトリクスを構成する細粒な層状珪酸塩は炭素に富む物質を伴うことが分かった。本研究では、水質変成度の異なる岩相間での比較を行うために、複数の岩片に対して３次元観察を行った。

まず、Ivuna 隕石薄片中の４つの岩片について詳細な FE-SEM 観察と EDS 分析を行なった。その結果に基づきそのうち３つの岩片から FIB により箱型のサンプル(~25 μm)をそれぞれ切り出し、大型放射光施設 SPring-8 の BL47XU において X 線 CT 撮影を行い、３次元構造を得た。

先行研究[2]に加えて今回の SEM 観察より、水質変成度の高いと思われる岩相をもつ岩片-2、リン酸塩に富む岩相をもつ岩片-3、水質変成度の低いと思われる岩相をもつ岩片-4、水質変成度が高くマグネタイト粒子(~1 μm)の線状(あるいは面状)分布が見られる岩相をもつ岩片-5 を見出した。また、X 線 CT による３次元観察の結果より、岩片-2,3 のマトリクスには不規則形状をもつマグネタイト結晶(~2 μm)が集合体を形成せずランダムに分布していた。一方岩片-5 のマトリクス中では３次元的にマグネタイト粒子が線状に分布していることが分かった。この線状の集合体は複数見られ、類似した伸長方向をもっていた。

発表では、岩片-2,3,4,5 と、先行研究[3][4]における岩片-1 の３次元構造観察の結果を比較し、水質変成の詳細なプロセス(流体の移動方向や水質変成前の構造)について議論を行う。

参考文献

[1] Tomeoka and Buseck, 1988, *GCA*, 52: 1627-1640. [2] Morlok et al., 2006, *GCA*, 70.21: 5371-5394. [3] Kitayama et al., 2017, *JpGU*, PPS10-10. [4] Kitayama et al., 2017, *Goldschmidt*, 02b 2006.

F2

天体表面でのレゴリス粒子の摩耗を模擬したコンドライト隕石粒子の摩耗実験：３次元外形の変化

◯小川 倫弘[1]、土山 明[1]、中野 司[2]、上杉 健太朗[3]
[1]京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、
[2]産業技術総合研究所地質情報研究部門、[3]高輝度光科学研究センター SPring-8

小惑星イトカワや月の表面から持ち帰ったサンプル粒子には摩耗によってエッジが丸くなったと考えられる粒子が見出された[1,2]。本研究では、粒子同士が機械的に運動し削りあった場合の粒子形状の変化を解明するために、模擬物質として Sayh al Uhaymir 001 隕石（L4/5 Chondrite）と、組織による摩耗の仕方の比較のために単結晶の石英（インド産）を用いて摩耗実験を行なった。実験は 1-2 mm に破砕した多数のかんらん石粒子の中にトレーサーとして隕石（６粒）を、多数の石英粒子の中に色付きの石英（紫水晶、黄水晶、黒水晶、各２粒）をそれぞれ混ぜ合わせ、かんらん岩あるいはめのう容器に充填率約 50 %で封入し、粉砕機を用いて３種類の実験条件（回転速度 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm）で粒子同士が互いに擦れ合うように立体８の字運動をさせた。一定時間摩耗させた後取り出した１粒子毎のマイクロ X 線 CT 撮影と、再度かんらん石粒子もしくは石英粒子と混合し摩耗というサイクルを繰り返すことで、逐次的な粒子の３次元形状を計測した。CT 撮影は SPring-8 BL20B2 で行った。

撮影した CT 像から各粒子の形状変化の指標として３軸比、Angularity（近似楕円体体積/粒子実体積）を算出し、摩耗量の指標として体積を求めた。また摩耗によって生成された 250 μm 以下の粉の質量も計測した。さらに同一の粒子の摩耗前後の形状を重ね合わせることで粒子の摩耗した箇所およびその量について観察した。

以前に行った石英を用いた別の実験[3]では、Angularity、体積、粉の質量が実験開始直後に大きく減少し次第に変化量が小さくなった。また３軸比は 1500 rpm ではほとんど変化しないのに対し、2500 rpm では大きく変化するが最終的な形状は粒子によって異なるという違いが見られた。今回コンドライト隕石を用いた実験では実験中に粒子が半分に割れることがあった。これは隕石が多結晶体であることを反映していると考えられ、天体表面の粒子の摩耗プロセスを理解する際には粒子の組織を考慮する必要があると言える。

[1] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333: 1121. [2] Tsuchiyama et al. (2016) 4th Symp. Solar System Materials, abstract. [3] Ogawa et al. (2017) JpGU,P-PS10,abstract.

F3

数 10μm サイズ微小衝突破片の 3 次元形状分布～イトカワ粒子との比較

門川隆進[1]、○道上達広[2]、土' 山明[1]、アクセル・ハガーマン[3]、中野司[4]、上杉健太郎[4]、長谷川直[5]
[1]京都大学、[2]近畿大学工学部、[3]オープン大学、[4]JASRI/Spring-8、[5]ISAS/JAXA

直径 120μm 未満の 48 個のイトカワ粒子の詳細な 3 次元形状は Tsuchiyama et al. (2011, 2014)によって計測されている。イトカワ粒子の形状分布は、その 3 軸比（長軸 *a*：中間軸 *b*：短軸 *c* の大きさの比）が、分布に拡がりはあるものの、平均で 2:√2:1 になっている。これは室内衝突実験でのカタストロフィック破壊によって生じた数 mm 以上の破片の形状分布と一致する(e.g., Capaccioni et al., 1984; Michikami et al., 2016)。そのため、イトカワ粒子は衝突破片粒子と考えられている(Tsuchiyama et al., 2011, 2014)。しかしながら、室内衝突実験において、イトカワ粒子と同じ直径 120μm 未満の微小衝突破片はこれまで調べられていない。さらに、この微小サイズになると岩石組織が破片形状に影響を及ぼすことが考えられる。

本研究では、岩石組織が衝突破片の形状に及ぼす影響を調べるために、直径 120μm 未満の微小衝突破片 2163 個を Spring-8 の X 線 CT を用いて、それらの形状を測定した。多くの微小衝突破片は Michikami et al. (2016)の玄武岩の衝突実験で得られ保管されていたものである。残りの微小衝突破片は、今回新たに L5 コンドライト隕石に対して衝突実験を行い回収されたもので、比較のため、イトカワ粒子と物質的に類似のものを用いた。

実験の結果、玄武岩および L5 コンドライト隕石の微小衝突破片は、単位質量当たりの衝突エネルギー*Q*[J/kg]に依らず、平均３軸比が 2:√2:1 の形状分布になり（一方、Michikami et al.2016 によれば、数 mm 以上の破片形状分布は、衝突エネルギー*Q*[J/kg]に依存することが指摘されている）、イトカワ粒子の形状分布と類似していることが分かった。微小破片の形状分布が *Q* に依らないのは、衝突破壊の際、標的表面に生じた希薄波が交互に複数重なりあうことで、微小破片が形成されるためだろう。さらに今回の実験では、岩石組織は微小衝突破片の形状分布に影響を及ぼさないことが確認された。一方、Molaro et al. (2015)によれば、小惑星の自転による昼夜の温度差（熱応力）は、小惑星表面にある岩石のクラックの進展を促進し、クラックの進展は岩石組織に強く影響されることが分かっている。つまり熱応力で形成される破片形状は、衝突由来の破片形状と異なることが予想される。したがって、イトカワ粒子は熱応力で形成されたのではなく、衝突によって形成されたと結論付けた。

参考文献

Capaccioni et al. (1984) Nature, 308, 832-834.

Michikami et al. (2016) Icarus 264, 316-330.

Molaro et al. (2015) J. Geophys. Res. Planets. 120, 255-277.

Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333, 1125-1128.

Tsuchiyama et al. (2014) Meteoritics and Planetary Science, 49, 172-187.

F4

無隔膜開放系における衝突蒸発実験手法の確立

○黒澤耕介[1], 岡本尚也[1], 薮田ひかる[2], 小松吾郎[3], 松井孝典[1]

[1]千葉工大 惑星探査研, [2]広島大 理学研究科, [3]ダヌンツィオ大 国際惑星科学研究大学院

天体衝突は標的天体とは通常異なる組成の外来物質が莫大な運動エネルギーを持って飛来する現象であり，惑星表層での生命起原物質合成のために必要不可欠な自由エネルギーをもたらし得る．天体衝突は標的天体の内因的過程では駆動されない物理化学過程を引き起こし，標的天体表層の平均場から外れた非平衡場を作り出す．復元強制力によって場が平衡に慣らされていく過程では化学ポテンシャルの差分に対応する自由エネルギーを天体表層に放出する．また非平衡場からの復元過程においては副産物として特徴的な地質物質を残すことも期待される．そして環境変動の規模や副産物の地質物質の特徴は，衝突天体組成，衝突天体サイズ，衝突速度といった衝突条件に依存するだろう．従って惑星探査で得られると期待される衝突の痕跡に関するデータとの比較によって，太陽系初期10億年の軌道進化に関する情報も引き出せる可能性がある．我々の目標は衝突誘起化学反応の帰結を世界初の開放系実験によって明らかにし，その結果を探針として用いて過去の太陽系軌道進化を制約するとともに，天体衝突によって引き起こされる化学反応によって駆動される惑星表層の化学進化を調べることである．

我々は千葉工業大学惑星探査研究センターの高速度衝突実験施設において衝突誘起化学反応を調べる実験系を構築している．従来の衝突化学実験系の最大の違いは，開放系で衝突を起こすことによって天然衝突と同じ流体運動・温度圧力変化を実験室で再現することができる点である．我々は以前，二段式軽ガス銃を用いながら銃由来の化学汚染ガスの実験チャンバへの侵入を極力抑える実験系を報告した[Kurosawa et al., 2012, EPSL]．以前の実験系では銃由来の化学汚染ガスが実験チャンバに侵入しないようにするためにプラスチック膜を用いていた．しかしながらプラスチック膜の利用は，(1)飛翔体がダメージを受けるため強度が高い飛翔体しか用いることができないこと，(2)強度の高い飛翔体を用いた場合であっても表面が剥離するようなわずかな破壊が起こり，微小破片群の高速度衝突によって高速撮像，発光分光計測のノイズとなること，(3)プラスチック膜貫通時に炭素系蒸気が発生するためアミノ酸などをはじめとする興味ある微量炭素系化合物の分析が困難であること，といった多くの弱点となることがわかってきた．そこで上述の開放系衝突化学実験系を無隔膜で実験可能になるように改良した．今回は炭酸塩岩と水氷標的を用いた実験結果について報告する．

謝辞: 本研究は宇宙科学研究所の超高速度実験施設の計測機器をお借りして行われています．長谷川直氏に感謝致します．

参考文献: Kurosawa K. et al. 2012. *Earth and Planetary Science Letters* **337-338**, 68-76.

F5

フラッシュ X 線を用いた衝突破壊現象の観測

○岡崎 昌志[1], 荒川 政彦[1], 保井 みなみ[1], 長谷川 直[2]
[1]神戸大学大学院理学研究科, [2]宇宙科学研究所/JAXA

はじめに: 微惑星の成長と進化において、衝突現象は最も重要な物理素過程の一つである。衝突破壊とその破片の再集積は、原始惑星の形成だけでなく、衛星や小惑星族の成因と考えられており、衝突破壊現象の理解は重要である。衝突破壊強度は、衝突後の最大破片が標的質量の半分となる時に必要とされるエネルギー密度 Q^* (= $m_p v_i^2/2M_t$: 単位質量あたりに与えられる運動エネルギー) として定義される。この Q^* は、100m を超える天体では、重力による破片の再集積で決まるため、これまで数値シミュレーションのみで推定されてきた。しかしながら、先行研究で示される重力支配域の Q^* は数値シミュレーション毎に大きく異なっているため何らかの方法で室内実験による検証が必要であった。重力支配域では天体の脱出速度以下の速度しか持たない破片は、互いに再集積してラブルパイル天体を構成すると考えられる。この単純な仮定を用いると、室内実験の結果から得られる破片速度より、再集積したラブルパイル天体の質量を推定することができる。しかしながら、破片速度分布に関する研究は非常に少なく、さらに、その先行研究で求められた破片速度は高速カメラで撮影できる表面付近の破片に限定されてきた。そこで本研究では、高速カメラでは測定不可能な標的内部の速度分布を計測する手法を確立させ、その内部速度分布から Q_D^* に制約を与えることを目的とした。

実験手法: 衝突破壊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なった。弾丸は直径 7mm のポリカーボネート球を用いた。衝突速度は 1.5-6.5 km/s (Q:10^3-10^4 J/kg) で変化させ、カタストロフィック破壊させた。ほとんどの実験では、最大破片は標的質量の 10%程度となった。標的試料には含水率が異なる直径 6cm の凍結粘土球を用いた。粘土試料はベントナイトと水を 3 通りの質量比 (100:35, 100:50, 100:80) で混合して作成した。粘土球は-20℃に冷却して、試料内の水は凍結させて用いた。試料内部の速度分布を測定するため、標的内部には直径 3mm の鉄球をトレーサー粒子として平面上に配置した。このトレーサー粒子の運動を撮影するために 3 方向からフラッシュ X 線を照射して、その透過像をイメージングプレートで記録した。なお、撮影のタイミングは衝突後の 50μs-20ms で変化させて、トレーサー粒子の変位とその時の撮影時間から内部速度分布を決定した。また、衝突の様子は 20 万コマ毎秒の速度で高速カメラを用いて撮影し、衝突点の反対点から放出される破片の速度を決定した。なお、実験用のチャンバー内は、衝突実験中は約 100Pa まで真空引きしている。

実験結果: トレーサー粒子の速度ベクトルは、衝突点近傍では弾丸の進行方向と逆向きとなった。一方、衝突点から標的半径程度離れると弾丸の進行方向と同じ向きとなった。速度ベクトルは衝突点近傍で最大となり、最小となるのは反対点ではなく中心付近であった。そのため、標的内部の速度分布は衝突点距離だけではなく標的表面からの距離も関係すると考えられる。なお、速度分布は Q に伴って全体的に高速となる。反対点近傍のトレーサー粒子の速度ベクトルは、最大破片が小さな場合には、それぞれが方向と大きさの異なる速度ベクトルをもっていた。しかしながら、最大破片が大きな場合はそれぞれの速度ベクトルの向きと大きさが同じであった。これは、最大破片が小さな場合、反対点の破片が独立に動くのに対して、最大破片が大きな場合、反対点の破片は大きくトレーサーは一緒に動いていると考えられる。

F6

クレーターイジェクタのスケール則に対する衝突速度依存性

松榮 一真[1], ○荒川 政彦[1], 保井 みなみ[1], 辻堂 さやか[1], 長谷川 直[2]
[1]神戸大学大学院理学研究科, [2]宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所

【はじめに】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。従って、天体衝突による表層進化の研究を行う上で、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が必要となる。そこで我々は、これまで低速度域(100-200 ms^{-1})におけるイジェクタ速度分布の計測からそのスケール則を構築し、特に弾丸密度依存性について詳しく調べてきた(Tsujido et al., 2015)。一方、実際起こる天体衝突は、数 kms^{-1}を超える高速度衝突であり、これまでのイジェクタ速度分布の衝突速度依存性を超えて、スケール則の適応範囲をさらに広げていく必要がある。

【実験方法】宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて砂標的へ高速度衝突実験を行った。弾丸に直径 4.7 mm のポリカーボネート、直径 2 mm の密度の異なる 7 種類の球(ガラス、アルミ、チタン、ジルコニア、SUS、銅、タングステンカーバイト)を用いて、それらを 1.5-6.9 kms^{-1} の速度で衝突させた。クレーター形成過程をハイスピードカメラで撮影し、その動画を用いてイジェクタ速度分布を計測した。実験結果は、クレーターサイズのスケール則(Matsue et al., in prep)と合わせ、クレーター形成過程についても考察した。

【実験結果】異なる実験条件で得られたイジェクタ速度分布は、Housen, 1983 で提唱されている π スケール則の式: $v_0/\sqrt{gR} = k_2\left(x_0/R\right)^{-1/\mu}$, を用いて整理することができた。$v_0$, g, R, x_0はそれぞれエジェクタ放出速度、重力加速度、クレーター半径、放出位置を表し、k_2及び μ は定数である。k_2は衝突条件によらずほぼ一定の値 0.7±0.2 となり、標的物質によって決まる値であると考えられる。μ は弾丸密度に依存し、弾丸密度とともに 0.35 から 0.5 に大きくなることがわかった。一方、クレーターサイズに関するスケール則から求めたμの値は 0.42±0.03 となっており、イジェクタ速度分布で求めた μ に近い値になることがわかった。このことから、今回の衝突条件では、クレーターサイズスケール則、イジェクタ速度分布スケール則で用いている μ は同じ値を用いて問題ないことが確認できた。

高速度域の結果と、低速度域の結果(Tsujido et al., 2015)を比較した所、θ_{ave}、k_2は速度依存性が見られなかったが、μ、イジェクタカーテン角度は低速度域の方が大きくなることがわかった。これは拡張 Z モデル(Croft, 1980, Tsujido et al., 2015)により、点源深さを考慮したZ値を用いることで説明可能であることがわかった。低速度域では点源深さが、高速度域よりも約 2 倍ほど深くなっており、弾丸の潜り込みの影響が大きい。一方、高速度では、衝突時に弾丸が破壊するため、点源は表面近くとなっている。

F7

インドシナ半島における、79 万年前小天体衝突イベント起源の衝撃変成石英の発見

○多田賢弘[1]・多田隆治[1]・Paul Carling[2]・Wickanet Songtham[3]・Le Xuan Thuyen[4]・常昱・田近英一[1]

[1]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 [2]Geography and Environment, University of Southampton [3]Northeastern Research institute of Petrified Wood and Mineral Resources, Nakhon Ratchasima Rajabhat University [4]Ho Chi Minh City University of Science

天体衝突は太陽系で最も普遍的な地質現象である。衝突に伴う物質の放出過程や、衝突天体同士が被る衝撃変成作用を明らかにするために、隕石の分析，衝突回収実験、数値シミュレーション、野外調査といった手法がとられてきた。このうち、地球上の衝突クレーターやイジェクタ層の野外調査は、白亜紀末の大規模な衝突イベントに関する詳細な調査の他は、リースクレーターやメテオクレーターなど年代の新しい比較的小規模な衝突に限られている。これは、地球上では風化、浸食、埋没、プレートの沈み込み，植生の影響等によってクレーターやイジェクタ層が消失してしまうためである。これらの問題を克服するためには、できるだけ年代が新しく、かつ規模の大きい衝突イベントを対象とした調査を行う必要がある。

小天体衝突によって地殻物質が溶融・放出され形成されたガラス質物質であるテクタイトは、地球上の 4 つの地域に分布している。そのうちオーストラリア・アジアテクタイト分布域は、東南アジアから南極に渡る最も広い分布域であり、かつ最も年代が若い（79 万年前）という特徴を持つ。海底コア中のマイクロテクタイトの分布などからインドシナ半島東部に衝突し直径 40km 程度のクレーターを形成したのではないかと推定されているが、衝突クレーターは未発見であり、正確な衝突地点や衝突の規模、様式が明らかにされていない。またインドシナ半島陸上ではイジェクタ層も未だ認定されていない。イジェクタ層は衝突地点に近いほど層厚が厚くなるため、衝突クレーター発見のためには，まずイジェクタ層を特定しその分布を明らかにする必要がある。我々はそのような目的で，タイとベトナムの 10 地点において野外調査を行った。そのうちタイ・ラオス国境付近の地点において岩相・層序を記載するとともに構成粒子の顕微鏡観察と粒度分析を行い、基盤砂岩とそれを覆う礫質シルト層中から PDFs(Planar Deformation Features)を持つ衝撃変成石英を発見した。PDFs はユニバーサルステージを用いて方位を測定することで同定した。この衝突に関連して陸上の地層中から衝撃変成石英を発見したのは本研究が初である。テクタイトや衝撃変成石英を含むことから、これらの堆積物がイジェクタ層であると考えられる。今後複数地点で同様の分析を行うことで、イジェクタ層の分布と基盤岩が被った衝撃圧力の分布を明らかにし、衝突地点を特定できるのではないかと考えている。

F8

iSALEによる重力支配域での微惑星の衝突計算

○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。その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。これまでに衝突現象は、数多くの先行研究で室内実験や数値計算などの手法で調べられてきた。例えば、数値計算ではSPH法、N体計算、メッシュ法等の衝突シミュレーションを用いて天体の衝突破壊過程について研究されてきた。特に天体がどの程度破壊されるかは初期の衝突エネルギーQ_D（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）に依存するため、大規模衝突への境界となる標的天体の質量が元の半分となる時のエネルギーQ_D^*の値は精力的に調べられてきた(e.g., Benz & Asphaug 1999)。しかしながら、近年の高解像度のSPH法による数値計算結果からQ_D^*の値が計算解像度に依存することが明らかとなった(Genda et al. 2015, 2017)。高解像度のSPH計算の場合、Q_D^*の値が従来の値よりも小さくなり、これは天体が従来よりも破壊されやすいことを示唆しており、天体形成に大きな影響を与える可能性がある。一方でこの結果がSPH法という計算手法に依存している可能性もあるため、本研究では異なる計算手法(メッシュ法)によってQ_D^*の解像度依存性を調べ、高解像度のSPH法で求められたQ_D^*の値と比較する。

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を使って調べる(Amsden et al. 1980, Ivanov al. 1997, Wunnemann et 2006)。計算の結果、計算条件が同じ場合でも解像度の違いだけで最大破片の質量が異なることが明らかとなった。また、最大破片の質量も解像度が高くなるにつれて収束していくことがわかった。さらにQ_D^*を見積もった結果、Genda et al.(2015) の結果とほぼ同じような値となり、メッシュ法においても天体は従来よりも壊れやすいという結果となった。

F9

月面衝突閃光候補の超低分散スペクトル

〇柳澤正久、柿沼文広
電気通信大学・情報理工学研究科

メテオロイドが地球大気に突入すると流星となる。これらは月面にも衝突しており、速度が大きい(>20 km/s)ため閃光を発する。そして、衝突エネルギーが大きい場合には地球から観測でき、月面衝突閃光と呼ばれている[1]。これまでに 300 以上の閃光が報告されているが[2]、スペクトル情報はおろか色に関する情報も得られていない。そのため、発光メカニズムの研究は進んでおらず、また、閃光の検出にはどの波長帯での観測が適しているのかもハッキリしていない。現在、閃光観測から衝突月震の発震時刻と位置を知り、1、2 台の月震計で効果的に月の内部構造を決定することが検討されている。この時、より小型の望遠鏡、あるいは、月オービター搭載カメラで閃光を検出するためにもスペクトル情報は重要である。

我々は、電気通信大学(東京都調布市)の口径 450 mm、焦点距離 2025 mm のニュートン式反射望遠鏡に図１に示すスペクトルカメラを取り付け、低分散スペクトル観測を行った。イメージセンサのカバーガラスに回折格子を直接貼り付けた略式の分光カメラであるが、分散が小さいために暗い閃光のスペクトルも観測できる。2016 年 11 月 7 日および 2017 年 5 月 1 日、2 日には他の観測者による確認はないが、5 つの閃光候補(明るさは約 9 等級)の超低分散スペクトルを得ることができた。結果の一例を図２に示す。閃光は約 2800 K の黒体放射を示すであろうと予想されてきたが、黒体放射だとするとそれより高温であることを示している。

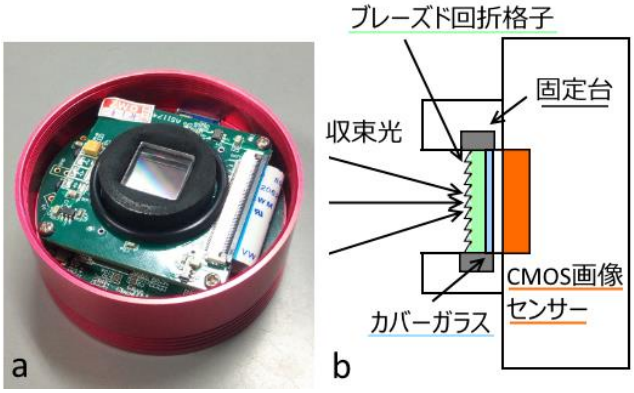


図１. 簡易スペクトルカメラ. ZWO 社 ASI174MM カメラの CMOS センサのカバーガラスに直接グレーティングを貼り付けた.

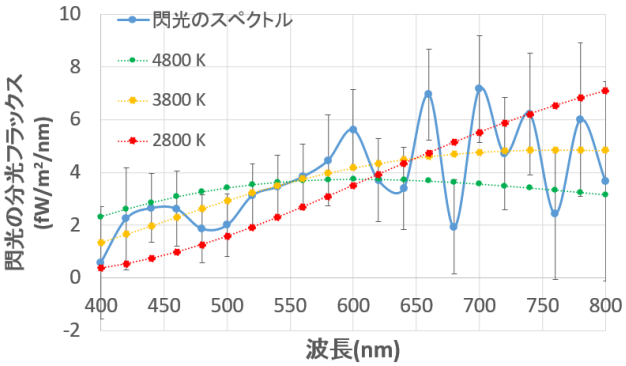


図２. 2016 年 11 月 7 日の閃光候補のスペクトル. 3 本の滑らかな曲線は波長 400 nm で上から 4800 K, 3800 K, 2800 K の黒体のスペクトルである.

参考文献

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

G1

SELENE レーダサウンダ観測に基づく月地下構造データベースの構築

Development of the lunar subsurface structure database based on SELENE radar sounder observation

○熊本篤志[1]，石山謙[2]
[1]東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻
[2]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

SELENE の月レーダサウンダ(LRS)は 2007～2008 年の運用において，月の全球地下探査を実施し，2363 時間分・1681 周回相当の観測データを得た[Ono et al., 2010]．これらの観測データから，複数の表側海領域において，地下数 100m の深さに古レゴリス層が堆積していることが明らかにされ [Ono et al., 2009]，それらの構造・深さ・広がり・表面年代との対応を議論することによって，晴れの海南部のリッジが 28.4 億年前以降に形成されたこと [Ono et al., 2009]，湿りの海において，クレータの分光観測と組み合わせて誘電率・空隙率推定を行ったところアポロサンプルより高かったこと [Ishiyama et al., 2013]，表側海領域での溶岩の平均的な噴出量は 38 億年前から 33 億年前にかけて，10^{-3} km^{-3}/yr から 10^{-4} km^{-3}/yr まで減少していたこと [Oshigami et al., 2014] が示唆された．これらの研究は，機器チームのメンバーによるもので，地下反射層の読み取りは著者自身によって行われた．SELENE の観測データは現在既に公開されており(http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.en)，誰でも自由に参照することができるが，レーダグラムの形式で公開されているため，反射エコーの識別・深さ読み取りは利用者が自身で行う必要がある．

そこで，本研究では，レーダグラムの読み取りに慣れないデータ利用者の便宜を図るべく，地下エコーのデータベース化の試みについて紹介する．観測データが膨大なため，すべてを手動で行うことは現実的ではない．一方で，レーダグラムからのエコー読み取りは，人間でも判断の分かれる難しいケースが含まれるため，完全自動化を目指すのも現実的ではない．そこで，膨大なデータに対して，まずエコー識別アルゴリズムを適用し，修正を要する個所に対してのみ，人間が修正を行うことによって，データベース化に要する時間・労力の低減を図る．エコー識別アルゴリズムには，プラズマ波動のスペクトルデータから，電子密度の導出に有効な狭帯域放射の周波数を自動識別する手法を応用する．これは，複数のピークが立つスペクトルに，一つ前の時刻に決定された周波数を中心するガウス関数をかけて，最大のピークを選択していくものである [Kurth et al., 2015]．このエコー識別アルゴリズムの有効性の評価，および手動修正も含めたデータベース化の進捗状況について報告を行う．

G2

衝突盆地周辺の岩石組成から推定する月マントル化学組成の推定

Estimation of the lunar mantle composition based on rock exposures of large impact basins

◯大竹真紀子[1]，山本聡[2]，諸田智克[3]，加藤伸祐[3]

1:JAXA/ISAS 2:国立環境研究所 3:名古屋大

研究の背景：地球・月系を作った巨大衝突により，地球と衝突天体の間でどのような物質分配が起こったのかを知ることは，地球型惑星の形成過程を理解する上で重要である．この物質分配を知る上で，月の全球組成は重要な情報であるが，月の体積の 90%以上を占めるマントル組成に不明点が多く，月全球の化学組成の推定は困難である．一方，月の衝突盆地周辺には地下深部より掘削・放出により表層にもたらされた岩石が堆積し，これまでに「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，衝突盆地周辺にマントルの主要構成鉱物であるカンラン石を主成分とする岩石の分布が報告されている．

目的：これまでに我々は，これらカンラン石の分布領域について鉄の含有量や周辺の地質など情報を使ってカンラン石の起源を推定し，マントル起源の可能性が高い領域を同定している．今回の研究では，これらカンラン石の Mg#をカンラン石の吸収中心波長を用いて推定することにより，カンラン石の起源と Mg#の関係について議論する．

解析手法：「かぐや」データから見つかった約40領域（近傍にある露出地点は1領域と見なす）のカンラン石分布領域について，「かぐや」スペクトルプロファイラによる連続分光スペクトルデータの全てに対し，カーブフィッティングの手法によりカンラン石の吸収の中心波長を求め，そこから実験室で求められている吸収中心波長とMg#の関係を用いてMg#を推定した．

結果と考察：単純なカーブフィッティング手法を用いた場合では，吸収形状に最適なフィッティングが行われず，フィッティング後の残差が大きくなるケースがあり，正確なMg#の推定が困難であった．今後は，鉱物の吸収形状についてこれまでの研究から得られている吸収中心波長の上限・下限などを制約条件に用いたカーブフィッティングを行う．

月の地形が月震波の伝搬に及ぼす影響の評価

○小野寺圭祐[1,2]、田中智[2]、川村太一[3]、石原吉明[2]
[1]総合研究大学院大学、[2]宇宙科学研究所、[3]国立天文台

アポロ計画で月面に地震計が設置されて以来、月震（月の地震）データを使った内部構造の推定が行われてきた。過去の研究（例えば、Lognonné et al. [2003], Garcia et al. [2011]）において、幾つかの一次元月内部構造モデルが提案されているが、モデルごとの不確定性が大きく、現状ではどのモデルが最適であるか判断することは難しい。

不確定性が大きくなる原因としてアポロ月震データの S/N 比の低さやレゴリス層による散乱の影響、地形の影響などが考えられる。特に地震波を使った内部構造の推定には、水平均質層を仮定した解析が行われてきたため、地形の影響を考慮した解析がほとんど行われてこなかった。しかし、GRAIL やかぐやといった近年の月探査機から月表面やモホ面の地形に関する情報が得られるようになったことで、水平方向の不均質な構造を考慮した解析が可能になってきた。

本研究では、水平成層モデルとかぐやもしくは GRAIL のデータを基に作成した月構造モデルについて、OpenSWPC(Maeda et al.[2017])を用い、２次元及び３次元空間での月震波の伝搬シミュレーションを行うことで、月の地形が月震波の伝搬に及ぼす影響を評価した。本講演では、今までに得られた結果について報告する。

引用文献

Lognonné *et al.* 2003, *Earth Planet. Sci. Lett. 211*, p27-44
Garcia *et al.* 2011, *Phys. Earth Planet. Inter. 188*, p96-113
Maeda *et al.* 2017, *Earth, Planets and Space*, 69:102

G4

珪酸塩鉱物中における OH/H_2O の温度安定性の実験的検証

○仲内悠祐[1], 安部正真[2], 松本徹[2], 北里宏平[1], 土`山明[3]
[1]会津大学, [2]JAXA/ISAS, [3]京都大学

近年の探査により、月表層には存在しないと考えられていた“OH 基や H_2O”の存在を示唆する観測結果が報告された[1,2,3]。観測された“OH 基や H_2O”は、太陽風 H+と天体表層鉱物中の酸素が反応し形成した可能性が提案されている[1,2]。この報告を受け、月面岩石試料に太陽風模擬 H^+照射実験が行われ、“OH 基や H_2O”が生成する事が確認された[4]。さらに我々の研究から、天体表層の鉱物と太陽風 H^+の反応過程の具体的描写についても明らかになりつつあり、“Si-OH と H_2O”が共に生成することが示唆されている [5]。

小惑星探査機はやぶさ 2 では近赤外分光計（NIRS3）を搭載し、月を観測した。観測結果から、月面における“OH 基や H_2O”の存在が示唆され、さらにそれらの存在量は月面温度や組成と相関があることが示唆されている[6]。観測された“OH 基や H_2O”は太陽風 H^+により生成されたと考えられているが、それらが月面の温度環境で安定的に存在できるかはわかっていない。

我々は宇宙科学研究所に、真空環境を保ったまま水素イオン照射・試料加熱・反射スペクトル測定を行えるイオン照射装置を設置した。この実験系では、試料を大気に触れさせることなくイオン照射と反射スペクトル測定を行うことができる。

本発表では、Olivine に太陽風を模擬した水素イオン（H^+, 1keV）照射を行った後に、日照時の月面温度の範囲(0 ~ 150 度)で試料温度を段階的に変化させ、FTIR を用いて反射スペクトル測定を行なった結果を報告する。実験で得られた結果から、月面温度環境での”太陽風生成 OH/H_2O”の温度安定性について議論する。

Reference :
[1] C. M. Pieters, et al., (2009) Science, 326, 568 – 572.,
[2]J.M.Sunshine et al., (2009) Science, 326, 565 – 568.,
[3]T.B.McCord et al., (2011) JGR, 116, E00G05.,
[4]A.S.Ichimura et al., (2012) EPSL, 90 – 94, 345 – 348.,
[5]Y.Nakauchi et al., (2014) 45th LPSC, #2004.,
[6]Kitazato et al., (2016) 60th JSASS, #1G12.

G5

月における地下空洞の構造の解析
～月レーダーサウンダー(LRS)を用いた地下空洞の探索～

○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]

[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，人や機器を小惑星や放射線から保護することができ，空洞内の温度が一定であると考えられることから，将来の基地建設地の候補として考えられている．また，科学探査の対象としても考えられている．近年，縦孔がSELENEに搭載された地形カメラの月画像データにより発見された．その縦孔下には地下空洞が広がっている可能性はあるが，実際に地下空洞が存在するかどうかは確かめられていなかった．

我々は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を行った．はじめに我々が探索を行った地点は，嵐の大洋のリルAのマリウスヒルズの縦孔付近の地点である．その地点で観測されたLRSの反射波データに，反射波強度の急激な減少の後に反射波のピークが出現する特徴的なエコーパターンが確認された．このエコーパターンは地下空洞の存在を指し示している可能性がある．次に，我々はマリウスヒルズの縦孔周辺(北緯13.00～15.00度，東経301.85～304.01度)に調査範囲を広げた．すると，マリウスヒルズの縦孔付近の地点で観測されたエコーパターンと似ている特徴的な反射波パターンが複数の地点で確認された．また，リルAとそのリルの延長線上に位置する地点でも特徴的な反射波パターンが確認され，その地点はGRAILの重力場データによって，低質量密度の地質が分布する領域であることが判明した．

以上の結果から，本研究で発見されたエコーパターンが地下空洞の存在と対応し，マリウスヒルズの縦孔の近傍には地下空洞が存在すると考えられる．

H1

月火星の地下空洞直接探査 UZUME 計画　その２

○春山純一、西堀俊幸、河野功(JAXA)　月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ。

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昨年の当学会秋季講演会で紹介したとおりである。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。一方、海外でも月や火星の縦孔・地下空洞探査への興味が高まり、研究も進み始めている。昨今の世界の月火星探査成果、日進月歩の月火星研究の現状を踏まえてこれまでの検討をブラッシュアップし、我が国の長期的な宇宙探査構想の中で、月火星の地下空洞直接探査を位置づけること、実りある月火星の地下空洞直接探査を具体化することが、急ぎ進められなければならない。

月火星の地下空洞直接探査リサーチグループの活動の目的は以下の通り（提案書より）である。月火星の地下空洞直接探査の

１）探査によって得られる科学的課題のより詳細な整理

２）１）で整理された課題を実行するための技術開発項目の洗い出し

３）１)、２）で整理された科学的課題と洗い出された必要な技術を踏まえての探査戦略の設定し、最終的には、WG 提案を行うことである。

これまでに、「学術動向に即した探査にするために、調査・研究により学術動向の見極め、月火星の地下空洞直接探査が学術動向の期待に添うことの確認」を、TV 会議他、メンバが集い議論を深めるなどして行ってきた。更にシンポジウムを開催し、理工連携の可能性、国際有人探査の動向なども、視野に入れた。

本講演では、国内外の動向を踏まえ、これまでの月火星の地下空洞直接探査リサーチグループの議論の整理と、今後の取組について紹介する。

Direct Altimetry データを用いる新手法による「かぐや」の精密軌道決定と精度評価（序報）

○石原吉明[1]・Sander Goossens[2]・Erwan Mazarico[2]・大竹真紀子[1]・大嶽久志[1]
[1]JAXA/ISAS/JLPEDA・[2]NASA ゴダード宇宙飛行センター

レーザ高度計の測距データを追跡データとして用いる新たな軌道決定手法を用い、月探査機「かぐや」の延長ミッションフェーズの一部について軌道再決定を行った。また、再決定した軌道の絶対精度及び改善具合の評価を行うため、旧軌道及び今回再決定した軌道と月地形モデルを用いて模擬観測画像を作成し実観測画像との比較をおこなった（図 1）。
かぐやの延長ミッションフェーズでは、リアクションホイールの故障・電波追跡データの減少により、場合によっては数キロ以上の位置ずれが存在していたが、今回再決定した軌道を基にした模擬観測画像と実画像の位置ズレは典型的には数十メートル以内（MI 画素にして数ピクセル以下）であり、新手法の有用性が示された。

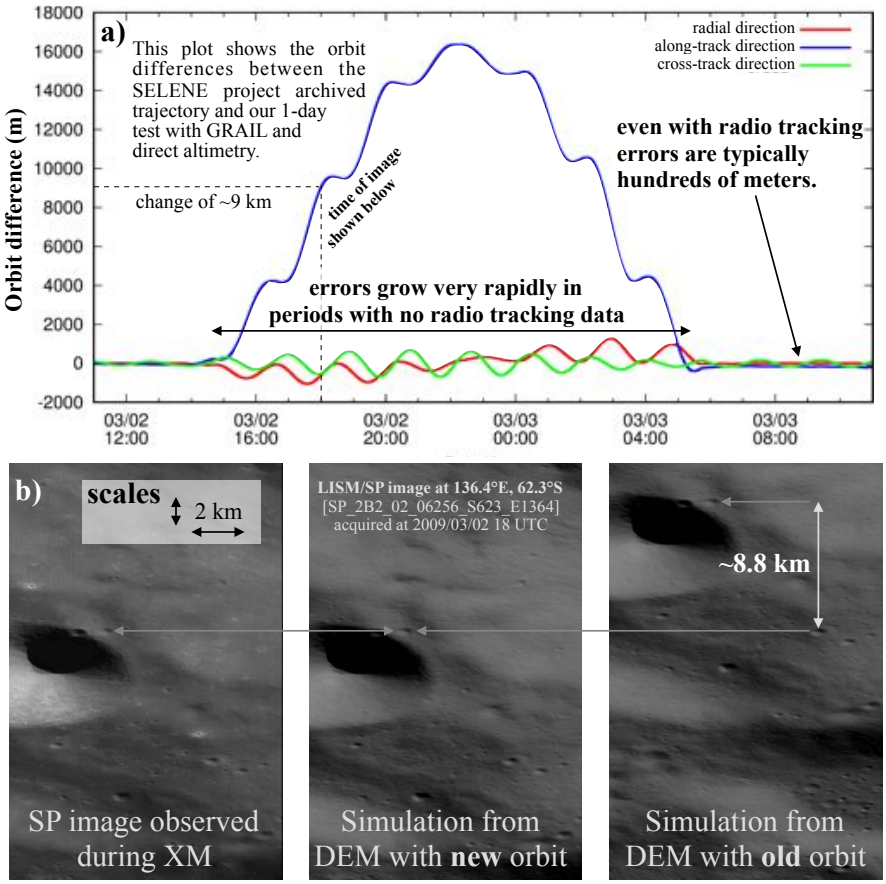


図 1a) 新旧軌道の探査機位置差の時系列 b) SP 支援画像の実画像・新軌道と DEM による模擬画像・旧軌道と DEM による模擬画像の比較。

H3

月周回衛星「かぐや(SELENE)」データの長期保存対応

○山本幸生[1]，石原吉明[1]
[1]宇宙航空研究開発機構

月周回衛星かぐや(SELENE)は 2007 年 9 月に打ち上げられ，2009 年 6 月に月面に制御落下させるまでの約 21 か月間，様々な科学観測を実施した．これらの観測結果は SELENE Level 2 Database (L2DB)と呼ばれるシステムに保存され，地図による検索機能などを提供し，打ち上げから 10 年目となる現在まで月科学の成果に貢献してきた．

しかしながら，L2DB には長期保存という観点において 2 つの課題が存在した．一つ目の課題は，システムとデータが密接に連携している点である．L2DB の換装を考慮した場合，システムだけではなくデータの移行も伴う．二つ目の課題は，データフォーマットが独自フォーマットという点である．世界の惑星探査において Planetary Data System (PDS)が標準だが，L2DB で採用したフォーマットは PDS version 3(PDS3)によく似た独自のフォーマットである．当時としては，PDS3 に準拠するための知識もリソースも不足していたため，この判断は妥当なものであったと言える．しかし各国が惑星探査を行えるようになり PDS に準拠したデータが揃い始めると，よく似た別のフォーマットは，意味解釈や解析ツールの共有という面において混乱を生じる．そこでシステムとデータの分離を目指し，さらにデータの PDS3 への準拠を目的とした長期保存対応を実施した．

システムとデータは，データ提供と検索を別のレイヤーとして分離し，検索システムを介さずデータのみで提供可能とするようにした(図 1)．検索システムはインターネット上に公開されたデータ提供に対する検索として整理を行い，IT 技術の進化に追随しないようにした．

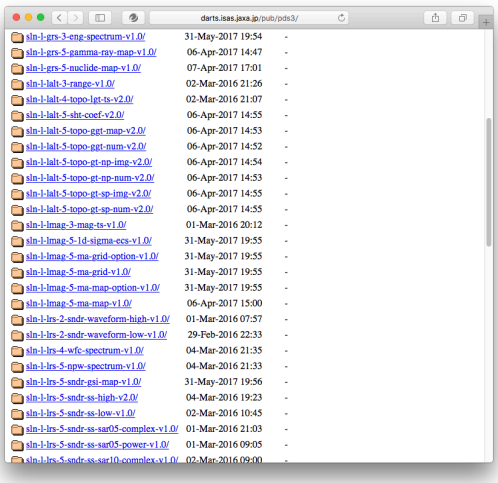


図 1 データのみの提供

PDS3 への準拠は，NASA が提供する Validation Tool による妥当性検証や，符号や精度の修正，用語の統一を行った．PDS3 を扱える汎用ツールで処理可能なよう留意し，さらに今後主流となる PDS version 4 (PDS4) を意識してメタデータ部分(PDS ラベル)とデータ本体を分離した．

本発表では，月惑星探査における科学データの長期化に対する取り組みを報告し，特にこれまでの L2DB と新しい長期保存対応がなされたデータの違いについて説明する．

H4

SLIM 観測運用検討のための着陸地景観シミュレーション

○佐伯和人[1]、本田親寿[2]、大竹真紀子[3]
[1]大阪大学、[2]会津大学、[3]JAXA/ISAS

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。本研究では、日本の次の月着陸探査計画である小型月着陸実証機 SLIM 搭載をめざして開発しているマルチバンドカメラの運用成果を最大化するために、着陸地点の景観シミュレーションを行った。今回の景観シミュレーションの目的は主に以下の３つある。（１）着陸地点選定の際、着陸地点周辺の岩石分布を推定して着陸安全性を検討する（安全性検討）。（２）着陸後、太陽高度による観測可能領域の変化を調べて、運用計画に反映させる（運用計画）。（３）SLIM の着陸位置を画像から判断するための比較画像を作成する（位置確認）。

月面の岩石サイズ・分布密度関数はルナ・リコネサンス・オービターやサーベイヤーの観測画像から推定した。また、さまざまな太陽高度・方位角、着陸姿勢において、SLIM 搭載を目指して開発している分光カメラや広角カメラからどのような画像が取得できるかを、３DCG ソフトウェア Shade3D によって作成した。CG 作成にあたっては、「安全性検討」、「運用計画」のためには、岩石サイズ・分布密度関数から推定される岩石サイズに応じた密度分布となるように各サイズの岩石をランダムに配置することで作成した。また、「位置確認」の検討のためには、ルナ・リコネサンス・オービターの画像から岩石サイズを推定する際に画像では岩石サイズがピクセルサイズに丸められていることと、上空から見たサイズと着地地点から見た高さ方向のサイズに差がある可能性があることから、今回は岩石サイズがピクセルサイズの 30%から 100%まで変化する可能性を考慮し、不確定なサイズ部分を半透明の球体で表現した。「運用計画」のための太陽方位角、高度の計算については、実際の運用日程と着陸地点が確定したのちは SPICE による精度の高い計算をするが、現時点では月を球体近似した簡易な幾何計算で算出している。

結果、「安全性検討」については、岩石の分布が高密度推定値 $N = 4.1 \times 10^5 D^{-4.7}$ （N：累積個数（/km^2）、D：岩石サイズ（m））だと着陸困難となるので、岩石分布がやや少なめの場所を選ぶ必要があることがわかった。また、「運用計画」については、太陽高度が 10～20 度の場合は、観測領域のほとんどが SLIM 本体の影となり、低太陽高度を避ける必要があることがわかった。「位置確認」に関しては、地面の曲率によって地平線周辺の岩石の可視不可視は不確定性が大きく、半透明球体による検証用画像は手作業による確認には効果があることがわかったが、位置判定自動化技術の必要性も同時に実感された。

H5

月面水の同位体分析に向けた宇宙機搭載用光学分析装置の開発

○田坂直也，　山中千博，　橋爪光，　新述隆太, (大阪大学)

近年リモートセンシング技術の発達などにより月極域において水の存在が示唆され始めている。本研究では、水分子の持つ同位体組成に注目し、月面の水の起源、挙動の理解を目指している。月面において、太陽風、微小隕石、彗星、月岩石を起源とする水が生成しうるが、それぞれは、大きく異なる水素・酸素同位体組成を持つ。水の同位体組成を調べることにより、月面における水生成プロセスを理解できる。例えば太陽風が月岩石に照射され水が生成されたなら、太陽組成の水素と月組成の酸素が同時に観測されると考えられる。また、水の起源が分かれば月面での水の挙動の理解も期待される。

月面水の情報は、月探査計画でサンプルリターンが実現したとしても、地球に持ち帰られた途端に、地球大気中の水蒸気に汚染される可能性があり、月試料から水の起源の正確な同位体情報が得られるとは限らない。そこで、サンプルリターンではなく月面でその場分析をすることによってこの問題を解決できると考えている。

また、同位体測定で一般的に用いられている質量分析計で水の分析をした場合、全ての同重体を質量分離するために大型の質量分析計が必要となり、探査計画に用いるには多くの問題がある。この点において光学分析法が有利である。本研究において開発を進める装置は、狭帯域の中赤外レーザーを用いたレーザー同位体分光器であり、高反射鏡を用いたキャビティに測定物質を閉じ込め、1m のキャビティ長で数 km の光路長を実現させる Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)という手法を用いている。月面水の同位体測定においては、レーザー同位体分光装置への水試料の転送と同位体比を測定する安定堅牢なシステム、さらには月面環境での測定値較正法などの開発が必要となる。レーザー装置については複数のレーザーを搭載することで同位体吸収線を幅広く選出することができるが、装置の温度制御には、極めて重要な問題がある。用いる水同位体の振動回転準位は、それぞれ異なる J 値を有しており、近傍にある H, D および ^{16}O, ^{17}O, ^{18}O で較正される水分子吸収線それぞれの温度特性が異なる場合がほとんどであるため、温度変化により、吸収強度が大きく変わる恐れがある。このため、装置の恒温性を十分に保つ（0.1℃未満）必要がある。

我々は今回、月面環境での同位体分析を考慮し、単一レーザーを用いた場合の水・酸素の同位体分析が可能な波長の適合性について、HITRAN database を用いて近赤外－中赤外域で評価した。また水の振動回転準位のスペクトル線の温度・圧力依存について SpectraPlot を用いて考慮することにより、今後の装置開発の指針を得ることを目標としている。講演では、装置の現状と課題について詳細に発表する予定である。

H6

DESTINY⁺ミッションが目指す流星群母天体 Phaethon のフライバイ観測と惑星間ダストのその場観測

○荒井 朋子[1], 小林 正規[1], 石橋 高[1], 吉田 二美[1,2], 大坪 貴文[3], 岩田 隆浩[3], 岡田 達明[3], 豊田 裕之[3], 西山 和孝[3], Phaethon 探査検討チーム[4]

[1]千葉工業大学, [2]神戸大学, [3]宇宙航空研究開発機構, [4]日本惑星科学会

深宇宙探査技術実験ミッション DESTINY⁺ (Demonstration & Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLyby and dUSt analysis)は、JAXA の平成 27 年度イプシロンロケットによる公募型小型ミッションとして提案され,現在フェーズ A 検討を行っている.本計画ではイオンエンジンにより地球周回軌道から地球重力圏を脱出後,ふたご座流星群の母天体である Phaethon をフライバイし,高精度カメラによる追尾撮影及び放出されたダストのその場分析を行う.また,地球周回軌道を離脱後、Phaethon に到達するまでのクルージング期間中に惑星間ダスト及び星間ダストのその場分析を行う計画である.

年間 4 万トンを超えるダストが地球外から地表に供給されている. 成層圏や地表で回収された惑星間ダストの分析結果から,ダストは空隙の多い脆い構造を持ち,炭素や有機物を一般的に含むことがわかっている.隕石で炭素質のものは全体の 5%以下と非常に少ない.惑星間ダストの炭素濃度は隕石の数倍から 10 倍である. 地球外からもたらされる炭素や有機物の主要な輸送媒体はダストと示唆される. したがって,地球外由来の炭素や有機物が地球生命の前駆物質になりうるという仮説の検証には,地球飛来ダストの実態理解が重要である.近年惑星科学や天文学において分野横断的な手法で,上記の仮説検証を目指しダスト研究が精力的に進められている. DESTINY⁺では,「地球生命の前駆物質の可能性がある地球外からの炭素や有機物の主要供給源と考えられる地球飛来ダスト及びその母天体の実態解明」を大目的に据え、深宇宙探査機により大気圏突入前の地球周辺のダストを惑星間空間でその場分析を行うと共に,地球に流星群としてダストを供給する流星群母天体 Phaethon をフライバイして,天体形状,地形,地質観測を行い,近傍ダストのその場分析を目指す.理学目標は以下の二つ.

(1)地球飛来ダストの実態解明: 地球飛来ダストの物理特性(速度,到来方向,質量分布)及び化学特性を明らかにし,地球飛来ダストの実態を解明する.

(2)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: 流星群母天体である活動小惑星におけるダストの生成・放出機構を明らかにし,地球へのダスト供給機構に係る新たな知見を得る.

上記の理学目標達成のため,望遠カメラ,マルチバンドカメラ,及びダストアナライザの三つの観測機器の搭載を予定している.本講演では DESTINY⁺の理学ミッションの科学的意義,目標,最新の観測計画を紹介する.

DESTINY+ミッション搭載用超望遠モノクロカメラ（TCAP）およびマルチバンドカメラ（MCAP）

○石橋 高[1], 亀田 真吾[2], 荒井 朋子[1], 奥平 修[1], 山田 学[1], 石丸 貴博[3], 佐藤 峻介[3], 大槻 真嗣[3], 岩田 隆浩[3], 岡田 達明[3]

[1]千葉工業大学, [2]立教大学, [3]宇宙航空研究開発機構

小型探査機により小惑星 3200 Phaethon のフライバイ観測を行う DESTINY+計画が提案されている. この計画では, 相対速度数 33km/s（現在の軌道設計による）という高速の小惑星フライバイの間に, 高空間分解能の小惑星表層地形観測や, 多波長による小惑星表層物質分布観測を行うことを目指している. 本発表では、地形撮像用の望遠カメラ TCAP（Telescopic CAmera for Phaethon）と多波長撮像用のマルチバンドカメラ MCAP（Multiband CAmera for Phaethon）について行ったこれまでの検討の結果を示す.

DESTINY+ミッションにおけるフライバイ観測の理学目的は, ふたご座流星群の母天体である Phaethon の素性を明らかにすることである. Phaethon は少なくとも近日点付近ではダストを放出していることが知られており, そのダストはふたご座流星群として地球に到達している. すなわち, Phaethon は地球に物質を供給している小惑星という観点から非常に興味深い天体であり, これまでにも数多くの地上からの望遠鏡観測が行われてきた. しかし, 地上観測では点光源としての観測しかできず, 得られる情報には限りがある. そこで, DESTINY+では, 世界で初めて Phaethon を空間分解して観測し, ダスト放出機構を含めたその実態の解明を目指す.

フライバイフェーズにおける Phaethon 観測の目標は大きく分けると以下の 4 つである. (1) Phaethon の自転周期観測, (2) Phaethon の形状観測（輪郭観測, 3 次元形状観測）, (3) Phaethon 表層の地形観測, (4) Phaethon 表層の物質観測. このうち, 主に(1)から(3)を望遠カメラ TCAP で, (4)をマルチバンドカメラ MCAP で行う.

TCAP に必要な性能は, Phaethon 接近時に高分解能（≤5 m/pixel）でぶれずに撮像を行うことである. また, TCAP は望遠カメラであり視野角が狭いため, Phaethon を常に視野に入れるために, 駆動鏡を用いた追尾を行う. MCAP は, バンド幅が狭く得られる光量の問題から TCAP のような高分解能を達成することは難しいが, ≤100 m/pixel でのマルチバンド画像の取得を目指す. 観測バンドは, ノミナルで 390, 550, 700, 860 nm, オプションで 480, 950 nm である. 観測対象は, 紫外域の不溶性有機物の吸収, 可視域のスペクトルの傾き, 近赤外域のカンラン石の吸収（の影響）である. 全バンドの同時撮像を行うために,「光学系＋受光素子」のセットをバンド数分だけ並列する方式を採用している. これまでに, 両カメラの概念検討を行い, 両カメラの成立解が得られている. 今後はさらに検討を進め, 質量や消費電力の低減, 探査機システムとのインターフェースの最適化, 小惑星追尾アルゴリズムの詳細検討などを行う予定である.

H8

DESTINY+搭載用ダストアナライザ

○小林 正規[1]、荒井 朋子、木村　宏、シュラマ ラルフ、クリューガ ハラルド
[1]千葉工業大学、[2]神戸大学、[3]シュトゥットガルト大学、[4]マックスプランク太陽系研究所

深宇宙探査技術実験ミッションDESTINY+（DESTINY+, Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage for Phaethon fLyby and dUSt analysis）では，「将来の深宇宙探査の鍵となる先端技術」というミッションのコンセプトを示していて，探査機バス重量の大幅軽量化，高度化されたイプシロンロケットとの組み合わせで，月，金星，火星などの探査において50kg～200kgのミッションペイロードを持つ小型高性能深宇宙探査機の実現を目指している．

DESTINY+には、DESTINY+ Dust Analyzer（DDA）が搭載されて、DESTINY+が地球を離れてフェートンへ到達するまでのクルージングフェーズと，フェートンを近接フライバイするタイミングでそれぞれ科学観測を行う．フェートンまでのクルージング中は，バックグラウンドとして人工デブリの影響を受けやすい地球周回軌道を離れて，星間ダストおよび惑星間ダストを観測する絶好の機会である．

本講演では，DESTINY+に搭載されるダスト分析装置（DESTINY+ Dust Analyzer，DDA）について概要と現在行っている概念検討の内容について述べる．

図１．DDAの概念図（左）と実験室モデルの写真（右）

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) ー 概要および国内開発状況

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] 藤井雅之,[8] 横沢剛,[8] 畠山千尋,[8] 佐藤真衣,[8] 小島健太郎,[8] 松井直樹,[8] 中川寛之,[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] Kay Lingenauber,[13] Christian Althaus,[13] Simone Del Togno,[13] Judit Jänchen,[13] Belinda Borgs,[13] Thomas Behnke,[13] Horst-Georg Loetzke[13], Harald Michaelis[13], Reinald Kallenbach,[13] Hauke Hussmann[13]

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], ドイツ航空宇宙センター[13]

We present an overview and Japanese development status for the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) mission. JUICE is a mission of ESA to be launched in 2022, and GALA is one of the payloads of JUICE. Major objectives of GALA 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 more detail about GALA science, see also a poster by J. Kimura et al).

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 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国内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変形を通じての地下海の存在、特徴を調べる等の科学研究に極めて有益である（GALA のサイエンスについては、本学会の木村淳他のポスターも参照されたい）。

GALA 基本的には高度～500 km のガニメデ周回軌道にて運用する。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。日本では現在、 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設計、製造、試験を進めている。講演ではこれらの進捗について、最新の状況を紹介する。

H10

火星表面での現場顕微鏡観察のための生命探査顕微鏡（LDM）開発の現状

Current status of Life Detection Microscope (LDM) for in situ microscopic imaging at the surface of Mars

○山岸明彦[1], 佐藤毅彦[2], 宮川厚夫[1], 塩谷圭吾[2], 吉村義隆[3], 佐々木聰[4], 小林憲正[5], 癸生川陽子[5], 藪田ひかる[6], 三田肇[7], 今井栄一[8], 長沼毅[6], 出村裕英[9], 藤田和央[2], 臼井寛裕[10]

[1]東薬大,[2]JAXA,[3]玉川大,[4]東京工科大,[5]横国大,[6]広大,[7]福工大,[8]長岡技科大,[9]会津大,[10]東工大

火星で探査を続けるNASAのMSLは、大気中メタン、土壌中の還元型化合物（硫化鉄）、火星由来有機物の検出を報告した。Vikingの結果の見直しがすすみ、生命探査を今一度実施する必要性が高まっている。LDM – WGでは、Vikingの装置の二桁高い感度をもつ蛍光顕微鏡装置の開発を行っている。

近年の火星衛星探査から、地下の水あるいは水蒸気が表面に噴出している可能性のある場所の候補が複数発見されている。現在もTGO、ALMA、地上望遠鏡でのメタンと水蒸気の遠隔探査が進んでいる。地下で液体の水のある場所があれば、火星でも最も微生物生存の可能性が高い場所といえる。そこから、噴出する水あるは水蒸気は最適な探査対象と言える。

欧米はこれまで水と有機物の探査を行ってきた。MSLは熱気化TV-GC-MSと周波数可変赤外分光により、土壌と大気中での水とメタン等の分析を行っている。ESA/ロシアのExoMars着陸機はラマン顕微鏡とレーザー気化質量分析装置、NASAのMars2020は紫外蛍光とラマン顕微鏡で有機物の探査を実施予定である。

これに対してLDMでは、「細胞」の直接検出を目指す点が特徴である。LDMではいくつかの蛍光色素を用いて、有機物と細胞の特徴を検出する。蛍光色素SYPRO REDは有機物一般を染色する。SYTO24とヨウ化プロピジウムは、有機物を赤く、膜に囲まれた有機物を緑に染色する。後者は「細胞」である可能性が高い。さらにCFDA-AMは酵素活性を検出して緑に染色する。装置は1μmの微生物を検出できる。これは今後欧米で予定される撮像より10倍程度高い画像分解能であり、地球の微生物の大きさに対応している。また1mm^{3}を撮像することで、地球でもっとも微生物密度の低い場所（10^4細胞/ｇ土壌）での微生物検出が可能である。また、採集した試料の水や有機物（赤外反射分光）、鉱物分析（紫外可視蛍光時定数測定）の可能性の検討も行っている。LDM開発の現状を報告する。

火星探査の新しい戦略と火星探査技術実証

Mars Exploration Strategy Update and Technology Demonstrative Mission

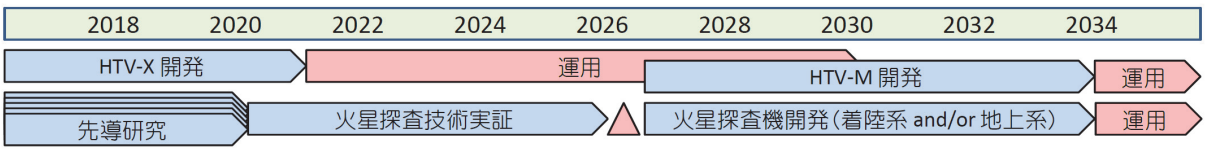
○藤田和央，畠中龍太，池永敏憲，西顕太郎，春木美鈴，鈴木俊之，小澤宇志，野村哲史
宇宙航空研究開発機構

現在，宇宙航空研究開発機構の国際宇宙探査推進チームでは，日本の宇宙探査全体シナリオの検討を進めている．全体シナリオでは，まず地球近傍でのミッションによって宇宙探査技術を発展させ，月圏への有人を含む探査を実施し，技術醸成を行った後に，国際共同有人火星探査へ積極的に参加してゆくことが謳われている．本シナリオにおいて，我々は，火星探査戦略を再検討している．現在検討中の構想では，国際協働有人火星探査において，わが国は火星圏への物資輸送へ寄与し，これを HTV-M によって行う．HTV-M は HTV，そして現在開発中の HTV-X の後継機であり，エアロキャプチャによって軌道に投入される火星圏への輸送機である．HTV-M は地上探査機のプラットフォームや，データリレー衛星としても機能する．

また，HTV-M に至る技術獲得を目標として，2020 年代後半に火星探査技術ミッションを実施するというロードマップを構築中である（図 1）．現段階では，技術実証機は HTV-M の技術実証を第一の目的とし，リモートセンシングによるサイエンスや，将来の我が国の火星地上探査を先導するための支援機能（データリレー機能など）を提供することを目的とする，エアロキャプチャオービターである．HTV-M では，輸送重量最大化のために，ロケットフェアリングと熱防御用エアロシェルを兼用とする設計を想定しており，従来のカプセル型飛翔体よりも技術的難易度が高い．従って，本実証機では，世界的にも未踏技術であるエアロキャプチャに加え，新しい空力形状のエアロシェルという，挑戦的な課題に挑戦しなければならない．現在，当該実証機の概念検討を進めており，講演ではその検討状況概要を紹介する．

一方，火星サイエンスの側面からは，MMX に続く地上探査を実施することが望ましい．複数の大規模な火星ミッションを実行するのは費用対効果の点で現実的ではないため，2 つのシナリオが考えられる．1 つ目のシナリオは，技術実証機を地上探査の先導ミッションとして小型ミッションで実施し，その後に地上ミッションを行うものである．2 つ目のシナリオは，技術実証ミッションに地上探査を付加するものである．今後，サイエンスのコミュニティとも議論を行い，火星探査の新しいロードマップを具体化してゆきたい．

図 1　HTV-M（H-Ⅲ Transfer Vehicle to Mars）および実証機のロードマップ（構想）



火星着陸探査に向けた LIBS-QMS 法を用いたその場 K-Ar 年代測定装置の開発

○堀内美沙[1], 細川真菜美[1], 川嶋愛弓[1], 宇野めぐみ[1], 沖津由尚[2], 長勇一郎[3], 亀田真吾[1], 三浦弥生[2], 笠原慧[2], 杉田精司[2]
[1] 立教大学, [2] 東京大学, [3] NASA Marshall Space Flight Center

火星は昔、現在の地球のような温暖湿潤な環境であったとされているが、現在は乾燥寒冷な環境になっている。この環境変動が起こった過程を解明するためには、火星表層の形成年代を複数地点で測定し、環境変動前後の火星の地質情報を得る必要がある。そこで火星表面をローバーで移動し、複数地点の岩石の放射年代を計測することが重要となる。このような重要性のため、NASA の Curiosity は火星の Gale クレーターにある堆積岩で K-Ar 年代測定を行い、4.21±0.35 Ga という年代を得た[Farley et al., 2014]。しかし測定した試料には、砕屑岩中の鉱物と堆積中に形成された自生鉱物が未知の割合で含まれるものであったので、得られた K-Ar 年代が堆積岩の形成年代であると結論づけることは難しかった。そこで我々は、LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) と QMS (quadrupole mass spectrometer) を用いた岩石の局所分析を行うことを試みており、Curiosity とは異なり火山岩の測定を行うことを予定している。本手法は実験室では実証された[Cho et al., 2016]が、これらの装置は大型(>50 kg)であり探査機搭載には大きな隔たりがあった。

そこで本研究では、小型ローバーに搭載可能な年代測定装置を製作し、実験室で K と Ar を同時に検出する実験を行った。その後、本装置を小型ローバーに搭載し、伊豆大島の火山地形でフィールド試験を行った。

今回は第一試作機として、(1)真空槽は ICF70 から ICF34 に変更、(2)レーザーは出力が 100mJ から 10 mJ のものに変更、(3)ゲッターは 700~800 ℃に熱した Ti-Zr ゲッターから 350 ℃に熱した非蒸発型ゲッターへ変更、(4)Ar を吸着するチャコールトラップは不使用、という小型軽量化を行った。QMS など更なる小型軽量化を行う余地が残されているが、装置は大きさが 360 mm×620 mm×200 mm で重さが約 20 kg(電源、コントローラー、真空ポンプは除く)まで小型軽量化した。次に、年代が既知の天然試料 2 つ(Biotite:K_2O=8.64 wt%, 1.78 Ga, Hornblende:K_2O=1.12 wt%, 1.75 Ga)を用いて実験室で実験を行ったところ、K, Ar 含有量の異なるどちらの試料からも K と Ar を同時に検出することができた。その後に、火星に似た火山地形である、伊豆大島の裏砂漠でフィールド試験を実施した。本装置を搭載したローバーを約 30 m 以上動かせることを確認し、その場で真空容器収納済みの Biotite 試料で K-Ar 測定を行ったところ、実験室と同様に K と Ar を同時に検出することができた。これより本装置はバッテリー駆動可能で、ローバー移動の振動に耐えられることが示せた。小型ローバーに搭載可能な装置で K と Ar が検出できたことから、次に、Ar 濃度推定のための、試料の重量を求める機能を実装出来れば、ローバー上で年代測定実験が行える見込みである。

火星衛星探査機搭載用望遠カメラと広角分光カメラの設計

○長田直也[1]、加藤博基[1]、亀田真吾[1]、塩谷圭吾[2]、尾崎正伸[2]、
神山徹[3]、鈴木秀彦[4]、宮本英昭[5]
1.立教大学　2.宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所
3.産業技術総合研究所　4:明治大学　5:東京大学

JAXA は火星衛星であるフォボスとダイモスの起源を明らかにするため火星衛星探査計画を検討している。この計画ではフォボス・ダイモス・火星の観測とフォボスからのサンプルリターンを計画している。この探査機に搭載予定の望遠カメラ(TL)と広角分光カメラ(WAM)の設計を行った。

TL の目的はフォボスの地形を明らかにすることである。平坦な着陸地点や、宇宙風化の影響が少ないとされる岩塊やクレーターを見つけなければならない。センサの選定から始め、地形情報取得に必要な鮮明度もシミュレーション画像から推定した。それに加え、被写界深度や光量などの制約も見積もり、それらの制約を考慮して設計した結果、リッチークレチアン式が最適解であることがわかり、高度 20 km から 11.6 cm/pix の空間分解能を持つ望遠カメラを設計した。温度変化による性能変化や迷光解析についても述べる。

WAM の目的はフォボス表面の物質分布情報を得ることである。はやぶさ 2 に搭載された広角カメラ ONC-W1,W2 では多波長の画像を得ることができない。フィルターホイールを搭載した ONC-T には、探査機が降下中ではホイールを回している間に撮像範囲が変わってしまうという欠点がある。そこで新たに 7 つの異なる単色広角カメラを設計し、全波長同時撮像を行うことを提案する。探査機が着陸している時とフォボスを周回している時の両方で使用できるように被写界深度を大きく保ち、且つ性能に入射角依存性があるバンドパスフィルタやセンサへの光線の入射角に制約を設けて設計した結果、レトロフォーカス式が最適解であることがわかった。

本発表では、以上のカメラの設計を紹介する。

火星衛星探査計画のための分離カメラ (MMX-DCAM5) の検討状況

○小川 和律[1]、和田 浩二[2]、石橋 高[2]、澤田 弘崇[3]、荒川 政彦[1]、
本田 理恵[4]、坂谷 尚哉[5]、白井 慶[3]、保井 みなみ[1]
[1]神戸大学、[2]千葉工業大学 惑星探査研究センター、
[3]宇宙航空研究開発機構、[4]高知大学、[5]明治大学

現在、日本の次期惑星探査として火星衛星サンプルリターン計画 (MMX) が検討されている。これは、探査機が火星圏へ到達したのちに火星衛星 Phobos の近傍軌道に滞在して、リモートセンシング観測と着陸・表面試料採取を行って地球に帰還するというもので、2020年代前半の打ち上げを目指している。我々はこれまで、MMX 探査機に搭載する科学観測機器の候補として分離カメラ (DCAM5) と呼ぶ機器を提案し、検討を行って来た。本発表では、この DCAM5 の科学目標と検討・開発状況を報告する。

DCAM は、探査機本体から 10 cm 程度の小型ユニットを分離・放出して数時間のうちに観測を行い、データを探査機本体に無線送信するコンセプトの観測機器シリーズである。JAXA が開発した DCAM1・DCAM2 がソーラセイルミッション IKAROS に初めて搭載され、IKAROS が展開した帆を離れた位置から撮影した。DCAM3 は Hayabusa2 が行う小惑星上の衝突・人工クレータ生成実験のために開発したもので、爆破破片との衝突を回避するため探査機本体が遠方に回避する間も現場近くに留まり、衝突実験の様子を可視カメラで撮影する予定である。MMX DCAM5 (DCAM4 は欠番) は Phobos 上空の軌道上から地表面に向かって投下し、投下開始から着地後 1 時間程度までの間に観測を行うものである。

DCAM5 の科学目標は、Phobos 上の探査機が着陸困難な地域 (例えば大型クレータ内部や岩塊が多い地域など) や着陸候補地点に対し、マルチスケールで詳細な地形的特徴・分光学的特徴を調べ、さらにレゴリス表層の地盤強度 (岩塊であれば破壊強度等) とレゴリス粒子の特性を調べることである。そのために、可視・近赤外マルチバンドカメラ、可視単色接写カメラ、3 軸加速度計を搭載して以下を行う: (1) 落下中に地表面の可視・近赤外分光撮像、(2) 着地時の加速度応答計測、(3) 着地点表面の接写撮像、(4) 着地時に舞い上がるダストの撮像。

上記各観測のデータを統合して落下点の表面状態を総合的に解釈するため、各センサを一つのコンポーネントにまとめて投下する。特に Phobos 地表面の物理状態は過去に直接的な観測例が無く不明な点が多い。DCAM5 では、着地時の加速度応答による地盤強度計測と地表面接写によるレゴリス粒径の判定結果を組み合わせ、レゴリスの堆積状態 (空隙率) を推定する新しい手法に挑戦する。また分離ユニットの小型軽量の特性を活かして、異なる幾つかの地域の調査を行うために複数台の搭載を提案している。

はやぶさ2着陸地点選定運用訓練のための仮想Ryuguデータ作成

Data production of the “Ryuguoid” for operational training of HAYABUSA2 landing site selection

三浦 昭[1]，山口 智宏[1]，本田 理恵[2]，横田 康弘[2]，千秋 博紀[3]，北里 宏平[4]，山本 幸生[1],中村 智樹[5]，野口 高明[6]，本田 親寿[4]，山田 学[3]，和田 浩二[3]，佐伯 孝尚[1]，○田中 智[1]

Akira Miura[1], Tomohiro Yamaguchi[1], Rie Honda[2], Yasuhiro Yokota[2], Hiroki Senshu[3], Kohei Kitazato[4], Yukio Yamamoto[1], Tomoki Nakamura[5], Takaaki Noguchi[6], Chikatoshi Honda[4], Manabu Yamada[3], Koji Wada[3], Takanao Saiki[1], ○Satoshi Tanaka[1]

1,宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構, 2, 高知大, 3, 千葉工大, 4, 会津大, 5, 東北大, 6, 九州大

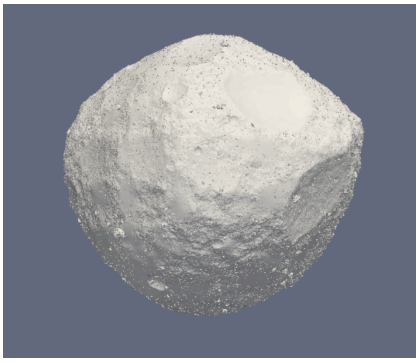
1, JAXA, 2,Kochi Univ., 3, Chiba Institute of Technology, 4,Univ. Aizu, 5, Tohoku Univ. 6. Kyushu Univ.

「はやぶさ2」プロジェクトではリモートセンシングデータを用いて形状や地質マップなどのプロダクツを作成し，着陸地点選定までをシミュレーションする運用訓練を本年度初頭から開始した．Ryuguの模擬データ(Ryuguoid)は訓練として必要な工学条件だけでなく,着陸地点のサイエンス的意義を議論できるようにサイエンスおよび工学メンバからなるデータ作成チームを組織し，議論と試作を重ねた．

“Ryuguoid”は三角形ポリゴンで構成し，探査機が5kmの高度で撮像した時に解析に必要な精度が十分達成されることを必須条件とした．”Ryuguoid”基本形状モデルと自転軸や自転周期など，着陸にとって重要なパラメータについては現状の観測値を大きく逸脱しない範囲で設定した．また，母天体形成から現在に至るまでのプロセスも観測事実を参照にし，クレータやボルダーの分布，物質分布等を設定した．さらに現実的な惑星表面の見え方になるようにフラクタルによる凹凸を加えた．

画像撮像条件は実際のはやぶさ2の運用計画立案で用いられる「MISSION_PLAN」とよばれるコマンド作成ツールを用いた．撮像タイミングにおける探査機の位置，姿勢をシミュレータ（HDS）で決定し，設定した地質情報に対応する隕石の測定スペクトルや粒径と熱物性の関係を最新の実験や地上観測データに基づいて搭載機器が撮像するイメージ画像を作成した．さらに各リモートセンシング機器で得られた画像に近づけるために機器の特性や誤差を極力考慮した上で補正し，訓練画像データとして提供した．

これらの各処理において機器特性と解析プロセスを総合的にレビューすることが必要不可欠となり，データ解析において改善すべき点を見いだすことができるなど到着後のデータ解析にむけても重要な成果が得ることが出来た．さらに今回開発したシミュレーションシステムを実際に得られたデータとの比較検討を行うために有効に活用する方法を検討している．



訓練用に作成した”Ryuguoid”イメージ画像（直径約800m、上が自転軸方向

はやぶさ 2 着陸点選定訓練：データ解析・検討

○渡邊誠一郎[1,2]、石原吉明[2]、田中智[2]、山口智宏[2]、三浦昭[2]、山本幸生[2]、平田成[3]、
諸田智克[1]、坂谷尚哉[4]、北里宏平[3]、松本晃治[5]、藪田ひかる[6]、
はやぶさ 2 LSS データ解析検討チーム[7]
[1]名古屋大学、[2]JAXA/ISAS、[3]会津大学、[4]明治大学、[5]国立天文台、[6]広島大学、
[7]はやぶさ 2 プロジェクト

始原小惑星からのサンプルリターンをめざす探査機「はやぶさ 2」は、2014 年 12 月の打上げ、2015 年 12 月の地球スイングバイを経て、2018 年夏の到着に向け航行を続けている。目的天体リュウグウ（1999 JU_3）は C 型地球接近小惑星であり、母天体の熱水活動に伴う水質変成・有機物多様化を記憶する含水鉱物や炭素質物質が表面に分布すると期待される。

はやぶさ 2 は天体表面の最大 3 箇所に短時間サンプラホーン先端を接地させ（タッチダウン:TD）、弾丸を打ち込むことで表面から放出される粒子を捕獲するサンプリングを行う予定である。TD 点の選定は、小惑星到着後のリモートセンシング観測に基づく、科学価値評価と安全性確認によって行われる。リュウグウの形状・自転軸方向には大きな不確定性があるが、仮に自転軸が横倒しに近い場合、到着直後の時期だけでは小惑星全域を観測できない可能性が高い。そのため、まずは到着後一ヶ月程度の間に、小惑星表面地球直下点の 20 km 上空からのグローバル観測と、高度 5 km 程度まで降下して行う TD 可能緯度帯の観測から、10 月に予定される着陸機 MASCOT（欧州 DLR/CNES 開発）のリリースと 1 回目の TD の両候補点を選ぶ着陸点選定（LSS）を実施する方針である。

本講演では、現在行われているはやぶさ 2 プロジェクトの LSS 訓練の内容を報告する。訓練における解析は、［1］で述べられる高精度模擬小惑星モデルに基づいて、実際の小惑星近傍観測計画（2018 年 7・8 月）に従って生成された各種画像・データを出発点として、実際の LSS で使用を計画しているツール群を用いて、模擬小惑星の形状モデルを作成し、可視光／近赤外スペクトル、スペクトル特徴量、表面温度／熱慣性等のデータプロダクトを作成・評価した。さらにそれらのプロダクトに基づき、安全性確認を実施するとともに、自転パラメタを決定することで、2018 年 10 月後半に予定される第 1 回目の TD 時点における地球直下点近傍緯度帯から 5－6 箇所の TD 可能領域を設定した。そしてそれらの領域を中心に、各種データプロダクトに基づいて、含水鉱物や有機物の存在や表面粒子粒径・ボルダーサイズ分布等を推定し、科学評価を行った。形状モデルの作成や探査機軌道推定などにおいてはいくつかの問題点が認識されたので、それらも含めて訓練の結果を概観する。

［1］「はやぶさ 2 着陸地点選定運用訓練のための仮想 Ryugu データ作成」（田中他）、2017 年日本惑星科学会秋季講演会，2017

はやぶさ２可視カメラの撮像模擬実験

○諸井圭市[1]、亀田真吾[1]、杉田精司[2]
[1]立教大学、[2]東京大学

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 月にリュウグウに到着する予定である。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始原的な物質を地球へと持ち帰ることであり、リュウグウには、地上からの反射分光測定の結果[Vilas, 2008]から含水鉱物の存在を示す 700 nm 吸収帯の存在が確認されている。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 700 nm 吸収帯の検出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、700 nm 吸収帯の検出が可能であることを確認した[Kameda et al., 2015]。しかし、ONC-T ではフィルタホイールを回転させてマルチバンド分光観測を行うため、フィルタを回転させている間に、リュウグウの自転によりバンドごとの視野のずれが生じるが、700 nm 吸収帯が検出可能であることを示した先行研究ではバンドごとの視野のずれは模擬していない。

そこで本研究では、ONC-T を模擬したカメラを用いて、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、このずれを補正することによる 700 nm 吸収帯の深さへの影響を確認した。

自転によるバンドごとの視野のずれはリュウグウ表面からの高度によって変化する。そのため本研究では、高度 20 km（HP）と高度 5 km を想定し、試料台の下に x 軸ステージを設置して、バンドごとに隕石の位置を動かすことで自転によるバンドごとの視野のずれを模擬した。また、はやぶさ２の撮像を模擬するために、ONC-T で使われている CCD チップと同じものを組み込んだカメラと、ONC-T に搭載されているバンドパスフィルタと同等の透過中心波長を持つフィルタを用いた。隕石試料には、マーチソン隕石（ペレット）とノゴヤ隕石（チップ）の 2 種類の炭素質コンドライトを用いた。

地球外物質研究グループによる はやぶさ２試料受入準備

○安部正真[1]，岡田達明[1]，矢田達[1]，坂本佳奈子[1]，吉武美和[1]，中埜夕希[1]，松本徹[1]，川崎教行[1]，熊谷和也[1]，松井重雄[1]，西村征洋[2]，圦本尚義[1,3]，
[1]宇宙航空研究開発機構,[2]マリン・ワーク・ジャパン,[3]北海道大学

はやぶさ２はＣ型小惑星リュウグウの試料（サンプル）を 2020 年に地球に持ち帰る予定である。JAXA（宇宙航空研究開発機構）/ISAS（宇宙科学研究所）地球外物質研究グループでは、はやぶさ２試料受入準備として、専用のクリーンルームおよびクリーンチャンバーの製作を 2016 年より開始している。本年夏にはまずクリーンルームが完成し、翌年夏までにクリーンチャンバーが設置される予定である。

クリーンチャンバーは全 5 室構成であり、真空ハンドリングを中心としたチャンバーと窒素雰囲気でのハンドリングを中心としたチャンバーに、大きく分かれる。前半の真空ハンドリング領域では、リュウグウ試料の封入されたサンプルコンテナの開封作業と、サンプルコンテナから試料の入ったサンプルキャッチャの取り出し作業、およびサンプルキャッチャの蓋の開封作業を行う。また真空環境下において、サンプルキャッチャ内の試料の光学観察と一部試料の取り出しもできるように設計している。

サンプルコンテナからサンプルキャッチャを無事取り出したあとの作業は、主に高純度窒素環境下においてのグローブ操作となる。窒素雰囲気のチャンバーとしては、はやぶさ１と同様な光学顕微鏡観察下でマニピュレータ作業が行えるチャンバーとは別に、目視で作業しやすい新たなチャンバーも製作している。はやぶさ２の持ち帰るリュウグウ試料ははやぶさ１のイトカワ試料に比べて、量およびサイズが大きいことが予想されているため、効率よく試料の取り出し、観察、分別などの作業を行う必要があり、チャンバー上面が全面窓となっており、手元に顔を近づけた状態で試料ハンドリングが行えるようになっている。

地球外物質研究グループでは、帰還カプセルを相模原キャンパスのキュレーションセンターで受け入れてから 6 ヶ月間で試料の取り出しから一次記載を行い、初期分析チームや、NASA への試料分配を行う予定である。初期分析は 1 年間かけて行われた後、国際公募研究である国際 AO がスタートする予定である。

新しいクリーンチャンバー設置完了からはやぶさ２の試料帰還までは約 2 年あるが、この間に、設備の機能確認試験および本番のリハーサル試験などを行ったあと、再びチャンバーを清浄化して、はやぶさ２帰還試料の受入を万全な状態で迎えることになる。

「宇宙科学の今後 20 年の構想を検討する委員会」活動報告

○今村剛[1]，矢野創[2]，関根康人[1]，三好由純[3]，清水敏文[2]
[1]東大，[2]宇宙研，[3]名大

JAXA 宇宙科学研究所の宇宙理学委員会・工学委員会のもと「宇宙科学の今後 20 年の構想を検討する委員会」（通称：20 年委員会）が設立され，宇宙科学のロードマップを検討している．この活動は，2030 年代を見越した長期的な方向性のオプションを整理したうえで，2020 年代に系統的に準備すべきことやキー技術を抽出しようとするものである．惑星探査は宇宙物理，太陽物理，太陽地球系物理，宇宙環境利用などと並ぶ重要な柱である．

発端は，2014 年末に ISAS から宇宙科学コミュニティに RFI（研究領域の目標・戦略・工程表提供の依頼）を送出し，集まった回答を ISAS がとりまとめたことにある．その過程で，宇宙科学の将来計画を継続して改訂していくために，今後 20 年ほどの長期ロードマップを理工学のコミュニティが主体となり提言する必要性が強く認識された．その一方で，今後 10 年の戦略的中型計画（H2A クラス）の候補が概ね固まってきたことを受けて，10-20 年後の中型計画のオプションと，それらを実現するために今後 10 年間に開発すべきキー技術を具体化する必要が出てきた．20 年委員会はこのような問題意識のもと，2016 年末に検討を開始した．メンバーは理学分野と工学分野が同数であり，理学と工学の競争的かつ協調的な発展によるロードマップを目指している．理学のミッション構想から抽出されるニーズベースのシナリオだけではなく，工学技術からのシーズベースのシナリオも想定する．

20 年委員会は，RFI 回答をベースに日本の宇宙理工学における現状の開発能力とこれまでに考えられている計画を把握したうえで，ありうる大きな方向性と，具体的なミッション構想の科学的価値や実現可能性を総合的に検討する．各コミュニティの意見を反映する一方で，コミュニティ横断的かつ理工合同の議論による新しい視点からのシナリオの構築も目指している．

20 年委員会が提示するのはあくまで可能性のあるシナリオであり拘束力はないが，理工学委員会が今後のミッションの規模と頻度，プログラム化を検討するうえで指針のひとつとなることが想定されている．本講演ではこの委員会での議論の途中経過について報告する．

D1

水惑星学の創成

○関根康人[1]、渋谷岳造[2]、玄田英典[3]、福士圭介[4]、臼井寛裕[3]、高橋嘉夫[1]、倉本圭[5]、鍵裕之[1]、渡邊誠一郎[6]（[1]東京大学、[2]海洋研究開発機構、[3]東京工業大学、[4]金沢大学、[5]北海道大学、[6]名古屋大学）

太陽系探査によって、地球以外の天体に液体の水が存在する（していた）証拠が続々と見つかっている。近年では、そこに探査機がアクセスすることで、水の化学的性質まで明らかになろうとしている。例をあげれば、火星探査車キュリオシティーは、かつての湖の堆積物の上を走り回り、湖底の沈殿物を分析しており、土星系探査機カッシーニは、氷衛星エンセラダスの内部海から噴出する海水をその場分析している。また、我が国の探査機はやぶさ２は、かつて内部に液体の水を保持していた氷微惑星を母天体とするＣ型小惑星リュウグウに到着し、サンプルを持ち帰る予定である。しかしながら、これらはこれまで天体ごとの個別論として議論されてきている。太陽系における水を持つ天体の理解を、生命にまでつながる学問体系として発展させるためには、これら“水惑星たち”の形成進化の物理・化学を統一的に理解する必要がある。

本発表では、惑星科学（惑星形成論、太陽系探査学、惑星気象学、宇宙物質科学）と地球科学（地球化学、地質学、生命圏科学）の有機的な融合のもと、これら天体上で水が駆動する化学反応や物質循環の解明を突破口として、水が惑星の形成・進化に果たした役割を総合的に理解し、生命生存可能性の議論にまで至る「水惑星学」という新しい学問領域の創成を提案する。

これを実現するため、我々は太陽系天体の水・物質循環を記述する理論とその実試料による実証を両輪とする研究体系を構築することを目指す。具体的には、天体の海底や地下での水-岩石反応、地表面での水-氷相互作用や光化学反応について、それぞれ室内実験に基づき反応過程や反応率を明らかにする。そして、これらを水循環や惑星形成を扱う物理モデルに組み込むことで、天体上の水・物質循環を記述・解釈・予測する理論を構築する。これに対して、宇宙物質から水質（pH、酸化還元状態、温度など）を読み解くプロキシを開発しつつ、隕石やリターンサンプルに適応して水環境を読み解く分子地球化学分析や、はやぶさ２探査対象の小惑星リュウグウや火星、氷衛星の探査データの解析から、太陽系天体の水環境を実証的に解読していく。

これら理論と実証の両輪で進める先の達成目標は、１）微惑星内の水・物質循環の解明と地球の水量の決定要因の理解、２）火星、氷衛星における水環境進化とエネルギー論に基づく生命圏の推定である。これらは将来的には、系外地球型惑星の表層環境推定、太陽系生命探査、地球史での再現不能イベント（全球凍結など）の理解へと発展し、究極的には地球という惑星を水惑星一般の座標空間の中で再定義することにつながる。

この研究計画は、平成 29 年度から始まった新学術領域研究「水惑星学の創成」として採択された。公募研究では、系外惑星学、惑星形成論、隕石学、地球史学など、本領域でカバーしきれない斬新なアイディアによる萌芽的な研究や、探査機器開発など長期的視点を持つ提案を期待する。また、本領域によって整備される、はやぶさ２探査データや軟Ｘ線顕微鏡をさらに発展させる研究も公募研究として期待される。太陽系内外の水を持つ天体上での物質循環や進化に関する、実験、理論、観測、分析、探査に興味のある研究者の積極的な参加を歓迎する。

D2

地球型水惑星における
暴走温室効果発生に対する表層水分布依存性

◯ 小玉貴則[1]，玄田英典[2]，新田光[3]，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惑星科学専攻

液体の水は地球型惑星の気候やハビタビリティにとって重要な物質である考えられる. 水を持つ惑星が強い太陽放射を受け取った場合, 液体の水は全て蒸発してしまう. このときの太陽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た. 今回, 惑星の水分布は東西方向に一様な水分布を持ち, 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.

先行研究で示されている 2 つの気候レジームを確認した. 1 つは, 低緯度が乾燥していて高緯度は湿潤な陸惑星レジームであり、もう 1 つは全球的に湿潤な海惑星レジームである. この 2 つの気候レジームは, ハドレー循環の幅により決まっていることがわかった. 暴走温室限界は, 惑星の水分布により, 現在の地球が受け取る太陽放射の 130%(海惑星の場合) から 180%(水の局在化が強い陸惑星の場合) まで連続的に変化することを示した.

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, 表層水量のような惑星の表層環境により変化しうることを示している. また, 陸惑星は広いハビタブルゾーンを持つことが推定されており, 陸惑星気候の特徴である雲の少なさから, 陸惑星は将来のハビタブル惑星観測にとってよいターゲットになるだろう.

D3

高解像度金星大気シミュレーションで再現された惑星規模のストリーク構造

◯樫村 博基[1]・杉本 憲彦[2]・高木 征弘[3]・松田 佳久[4]・大淵 済[1]・榎本 剛[5,6]・中島 健介[7]
石渡 正樹[8]・佐藤 隆雄[9]・はしもと じょーじ[10]・佐藤 毅彦[9,11]・高橋 芳幸[1]・林 祥介[1]

[1] 神戸大学, [2] 慶應義塾大学, [3] 京都産業大学, [4] 東京学芸大学, [5] 京都大学, [6]JAMSTEC
[7] 九州大学, [8] 北海道大学, [9]ISAS/JAXA, [10] 岡山大学, [11] 総合研究大学院大学

金星探査機あかつきの IR2 カメラは, 金星の夜面を撮像することで, 雲層下部の様々な特徴を明らかにしている. なかでも顕著な特徴の 1 つが, 南北両半球で高緯度から低緯度にかけて延びる, 惑星規模の明るいストリーク構造である (図 1a). IR2 の夜面画像が捉えるのは地表付近の大気から放射される赤外線であり, それは雲によって遮られるため, 明るい領域は雲の薄い領域を表している.

我々は簡易な大気大循環モデルを用いて, 金星大気の高解像度シミュレーションを実施してきた. モデルは AFES (Atmospheric general circulation model For the Earth Simulator) を金星大気に対応させたものである. 水平解像度は T159L120 (約 $0.75° \times 0.75°$ 格子; $\Delta z = 1$ km) である. モデル内の大気は乾燥しており, 日変化を含む太陽加熱と水平一様なニュートン冷却で放射過程を簡単化している. ニュートン冷却の基準温度場は金星大気の静的安定度を模しており, 近年の電波掩蔽観測で示唆されている低安定度層 (0.1 K/km) が高度 55 km から 60 km に導入されている.

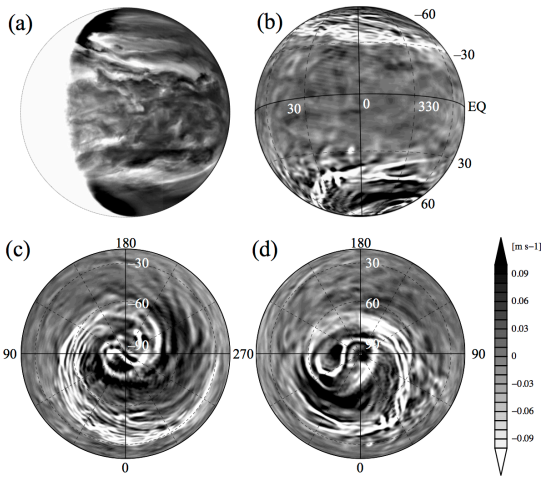


図 1: (a) 2016 年 3 月 25 日に IR2 カメラ (波長 2.26 μm) で撮影された金星夜面画像. ただし, コントラストを強調する処理が施された記者発表用の画像である. (b–d) 金星 AFES で計算された高度 60 km の鉛直流分布 (スナップショット). (b) は (a) 撮像時の探査機位置から見た場合の分布. (c, d) は極上空から見た分布. なお, 金星 AFES は自転の向きが金星と逆のため, 図を回転させて表示している.

金星 AFES で計算された大気の低安定度層上空の鉛直流速分布には, IR2 夜面で観測された惑星規模のストリークと (南北方向の位置は若干異なるものの) 類似した構造が現れた (図 1b). 強い下降流が巨大なストリーク状に分布しており, これは観測と整合的である. なぜなら, 下降流によって雲量が減り, 雲の薄い領域を生み出しうるからである. 極上空から見ると, モデル内のストリーク構造は, 極渦から低緯度にかけて延びる螺旋を成している (図 1c, d). このような螺旋構造は, Venus Express の VIRTIS が捉えた螺旋構造とも類似している. また, 南北両半球のストリーク構造はおよそ同じ経度に位置しており, 南北で同期している. 本発表では, さらに, ストリーク構造に対する日変化加熱・低安定度層の影響をそれぞれ調べ, ストリークを形成する力学, 南北同期の要因について考察する.

謝辞 金星探査機あかつきに関わる全ての方に感謝申し上げます. 本研究は, 地球シミュレータ利用課題『AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』及び『AFES を用いた火星・金星大気の高解像度大循環シミュレーション』と文部科学省ポスト「京」萌芽的課題 3「太陽系外惑星 (第二の地球) の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」の一環として実施しました.

D4

地球型惑星最初期進化の惑星サイズ依存性

○小河正基[1]
[1]東京大学大学院総合文化研究科

現在の地球の内部構造を見ると、地球形成期に発達したはずのマグマオーシャンによるマントル成層構造の痕跡が驚くほど見られない。この初期進化の過程を明らかにするため、地球サイズの惑星についてマントルの粘性率から決まるレイリー数を様々に変えて、火成活動･マントル対流結合系のモデルを用いた数値シミュレーションを行った。この時期のマントル進化を理解する上で鍵となるのはマントル･オーバーターンである。マグマオーシャンから結晶が分化したとき最後に残る残渣液の固化物はその下に沈殿した結晶より組成的に高密度である。従って、もしマグマオーシャンがそのまま固結したとすると、その構造は重力的に不安定であり、マントル･オーバーターンが起こる。実際にはオーバーターンはマグマオーシャンの固化と同時に進行し、このオーバーターンにおける湧昇域では固体マントルの減圧溶融が起こり、マグマオーシャンへマグマが新たに供給されると期待される。本研究では、この減圧溶融とマントルオーバーターンの相互作用とその結果起こるマントルの撹拌･混合について論ずる。この過程で重要な働きをするのが、火成活動･マントル湧昇流フィードバックである。マントル湧昇流によるマグマの生成とその固体マントルからの分離は、マントルのレイリー数が十分高いとき湧昇流自身を強化し、マントルを強く撹拌する。シミュレーションから、地球で期待される高いレイリー数（$>10^7$）では、このフィードバックのためマントルは強く撹拌されるため、その初期進化は月のようなレイリー数が低くフィードバックがかからない場合の初期進化と本質的に異なり、マントルはほんのわずかしか組成的に分化しないことが示唆された。さらに、わずかに起こる分化の程度は、プレートの破壊強度に左右され、破壊強度が低いほど均質になるという結果を得た。

D5

火星隕石ナクライト・シャシナイト起源岩体の関係について

○三河内 岳
（東大・理・地球惑星科学）

火星隕石はこれまで総数 100 個以上見つかっているが、ほとんどはシャーゴッタイトであり、ナクライトとシャシナイトはそれぞれ 9 個、3 個のみである。シャーゴッタイトが様々な岩石鉱物組成・年代幅を示す一方で、ナクライトとシャシナイトは、それぞれのグループ内の試料はいずれもよく似た岩石鉱物学的特徴を示し、結晶化年代（約 13 億年前）と宇宙線照射年代（約 1 千万年）が共通である。これらのことから、ナクライトとシャシナイトは火星表層近くの同一集積岩体で形成し、同じインパクトで宇宙空間に放出された可能性が指摘されている。本研究では、カンラン石の Ca 組成ゾーニングから得られるナクライト・シャシナイトの冷却速度を比較し、同一岩体での形成の可能性を議論した。

ナクライトは主に均質な普通輝石と少量のカンラン石とメソスタシスから成るが、メソスタシス量と結晶度が試料ごとに大きく異なる。NWA 998 や Lafayette では、結晶質の長石であり、その量は 10%ほどである。それに対し、ガラス質のメソスタシスを持つ MIL 03343 などでは、その量が 20~30%ほどに達し、集積岩体上方で急冷して形成されたことが推測されている。しかし、最近見つかった NWA 10720 ではメソスタシス量はこれらのガラス質メソスタシスを持つナクライトと同量（約 25%）であったが、Nakhla などと同サイズの長石（長さ 0.5 mm 程度）が結晶化しており、カンラン石の Ca 組成ゾーニングを用いた冷却速度推定では、Nakhla とほぼ同じ 100 ºC／年（1100→700 ºC）の値が得られた。ナクライトの起源岩体モデルとして提出されている層状の集積岩体では、NWA 10720 がうまく相当する位置がないため、ナクライトは同時代に複数の岩体で結晶化したことが考えられる。

シャシナイトは、均質なカンラン石から主に成る集積岩で、3 つの試料が見つかっているが、いずれも Mg-Fe 比は均質なものの、それぞれの隕石のカンラン石リム部分ではナクライトと同様に Ca 量に減少が見られた。これらの組成変化から冷却速度を計算すると 30-100 ºC／年（1100→700 ºC）となり、3 試料とも近い値を示す。各試料のカンラン石 Mg-Fe 組成に大きな幅があること（$Fo_{79\text{-}54}$）を考えると、3 つのシャシナイトはそれぞれ別々の岩体で集積岩として形成されたと考えるのが適当である。

以上のように、ナクライト岩体は複数存在した可能性が示され、シャシナイトについても同様のことが言えることが明らかになった。また、ほぼ同じ冷却速度を持つナクライトとシャシナイトが存在することから、両者は火星表面の同じ地域で同じ時代に形成されたものの、同一岩体ではなく、別々の岩体を起源としていたと考えられる。

D6

火星の地軸傾斜の変動に伴う火星二酸化炭素システムの応答の解析

○渡辺泰士[1]　田近英一[1]　門屋辰太郎[1]　小林　建[1]

1.東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

現在の火星表層は，弱い日射とCO_2を主成分とする薄い大気による，乾燥寒冷な環境で特徴付けられる．CO_2は火星大気の約95%を構成するほか，冬季には高緯度において凝結したり，地表面のレゴリスによって物理吸着されたりする．このCO_2の分配は，より長い時間スケールでの物理条件の変動に応答し，大気圧を大きく変化させて気候変動をもたらす．このため，火星の気候変動を考える上で，大気・極冠・レゴリスからなる火星二酸化炭素システムの挙動を知ることは大変重要である．このような近過去の火星気候変動の要因として軌道要素の変動が挙げられる．なかでも過去数千万年間の火星の地軸の傾きの変動の振幅は20度程度に達し，火星の気候に大きな影響を与えたと考えられる．しかしながら，近過去の火星の軌道要素変動に応答した火星二酸化炭素システムの応答の系統的な解析は行われていない．また現在の火星表面にみられる地形的特徴との関連についても，指摘はあるものの，定量的検討は十分には行われていない．

そこで本研究では，火星二酸化炭素システムとエネルギーバランスの結合モデル[Nakamura and Tajika, 2001;2002;2003]を用い，様々な条件のもとでの平衡解を求めることで，火星の軌道要素変動，特に地軸の傾きの変動に対し火星二酸化炭素システム及び気候がどのように応答するかを定量的に解析した．その結果，地軸の傾きがある閾値以下の状態とそれ以上の状態とで，系の振る舞いが大きく変わることが明らかになった．閾値以下の状態では永久極冠が存在し，地軸の傾きが小さくなるほどCO_2が永久極冠へと凝結し非常に希薄な大気が卓越して，地軸の傾きが大きくなるほど大気・レゴリス中のCO_2量は増大していくことが分かった．一方，地軸の傾きが閾値を超えると，CO_2の永久極冠は存在できなくなり，自転軸傾斜の変動はCO_2リザバー間の分配に大きな影響を及ぼさなくなることが分かった．

次に，衝突クレーターなどの斜面における局所的なエネルギーバランスを考慮するモデルを上記の1次元エネルギーバランスモデルと結合し，赤道向き，極向きそれぞれの斜面でのCO_2氷の形成条件を調べ，実際の火星で見られる地形との比較検討を行った．その結果，局所的なCO_2氷の形成が火星の中緯度に見られる衝突クレーターの南北斜面傾斜角の非対称性[e.g. Ishii et al., 2005]と関係する可能性を示唆する結果が得られた．

D7

放射冷却が原始火星大気の流体力学的散逸に与える影響

◯吉田辰哉，倉本圭
北大理

原始火星が月サイズ以上まで成長すると，原始太陽系星雲ガス成分の捕獲や衝突脱ガスにより大気を獲得しうる． 二成分モデルを用いて火星材料物質組成を与え（Dreibus and Wanke, 1987），脱ガス成分組成がマグマ, 溶融金属鉄, ガス間の化学反応によって決定される場合, 集積最終段階では地表面気圧が ~2000 bar, 地表面温度が ~ 2500 K もの H_2，H_2O, CO，CH_4 を主体とする高温高圧な原始大気が形成された可能性がある（Saito and Kuramoto, 2017）．火星大気が実際にこのような非常に厚い原始大気から出発したなら，現在の希薄な大気を説明するには，原始大気の宇宙空間への散逸が必要である．

その有力な機構の一つが，初期太陽の放つ強力な EUV の照射による加熱で駆動される流体力学的散逸である．エネルギー効率が十分高ければ，上述の厚い原始大気をほぼすべて失わせることができる．一方で，大気に含まれる赤外活性分子が，放射冷却によって EUV 加熱を抑制し，散逸量を減少させてしまう可能性もある．原始火星大気の流体力学的散逸の先行研究では，赤外活性分子による放射冷却の影響はほとんど考慮されていない．そこで，本研究では，赤外活性分子として CO を H_2 大気に加えた流体力学的散逸モデルを構築し，放射冷却が散逸に与える影響を調べ，原始火星大気の総散逸量に制約を与えることを目的とした．

数値モデルは 1 次元球対称の 2 成分ガスの定常流を求めるモデルであり、波長に依存した EUV ならびに赤外放射の放射伝達が組み込まれている。火星の形成完了直後を想定し EUV 強度は現在の 100 倍とし，計算領域の下端は地表面から 1000km の高度に設定した．CO の混合比が 1%以下の場合，下端付近は断熱膨張によって低温のために励起状態の CO が少なく，放射冷却が抑えられる一方，この領域で大部分の EUV 加熱が起こる．他方，CO による放射冷却は，遷移音速点付近とその上層で主に起こる．そのため，CO 混合比が 1%の場合，EUV 加熱により得たエネルギーの約 40%が放射冷却により失われるが，散逸質量フラックスは CO を加えない場合からほとんど変化しない．CO 混合比をさらに大きくすると，平均分子量の上昇に伴い、単位時間あたりに散逸する分子数が下がって断熱膨張による冷却が減少し，下端付近の温度が上昇する．その結果，下端付近でも放射冷却が効くようになり，散逸質量フラックスが抑制される。混合比を 10%まで上昇させると，散逸質量フラックスは放射冷却を考慮しない場合の約 1/3 になる．ただし，CO 混合比の上昇に伴う散逸質量フラックスの低下の度合いは，徐々に小さくなる傾向がある．これは，赤外吸収帯の光学的厚みが大きくなって熱放射の脱出効率が低下することで，放射冷却の効率の上昇が鈍るためである．

散逸質量フラックスが放射冷却を考慮しない場合の 1/3 以下になるとすると，H_2 と CO の総散逸量はそれぞれ$\leq 5.0\times10^{20}$kg，$\leq 1.5\times10^{21}$kg となり，上述の原始大気中の CO の 85%以上は残ることになる．このことから，火星が獲得した原始大気質量は 2 成分モデルから推定される値の数分の 1 程度かより少なかったのかもしれない．ただし，この場合も 100bar オーダーの原始大気の形成が許される．また，本モデルは分子の解離を考慮していないため，散逸量を過小評価している可能性がある．流体力学的散逸以外にも衝突侵食や非熱的散逸によっても大気は散逸するため，大質量の原始大気を獲得した可能性は否定できず，今後のさらなる研究が必要である．

高解像度の火星大気ラージエディーシミュレーションで得られた地表面応力

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

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

火星大気の温度構造に大きな影響を与える大気ダストの巻き上げ量は地表面応力によって決まり, 地表面付近における循環場の構造が重要な役割を果たしていると考えられる. 本研究では地表面付近の循環場とダスト巻き上げ量の対応関係について理解することを目指し, 世界最高の解像度で計算を行った Nishizawa et al. (2016) によって得られたデータを用いて調査を行っている. 前回の発表ではモデル最下層 (高度 2.5 m) の循環場を調べた (村橋 他, 2016, 惑星科学会). その結果, ネットワーク状に広がった上昇流領域が存在することがわかった. これは Nishizawa et al. (2016) で示された 高度 62.5 m におけるセル状構造に対応すると考えられる. さらにその上昇流領域に沿って, 数十 m から数百 m スケールを持つ強渦度領域が存在していることがわかった. 今回は計算解像度ごとに地表面応力の空間分布と頻度分布を求め, 地表面応力が強い点における循環場の様子について調べた.

本研究で用いる Nishizawa et al. (2016) で計算されたデータは RIKEN/AICS で開発された SCALE-LES ver.3 を使用して得られたものである. 計算領域のサイズは水平 19.2 km, 鉛直 21 km である. 空間解像度は等方で 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m の 5 通りを用いている. 大気は CO_2 のみで構成されるとする. 重力加速度として 3.72 m/s^2, 初期における地表面気圧として 700 Pa を用いている. いずれも火星の値を想定したものである. 加熱・冷却率及び地表温度については, Odaka et al. (2001) による一次元モデルで得られた結果を外部から与える. 水平境界条件は周期境界である. 上記データのうち, 解像度 5 m のものは, 解像度 10 m で 14:00 (地方時) まで計算した結果を初期値として, 5 m 解像度で 1 時間分計算して得られたものである. 本研究では 14:30 におけるデータを用いた. 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することによって求めた.

その結果, 地表面応力の空間分布は, 循環場の対流セル境界と対応していることがわかった. また強い地表面応力を持つ上位 0.1 % の点及び孤立渦の空間分布から, 応力が大きな点が渦のある領域に沿って存在していることがわかった. さらに地表面応力の強度頻度分布を求めたところ, 5 m 解像度計算において, Greeley and Iversen (1985) で得られたダストが巻き上がる閾値である 0.03 Pa 以上の応力値を持つ領域が存在していることがわかった. 10 m よりも粗い解像度においては, 閾値を超える点は現れなかった.

D9

大気球による成層圏微生物採取実験：Biopauseプロジェクト

○大野宗祐[1]、石橋高[1]、三宅範宗[1]、奥平修[1]、河口優子[2]、梯友哉[3]、山田学[1]、前田恵介[1]、山岸明彦[2]、山田和彦[3]、福家英之[3]、吉田哲也[3]、高橋裕介[4]、野中聡[3]、瀬川高弘[5]、石川裕子[6]、所源亮[7]、山内一也[8]、松井孝典[1]

[1] 千葉工業大学　惑星探査研究センター、 [2] 東京薬科大学、 [3] 宇宙航空研究開発機構、 [4] 北海道大学、 [5] 山梨大学、 [6] リンカーン大学、 [7] ＩＳＰＡ、 [8] 東京大学

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

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

本講演では、2016年6月に北海道のJAXA大樹航空宇宙実験場にて行った本プロジェクトの第1回目の気球実験の概要と初期分析の結果について紹介する。第1回目の実験のため、まずは試料採取と分析手法の実証／確立を目的として実験を行った。地上微生物の混入可能性を劇的に減らす降下式インパクター型試料採集装置を新規に開発し、気球で上昇後パラシュートで降下させる際に試料を採取し、採取試料は顕微鏡を用いて観察した。その結果、培養できないものも含めた成層圏微生物数密度（の上限値）を世界で初めて観測から決定することに成功した。また、採取された成層圏微生物は紫外線に対する厚い遮蔽を持たないものがほとんどであることが判った。

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

D10

原始惑星大気中でのアミノ酸前駆体生成におよぼす恒星エネルギー粒子の役割

○小林憲正[1], 青木涼平[1], 癸生川陽子[1], 柴田裕実[2],
福田一志[3], 小栗慶之[3], V. S. Airapetian[4]
[1]横浜国大, [2]大阪大, [3]東工大, [4]NASA Goddard SFC

1953 年の Miller の実験[1]は，原始惑星大気がメタン・アンモニアを含む強還元型大気であるならば，雷（放電）で多量のアミノ酸が生じる可能性を示した。しかし，1980 年代以降，原始大気は二酸化炭素・窒素を主とする弱還元型大気とする説が有力になり，原始大気中でのアミノ酸生成が限定的と考えられた。近年は，原始大気中にメタンが少量含まれる可能性も示唆されている。その場合，窒素・メタン混合気体から放電などによりアミノ酸が生成可能なことから，原始大気中でも有機物生成が可能とされている。しかし，メタンが含まれるとしてもその割合は極めて低い可能性が高く[2]，そのような場合，紫外線や雷ではアミノ酸などの窒素含有有機物が生成しにくいことが，室内模擬実験によりわかった[3]。われわれは二酸化炭素・窒素・水型大気でも微量の一酸化炭素[4]またはメタン[3]が存在すれば，高エネルギー粒子線照射によりアミノ酸前駆体などが生成しうることを見いだした。つまり，高エネルギーの銀河宇宙線(GCR)によれば原始地球大気中でもアミノ酸などの含窒素有機物の生成が可能である。ただし，GCR のフラックスは低く，一酸化炭素もしくはメタン分圧が低い場合，アミノ酸の生成量は限定的となる可能性がある。

GCR の他，太陽から放出される太陽エネルギー粒子も化学進化のエネルギー源候補となる。特に近年，太陽に似た若い G 型星や，M 型星にもスーパーフレアを起こすものが見つかっている[5]。スーパーフレアなどに伴い恒星から大量に放出される恒星エネルギー粒子(SEP)は極めて還元性の低い原始大気中でも N_2O や HCN などの生成に寄与した可能性が報告されている[6]。原始太陽も大フラックスの SEP を放出した可能性があり，その場合には SEP は GCR よりもはるかに高フラックスとなるため，SEP がアミノ酸前駆体などの生体関連含窒素有機物生成に大きな役割を果たした可能性がある。その可能性の検証のため，さらなる実験を継続中である。

引用文献

[1] S. L. Miller, *Science,* **117**, 528-529 (1953).
[2] H. Kuwahara and S. Sugita, *Icarus,* **257**, 290-301 (2015).
[3] 青木涼平ほか，日本惑星科学会 2017 年度秋季講演会，P11 (2017).
[4] S. Miyakawa et al., *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 99, 14628-14631 (2002).
[5] H. Maehara *et al. Nature* **485**, 478-481 (2012).
[6] V. S. Airapetian *et al., Nat. Geosci.* **9**, 452-455 (2016).

D11

隕石母天体での星間有機物変成に関する実験的研究

○平川尚毅[1]、中野英之[2]、香内晃[3]

[1]京都教育大学大学院教育学研究科　[2]京都教育大学教育学部

[3]北海道大学低温科学研究所

分子雲中には鉱物、星間有機物、氷からなる 0.1 μm程度の星間塵が存在している(Greenberg, 1998)[1)]。星間塵は、原始太陽系星雲内や隕石母天体で変成作用を受けると考えられる。星間有機物に関しては、これまでに蒸発変成（香内ほか, 2002[2)] ; 中野ほか, 2003[3)]）や水質変成（中野ほか, 2002[4)] ; 松原・中野, 2017[5)]）に関する研究が行われてきた。しかし、水を含まない有機質隕石母天体での変成過程を再現する研究は行われてこなかった。本研究は、隕石母天体での星間有機物の変成過程を明らかにすることを目的としている。

本研究では、試薬を用いて調合したモデル星間有機物(香内ほか, 2002[2)] ; 中野ほか, 2003[3)])を用いて隕石母天体内部での熱変成過程（閉鎖系→開放系）を再現する実験を行う。閉鎖系の熱変成実験は、モデル星間有機物 10 mg をハステロイ製の超臨界オートクレーブに封入し、電気炉内で 100-450℃で加熱(加熱速度を 3℃/min、最高到達温度で 5 時間保持)することにより行う。開放系の熱変成実験はオートクレーブから回収した試料を 10^{-6}-10^{-7} Pa の真空下で加熱（加熱速度 1℃/min で 400 ℃または 600 ℃まで加熱し、最高到達温度で 80 時間維持）することにより行う。回収した試料は、赤外分光法や元素分析計による分析を行った。

これまでの研究から以下のことが明らかになった。

１．星間有機物は熱変成（閉鎖系）で石油状物質と水を生成することが分かった。

２．水を含まない星間有機物の隕石母天体での熱変成（閉鎖系→開放系）で、炭素質隕石中の元素組成を再現することができることが分かった。

現在、生成された石油状物質と水についての水素・酸素同位体分析を進めているところである。本発表では可能であればその最新の研究成果についても報告する予定である。

文献

1) J.M.Greenberg(1998): Making a comet nucleus, Astron.Astrophys.**330**, 375-380

2) Kouchi et al. (2002):Rapid growth of asteroids owing to very sticky interstellar organic grains, ApJ, **566**, L121-L124

3) Nakano H. et al.(2003): Evaporation of Interstellar Organic Materials in the Solar Nebula. **592**:1252-1262

4) Nakano H. et al. (2002): Proc. Jpn.Acad.Ser. B, **78**, 277-281

5) 松原康浩, 中野英之:超臨界条件下における星間有機物の水質変性, 京都教育大学環境教育年報(第 25 号), 2017

D12

南極微隕石中の可溶性有機物の検出を目指して

○山本康太[1]、橋口未奈子[2]、矢田達[3]、奈良岡浩[4]、中村智樹[5]、岡田達明[3,1]
[1]東京大学大学院理学系研究科、[2]九州大学惑星微量有機化合物研究センター、[3]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、[4]九州大学大学院理学研究院、[5]東北大学大学院理学研究科

我々の住む地球の表層には、水が存在し生命が育まれているが、その起源は未だ解明されていない。太陽系において、太陽に近い内惑星領域では比較的高温のため、水や有機物などの揮発性物質は安定に存在することができずに欠乏している。一方、近年の外惑星探査および彗星探査の成果から、内惑星領域よりも低温な外惑星領域では有機物は豊富に存在することが判明している。これは太陽系の、特に外惑星領域の進化を考える上で有機物の存在が無視できないことを意味する。また、現在の地球が豊かな生物圏を有している要因として、有機物が低温の外惑星領域で形成・進化し、内惑星領域にもたらされた可能性が考えられている[e.g. 1]。

惑星間空間には惑星間塵と呼ばれる、小惑星や彗星などから放出された無数の塵が漂っており、太陽光を反射して地球上からは黄道光として観測できるほか、地表では極域の雪氷中などから微隕石として採取することができる。これら宇宙塵の地球への降下量は年間で数万トンと見積もられており[2]、これは隕石のおよそ 10 倍かそれ以上に相当する[3, 4]。生命誕生のもととなった有機物を地球上にもたらした物質として、隕石よりも宇宙塵の方が、量的に寄与が大きかったのではないかと推測されている[1]。

宇宙塵の有機化学的特徴を理解するために、我々は南極で採集された微隕石中の可溶性有機物の検出を目指している。地球外物質中の有機物のうち不溶性有機物は構造決定が困難であるが、構造決定が可能な可溶性有機物は有機物進化過程における化学反応をより具体的に解明する手掛かりとなり得る。本研究では、1998 年に南極地域観測隊が沿岸裸氷帯から回収した微隕石 4 個をアルミ製のホルダー表面に固定された金板上に圧着し、試料内の有機物分布を見るために顕微フーリエ変換赤外分光分析を行った。それらの微隕石中で C-H 伸縮（~2900 cm^{-1}）および C=O 伸縮（~1700 cm^{-1}）の強度分布に不均質性が見られた。さらにそれらの脱離エレクトロスプレーイオン化オービトラップ質量分析を行った結果、3 個の微隕石から全部で 11 種類のイオンが試料から検出された。$C_{11}H_{22}ON^+$（*m/z* 184.170）, $C_{11}H_{24}O_2N^+$（*m/z* 202.180）, $C_{10}{}^{13}CH_{24}O_2N^+$（*m/z* 203.183）は 3 個の微隕石に共通していた。なお、C, H, N, O の組み合わせでは分子式が帰属できない質量もあった。いくつかの質量に対して MS/MS 分析による分子構造の推定を試みたが、フラグメントイオンに対して分子式が帰属できなかったため、親イオンの構造は同定には至っていない。今後、新たに回収し分析する微隕石については、分子の構造決定のために別の抽出法およびイオン化法を検討するとともに、南極の氷をブランクとすることでデータの信頼性向上を図る。

謝辞：本研究で使用した南極宇宙塵試料を採集した第 39 次南極地域観測隊及び試料を提供して頂いた国立極地研究所に感謝致します。

References: [1] Chyba C. and Sagan C. (1992) *Nature* **355**, 125-132. [2] Love S. G. and Brownlee D. E. (1993) *Science* **262**, 550-553. [3] Halliday I. *et al*., (1989) *Meteoritics* **24**, 173-178. [4] Bland P. A. *et al*., (1996) *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **283**, 551-565.

D13

粘土鉱物存在下の低温での核酸塩基とリボースからのヌクレオシド合成

○橋爪秀夫[1]、Benny K.G. Theng[2]、Sjerry van der Gaast[3]、藤井和子[1]
[1]物・材機構、[2]Landcare Research NZ、[3]NIOS NL

生命の起原についての研究において、タンパク質様物質や核酸様物質の合成は様々な方法で行われている。タンパク質は20種類のアミノ酸がペプチド結合した高分子である。核酸(RNA)は4種類の核酸塩基とリボースが反応（ヌクレオシド）し、ヌクレオシドとリン酸が反応しヌクレオチドになる、このヌクレオチドがリン酸エステル結合し高分子になったものが核酸である。タンパク質様物質の合成は様々な条件で行われている。一方、核酸様物質の合成に関してはヌクレオシドやヌクレオチド合成はタンパク質様物質合成の条件ではほとんど合成されない。修飾したヌクレオチドを用いた核酸様物質の合成には成功している。そのため、それぞれの構成分子からのヌクレオチド合成ではなく、ヌクレオチドをシアン化合物やアルデヒド、リン酸から合成する方法が化学進化の過程でもっともらしい合成方法であると提案されている。我々は核酸塩基とリボースからヌクレオシド合成を粘土鉱物の共存下の低い温度で行った。

核酸塩基はアデニンを用いた。糖類はD-リボースを用いた。粘土鉱物はワイオミング産モンモリロナイト(Mt)、モンモリロナイトの層間イオンをMg^{2+}に交換したMg-モンモリロナイト(Mg-Mt)、関白産カオリナイト(Kn)、合成アパタイト(Ap)を用いた。10 mmol・dm^{-3}のアデニンとリボース溶液を5 cm^3と200 mgの粘土鉱物をビーカに加えた。空気またはN_2ガス中、35～50 ℃で乾燥と加水を20回繰り返した。また上記の水溶液と粘土鉱物を10 cm^3の密閉容器に加え、-5→0→5℃を２時間ずつ保持し、70回繰り返した。処理後、乾燥と加水の試料には5 cm^3の脱イオン水を加え、一晩放置し生成物を抽出した。それぞれの試料は遠心分離により液体と固体を分離し、液体をLC-MSにより分析した。

35～50℃では温度が高くなるに従いアデノシン様物質は総じて合成されにくくなる。粘土鉱物が存在する場合は存在しない場合と比べて、アデノシン様物質は多く合成されている。粘土鉱物ではKnやApを用いた場合に収量は多くなる。またMtとMg-Mtを比較するとMg-Mtの方がアデノシン様物質の収量は多くなる傾向がある。しかし、処理後のMtの層間が広がることから層間に生成物が入っている可能性ある。比較のために密閉容器に水溶液を加え、35～50℃で粘土鉱物の有無によるアデノシン様物質の合成を行った結果、ほとんどの場合アデノシン様物質の合成はできなかった。-5⇔5℃の繰り返し処理ではKnやApを付加した場合、アデノシン様物質が確認された。

アデノシン様物質が現在の生物が使用しているアデノシンであるかを調べる必要がある。

D14

観測衛星による連続分光データを使った月面上のD型類似スペクトルの全球捜索

◯山本 聡[1], 渡邉誠一郎[2], 松永 恒雄[1]
[1]国環研, [2]名古屋大

D型小惑星は、小惑星の中で非常に低いアルベドを示し、可視・近赤外スペクトルが赤く、特徴的な鉱物吸収を示さない天体である。これらのスペクトルの特徴（D型スペクトル）から、一般に有機物を含む岩石から成ると考えられている。火星の衛星であるフォボスとデイモスはD型スペクトルを示すことから、D型小惑星が捕獲されたものではないかと考えられてきた。しかし、衛星の赤道面内円軌道化に対する説明が容易でないこと、D型小惑星であれば期待される水・氷のフィーチャーが見つかっていないこと、バルク密度の低さなど、捕獲説では簡単に説明できない問題も多い。一方、これら衛星の成因として、火星への巨大衝突で生じた周火星破片円盤中で集積してできたとの説が提唱されている。しかし巨大衝突で形成された場合、どのようにしてD型スペクトルを持つ衛星表面が形成されたのかについてはよく分かっていない。さらに、フォボス表面には相対的に青い領域と赤い領域が混在することが知られているが、その物質的違いも分かっていない。つまり、そもそもD型スペクトルの持つ天体が、どのような物質からできているのかについては良くわからないというのが現状であり、さらなる研究が必要である。

我々は最近、月の高地領域の中で宇宙風化を受けたと考えられる斜長岩の露頭の示すスペクトルの中に、D型スペクトルと非常に似たものが多数存在する事を発見した。このことは、D型スペクトルは必ずしも有機物の存在を示唆するものではないということを意味する。このような観点から、我々は豊富なスペクトルデータが蓄積されている月に着目し、D型スペクトルと似た場所が月面上でどのように分布し、どのような特徴を示すのかについて、かぐや搭載の連続分光計であるスペクトルプロファイラ(SP)のデータを使って調査を行っている。

今回は、全SPデータを使ったデータマイニング解析を行い、月面上で「特にアルベドが低い場所」と「特にスペクトル的に赤い場所」がどこに分布するのかについて調査を行った。その結果、特にアルベドが低い場所は、火砕堆積物であるDark Mantle Deposit (DMD)に集中して見つかることがわかった。また、玄武岩の海の中でも特にTiO_2量が多いと考えられるユニットも、低いアルベド領域として検知されることがわかった。次に、スペクトル的に赤い場所は、同様にDMDで集中的に検知されることがわかった。一方、スペクトル的に赤い玄武岩の海は、アルベドが低い海とは異なった場所に分布し、相対的にTiO_2に乏しいユニットに集中して検知される。本発表では、これらの結果を基に、月面上におけるD型類似スペクトルについて議論を行う。

D15

火山噴火準備過程における脱ガス現象の機構の提案
― しゃぼん液による脱ガスアナログ実験 ―

○桶間千遥[1], 佐伯和人[1]

[1]大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

火山噴火準備過程でマグマ中の揮発性成分が発泡しマグマ外へ抜ける現象がある。この脱ガスの度合によって火山噴火の様式は大きく左右される。脱ガス現象の機構について、従来は連結した気泡間で浸透流が起こるとされていた(Eichelberger et al, 1986)が、膜を破壊せず内部に浸透流が起こるとは考えにくい。今回、気泡間の膜が存在したまま脱ガスを促進するモデルを提案し、アナログ実験を行った。

図 1, 2 は右端が火道壁に接したマグマ中の連結気泡を示している。このモデルではマグマからの火道壁への脱ガスを想定している。単純な拡散(図 1)では、効率よい脱ガスは難しい。右端の気泡はガスが抜けると小さくなり、内圧が高くなる(ラプラスの法則)。その際、気泡膜に溶け込むガス成分の量が多くなり(ヘンリーの法則)、ガス成分は膜中の濃度差で隣の気泡に流れる。その結果連結気泡にサイズ差が発生し、小さな気泡は大きな気泡に吸収され、気泡の連結は途切れてしまう。そこで、気泡からガス A が抜けるとき、外界からガス B が気泡内部に流入して、気泡の全圧変化を抑えるモデルを考える(図 2)。このとき、ガス種の分圧差によって気泡膜の中で濃度勾配が発生する(ヘンリーの法則)。その結果ガス B は連結気泡のイの方向へ流れ込み、ガス A はアの方向へ効率よく排出することができうる。

実験は連結気泡をシャボン玉で模擬し行った。マグマ中の揮発性成分として想定されるのは CO_2 や H_2O であるが、今回は現象の検証のため Ar ガスと N_2 ガスを使用した。石英ガラス管(10 ㎜φ)の端にシャボン液で膜を作り、数枚の膜によってガラス管内に連結した気泡を作成した。気泡内外のガス種を変え、計測ステージで気泡の長さ時間変化を観測した。

結果、膜を破壊せず気泡は膨張、縮小する様子が見られた。それぞれの気泡の体積の時間変化は、隣接する気泡の分圧差を利用した拡散脱ガスモデル数値シミュレーションの結果とよく合った。よって流入ガス量が脱ガス量と同程度であれば、連結気泡のサイズの増減を防ぎ、連結構造を維持したまま効率的にガスを移動させることは可能であると言える。

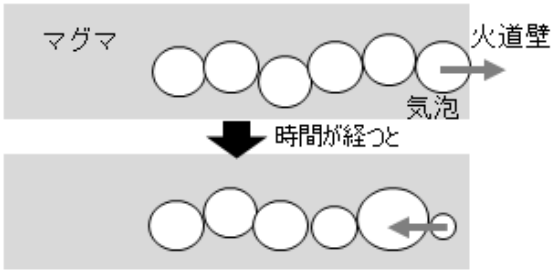


図1 単純な拡散モデル

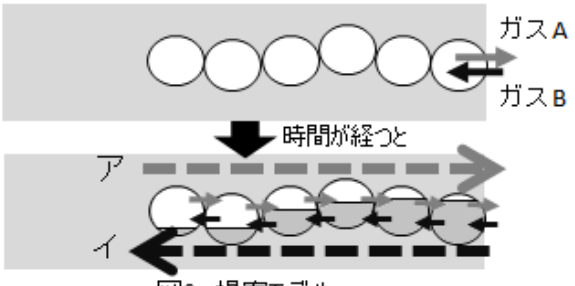


図2 提案モデル

気泡間の矢印はガスのフラックスを示す。破線矢印はガスの移動方向を示し、気泡内の着色はガスBの分圧を示す。

C1

小石集積による巨大惑星の形成

○カリフォルニア大学ロサンゼルス校[1]
[1]森島龍司

古典的な惑星形成の描像では、瞬間的に原始惑星系円盤中の全てのダストが微惑星となり惑星集積が進むと仮定されていたが、近年のモデルではその過程が大幅に見直されつつある。ガス円盤中でダストが相互衝突により小石（ペッブル）サイズまで成長すると、それらは中心星に向かって高速で落下する。その途中で小石が何らかのメカニズムで十分濃集すると微惑星が形成する。円盤外側領域から小石が供給され続ける限り微惑星形成は連続的に起こり、微惑星に取り込まれない小石もある割合で存在する。微惑星は相互衝突でも成長するが、十分大きくなると微惑星に取り込まれなかった小石と効率的に合体成長し惑星を形成する。

本研究では粒子法ベースの惑星集積コード（Morishima, 2015）を用いて、これらの惑星集積過程をひとまとめに計算するシミュレーションを行い、どのような原始惑星系円盤からどのような惑星系が形成するかを調べた。計算は雪線（3AU）より外側領域について行い、微惑星形成メカニズムは特に指定せずに小石がある時間スケールで微惑星に変換すると仮定した。円盤サイズ、円盤乱流粘性率、小石サイズ、微惑星形成時間、初期微惑星質量などのパラメータ依存性を調べた。

最初は雪線付近で微惑星同士の衝突により大きな微惑星が形成し、大きい微惑星は小石集積によりさらに成長する。円盤サイズが大きく、外側領域からの小石の供給が長期にわたって継続する場合、惑星質量が臨界コア質量に達し、巨大ガス惑星ができる。惑星質量が地球質量程度よりも大きいと、小石集積による惑星成長は秩序的成長である。またガス捕獲は内側の惑星から開始する場合が多いが、後からガス捕獲を開始した外側の惑星が円盤内側へのガス降着率を減らすので内側のガス惑星の成長率は小さくなる。これらのことにより、それぞれの惑星系ではだいたい同程度の質量の惑星が複数形成する場合が多いことが分かった。

円盤の粘性率が低いと小石集積による惑星成長速度は大きいが、ガス惑星へのガス降着率は低くなるので最終的な惑星質量は小さくなる。また、円盤粘性率が低いと小さい惑星でも円盤にギャップを形成することができ、ギャップ外縁での新たな惑星形成が効率よく起こることが分かった。結果として、粘性率が高いと、２、３個の木星サイズの惑星が形成するのに対し、粘性率が低いと質量が地球の１０倍程度の惑星が６、７個形成することが分かった。前者の条件は太陽系の形成条件に適しているのに対し、後者の条件はKepler11のような惑星系の形成条件に適していると思われる。

C2

ペブル集積によるガス惑星周りの衛星形成
Satellite formation around gas giants by pebble accretion

○芝池諭人[1], 奥住聡[1], 佐々木貴教[2], 井田茂[3]
[1]東京工業大学 理学院 [2]京都大学 大学院理学研究科 [3]東京工業大学 地球生命研究所

木星や土星の巨大衛星は周惑星円盤内で形成されたと考えられている。これまでの衛星形成モデルでは、一度多くの微衛星(km サイズ)が形成され、その微衛星が合体成長して衛星が形成されると考えられてきた(e.g. Canup and Ward 2006)。しかし、原始惑星系円盤から流入したダストの直接合体により周惑星円盤内で微衛星を形成するためには、円盤に流入するガスが非常に高いダスト-ガス質量フラックス比(～1)を持っている必要がある(Shibaike et al. in press)。十分な量のダストが円盤に流入しなければ、これらのダストは cm-m サイズの粒子(ペブル)まで成長した後に中心惑星へと落下する。一方で、原始惑星系円盤内で形成された後に周惑星円盤に捕獲された微惑星を衛星の材料とする説もある(e.g. Suetsugu and Ohtsuki 2017)。このシナリオで衛星を作るには、惑星のフィーディングゾーン内に十分な量の微惑星が存在している必要がある。

本発表では、周惑星円盤に捕獲されたごく少数の微惑星(微衛星)が、中心惑星に向かって落下するペブルを集積して衛星にまで成長する、という新しい衛星形成シナリオについて議論する。微衛星周辺のペブルの運動は、微衛星からの重力と円盤ガスから受ける抵抗力によって決まる。微衛星が数 100 キロサイズにまで成長すると、これらの効果によってペブルを集積可能な半径(集積半径)が微衛星のヒル半径程度にまで拡大し、効率的なペブルの集積が可能となる。一方で、ある程度大きく成長した(微)衛星は周囲のガスとの相互作用により Type I 移動する。原始惑星系円盤と異なり、周惑星円盤には中心に強い輻射源がなく、熱源は粘性加熱が支配的になる。この時、細かなダストが多く存在すると円盤の温度勾配が急になり、衛星が円盤外側に向かって移動する可能性がある。

最終的な衛星の質量は、この TypeI 移動のタイムスケールとペブル集積による成長タイムスケールが等しくなる質量程度になると考えられる。また、最終的な衛星の軌道半径は、移動のタイムスケールに加えて、移動を開始してから周惑星円盤が消失して停止するまでの時間が重要となる。本発表では、実際の木星の巨大衛星の質量(約 10^{26}g)と軌道半径(約 6-26 木星半径)が、この形成シナリオによって再現可能か議論する。

C3

磁場駆動円盤風の影響下で進化する円盤中でのスーパーアース形成

○荻原 正博[1]　鈴木 建[2]　小久保 英一郎[1]
Alessandro Morbidelli[3]　Aurélien Crida[3]
1) 国立天文台　2) 東京大学　3) コートダジュール天文台

系外惑星観測によって2000個以上の短周期スーパーアースが発見されている。このうち、１つの惑星系内に２個以上の短周期スーパーアースの存在が確定している多重惑星系においても、1000個以上の観測例がある。従って近年はこの短周期スーパーアース系の統計的な軌道分布（例：隣接する惑星の軌道周期比）が議論されており、惑星形成モデルを構築する際にはこの観測された分布を再現することが必要である。

本研究では、スーパーアース系の形成として、その場形成モデルを考える。その場形成モデルに則った先行研究によると、惑星がタイプI移動による速い軌道移動を経験した場合には、軌道周期比等の観測された分布を再現できないことがわかっており（Ogihara et al. 2015a, 2015b）、軌道移動の速度を抑制する何らかのメカニズムが必要となる。ここで本研究では、磁場駆動円盤風の影響下で進化する円盤中では、軌道移動が遅くなる可能性があることに注目し、短周期スーパーアース系の形成を重力N体シミュレーションによって調べた。シミュレーションの結果、惑星の軌道移動が遅くなる場合があることを実際に確認し、この場合に観測された軌道分布を再現可能であることがわかった。

一方、短周期スーパーアースの観測結果から惑星の密度情報が得られており、多くのスーパーアースは原始惑星系円盤由来のH/He大気を大量に纏っていないことがわかっている。本講演では、惑星成長を追うN体シミュレーション結果をもとに、スーパーアースが円盤ガスから獲得する大気量についても議論する予定である。

C4

惑星移動する原始惑星へのガス降着

堀 安範[1,2], 荻原 正博[3]

1 自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター, 2 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室
3 国立天文台 理論研究部

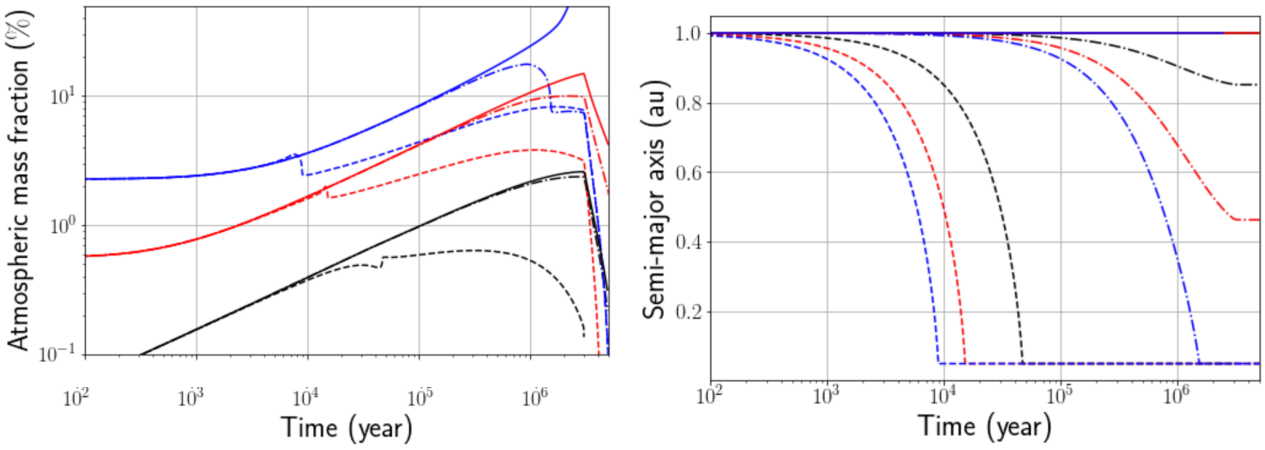
これまでに3600個の太陽系外惑星が発見され、中心星近傍には地球から海王星サイズの惑星(短周期スーパーアース)が普遍かつ豊富に存在することが明らかになってきた。短周期スーパーアースの多くは非常に低密度であることから、大気を保持している可能性が高い。大気を持つ短周期スーパーアースの起源についてはその場形成 (& 巨大衝突)とType I型惑星移動説が提案されている。本講演では後者に注目して、惑星移動する惑星への円盤ガスの降着を数値計算し、惑星質量と大気量の関係を調べた。

Gas Accretion onto a Migrating Protoplanet

Yasunori Hori [1,2] & Masahiro Ogihara[3]

1 Astrobiology Center, National Institutes of Natural Sciences
2 Exoplanet Detection Project, National Astronomical Observatory of Japan
3 Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan

Close-in super-Earths are common among over 3,600 exoplanets. Most of them have low mean-densities, which means the existence of an atmosphere onto a core; if some of them possess hydrogen-rich, namely, primordial atmospheres, their atmospheres likely originated from a disk gas. Two ideas for the origin of short-period low-mass planets with atmospheres have been proposed so far: in-situ formation, including giant impacts, and Type I migration. We simulate gas accretion onto a non-migrating/migrating planet embedded in a dissipating protoplanetary disk around a Sun-like star and investigate its atmospheric growth. Based on a theoretical relationship between planetary mass and the final atmospheric mass fraction obtained in our study, we discuss whether migrating planets can have/retain the primordial atmospheres.



1, 3, 5 Earth-mass || — No migration, - - - Fast migration, --- Slow migration

C5

高解像度 N 体計算による月形成シミュレーション
High-resolution N-body simulations of moon formation

○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]京都大学 大学院総合生存学館

Pezy Computing 社が開発した低消費電力型のコアプロセッサである Pezy-SC 上で動作する N 体計算コードを開発した。衝突計算にはラブルパイルモデルを採用し、自己重力計算には FDPS (Framework for Developing Particle Simulator) を用いて並列化を行った。本コードを用いて、地球へのジャイアントインパクトによって作られた原始月円盤内での月の集積シミュレーションを、複数の解像度のもとで行った。最大粒子数は 10^7 であり、この場合 1 粒子が約 10 km 程度の微衛星に対応している。計算の結果、地球のロッシュ限界半径の内側でのスパイラル構造が、低解像度 ($N \leqq 10^5$) の場合と高解像度 ($N \geqq 10^6$) の場合で異なることが示された。その結果、角運動量輸送率、またそれにともなう月形成のタイムスケールも数値計算の解像度に依存することがわかった。

We developed an N-body simulation code on multiple Pezy-SC processors-Pezy SC processor is a novel new architecture developed by Pezy Computing K. K. that has achieved large computational power with low electric power consumption. We adopt the rubble pile model for physical collisions, in which no mergers are allowed, and use FDPS (Framework for Developing Particle Simulator) to solve the self-gravity. We performed several sets of high- and extra-high-resolution N-body simulations of the lunar accretion from a circumterrestrial disk of debris generated by a giant impact on the Earth. The number of particles is up to 10 million, in which 1 particle corresponds to a 10 km-size satellitesimals. We found that the spiral structures inside the Roche limit radius were different between low-resolution simulations ($N \leqq 10^5$) and high-resolution simulations ($N \geqq 10^6$). According to the difference, angular momentum fluxes those determined the accretion timescales of the moon also depended on the numerical resolutions

C6

周惑星円盤の形成と温度構造について

○藤井悠里[12]，Oliver Gressel[2]，Udo Ziegler[3]

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

原始惑星系円盤内で巨大ガス惑星が形成される際には、角運動量の保存により、その惑星の周りに周惑星円盤と呼ばれるガス円盤が形成される。周惑星円盤はガス惑星の質量捕獲のみならず、その周りの衛星の形成において非常に重要な天体であると考えられている。しかし、大きさの問題に加え、原始惑星系円盤に埋もれていることにより、その観測は困難である。よって、現在のところ周惑星円盤の研究は数値シミュレーションを始めとした理論的な研究が中心となっている。

周惑星円盤の形成過程や進化を理解する上で鍵となるのが、その温度構造である。近年の研究により、進化初期の周惑星円盤は密度も温度も高かったことが明らかになってきている。我々のこれまでのモデル計算からは、特に形成直後の周惑星円盤の衛星形成領域の温度は、数千度に達するという結果が得られている。さらに詳しく周惑星円盤について理解するためには、原始惑星系円盤からの質量流入を含めた周惑星円盤の形成過程を温度構造を考慮しながら調べる必要がある。

我々は、原始惑星系円盤の中に置いた惑星にガスが流入する様子を調べるために、３次元輻射流体力学シミュレーションを行った。その際の数値計算には NIRVANA 3.5 コードを用いた。本講演では、その結果について議論する。

C7

星雲ガス中で集積する岩石惑星内部の D/H

◯齊藤 大晶[1], 倉本 圭[2]

[1] 高知工科大学 システム工学群, [2] 北海道大学 理学研究院

火星マントル起源と考えられている火星隕石中の D/H 比の分析値は炭素質コンドライトの D/H 比 ($1.3–1.7\times10^{-4}$, Robert, 2003) に近い (Usui et al., 2012). これは火星内部の水の起源が炭素質コンドライト様であったことを示唆している. その一方で, 火星隕石の年代学によると, 火星は CAI 形成後少なくとも 1.8 ± 1.0 Myr 以内に現質量の 1/2 にまで急速に成長した (e.g., Dauphas & Pourmand, 2011). これは, 火星の集積が基本的に原始太陽系星雲中で進行したことを示唆している. 原始惑星が月質量以上になると, 微惑星から H_2O をはじめとする揮発性成分が衝突により脱ガスを開始する. それと並行して, 原始火星は星雲ガスを重力的に捕獲し始める. すなわち, 星雲ガスおよび脱ガス成分の双方からなる混成型原始大気が火星上に形成された可能性がある. 星雲ガス成分中の水素の D/H 比は約 2.1×10^{-5} (e.g., Geiss & Gloeckler, 1998) と, 炭素質コンドライトの D/H 比よりも約 1/10 小さい. もし原始太陽系星雲ガス中で火星の集積が進行したのならば, D/H の低い水素が火星内部に取り込まれた可能性がある. もし星雲ガス成分と脱ガス成分が両者の密度差によって, 互いに混合しない場合, 火星内部の D/H 比は惑星材料物質のそれにほぼ一致するであろう. 他方, 対流による混合が起こる場合には, 原始太陽系星雲に由来する低い D/H 比が惑星内部に取り込まれる可能性がある.

そこで本研究では, 星雲ガス成分と脱ガス成分の境界層 (以下, 組成境界) と対流圏界面の位置を比較することで, 双方のガス成分が集積時間以内に成層状態を保つ, あるいは対流混合する条件を調べる. 均質集積を仮定し、炭素質コンドライト様の H/C 比を惑星材料物質に与え、衝突時の高温高圧下における金属相と酸化鉄成分との化学平衡で決まる気体組成を脱ガス成分の組成とする. 集積熱で支えられる原始大気の熱的構造を解析し, 様々な条件下での地表面温度を求め, 岩石の融点を超えた場合にはマグマオーシャンが形成し, 原始大気中の水蒸気が内部に取り込まれると仮定した. 惑星集積時間には隕石年代学と矛盾のない 1.5 – 5 Myr, 材料物質中の揮発性成分濃度をパラメタとして与えた.

まず火星を想定した結果を以下に示す. 揮発性成分濃度が 1 wt% 未満の材料物質から形成された場合, 集積最終段階では組成境界よりも上部に対流圏界面が位置する. すなわち, 混成型原始大気は分離状態を保つことができないことを示す. ただし, このときの地表面温度は岩石融点を下回り, 星雲起源の低い D/H 比 は内部に取り込まれない. 一方, 揮発性成分が 1 – 2 wt% の場合, 対流による両成分の混合は起きるが, 混合する星雲ガス成分の質量が脱ガス成分の質量に比べて約 1/100 と少量であることから, 大幅な D/H 比の低下は起きない. このとき 地表面温度は岩石融点を超え, 火星内部の D/H 比は材料物質中の D/H 比よりもやや低くなる可能性はあるものの, ほぼ材料物質中と同様の値をもつと推定できる. 最後に, 揮発性成分濃度が 2 wt% 以上のとき, 対流圏界面は組成境界よりも下部に常に位置し, 対流による星雲ガスと脱ガス成分の混合は生じない. このとき地表面温度は 1500K を超えるため, 火星内部の D/H 比は材料物質の D/H 比と同様の値をもつと考えられる. これら結果から, 揮発性成分の濃度によらず, 火星内部の D/H 比 は材料物質の D/H 比の値と近くなる可能性が高いことがわかった.

現在解析中ではあるが, 惑星質量が火星以上の場合, この描像は成立しないことが明らかになりつつある. 惑星質量が大きくなると, 捕獲される星雲ガス質量が多くなるため, 光学的に厚くなり, 星雲ガスのみでも対流が起こるようになるためである. また, 地表面温度も岩石融点を超えるほどに高温になることから, 星雲ガス由来の水素を内部に取り込む可能性が高くなる. このことは, 深部の地球マントルに由来すると考えられている火山岩の低い D/H 比 (Hallis et al, 2015) を合理的に説明する.

C8

還元的な大気下での惑星初期進化の軌道依存性

Thermal evolution of magma oceans under reducing 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．大気とマグマオーシャンの共進化問題は，これまで主に強い温室効果気体である水蒸気・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)．特に，水蒸気を主成分とする大気では，恒星からの軌道距離によって，固化時間や固化した後の水量が大きく異なることが明らかとなり，これは地球と金星とで水量が大きく異ることを説明できる可能性がある(Hamano et al. 2013)．また，大気量と地表温度で決まる放射スペクトルの時間進化から，系外惑星系で予想される溶融した惑星の観測頻度や放射スペクトルも軌道によって異なることが示唆される(Hamano et al. 2015).

一方で，円盤ガスの捕獲や巨大衝突時に撒き散らされた金属鉄との反応など，惑星がもつ初期大気組成は還元的である可能性もある．例えば，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，コンドライトと同様のバルク組成（Kuramoto and Matsui, 1996）や現在のマントルの FeO 量から(e.g. Frost et al. 2009)は，Iron-Wustite バッファに対して約２桁低い酸素のフガシティが予想される．このとき大気（流体相）中の水素-水蒸気モル比は約 9:1 となり，水素を主体とした大気組成となる.

本研究では，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．高温な地表温度では，水蒸気大気では惑星放射は射出限界を下回らない．一方で，水蒸気分圧を一定とし比較すると，惑星放射は水素のモル分率とともに減少する．これは，水蒸気の気柱質量の増加と水素の保温効果によって生じる．惑星放射の減少は温度が低いほど顕著であることがわかった．様々な大気酸化還元度（水素/水蒸気モル比）に対して放射対流平衡計算を行った結果を大気–マグマオーシャン進化モデルに組み込み，水蒸気大気の場合と比べて，惑星進化の軌道依存性がどのように変わるのか議論する.

E1

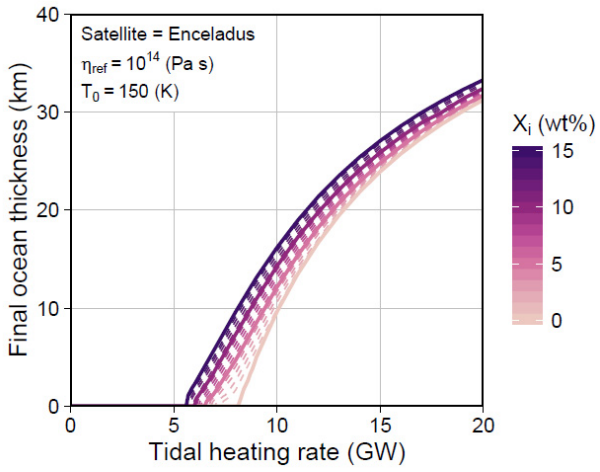
土星系氷衛星の熱進化：
エンセラダスとディオネの内部海

○鎌田俊一
北海道大学 創成研究機構

氷天体が内部海を保持しているか否かは，その天体の進化過程を探る上で重要な指標となるため，惑星科学において最も重要な研究課題の一つである．また，液体の水は地球型生命にとって必要不可欠であるため，アストロバイオロジーにおいても重要な研究テーマである．

カッシーニ探査によって得られたデータから，土星系氷衛星の現在の内部構造に関する理解が深まってきている．エンセラダスについては，内部海は全球的で，かつ南極付近で分厚いことが分かった［e.g., Thomas et al., 2016］．ディオネについては，最小地殻応力アイソスタシーモデルを用いた測地データの解析から，全球的に厚さ数十 km の内部海があることが示唆された［Beuthe et al., 2016］．これらの氷衛星は，その小さなサイズ故に集積熱や放射壊変熱だけでは内部海を長期間保持できない．本研究では，これらの氷衛星が現在内部海を保持するのに要する発熱量を熱進化計算を通じて調べ，それと潮汐加熱率を比較する．

計算の結果，エンセラダスが厚さ 30–50 km の全球内部海を持つためには，>～20 GW の発熱が必要であることが分かった（下図）．南極付近での分厚い海を維持するために >10 GW の融解熱が必要である［Kamata & Nimmo, 2017］ことを考え合わせると，エンセラダスに必要な加熱率は >30 GW ということが分かった．この結果は，軌道共鳴にあるエンセラダス－ディオネ系に対する潮汐加熱率（<～50 GW［Fuller et al., 2016］）の大部分がエンセラダスに分配されていることを示している．一方，ディオネについては，氷が極めて高粘性率かつ高アンモニア濃度でない限り，>>20 GW の発熱率が必要であることが分かった．これは，ディオネの氷地殻は分厚いため，内部の熱が熱対流によって効率的に逃げるためである．この結果は，ディオネの氷地殻・海はかなり不純物を含むか，ディオネの氷地殻には最小地殻応力アイソスタシーが成立せず，内部海は存在しないことを示している．



図：熱進化最終状態における内部海の厚さと潮汐加熱率の関係．氷地殻に含まれるアンモニア濃度を色で表している。エンセラダスが現在 >30 km の全球内部海を持つためには >～20 GW の潮汐加熱率が必要である．

E2

土星中型衛星の軌道進化とエンケラドスの潮汐加熱

○中嶋彩乃[1] 井田茂[2] 木村淳[3] Ramon Brasser[2]

[1]東京工業大学　理学院　地球惑星科学系　地球惑星科学コース

[2]東京工業大学　地球生命研究所

[3]大阪大学　理学研究科　宇宙地球科学専攻

土星中型衛星は、土星に近いものから順にミマス、エンケラドス、テティス、ディオーネ、レアと分布している。これらの衛星の特徴には、1. エンケラドスのみが熱的に活発な点と 2. 隣り合っていない天体同士が共鳴関係(テティス–ミマス２：１、ディオーネ–エンケラドス２：１)にある点、3. 各衛星のシリケイト含有率に相関が見られない点などがあり、原因はこれら衛星の形成・軌道進化過程にあると考えられているが、未だに明らかになっていない。我々はこの中でも特に 1. エンケラドスのみの熱活動に注目して研究を行った。

エンケラドスの熱放射はカッシーニによって観測されており、約 16GW と見積もられている(Howett et al., 2011)。エンケラドスは岩石コアが非常に小さいため放射性加熱は約 0.32GW (Spencer & Nimmo, 2013)であるため、主な熱源は自身が変形することによる潮汐加熱だと考えられている。しかし、土星の散逸係数を理論的に見積もられた Q_S=18,000 と仮定すると、現在のディオーネとの 2:1 共鳴を保つことで生じる潮汐加熱はわずか 1.1GW となり (Meyer & Wisdom, 2007)、現在の熱放射を説明できなかった。

近年、アストロメトリ法による解析から、土星の散逸係数が新たに Q_S=1,680 と示唆された。この値を仮定すると、中型衛星は土星リングから誕生したと考えることができ (Charnoz et al., 2011)、今まで考えられてきた軌道進化と大きく異なる。本研究では、エンケラドス、テティス、ディオーネ、レアの４天体に対し、Symplectic Massive Body Algorithm (SyMBA) を用いて、土星リングで誕生してから現在の配置に至るまで一貫した軌道計算を行った。初期条件は、SET1: エンケラドスがテティスより先に土星リングから誕生する場合、SET2: エンケラドスがテティスの後に誕生する場合、SET3: エンケラドスとテティスが同時に誕生する場合に分けて計算を行った。その結果、SET1、SET3 ではエンケラドスとテティスが共鳴に捕獲による離心率の上昇から軌道交差を起こし、衝突破壊や合体を起こしてしまい、現在の軌道分布を再現できないことがわかった。一方、SET2 の場合では、土星リングから受けるトルクを考慮し、テティスが誕生してすぐにエンケラドスが誕生するという、限られたパラメータでのみ現在の軌道分布を再現可能であることがわかった。また、エンケラドスとテティスが共鳴関係になることで、質量の小さいエンケラドスのみ離心率が上昇するため、中型衛星の中で唯一、過去に加熱を経験することが明らかになった。

E3

ガニメデ上のFurrow構造の起源に関する研究

○平田直之[1]　末次竜[2]　大槻圭史[1]
[1]神戸大学　[2]産業医科大学

木星衛星ガニメデにはFurrow構造と呼ばれる地形が存在している(図１). Furrowはガニメデで識別できる地質学的構造としては最も古いものだと考えられている[1]. 外見が良く似ていることから, カリストに見られるヴァルハラ盆地の多重リング構造に類似した成因を持つと考えられている[2]. 具体的には巨大衝突盆地形成後の負の質量異常を緩和させる過程で生じる応力場によって, 正断層性のテクトニクスが働いた結果出来たグラーベンであると考えられている. 我々はヴォイジャー画像とガリレオ画像を解析し, Furrowの分布を改めて調査した. その結果, ガニメデのFurrowは従来考えられてきたようなローカルなものではなく, 全球規模に及ぶものであることを明らかにした. これは, Bright Terrain形成以前のガニメデには全球規模の多重リング構造があったことを意味する. 衝突由来であれば, 太陽系最大の衝突構造と言えるだろう. 明瞭なリムを残していないのでインパクターの大きさを見積もるのは難しいが, 我々の数値計算に基づくと直径100-500km程度のインパクターが衝突したと想定される. この大きさのインパクターはガニメデが分化できるほど衛星を加熱した可能性があり, 未分化なカリストと分化したガニメデという対称的性質の原因になった可能性がある.

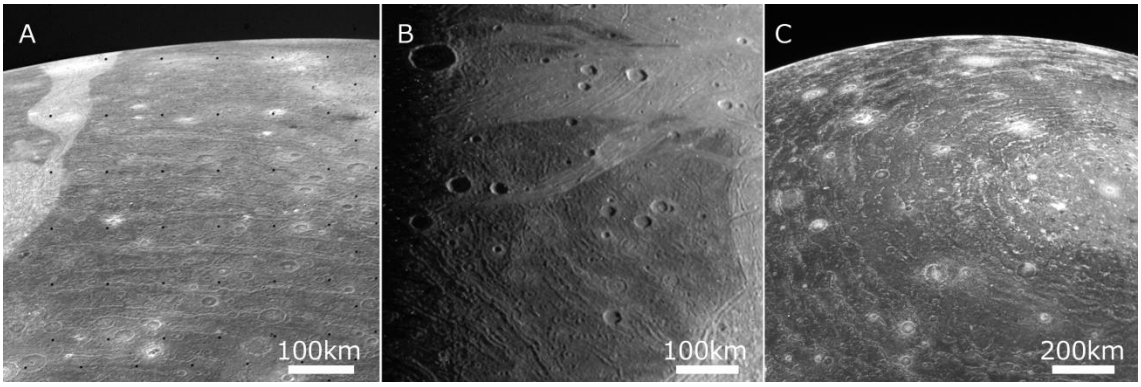


図１(A)ガニメデのガリレオレジオに認められるFurrow構造. ヴォイジャー2号撮影(C2063641). (B)ガニメデのニコルソンレジオに認められるFurrow. ガリレオ探査機撮影(s0401701078). (C)カリストのヴァルハラ盆地. 周囲に多重リングが認められる(C1642151).

[1] E. M. Shoemaker , R. Wolfe, in Satellites of Jupiter. (1982), vol. 1, pp. 277-339.
[2] W. B. Mc Kinnon, H. J. Melosh, Evolution of planetary lithospheres: Evidence from multiringed structures on Ganymede and Callisto. Icarus 44, 454 (1980/11/01, 1980).

E4

惑星に一時捕獲された小天体の捕獲軌道滞在時間

○樋口有理可[1]、井田茂[2]
[1]国立天文台 RISE 月惑星探査検討室
[2]東京工業大学地球生命研究所

巨大惑星の周囲に多数発見されている不規則衛星は、その半数以上が逆行軌道を持つ。これらの不規則衛星は、惑星周囲にやってきた小天体が捕獲された結果だと考えられている。我々はこれまでに、火星系の衛星の起源の解明を念頭に、楕円軌道惑星による小天体の一時捕獲必要条件を明らかにした。今回は、捕獲された小天体がどのくらいの時間捕獲され続けるかを主に数値計算で調べた結果を発表する。

まず、円制限３体問題の保存量であるヤコビエネルギーを衛星系で利用しやすい形に変換し、そのヤコビエネルギーを用いて捕獲された天体の特徴を調べた。すると、捕獲された天体のヤコビエネルギーは、いくつかのピークを持つ離散的な分布を持つことがわかった。この分布を用いて捕獲を数種類のタイプに分類し、それぞれのタイプ別に捕獲継続時間の累積分布をべき関数で近似した。その近似式の指数が惑星の離心率、捕獲タイプによりどのように変化するかを調べた。その結果、捕獲タイプによって分布の形が異なる(集団としての寿命に差がある)こと、ある捕獲タイプにおいては、惑星が離心率を持っているほうが長時間捕獲に有利であることなどがわかった。衛星軌道に進化するために必要な捕獲継続時間は、その衛星系に有効なエネルギー散逸過程に強く依存する。すなわち、各衛星系に働くと考えられるエネルギー散逸過程によって、衛星にする天体の捕獲タイプの割合は大きく異なることが考えられる。

E5

巨大衝突説から予測される火星衛星の構成粒子について

○兵頭龍樹[1], 玄田英典, Sébastien Charnoz, Jean-Pierre Bibring, 中村智樹, Pascal Rosenblatt,

[1]地球生命研究所・東京工業大学, [2]Institut de Physique du Globe de Paris, [3]東北大学, [4]Royal Observatory of Belgium

近年、我々は巨大衝突説の枠組みで火星衛星 Phobos と Deimos を形成することに成功した（Rosenblatt et al. 2016, Nature Geo）。本研究では，巨大衝突説の枠組みにおいて、火星衛星がどのような物質で構成されているべきかについて深く議論する。特に、粒子サイズ、物質の起源（火星 or 衝突天体由来）、および、衝突直後の熱力学的情報（Hyodo et al. 2017c, ApJ）、詳細な火星衛星形成円盤の力学進化（Hyodo et al. 2017d, ApJ submitted）、構成粒子の化学組成および揮発性元素の有無（Hyodo et al. in prep）について時間の限り議論する。

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）ミッションに向けた理論予想となり、火星衛星サイエンスおよび探査ミッションが最大化されることを期待する。

E6

火星周りの原始大気を考慮した火星衛星捕獲説

○鈴木智浩[1]　玄田英典[2]　樋口有理可[1]　井田茂[2]
[1]東京工業大学地球惑星科学系　[2]地球生命研究所

火星には二つの小さな衛星、Phobos と Deimos が存在している。火星衛星の起源としては主に捕獲説と衝突説が議論されてきたが、決着はついていない。Phobos と Deimos の反射スペクトルが C 型や D 型の小惑星に類似しているという点は捕獲説を支持するが、火星に飛来する小天体の方向はランダムであることが期待されるので、二つの衛星が小さな軌道傾斜角を持っている(つまり、ほぼ火星赤道面上を公転している)ことを自然には説明できない。火星衛星の捕獲に関する先行研究(Hunten, 1979; Sasaki, 1990; Burns, 1992)でも、火星との潮汐相互作用や火星周りの静止した原始大気のガス抵抗によって衛星の離心率が現在のようにほぼ 0 になることがわかっているが、軌道傾斜角の問題は全く解決されていない。そこで、本研究では、火星周りの原始大気が静止しているのではなく、火星の自転方向に回転運動をしているような場合を考慮すれば、捕獲された小天体の軌道傾斜角も変化するのではないかと考えた。本研究では、回転速度をパラメータとして、Sasaki (1990)で用いられた原始大気のガス密度分布を考慮して、捕獲後の衛星の軌道傾斜角の変化を数値的に計算した。その結果、ガスの回転速度によって軌道傾斜角の落ち方にかなりの差が出て、ガスの回転速度が火星周りのケプラー速度の 50%ではあまり変化がないことがわかった。原始惑星系円盤ガス中で成長する原始惑星が捕獲する大気の運動に関して、Ormel et al. (2015)は等温で非粘性な流れを二次元計算している。彼らの計算結果によると、火星質量の天体が捕獲する原始大気の回転速度は、ケプラー速度のおよそ 10%程度であることが示されているので、本研究で得られた結果を適用すると、小天体がランダムな傾斜角で捕獲された後に現在の軌道になる確率は従来の確率からわずかしか上がらない。しかし、火星集積時に微惑星自体が大気に角運動量を与えることを考えると大気の回転速度を見積もれるので、その点についても議論する。

E7

フォボスの形成仮説に応じた模擬土壌の開発

Development of Phobos simulant based on two formational hypotheses.

○宮本英昭、新原隆史、逸見良道、茂木勝郎、羽柴公博、福井勝則、Giergj Dodbiba、藤田豊久（東大）、小川和律（神戸大）、和田浩二（千葉工大）、中村智樹（東北大）

Mechanical properties of the surface of Phobos are essential for the designing both a lander and a sampler, though such properties are largely unknown due to the lack of knowledge in such as the chemical composition and the particle size. No theories exist to estimate these values from partial information. In order to evaluating these properties, we are developing simulant of Phobos based on formational scenarios of both a captured carbonaceous chondrite and an accumulation of debris from Mars.

フォボス表面の機械的特性は着陸機やサンプラーの設計を左右する重要な情報である。しかし表層レゴリスの化学組成や粒径に関する情報の欠如に加え、そもそも機械的特性を推定するための理論が確立していないことから、想定される値の範囲は極めて広いものとなってしまう。そこで私たちは、フォボスの模擬土壌を開発することで、この推定範囲を現実的な値へと絞ろうとしている。

フォボス形成の仮説は複数存在するため、それぞれに応じ想定される組成や岩石粒子サイズなどは変化する。こうした推定値を考慮し、さらに隕石の組成や岩石組織、構成鉱物、粒度分布などを参考にしながら、カンラン岩、磁鉄鉱、石灰岩、玄武岩質スコリア・火山灰、黄鉄鉱、蛇紋岩などさまざまな岩石をトン単位で集め、粉砕・混合・圧密・焼き付けなどを行うことで、工学的な試験のみならず理学的見地に立った実験にも実用的なシミュラントを作成している。複数の形成仮説に関連し、結果的に月シミュラントや火星シミュラントも作成されることとなる。なお岩石は自然公園保護法等の関連法案に配慮しつつ、鉱山事業者、土地所有者、各地域の行政組織の協力を得ながら進めている。

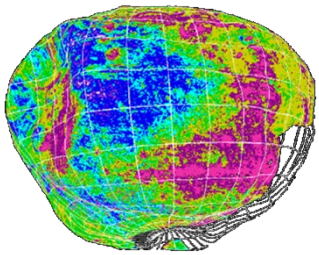
フォボスの Blue Unit と三次元形状モデルを用いたイジェクタの分布

○菊地紘[1]　宮本英昭[1]　[1]東京大学

フォボスの表面は大きく Blue Unit(BU)と Red Unit(RU)に分類されている[1]．その中でもフォボスの始原的な物質が表面に堆積していると考えられる Blue unit (BU)の形成を理解することは，フォボスの表面を理解するだけでなく，火星衛星の起源と進化を解明する上で重要である．これまでフォボスの BU は Stickney Crater (SC)の東側と南側に主に分布していることがわかっていた．東側は SC のフォボスが火星の Fluid Roche Limit (FRL)付近に存在したときに，SC から放射状に放出されたイジェクタが火星の重力とフォボスの軌道が強く影響して堆積した[2]か，SC の内側で生じた地滑り[3]か，不均質な内部構造であるという仮説[1, 4]があるが，[2]で比較的その分布を説明できることがわかっていた．しかし南側の BU は，月などのクレーターでみられるような，衝突体がフォボスに低角度で衝突することで非対称的にイジェクタが放出された可能性が示唆されたが，そうなると東側との整合性が取れなくなってしまう．

近年，高解像度画像が得られたことで，南側の BU のより詳細な分布がわかってきたため，本研究では南側の BU の分布を丁寧に観測することから始めた．東側と南側で BU と RU のデータセット(図)を作成しクレーター密度を調べた結果，地域ごとでは大きな違いはみられなかった．この結果は南側には Blue material が薄く堆積しており，SC より小さいクレーターのイジェクタが起源であると考えても矛盾がない．そこで本研究では SC の内側にある Limtoc Crater (LC)に注目した．このクレーターからみたとき Dynamic Height [5]を計算すると SC は北側で高く南側で低い傾向があるため，北側には堆積しなかったという仮説を立てた．そこでフォボスの三次元形状モデルを用いてイジェクタ粒子の運動を数値計算で追跡した結果，低速度で放出したイジェクタ粒子がフォボスと再衝突した地点の分布と観測される南側の BU との間に強い相関があることがわかった．

今回フォボスの BU は SC と LC が起源であると考えてその分布を矛盾なく説明できた．これまでのフォボス表面の知見を整理すると，現在の表面状態を見る限りフォボスは FRL 付近の情報だけが記録されていることになる．フォボスは破壊と集積を繰り返して形成した[6]のかもしれない．



図：フォボスの三次元形状モデルに展開したスペクトルマップ[7]

参考文献

[1] Murchie, S.L., et al., Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets, 1991. **96**(B4): p. 5925-5945. [2] Thomas, P.C., Icarus, 1998. **131**(1): p. 78-106. [3] Shingareva, T.V. and R.O. Kuzmin, Solar System Research, 2001. **35**(6): p. 431-443. [4] Basilevsky, A.T., et al., 2014. **102**: p. 95-118. [5] Thomas, P.C., Icarus, 1993. **105**(2): p. 326-344. [6] Hesselbrock, A.J. and D.A. Minton, Nature Geosci, 2017. **10**(4): p. 266-269. [7] Karachevtseva, I., et al., Planetary and Space Science, 2015. **108**: p. 24-30.

E9

誘導熱プラズマ装置を用いた Mg-Fe-Si-O-S 系での微粒子合成実験：GEMS 模擬粒子の合成に向けて

○河野颯[1]、　土`山明[1]、　Kim Taehee[1]、　松野淳也[1]

[1]京都大学大学院理学研究科

彗星塵には GEMS（Glass with embedded metal and sulfides）と呼ばれる径 100 nm 程度の非晶質珪酸塩粒子が含まれている。GEMS は鉄やニッケルの金属と硫化鉄のナノ粒子を内包している。その起源については、原始惑星円盤内での非平衡凝縮過程で形成されたという説[1]が優勢であるが、星間塵起源とする説[2]もある。いずれにせよ、GEMS は太陽系物質の中で最も始原的な物質であると考えられており、太陽系固体物質の起源を理解する上で重要な物質である。硫黄を含まない系においては、系統的な化学組成を用いて GEMS 模擬粒子の合成実験が行われているが[3]、硫黄を含む系においての系統的な合成実験はない。本研究では、GEMS の再現をめざして、硫黄を含む Mg-Fe-Si-O-S 系において合成実験をおこなった。

出発物質として、市販試薬の粉体（SiO_2, Si, MgO, Fe, FeS_2）を GEMS 平均組成（Mg:Fe:Si:S = 0.7:0.6:1:0.3 (モル比))[1]となるように混合したものを用いた。酸化還元状態の影響を調べるために、Si と SiO_2 の混合比を変えた 2 つの実験（Run-1: Si/SiO_2=0、Run-2 : Si/SiO_2=1)を行った。実験には誘導熱プラズマ(ITP)装置[4]を用いた。Ar-He 混合ガスを用いたプラズマによりおおよそ 10000 K の高温を生成し、投入した出発物質を蒸発、急冷することで微粒子の合成を試みた。生成物は XRD、FT-IR、SEM/EDS、TEM/EDS により、評価した。

XRD により、Run-1 では主に非晶質珪酸塩のハローが、Run-2 では Fe_3Si のピークと非晶質珪酸塩のハローおよび少量の Fe と蒸発残渣と思われる MgO のピークが確認できた。FT-IR では、Run-1, 2 ともに 9.6 μm 付近の非晶質珪酸塩の吸収と、Run-1 ではさらに 8.95 μm に蒸発残渣とみられる非晶質シリカの吸収が見られた。SEM 観察により、Run-1, 2 ともに、100 nm 程度の S を含む微細粒子の生成が確認できた。Run-2 の TEM 観察では、生成物のサイズや組織は GEMS に類似していたが、内包されるナノ粒子は主として Fe_3Si および硫化物であり、GEMS とは異なる。以上のように、Run-1 では GEMS と比べてより酸化的な条件で、Run-2 ではより還元的な条件で生成されたと考えられる物質が確認された。以上のことを踏まえて、今後は Run-1, 2 の中間的な酸化還元条件で実験をおこない、GEMS と比較していきたい。

[1] Keller and Messenger (2011) GCA, 75, 5336-5365. [2] Bradley et al. (2004) ApJ, 17, 650-655. [3] Matsuno (2015) Ph.D. thesis, Kyoto University. [4] T. H. Kim, et al (2017) ISPC, 23, P2-33-7.

エンスタタイトへの１keV水素イオン照射による太陽風宇宙風化模擬実験

○浅田 祐馬[1]，瀧川 晶[1,2]，土`山 明[1]，松本 徹[3]，仲内 悠祐[4]，安部 正真[3]，渡部 直樹[5]

[1]京都大学大学院理学研究科，[2]京都大学白眉センター，
[3]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所，[4]会津大学，[5]北海道大学低温科学研究所

月や小惑星などの大気のない天体表面における宇宙風化の原因として、微隕石の衝突、太陽風の照射、宇宙線の照射などが考えられている[1-3]。小惑星においても太陽風照射や微隕石衝突により宇宙風化が起きていると考えられてきたが[3]、はやぶさ探査機が持ち帰った粒子の分析によって、小惑星イトカワ上にブリスターと呼ばれる水ぶくれ構造を伴う非晶質層などの宇宙風化を受けた証拠が見出される[4-6]とともに、太陽風照射が主としてイトカワ粒子の宇宙風化をもたらしたことが指摘された[4]。

本研究では、太陽風を構成する粒子の大半を占める１keVのH^+の照射により、どのような宇宙風化が起こるのかを明らかにするために、宇宙科学研究所において現在開発中のイオンビーム照射装置を用いて１keVのH^+の照射実験を行った。照射実験のターゲットとして、普通コンドライトの主要構成鉱物の一つである直方エンスタタイト（En_{99}, Tanzania）を用いた。サンプルの大きさが３ × ５ × 0.5 mmの平板状の直方体を複数枚作成し、その表面を粒径 0.25 μmまでのダイヤモンド砥粒による機械研磨をおこなったものと、さらにコロイダルシリカによる化学研磨をおこない機械研磨によるダメージ層を取り除いたものの２種類を用意した。最後に超音波洗浄により表面をクリーニングした。照射前後の試料は表面の微細構造をSEM観察後、FIBを用いて切り出した試料の断面のTEM観察をおこなった。

機械研磨しかおこなっていない試料に関しては、1×10^{16} ions/cm^2 の H^+照射により試料表面に明瞭な変化は見られなかったが、照射量 1×10^{17} ions/cm^2 の試料表面には直径 30 nm で密度 3×10^{10} /cm^2 のブリスターおよび、基盤結晶と明瞭な境界をもつ非晶質層（厚さ 26 nm）の形成が確認された。一方、化学研磨をおこない、機械研磨によるダメージ層を取り除いた試料に関しては、1×10^{16} ions/cm^2 だけでなく 1×10^{17} ions/cm^2 の H^+照射を行った場合においても、試料表面にブリスターや非晶質層が確認できなかった。

これらの結果から、ブリスターや非晶質層の形成には従来指摘されているイオン照射量やイオンエネルギーだけでなく、照射前の試料表面に結晶性の乱れや歪みなどのダメージがあるかどうかも重要であると考えられる。表面に研磨によるダメージ層のないエンスタタイトについては、ブリスターや非晶質層が形成するためには 1×10^{17} ions/cm^2 よりも大きい照射量が必要だと予想される。発表では、さらに照射量 3×10^{17}, 1×10^{18} ions/cm^2 のイオン照射実験の結果も踏まえた議論を行う。

[1] Pieters C. T. et al. (2000) MAPS. 35, 1101-1107. [2] Hapke B. (2001) J. Geophys. Res. 106, 10039-10073. [3] Clark B. E. et al. (2002) in Asteroid Space Weathering and Regolith Evolution, Asteroids III. pp. 585–599. [4] Noguchi T. et al. (2014) MAPS. 49, 188-214. [5] Matsumoto T. et al. (2015) Icarus 257, 230-238. [6] Matsumoto T. et al. (2016) GCA. 187 195-217.

E11

宇宙風化作用に対する硫黄の影響

○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]ブラウン大学

1　研究背景と目的

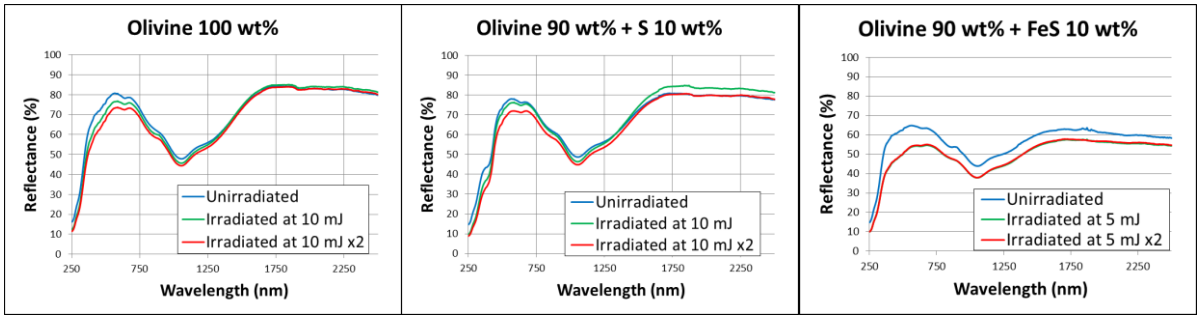
宇宙風化作用は大気のない岩石天体表面で光学的性質の変化を引き起こし、反射スペクトルの暗化、赤化が見られる。このような変化は、太陽風の照射や微小隕石の衝突などによるナノ鉄微粒子の生成が原因である。水星の表面でも宇宙風化作用は観察されているが、そこには宇宙風化の光学的性質の変化の担い手である鉄は少なく、硫黄が多く存在しているということがメッセンジャーの探査から分かった。このことから、宇宙風化による光学的性質の変化に鉄微粒子だけでなく硫黄やその化合物も寄与している可能性が示唆されている。本研究では、硫黄が宇宙風化による光学的性質の変化に与える影響を調べることを目的とする。

2　宇宙風化の模擬実験と分光測定

かんらん石に単体の硫黄やその化合物（硫化鉄など）を混ぜた粉末試料を準備し、真空中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を行った。レーザー照射前後の試料の反射スペクトル（波長範囲 250–2500 nm）を比較し、硫黄が宇宙風化による光学的性質の変化に与える影響を調べた。また硫黄の影響の熱に対する安定性を調べるために、レーザー照射後の試料に対して熱疲労実験も行った。

3　単体の硫黄・硫化鉄を加えた時の反射スペクトルの変化

レーザー照射後のかんらん石に単体の硫黄を加えた試料では、かんらん石のみの試料には見られない複雑な反射スペクトルの変化が見られた。硫化鉄を加えた試料は、かんらん石のみの試料に比べてより大きな暗化が見られた。これより、硫黄は天体表面でその存在形態によって宇宙風化作用による光学的性質の変化に様々な影響を与えると考えられる。



レーザー照射によるスペクトルの変化

Juvinas 隕石の変成履歴

○金丸 礼（総研大）、山口 亮（極地研・総研大）、西戸 裕嗣（岡理大）

Rei Kanemaru (SOKENDAI), Akira Yamaguchi (NIPR and SOKENDAI)

and Hirotsugu Nishido (OUS)

ユークライトは、小惑星ベスタの表層地殻に起源を持つと考えられており、主に低 Ca 輝石と斜長石から構成される玄武岩あるいはガブロである。ユークライトの多くは、母天体上での様々な変成作用（例えば、衝撃変成、熱変成、交代作用）を経験している。ユークライトを詳細に観察することによって、ベスタ表層の地質史を明らかにすることができるだろう。Juvinas 隕石はこれまで、典型的なモノミクト（一種類の岩石から成る）角礫岩と考えられてきたが、岩石組織的な不均一性が報告されている[1]。本研究では、Juvinas の岩石学的・鉱物化学的特徴から変成履歴を明らかにすることにより、ベスタ表層地殻形成に関する考察を行った。

岩石組織の観察には、国立極地研究所の光学顕微鏡、走査電子顕微鏡、Chroma CL、鉱物組成の測定には電子線マイクロプローブアナライザを用いた。また二次鉱物や変成組織の探索のため、岡山理科大学の冷陰極型 CL 装置(ルミノスコープ)用いて薄片全体の CL マッピングを行った。

結果：Juvinas は角礫岩であり、下記のように、大きく３つの部分から構成される。

粗粒部分（ガブロ）：主に粗粒(~1 mm)な低 Ca 輝石と斜長石の結晶からなり、サブオフィティック組織を示す。また副成分鉱物として不定形の石英、イルメナイト、トロイライト、小胞状のかんらん石（Fa_{67-77}）、脈状の斜長石（An_{95-97}）、リン酸塩鉱物などを含む。

細粒部分：輝石と斜長石からなる粗粒部分に接し、短冊状のリディマイトと細粒で針状(100 μm×10 μm)の斜長石（An_{90-92}）の集合体が観察される。

砕屑性マトリックス：岩石片や鉱物片（＜数 mm）の集合体であり、空隙が存在する。鉱物片は丸みを帯びた外形を示し、さらに他の鉱物片と接するところの一部は癒合している。マトリックスを構成する岩石片や鉱物片は、粗粒と細粒部分に観察される岩石組織、鉱物組成と一致する。

考察：上記の観察結果から Juvinas は、少なくとも、以下の 6 段階の形成過程を経たことがわかった。

（１）粗粒部分は、サブオフィッティック組織が示すことから、表層付近でマグマから結晶化したと考えられる。

（２）輝石の化学組成(Mg, Fe)が均質化されていることから、結晶化後、熱変成作用を経験したと考えられる。

（３）細粒部分は、粗粒部分への衝突イベントによって生じたメルトから急冷・結晶化したと考えられる。また、細粒部分を取り囲む輝石には、粗粒部分と同程度の離溶ラメラが発達しており、衝撃後の熱変成作用を示唆する。

（４）破砕性マトリックスは、粗粒部分と細粒部分が、衝突による破壊・角礫化され形成されたことを示唆する。したがって、Juvinas は、少なくとも２回目以上の衝撃イベントを経験したと考えられる。

（５）砕屑性マトリックス中の鉱物片の丸い外形、他の鉱物片との接点での癒合した組織は、２度目の衝撃変成後に、再結晶したことを示す。また、マトリックスの空隙が多いことから、角礫化後強い圧密を経験しておらず、母天体の比較的表層を構成するレゴリス角礫岩であった可能性がある。

そのほか、Fe に富むかんらんや Ca に富む斜長石の脈は、Fe メタソマティズムによる生成物と考えられている[2]。このメタソマティズムは、上記のどの段階で起こったのか明らかではない。以上から Juvinas は、結晶化後、複数回の熱変成作用と衝撃変成作用を受けたと考えられる。以上の結果は、ベスタの表層地殻では、角礫化・溶融・熱変成作用など、従来考えられているよりも複雑な地殻形成史が存在することが示唆された。

参考文献：[1] Takeda. H and Yamaguchi. A (1991) abstract of the 54th Meteoritical Society Meeting, 228. [2] Barrat J.A. et al. (2011) Geochim. Cosmochim. Acta 75, 3839–3.

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam による 木星トロヤ群サーベイ

○ 寺居 剛[1], 吉田 二美[2,3]

[1] 国立天文台ハワイ観測所, [2] 千葉工業大学, [3] 神戸大学

木星トロヤ群小惑星は未だ起源や捕獲過程が不明であり，それらを明らかにすることによって太陽系初期における惑星・小天体の力学進化に関する重要な手掛かりが得られると期待される．我々は小天体集団間で衝突進化の性質を比較することにより，木星トロヤ群小惑星の起源に迫ることを目指している．衝突進化は主に衝突破壊強度特性や衝突速度分布によって特徴付けられ，それらは小天体集団のサイズ分布に反映される．サイズ分布形状を測定するには広いサイズ範囲にわたって小天体の個数の増加度を調べなければならない．小さな天体ほど光度が低く観測が困難であり，木星トロヤ群小惑星の場合，直径 10 km 未満の天体は可視光で 20 等よりも暗くなるため，大口径望遠鏡による観測が必須である．先行研究 (Yoshida & Nakamura 2007; Wong & Brown 2015) ではサイズ分布曲線 ($\log N(D)$ vs. $\log D$; $N(D)$ は直径 D の天体の個数) の傾斜が直径 4 km 付近で変化するという結果が示されているが，いずれもサンプル数が少なく (≤ 150)，測定精度が十分とは言えなかった．また，木星トロヤ群小惑星とよく似たカラー分布を持つことが知られているヒルダ群小惑星も同じく重要な小天体集団であるが，サイズ分布の測定例は乏しく，木星トロヤ群と同様に大型望遠鏡による観測が必要だった．

我々は口径 8.2 m すばる望遠鏡に搭載された超広視野モザイク CCD カメラ「Hyper Suprime-Cam」 (視野直径 1.5 度角) を用いて木星 L4 点に近い領域をサーベイ観測し，約 26 平方度にわたる検出限界 $r = 24.4$ mag (直径 1 km に相当) の撮像データから 631 個の木星トロヤ群小惑星および 130 個のヒルダ群小惑星を検出した．それらから直径 $\sim$1–20 km の木星トロヤ群小惑星 431 個，ヒルダ群小惑星 91 個の無バイアスサンプルを抽出し，サイズ分布を測定した．得られた木星トロヤ群小惑星の直径 $\sim$1–10 km のサイズ分布は単一のべき乗則 ($N(>D) \propto D^{-b}$; b はべき指数で，最適値は 1.84 ± 0.05) で全体を良く近似することができ，先行研究で指摘されていた傾斜変化などの特徴は無いことがわかった．さらに既知小惑星カタログや先行観測 (Jewitt et al. 2000) のデータをつなぎ合わせて直径 1 km 以上のサイズ分布全体を調べると，直径 $\sim$10 km に傾斜変化が確認されるものの，メインベルト小惑星のサイズ分布に見られるような特徴的な波状構造は持たないことがわかった．波状構造は衝突破壊強度特性が重力支配域 ($D \gtrsim 0.1$ km) と強度支配域で異なることによって生じるものであり，その差が大きいほど振幅が大きな波形を励起させる．したがって，本結果は木星トロヤ群小惑星の衝突破壊強度特性はメインベルト小惑星のそれとは一致しないことを示しており，組成もしくは内部構造が異なると推測される．一方，ヒルダ群小惑星のサイズ分布も顕著な傾斜変化などは見られず，単一べき乗則で矛盾なく説明できる．最適べき指数は $b = 1.89 \pm 0.12$ で，誤差の範囲内で木星トロヤ群の値と一致する．個数を規格化して直接比較しても両者のサイズ分布形状はよく似ており，類似の衝突破壊強度特性を共有していることが示唆される．これらの結果から，木星トロヤ群小惑星とヒルダ群小惑星は同様の領域・過程で形成された可能性が高い一方，メインベルト小惑星とは異なる起源を持つと考えられる．

ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査計画における着陸その場高分解能質量分析

○癸生川陽子[1]，伊藤元雄[2]，青木順[3]，岡田達明[4,5]，河井洋輔[3]，松本純[4]，寺田健太郎[3]，豊田岐聡[3]，薮田ひかる[6]，坂本尚義[4,7]，矢野創[4]，中村良介[8]，Hervé Cottin[9]，Noel Grand[9]，森治[4]

[1]横浜国立大学，[2]海洋研究開発機構，[3]大阪大学，[4]宇宙航空研究開発機構，[5]東京大学，[6]広島大学，[7]北海道大学，[8]産業技術総合研究所，[9]Université Paris-Est Créteil

木星トロヤ群小惑星は，惑星形成論における巨大惑星移動説や始原的小天体の形成・進化を読み解く鍵である。戦略的中型ミッションとして計画審査段階にあるソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査計画の一環として，着陸機を用いたその場分析が計画されている。小惑星表層に含まれていると期待される有機物，含水鉱物，氷などの揮発性成分の元素組成や同位体組成を調べることにより，トロヤ群小惑星の起源と進化を明らかにする。このために，熱分解機構やガスクロマトグラフィーを組み合わせた高分解能質量分析装置(high resolution mass spectrometer, HRMS)の検討・開発を行っている。

木星トロヤ群小惑星において，エアガンとサンプラーホーンによる表面試料の採取およびガス式ドリルによる地下試料の採取(最大 1 m)を行う。試料は 600℃まで加熱可能な複数の試料ボックスに振り分けられる。表面及び地下それぞれの試料について①600℃までの段階加熱，②600℃で放出されたガスを高温熱分解(>1000℃)，③600℃で放出されたガスをガスクロマトグラフィー(GC)分離，の 3 パターンの前処理を行った後に，電子イオン化(electron ionization, EI)法によるイオン化を行い，HRMS 分析を行う。①600℃までの段階加熱では，それぞれの加熱温度で放出されるガス成分の精密質量から分子式を得る。②高温熱分解では，600℃でのプレヒーティングにより放出されるガスをさらに細かいガス分子(例えば H_2，CO など)まで分解し，これらの H, N, C, O 同位体組成を得る。③GC では，各分子種ごとに分離したうえで質量分析を行うことにより，EI によるフラグメント化パターンなどから分子式だけでなく分子構造の情報を得ることができる。

以上の分析により，トロヤ群小惑星の起源が明らかになり，惑星形成時の巨大惑星移動説や太陽系形成時の揮発性成分の分布と進化，彗星と小惑星の物質的なつながりといった太陽系の形成・進化史の進展が期待される。

ソーラー電力セイル(SPS)ミッションによるトロヤ群小惑星の科学観測

○岡田達明[1,11], 癸生川陽子[2], 青木順[3], 伊藤元雄[4], 河井洋輔[3], 矢野創[1], 岡本千里[5], 薮田ひかる[6], 坏本尚義[1,7], 横田勝一郎[1], 寺田健太郎[3], 豊田岐聡[3], 中村良介[8], 岩田隆浩[1], 松本純[1], 森治[1], Jean-Pierre Bibring[9], Stephan Ulamec[10], Ralf Jaumann[10], ソーラー電力セイル・サイエンスチーム

[1]JAXA 宇宙科学研究所, [2]横浜国立大学, [3]大阪大学, [4]JAMSTEC 高知コア研究所, [5]法政大学, [6]広島大学, [7]北海道大学, [8]産業技術総合研究所, [9]フランス宇宙物理学研究所, [10]ドイツ航空宇宙センター, [11]東京大学

ソーラー電力セイル（SPS）ミッションによる木星トロヤ群小惑星探査計画の、科学観測の概要と搭載観測機器の検討状況を報告する。SPS は次期中型宇宙科学ミッションの候補であり、現在 Phase-A1 検討中である。本ミッションでは、世界初の宇宙ヨット探査機「イカロス」で実証されたソーラーセイルの薄膜帆を一辺約 40m に拡張して超大面積太陽電池として発電を行い、「はやぶさ」「はやぶさ2」で実用化したイオンエンジンの増強型を駆動するハイブリッド推進システムにより、超低燃費で外惑星系探査を行うための宇宙航行の実証を行う。打ち上げから約 5 年で木星に到達し、重力アシストによってトロヤ群小惑星に向かい、さらに数年後にトロヤ群小惑星にランデブーする。10 年を超えるクルージング期間中を活用した科学観測も実施する。黄道光の原因となるダスト帯の外側に出て、赤外線バックグラウンドを数桁下げた条件で赤外線宇宙観測を実施するほか、太陽系内ダストの動径方向の空間分布測定やその磁場観測と組み合わせて磁場・ダストの相互作用を調査する。地球との超長基線を利用したガンマ線偏光観測などを行うことをも検討している[1]。

木星トロヤ群小惑星に到着後は、高度 250km に滞在し、可視撮像および近赤外・熱赤外分光撮像によるグローバルマッピングを行い、小惑星の形状、自転状態、表面地形、熱物性のほか、水質変成度や鉱物・有機物等の物質同定を行う。次に低高度に降下し、電波科学や LIDAR 観測による重力計測、レーダー探査による表層構造を調査する。これらの情報をもとに着陸地点の選定を行い、さらに高度 1km まで降下して 100kg 級の着陸機を投下する。着陸機は周辺パノラマ撮像による周辺地形調査、赤外分光撮像による物質調査、直下のマクロ撮像等による地質・地盤調査を行う。また、表層の熱放射観測による熱物性測定、磁場観測による磁性測定、ラマン分光による鉱物・有機物測定など物質・物性の測定を実施する。次に、表層および地下（最大 1m）の試料を採取し、複数の試料ケースに収納する。採取試料の一部は顕微分光撮像し、粒子単位での物質同定を行う。試料は順に加熱して揮発性成分を抽出し、熱分解などを通して質量分析を行い、軽元素の組成、軽元素の同位体比（D/H、$^{15}N/^{14}N$、等）、有機物等のガス分子の同定を行う[2]。オプションとして、サンプルリターンも検討中である。採取した一部の試料を地球帰還カプセルに収納し、着陸機が再浮上して母船と上空 50km でドッキングし、試料を受け渡す。母船は打ち上げの約 30 年後に地球まで戻り、カプセルを地球大気内にリエントリさせる。

トロヤ群小惑星は軌道安定な木星ラグランジュ点付近に存在し、主に揮発性成分に富むとされるD型や P 型である。人類未踏地にある天体の素性を調べること自体が興味深いほか、内惑星系では失われた氷など揮発性元素の測定が期待され、太陽系形成過程にも制約を与えられる可能性がある。

参考文献：[1] Okada T. *et al.* (2017), LPSC, 48, #1828. [2] Kebukawa, Y. et al. (2017), LPSC, 48, #2221.

木星トロヤ群小惑星からのサンプル採取装置の開発

○岡本千里[1]，松本純[2]，大木優介[3]，柏岡秀哉[4]，青木順[5]，河井洋輔[5]，癸生川陽子[6]，矢野創[2]，岡田達明[2]，森治[2]

[1]法政大学,[2]宇宙航空研究開発機構，[3]東京大学大学院，[4]総合研究大学院大学，[5]大阪大学大学院，[6]横浜国立大学大学院

木星トロヤ群小惑星は木星と軌道を共有する小惑星群であり，D 型または P 型小惑星，彗星核と同程度の低アルベドを持ち，有機物を多く含む物質で覆われているとされる．その平均密度は 1g/cm^3 を切るものもあり，太陽から 5AU 以上離れた領域に存在するこの小惑星には，水氷や揮発性氷が存在する可能性が示唆されている．トロヤ群小惑星は，小惑星帯とカイパーベルトとの狭間にあるため，原始太陽系円盤内の Snow Line を超えた領域での揮発性物質分布，さらには後にそれを混合した巨大ガス惑星移動のプロセスを紐解く上で重要な情報を保持していると考えられる．

現在，ソーラー電力セイル探査機を用いた木星トロヤ群小惑星への探査が計画されている．この探査機は着陸機を持ち，トロヤ群小惑星からのサンプリングが可能となる．サンプリングを行う上で重要となるのは試料採取装置であり，装置仕様によりサンプル採取量や採取状態が大きく依存する．そこで本研究では，木星トロヤ群探査で実施予定のサンプリング装置開発を行った．木星トロヤ群小惑星からのサンプル採取・分析により，その起源と進化を明らかにすることは，太陽系形成時の物質分布や混合過程，天体移動プロセスの解明，地球生命の元となった有機物の起源を明らかにする上で非常に重要となる．

木星トロヤ群小惑星からのサンプル採取として，表面サンプリングに加え，小惑星表面を 1m 掘削する地下サンプリングを実施する．先行研究による熱進化モデル計算によると，自転軸の向きによって，地表から～1m で，氷が安定に存在しうる領域が存在する可能性がある(Guilbert-Lepoutre 2014)．1m の掘削を行うことにより，宇宙風化を受けていない有機物や表面に存在できない揮発性の高い氷を採取できる可能性がある．サンプリング装置として表面サンプリング及び地下サンプリングのためのデバイスを 2 種類搭載する．表面サンプリングでは，はやぶさ，はやぶさ２と同様の弾丸射出機構による表面クレータリングを実施する．地下サンプリングでは，ガス圧により伸展する Pneumatic Drill 方式を採用した掘削デバイスを新規開発し，地下 1m（レゴリス層を仮定）のサンプルを採取することを目指す．採取された地下サンプルは掘削デバイス内部を通り質量分析器へと運ばれ，その場分析が実施される．本研究では，表面サンプリング装置及び地下サンプリング装置の試作を行い，機能試験を実施した．開発されたサンプル採取装置により，トロヤ群小惑星の表層から地下 1m までの物質に含まれる情報が明らかにすることが期待できる．

小惑星イトカワの表面に見られる白色地域の成因

○ 北里宏平[1], 平田成[1], 出村裕英[1], 稲澤朋生[1], 安部正真[2], 山本幸生[2], 三浦昭[2], 川口淳一郎[2]

[1]会津大学, [2]宇宙航空研究開発機構

2005 年にはやぶさ探査機が訪れた S 型小惑星イトカワの表面には，画像上で白く見える，反射率の高い地域が斑らに存在している．この白色地域は，宇宙風化（太陽風や微小隕石による光学特性の変化）が他の場所と比べて進んでおらず，比較的最近になって表面に露出した場所であることが，その場での分光観測とはやぶさが地球に持ち帰った試料の分析から明らかになった．しかし一方で，そのような場所がどのようにしてできたかは未だ明らかになっていない．これはイトカワの形成史だけでなく，地球近傍に存在する Q 型小惑星（未風化な S 型小惑星）の起源にも関係する問題である．

本研究では，白色地域の中でも特に反射率の高い「シラカミ」地域に着目し，その成因を調べるため，はやぶさに搭載された NIRS（近赤外分光計）と AMICA（可視多色カメラ）の観測データを使い，「シラカミ」と，それと隣接する「Muses-C」の解析を行った．これらの地域はイトカワのネック部分に位置しており，従来は NIRS の解析に有効なデータがないという問題が存在した．しかし最近，はやぶさのタッチダウン時の軌道が復元されたことにより[1]，その時の NIRS のデータが新たに利用できるようになった．そのデータを含めた解析から，(1)「Muses-C」には「シラカミ」から放出された未風化な物質が堆積していること，また，(2)「シラカミ」の反射スペクトルは LL コンドライトのそれとよく一致することが明らかになった．これらのことから，「シラカミ」は極めて最近（宇宙風化の影響が顕著にならない時間内で）起きた表面剥離によって白色化したと考えられる．

さらに我々は，「シラカミ」に隕石が衝突したような痕跡が見られないことから，それ以外の成因として考えられる，日射による熱風化について調べるため，イトカワの熱解析を行った．熱風化には，昼夜の温度サイクルによる熱疲労と，急激な温度変化による熱衝撃の二つがあるが，解析の結果，「シラカミ」は他の場所と比べて昼夜の温度差は大きくないものの，瞬間的な温度変化がイトカワの表面上で最も大きくなることがわかった．これは「シラカミ」が地形の作る影に入り，影から出たところでいきなり南中した日の光を浴びるような場所になっているためである．その温度変化率が実験的に求められている亀裂発生の閾値よりも十分に高いことから，「シラカミ」の表面剥離は熱衝撃が主因となって起きたと推測される．

参考文献:

[1] 三浦昭ほか, 2015, 宇宙科学情報解析論文誌, 4, 173-183.

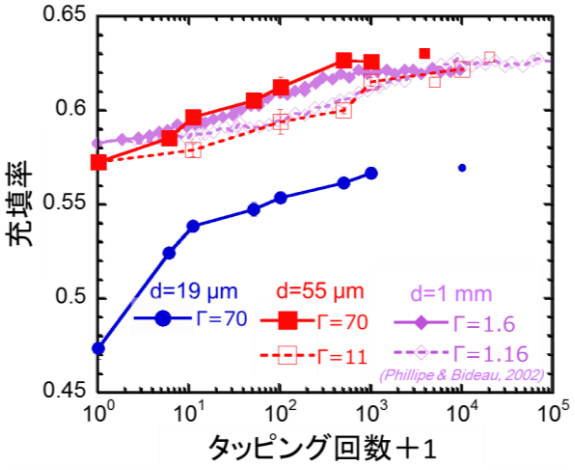
E18

小天体表層の振動圧密特性に関する実験的研究—粒子間力の効果

○大村知美，中村昭子
神戸大学大学院理学研究科

表層に記録されたクレーターより，小天体は多数の衝突を経験していることがわかる．衝突による振動はレゴリス層を流動化させ，地形の緩和やブラジルナッツ効果による岩塊のサイズ分級，物質の混合，また圧密を引き起こすと考えられている*(e.g. Richardson et al., 2004; Murdoch et al., 2015; Tomeoka and Ohnishi, 2015; Heiken et al., 1991)*．振動による粒子層の変化の指標には重力で規格化された振動加速度である Γ というパラメータが用いられる．例えば粒子層の対流が起こるのは Γ＞1 の条件下である*(e.g. Garcimartin et al., 2002)*．また振動を受けた粒子層の充填率は振動を受けた回数と共に増加し，あるところで平衡に達するが，最終的な充填率と充填のタイムスケールもまた Γ で特徴付けられる*(e.g. Phillipe and Bideau., 2002; 2003)*．ただしこれらの知見は地上重力下で mm サイズの粒子を使って得られたものである．同じ重力下であれば，理論的には直径が小さいほど重力に対し粒子間力が支配的になる．直径が μm サイズの有機粉体を用いた実験では，最終的な充填率は構成粒子に働く粒子間力と加速度による力の比で決まることがわかっている*(壇上，大塚，1980)*．ここから，構成粒子に働く粒子間力が十分に支配的な粒子層の圧密を考える場合は粒子間力をパラメータとして扱う必要性が示唆される．重力加速度が非常に小さい小惑星上ではレゴリス層の流動特性に粒子間力が影響することが考えられる．

本研究では粒子間力が支配的に働く粉体層の圧密特性に着目した．直径 19 μm と 55 μm の球形ガラス粒子を試料として用いた．試料はふるいを通して容器にすり切り充填し，振動は容器の自由落下によるタッピングで与えた．タッピングによる振動加速度は容器に取り付けた加速度計で記録した．実験は Γ＝11, 28, 70 の振動加速度で行った．任意の回数タッピングを行った後の試料の充填率を測定し，各試料，加速度においてタッピング回数と充填率変化の関係を調べた．実験結果の一部と先行研究より得られた圧密曲線を図に示す．直径 19 μm の粒子の最終的な充填率は他の試料よりも小さかった．また振動加速度が大きいほど充填のタイムスケールは短かった．直径 55 μm の粒子の圧密曲線と直径 1 mm のガラス粒子を用いた先行研究より得られた圧密曲線はよく似ているが，それぞれの圧密曲線が得られたときの加速度の大きさはオーダーで異なった．すなわち同じ振動加速度ならば直径 55 μm の粒子の充填タイムスケールは直径 1 mm の粒子のそれよりも長いことになる．これらは粒子間力の影響によると考えられる．粒子間力は最終的な充填率に影響するのみならず，充填のタイムスケール，ひいては振動による流動のタイムスケールを長くすることが示唆される．



凹凸表面のボンドアルベドの数値計算

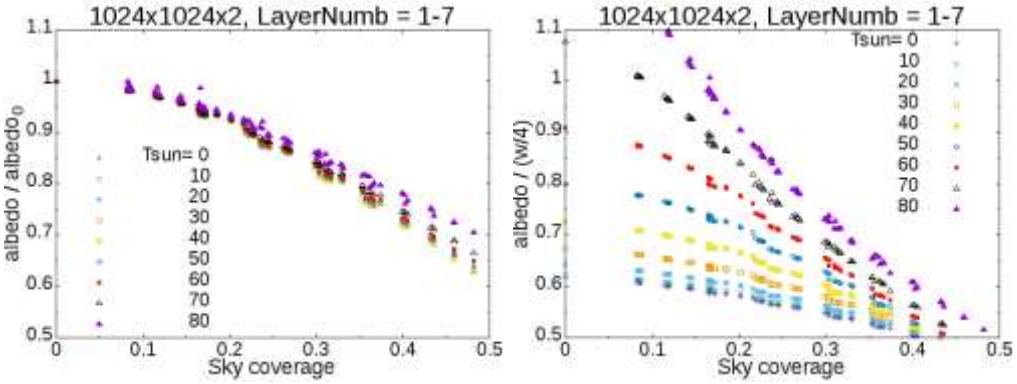
Numerical study on the bond albedo of rough surfaces

千秋博紀 [1]，諸田智克 [2]，横田康弘 [3,4]，坂谷尚哉 [5]
[1] 千葉工業大学, [2] 名古屋大学, [3] 高知大学, [4] 宇宙航空研究開発機構, [5] 明治大学

H. Senshu[1], T. Morota[2], Y. Yokota[3,4], and N. Sakatani[5]
[1]PERC/Chitech, [2]Nagoya Univ., [3]Kochi Univ., [4]ISAS/JAXA, [5]Meiji Univ.

大気を持たない月や小天体の表面温度分布は，太陽からのエネルギーと，表面からの熱輻射，地下への熱エネルギーの伝搬とのバランスで決まる．通常，これらの影響は，ボンドアルベド（エネルギー吸収率），熱輻射率，熱慣性といった物性値を用いて評価される．しかし実際には，表面での熱収支には表面形状が影響する．例えば太陽によって照らされる天体表面は，凹凸によって見た目の明るさが変化する．太陽からの入射エネルギーの大部分は可視光の波長領域であることと考えあわせると，熱収支に表面形状が影響していることを想像するのは難くない．

そこで我々は，数値計算によって凹凸をもつ面を作り，その面の見た目の明るさを全方位積分することで，面の凹凸の影響によって太陽エネルギーの吸収率（ボンドアルベド）がどのように変化するのかを求めた．凹凸面は，真上から見ると正三角形を敷き詰めたようになっており，各頂点の高さをランダムに変化させることで作り出している．各面素の散乱特性としてはなるべく単純なモデルとして，ほとんどの先行研究で用いられている Lambert 散乱と，天体表層の観測結果を解釈する際によく使われる Hapke モデルの中で用いられている Lommel-Seeliger 散乱の二通りを仮定した．結果を次の図に示す．



図：左が Lambert の場合，右が Lommel-Seeliger の場合のアルベド．横軸は凹凸の程度を表すパラメタ．Tsun は太陽入射角

これを見ると分かるように，アルベドは面素の位相関数にどちらのモデルを採用するのかによって値が大きく異なる．また特に Lommel-Seeliger では，面のボンドアルベドは太陽入射角によっても大きく変化する．これはローカルタイムによってエネルギー吸収率が異なることを意味しており，表面温度進化に関する先行研究で行われてきたような，アルベド一定の仮定で得られた結果は見直す必要があるだろう．

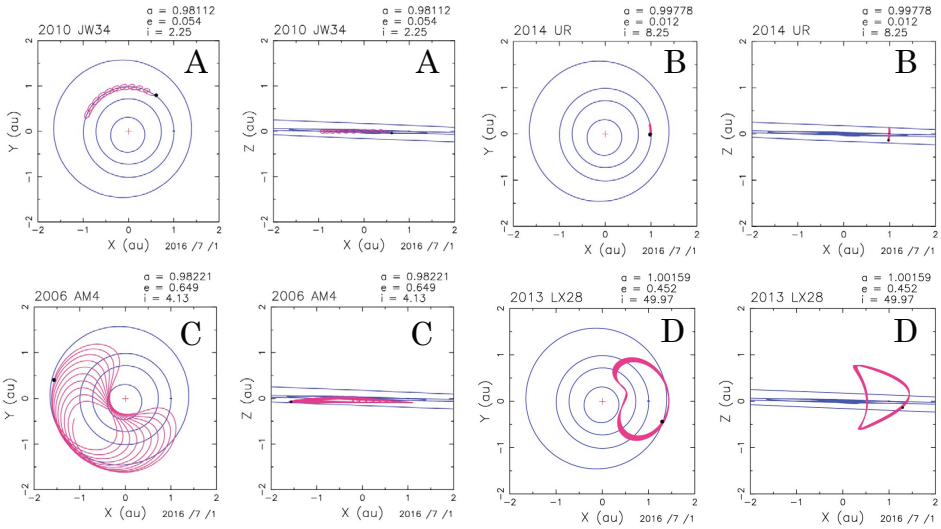
E20

地球とほぼ同じ公転周期を持つ小惑星の軌道運動と探査の可能性

○吉川 真[1]、津田 雄一[1]、浦川 聖太郎[2]
[1]JAXA、[2]日本スペースガード協会

最近、小惑星の発見が急速に進み、現時点（2017 年 8 月）で約 74 万個の小惑星が発見されている。それに伴って地球の軌道に近い軌道を持つ小惑星もかなり存在していることもわかってきた。本研究では、地球とほぼ同じ公転周期を持つ小惑星の軌道運動の特徴を調べたが、公転周期がほぼ 1 年という共通の特徴の元で地球に相対的な軌道はかなり多岐にわたっていることがわかった。

ここでは 2016 年 7 月の時点で Minor Planet Center が公開していた約 72 万個の小惑星リストより公転周期が 1 年に近い（つまり、軌道長半径が 1au に近い）ものを抽出してしらべてみた。軌道長半径が 1au±0.02au のものは 207 個存在しており、さらに軌道長半径が 1au ±0.002au のものは 16 個あった。これら 207 個の小惑星について二体問題近似で今後 10 年間の地球に相対的な軌道を調べてみた。そのいくつかの例を下の図に示す。



地球が(1,0)の位置に固定されている回転座標系にて、10 年間の小惑星の軌道を示した。それぞれの図について左が黄道面に投影した軌道で、右が黄道面に垂直な面に投影した軌道である。惑星の軌道（水星～火星）はおよその位置を参照するために描いたものである。

軌道長半径の 1au からのずれが大きい場合（A、C）、小さい場合（B、D）、軌道離心率が大きい場合（C、D）、軌道傾斜角が大きい場合（D）などいろいろな組み合わせで、地球に相対的な軌道がいろいろ存在することが分かる。これらは地球軌道に近いとか地球に対する相対的な軌道があまり変化しないという特徴があるので、有人活動のベース基地に使うとか、太陽系の内側の領域を通過するプローブとして使うなどの利用が考えられよう。もちろん、科学探査や資源探査の可能性も十分考えられる。これらの天体へ探査機が送られたことはないので、探査機を送る可能性についても検討してみたい。

地球衝突天体を発見した時、我々はどのように対応すべきか

◯浦川　聖太郎[1]、奥村　真一郎[1]、大塚　勝仁[2]、吉川　真[3]

[1]日本スペースガード協会、[2]国立天文台、[3]JAXA

小惑星や彗星の地球への衝突は、我々が直面する最大の自然災害と言える。天体の地球衝突問題を扱う活動は、スペースガードあるいはプラネタリーディフェンスと呼ばれている。スペースガードを行うためには、観測的手法により小惑星や彗星を発見することが第一に重要となる。また、地球への衝突確率を推定するには軌道力学的な知見が必要となり、地球へ衝突した時の被害を推測するには、衝突の科学が重要な役割を果たす。天体の軌道をずらすことで衝突回避を行うなら、探査機ミッションの技術や経験も欠かすことができない。このように考えると、惑星科学のあらゆる知見がスペースガードに関わっている。さらに、科学的視点を超えた議論も大切となる。仮に直径300m程度の小惑星が、東京に衝突した場合、関東地方全体が壊滅する。東京に小惑星が衝突するということは、単に地域が壊滅するだけでなく、世界の経済に壊滅的な影響を与えることとなる。もし、東京のような大都市への小惑星衝突が現実なものとなれば、世界の多くの機関が衝突を避けるための英知を集めてくれるであろう。それでは、どの程度の規模の都市まで、世界は救ってくれるであろうか?そして、その判断は、どこで誰が行うのであろうか?このような問題に対する議論は国内でほとんど行われていないのが現状である。

また、2017年3月に隕石落下と疑われる衝突痕が青森県の私有地で見つかる事象が発生した。これまでのところ、隕石は発見されていないが、仮に学術的価値の高い隕石が発見された場合、科学研究へ活用するための手続きは誰がどのように行うべきであろうか?隕石落下に対する具体的な対応方法も存在していないのが現状である。 本講演では、地球衝突天体問題の現状を述べ、地球衝突天体が発見された時、我々科学者がどのように対応すべきか議論を行う。

E22

小惑星帯の起源(マルチインパクト仮説 Abduction による)

木星の重力により惑星に成れなかったと云う迷信を排し，

イトカワ等の分化した小惑星の謎を解明

種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2017 -9

<迷信> 小惑星帯位置では外側軌道の巨大質量惑星(木星)の影響で惑星に成れなかった．

そこで，*惑星に成れなかった始源的な物質探査を小惑星帯に計画するという人も居る*(笑い)．

<思考実験>

1. 惑星集積理論では萬有引力による相互衝突(相対速度が小さい)により，公転周期の小さい(内側)ものから合体して内側軌道にシフトして行く．内側から惑星形成．
2. セレス位置に惑星が集積する時に巨大質量木星は形成されていない．
3. 惑星内部以外に分化するメカニズムも知られていない．迷信は 1～3 等，矛盾が多い．
4. マルチインパクト仮説では惑星 CERRA の木星摂動で断裂し小惑星帯の起源と成った
5. マルチインパクト仮説は，月やプレートテクトニクスの起源を含めて検証可能である．

<小惑星帯の特徴>

1. **小惑星帯の軌道エネルギー⇒セレス[ﾃｨﾃｨｳｽ・ﾎﾞｰﾃﾞの法則]位置を中心に分布**
2. 太陽を片側焦点とする楕円軌道が多い．
3. 惑星と略同一方向に回転している．
4. **小惑星帯起源とされている地球隕石が多い．**
5. **地球隕石の大半は分化したものが多く，イトカワの様に石質隕石の集合体も有る．**
6. ***微惑星の合体進化を想定すると，セレス位置に分化した惑星の形成が推定される．***
7. ***マルチインパクト仮説***では，セレス位置に分化した原始惑星 CERRA を仮定して，その外側の巨大質量惑星が形成されると，木星摂動により CERRA 軌道が偏平化して，木星衝突直前に潮汐断裂し**トレーン小惑星と成る．⇒地球衝突⇒月射出，海洋底の起源**
8. **トレーン小惑星以外の破片⇒小惑星帯の起源と成る．*(1～7 の全ての性質を満足する)***

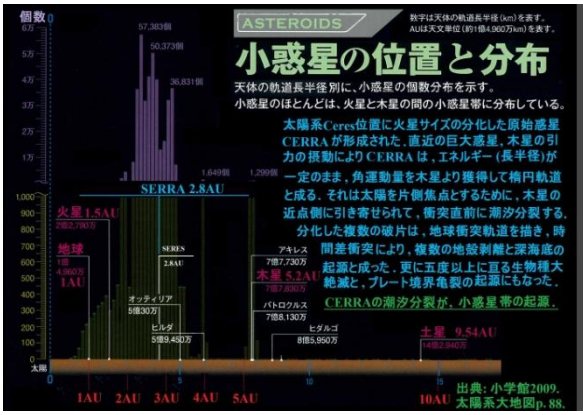


図 1.小惑星の位置と分布，セレスと略一致

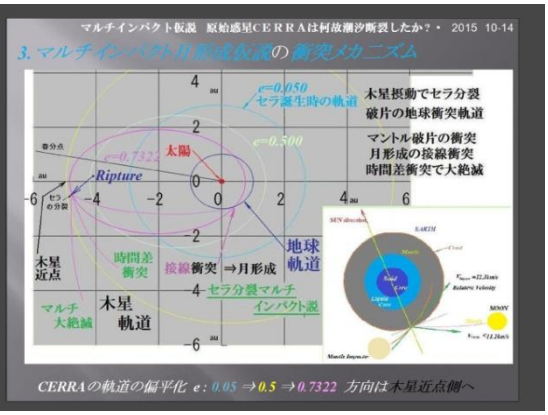


図 2. CERRA 軌道偏平化と潮汐断烈

結論 **マルチインパクト仮説では Abduction により，小惑星帯の起源の全てが説明可能．**

P1

TRAPPIST-1 系地球型惑星からの水蒸気大気の流体力学的散逸

○渡辺 健介[1], 倉本 圭[1]

[1]北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻

近年, 赤色矮星 TRAPPIST-1 に 7 つの系外惑星が発見され, 少なくとも内側の 6 つは地球と似た質量と大きさを持つ地球型惑星と推定され, 複数個の惑星がハビタブルゾーン内に位置している. またこれらの惑星はスノーライン付近で形成され, 内側に移動してきたことが理論的に示唆されており, 少なくとも形成時点においては水を豊富に保持していた可能性がある. 赤色矮星まわりのハビタブルゾーンは中心星の光度進化によって内側に移動してきたとされ, それに伴い現ハビタブルゾーン内にある地球型惑星は, 過去に暴走温室状態にあり, 中心星の EUV 放射によって水蒸気大気の流体力学的散逸を起こしていた可能性がある. そのため, TRAPPIST-1のハビタブルゾーン内に存在する地球型惑星が液体の水を保持しているかどうかは, 初期の獲得水量と, これまでの流体力学的散逸の規模に依存する.

これまで半解析的な大気散逸モデリングを用いて TRAPPIST-1 系からの水素散逸率の推定が試みられており, 例えば TRAPPIST-1 d では系の年齢を通じ 3 – 7.5 地球海洋質量分の水素が失われたと推定されている (Bolmont et al. 2017). しかし従来のモデルでは水蒸気による放射冷却効果や光解離により生じる多数の大気成分による相互作用が取り入れておらず, 散逸量、大気成分の分別、現在の大気構造の観測可能性などについて不明な点が多い.

そこで本研究では, 多成分大気の一次元流体力学的散逸モデルを構築し, 水蒸気による冷却効果や分子種間の化学反応過程を取り入れ, 水蒸気大気からの大気散逸率を推定した. 流体力学的散逸の駆動源となる EUV 放射強度は TRAPPIST-1 のような M8 型の低質量恒星に対しては観測されていないため, Chandey et al. (2015) の EUV と X 線の関係, そして Guinan et al. (2016) の早期型 M 型星の年齢と X 線の関係を用いて EUV 放射強度の進化曲線を推定した. 早期型 M 型星と M8(晩期)型星の X 強度のスケーリングは TRAPPIST-1 や同じ M8 型の VB10 の観測値を参考にする. TRAPPIST-1 で観測された X 線強度は, より若く理論的により X 線が強いはずの VB10 よりも 20 倍程度大きく, 一時的な増光を捉えた可能性も指摘されている. このような X 線強度の不確定性があるため, ここでは両星の観測値に基づく, 二通りの X 線強度進化曲線を与えた.

今回はハビタブルゾーンの内縁付近に位置する TRAPPIST-1 d を対象に数値計算を行った. この惑星表層に現在も水が存在すれば, より外側のハビタブルゾーンに位置する惑星にも水が残っているはずである. 数値計算の結果, 主に EUV 吸収を起こす高度領域において水蒸気による放射冷却が効き, 散逸率が抑えられることが分かった. 水蒸気は計算領域下層で光解離し, 上層では分子量の小さい大気成分が主要となる. 現在の地球の 10 倍以上の EUV 放射を与えた場合 (ちなみに TRAPPIST-1 の X 線強度観測値は約 200 倍の EUV 放射に相当), 酸素は質量分別を起こさず水素と共に逃げることが分かった. 得られた結果から, 水素の総散逸量を推定する. TRAPPIST-1 の X 線強度から推定した EUV 放射を与え, 3 Myr から 1 Gyr まで時間積分すると, 68 地球海洋質量相当の水素が逃げ, VB10 の観測結果を用いたモデルだと 0.9 地球海洋質量相当の水素が逃げる結果となった. 後者の EUV 進化曲線を適用した場合, 惑星形成初期において地球同様の質量比 (地球海洋質量の数倍以上) の水を獲得していたなら, そのほとんどが惑星に残っている可能性がある.

P2

CAI の Al-Mg および Li-Be-B 同位体比から探る原始太陽系円盤進化

福田航平[1], ○比屋根肇[1], 藤谷渉[2], 高畑直人[3], 鹿児島渉悟[3], 佐野有司[3]
[1]東京大学大学院理学系研究科, [2]茨城大学理学部, [3]東京大学大気海洋研究所,

^{10}Be は半減期約 140 万年で ^{10}B に壊変する短寿命放射性核種であり、原始太陽系円盤進化の最初期段階に存在していた可能性が指摘されている[McKeegan et al., 2000]。これまで、初期太陽系における ^{10}Be の起源として、太陽由来の高エネルギー宇宙線による核破砕反応説が有力視されてきた。しかし近年、重力崩壊型の超新星爆発に伴ったニュートリノ反応によって ^{10}Be が生成し得ることが示され[Banerjee et al., 2016]、^{10}Be の起源に再考の余地が出てきた。そこで本研究では、CAI の ^{10}Be 存在度を決定し、さらに ^{10}Be の生成に伴って変化しうる他の同位体系（リチウムおよびホウ素）を組み合わせ、かつ超新星爆発に伴って生成しやすい ^{26}Al 存在度を決定することで、^{10}Be の起源に関して議論することを目的とした。

本研究では、太陽系の比較的外側で形成した可能性が指摘されている CH コンドライト隕石中の CAI に着目した。同位体比分析には大気海洋研究所設置の二次イオン質量分析計（NanoSIMS 50）を用いた。８つの CAI を分析した結果、^{10}Be/^{9}Be 比は 0 〜 33×10^{-4} と従来の理解よりも高いかつ大きなバリエーションを示した。一方、Li 同位体比は ^{10}Be/^{9}Be 比によらず、すべてコンドライト的な値を示した。今回得られた ^{10}Be/^{9}Be 比の大きなバリエーションは、先行研究同様に初期太陽由来の宇宙線照射による不均一な ^{10}Be 生成説を支持する。しかし、Li 同位体比がコンドライト的なことから、^{10}Be は CAI 形成後の宇宙線暴露ではなく、CAI の原料となる円盤ガスの宇宙線暴露によって生成したことを示唆する。また、Al-Mg 同位体比分析の結果、すべての CAI は ^{26}Mg（^{26}Al の壊変によって生成）の過剰を示さなかった。CH コンドライト中の CAI は太陽系に ^{26}Al が持ち込まれる前の活発な太陽活動の痕跡を記録しているのかもしれない。

P3

原始惑星系円盤での乱流拡散によるダストアグリゲイトの焼結

○児玉季里子[1]，城野信一[1]
[1]名古屋大学大学院環境学研究科

原始惑星系円盤はガスとダスト微粒子で構成されている．ダスト微粒子の付着成長が惑星形成の第一ステップであるので，ダスト微粒子が付着成長できるか否かを知ることは重要である．ダスト微粒子には氷ダストと岩石ダストがあり，本研究で注目している氷ダストアグリゲイトは，加熱されると焼結が進行する．焼結したダストアグリゲイトは衝突すると跳ね返り成長できなくなるので，焼結の進行が惑星形成の初期に影響する．

原始惑星系円盤では，熱源は中心星の可視光照射である．赤道面付近のダスト微粒子によって照射は遮られるため，円盤の光学的表面のダスト微粒子のみ加熱される．そのため，乱流によって氷ダストアグリゲイトが高温である円盤の光学的表面付近に輸送されると，焼結が進む可能性がある．

Sirono, (2011, ApJ, 735, 131)では，赤道面での温度分布から焼結が進行するのに必要なタイムスケールが示されている．しかし，先行研究では氷ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動は考慮されていない．そこで本研究では，数値シミュレーションにより各ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動を算出し，乱流輸送を考慮した焼結に必要なタイムスケールと焼結したダストアグリゲイトの鉛直方向分布を求めた．

ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動は乱流による拡散と，中心星の重力による沈降の２つである．乱流拡散と沈降を数値シミュレーションで再現することで，各ダストアグリゲイトの運動を算出する．沈降タイムスケール程度の時間が経過すると，ダストアグリゲイトの分布は定常状態になる．定常状態においても，各ダストアグリゲイトは円盤内鉛直方向を動き，高温である円盤の光学的表面に到達すると焼結する．そのため，焼結したダストアグリゲイトの数は時間とともに増加する．数値シミュレーションによって，高温領域を経験し，焼結したダストアグリゲイトの割合を算出し，そこから焼結に必要なタイムスケールを得ることができる．

焼結タイムスケールは円盤の光学的表面が下がるにつれ短くなる．円盤の光学的表面までの距離はオパシティに依存しているため，ダストアグリゲイトの成長につれオパシティは低下し，先行研究の焼結領域に加えて新たな焼結領域が出現することが期待される．しかし，小さいダストアグリゲイトが少量でも存在すると，円盤の光学的表面は十分に下がらない．大小２つのサイズのダストアグリゲイトを混ぜて，Watanabe & Lin, (2008, ApJ, 672, 1183)の式から出した円盤の光学的表面の高さから算出される焼結タイムスケールは 1000/Ω 以上である．これはダストアグリゲイトが成長するまでの時間と比べて大きいため，ダスト微粒子の初期成長に乱流拡散による焼結はほとんど影響しない．また，焼結したダストアグリゲイトの鉛直方向分布は，はじめ光学的表面に存在していた２つのピークが赤道面付近における単一のガウス分布に近づくように進化することがわかった．つまり，焼結したダストアグリゲイトは赤道面に沈降し，外側から落下してきた大きなダストアグリゲイトに衝突付着することで消失してしまう．これはダストアグリゲイトの沈降タイムスケールが焼結タイムスケールより短いためである．これらのことから乱流拡散による焼結の影響は無視できることがわかった．

P4

高解像度三次元流体シミュレーションによる周惑星円盤のサイズ推定

○波々伯部 広隆[1] 町田 正博[1]
[1]九州大学

原始惑星の質量は惑星形成過程を制約するための重要な情報を含んでいる．したがってその値を観測から推定する手法を確立することは重要である．近年，原始惑星系円盤のギャップが直接観測されるようになっており，将来的には周惑星円盤が観測されることが期待される．

そこで，観測量である周惑星円盤の半径と，原始惑星質量との関係を調べるために，高解像度の局所三次元流体シミュレーションを行った．計算コードにはnested gridを並列化して用いた．並列化により，最大解像度のグリッドに周惑星円盤全体を収めた上で，現実的な時間内に複数のパラメータで計算を実行できるようになった．

惑星周辺の流れ場の計算を行う場合には，しばしば惑星近傍では重力を緩和するということが行われるが，周惑星円盤の半径程度の位置では緩和の影響を無視できない．そこで本研究では，重力源に接するセルをsinkとし，その強さを近傍のセルから動的に決定するようにした．これにより定常解を得ることができた．

本発表では，このシミュレーションによって得られた周惑星円盤半径と惑星質量の関係式について報告する．またヒル半径がスケールハイトの約0.8倍のときに，その関係が切り替わることがわかったため，それらの結果を比較する．

P5

GPUを用いた超高解像度の惑星形成N体シミュレーション

岩澤全規[1], 堀 安範[2,3], 押野 翔一[4], 藤井 通子[5]

1 理化学研究所 計算科学研究機構, 2 自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター
3 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室, 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 理学系研究科 天文学専攻

我々はツリー法とエルミート積分を組み合わせたハイブリッド・並列N体計算コード(PENTA**C**LE)を開発した。PENTA**C**LEではFDPSライブラリの導入で、粒子シミュレーションの並列化を実現し、最大1000万体の惑星形成シミュレショーンが可能となった。現在、1億粒子以上の超高解像度N体計算に向けて、GPUクラスタに最適化した並列N体計算コード(PENTA**G**LE)を開発中である。本発表ではPENTACLEの性能を紹介したのち、PENTA**G**LEコードの開発状況および将来計画について紹介する。

GPU-accelerated High-resolution N-body Simulations for Planet Formation

Masaki Iwasawa[1], Yasunori Hori [2,3], Shoichi Oshino[4], Michiko S. Fujii[5]

1 Advanced Institutes for Computational Science, RIKEN,
2 Astrobiology Center, National Institutes of Natural Sciences
3 Exoplanet Detection Project, National Astronomical Observatory of Japan
4 Center for Computational Astrophysics, National Astronomical Observatory of Japan
5 Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo

We developed a fully-parallelized hybrid N-body code for planet formation (PENTA**C**LE: Iwasawa et al., submitted), implementing the P3T method (Oshino et al., 2011) and a multi-purpose platform for a parallelized particle-particle simulation (FDPS: Iwasawa et al., 2016) into it. PENTA**C**LE enables us to handle up to ten million particles for N-body simulations in a collisional system, using a present-day supercomputer. Toward a high-resolution N-body simulation with 100 million particles and beyond, we are now developing a parallelized hybrid N-body code optimized for a NVIDIA-based GPU cluster. We show the performance and capability of PENTA**C**LE and then, we introduce the current status of our GPU-accelerated N-body code (PENTA**G**LE) and our future plans, for example, a global simulation for water transport to the Earth in the protosolar nebula.

惑星の集積メカニズム

太陽系惑星の起源とティティウス・ボーデの法則の検証(アブダクションによる)

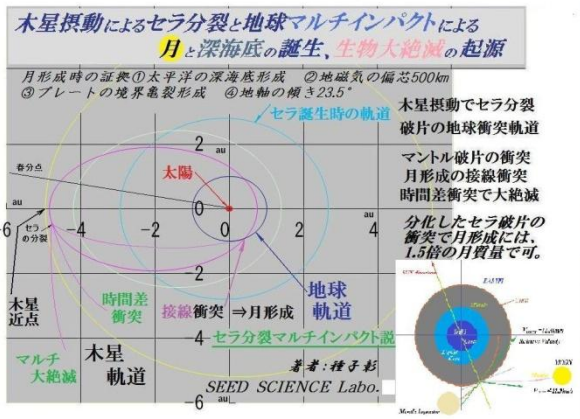
種子彰 TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2017 -9

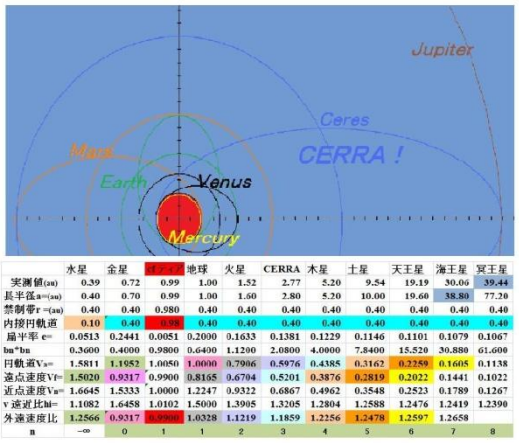
惑星集積メカニズムの謎

マルチインパクト仮説は，太陽系の起源の内，月と小惑星帯の起源と地球の海とプレートテクトニクスの起源と駆動力とプレートが他のプレートの下に潜り込み始める謎と駆動方向の急変や，地軸の傾きの起源を統一的にアブダクションで説明できた．しかし，太陽系の惑星相互の距離を示す法則=ティティウス・ボーデの法則は，経験的法則であり，未だに証明できていない．**ﾃｨﾃｨｳｽ・ﾎﾞｰﾃﾞ法則を検証できれば，太陽系の謎が全て解明できる．**

<ティティウス・ボーデの法則>

ティティウス・ボーデの法則では軌道半径は Rn=Re×(o.4+0.3×2**(n-1)) と表わされる．但し Re≒149 597870.700km: 一天文単位 n=1 水星 n=2 金星 n=3 地球 n =4 火星 n=5 セレス n=6 木星 n=7 土星 n=8 天王星 この辺で怪しくなってくる





	水星	金星	ｾﾚｽ	地球	火星	CERRA	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
実測値(au)	0.39	0.72	0.99	1.00	1.52	2.77	5.20	9.54	19.19	30.06	39.44
長半径a=(au)	0.40	0.70	0.99	1.00	1.60	2.80	5.20	10.00	19.60	38.80	77.20
禁制帯r=(au)	0.40	0.40	0.980	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
内接円軌道	0.10	0.40	0.98	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
扁平率 e=	0.0513	0.2441	0.0051	0.2090	0.1633	0.1381	0.1229	0.1146	0.1101	0.1079	0.1067
bn*bn	0.3600	0.4000	0.9800	0.6400	1.1200	2.0800	4.0000	7.8400	15.520	30.880	61.600
円軌道Vc=	1.5811	1.1952	1.0050	1.0000	0.7906	0.5976	0.4385	0.3162	0.2259	0.1605	0.1138
遠点速度Vf=	1.5020	0.9317	0.9900	0.8165	0.6704	0.5201	0.3876	0.2819	0.2022	0.1441	0.1022
近点速度Va=	1.6645	1.5333	1.0000	1.2247	0.9322	0.6867	0.4962	0.3548	0.2523	0.1789	0.1267
v遠近比bi=	1.1082	1.6458	1.0102	1.5000	1.3905	1.3205	1.2804	1.2588	1.2476	1.2419	1.2390
外速速度比	1.2566	0.9317	0.9900	1.0328	1.1219	1.1859	1.2256	1.2478	1.2597	1.2658	
n	-∞	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8

Fig1.マルチインパクト小惑星の誕生　　Fig2.ﾃｨﾃｨｳｽ・ﾎﾞｰﾃﾞ法則のメカニズム

軌道半径が一致している粒子は周期が一致しており衝突する事はあり得ない．
惑星の周期は軌道半径が小さいほど小さく，衝突合体する場合にも内側軌道から完了する．禁制帯半径より内側では衝突して全て太陽に合体する．此の法則は惑星相互の衝突合体の必要条件(速度差≒0km)を示している．**ティティウス・ボーデの法則**での N 番目の円軌道と，(N-1)番目の軌道離心率が増大して禁制帯に外接した時に，その楕円軌道の遠点は N 番目の円軌道と**略一致し且つ接線速度も略一致する．**つまり，(N-1)番目の軌道の周期が短かいので当然衝突すると合体して熱エネルギー分だけ速度が低下して更に**内側軌道と成る．**

この様にして，N 番目の円軌道から(N-1)番目の間のエネルギーを持つ小惑星は全て N 番目の円軌道に縮退する．**順次内側から合体してﾃｨﾃｨｳｽ・ﾎﾞｰﾃﾞ法則が検証できる．**

この様に**ﾃｨﾃｨｳｽ・ﾎﾞｰﾃﾞ法則を一度限りの進化の結果でアブダクションを用い検証できた．**

P7

コンドリュールの衝突放出過程による形成と集積

○ 松本侑士[1], 脇田茂[2], 長谷川靖紘[3], 押野翔一[2]

[1] みずほ情報総研, [2] 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト, [3]Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

近年の天体衝突における物質放出過程の研究により，衝突放出物の溶融による球状粒子形成過程が示された (e.g., Johnson et al., 2014)．この球状粒子の形成過程は微惑星の集積による惑星形成過程による副産物としてのコンドリュールの形成を示唆している (Johnson et al., 2015)．隕石中のコンドリュールが微惑星の集積で説明付けられるのであれば，コンドリュールは微惑星集積の証拠である可能性がある．そこで我々は微惑星の成長に伴うコンドリュールの形成についての複数の方面から研究を行った．

微惑星の衝突時の放出物の溶融条件は Johnson et al. (2015) で調べられている．ここでは平面に微惑星を衝突させる，原始惑星-微惑星衝突の描像での衝突を考慮しており，微惑星-微惑星での曲率を考慮した衝突は考えられてはいない．また未分化な微惑星への衝突は始原的な組成のコンドリュール (Scott & Krot 2005) を再現する上で重要である．そこで Wakita et al. (2017) では微惑星同士の衝突による球状粒子形成の条件を iSALE による数値計算から導いた．微惑星同士の衝突でも原始惑星との衝突と同様に球状粒子が形成されることがわかった．特に 3 km/s を越えるような速度での衝突ではより小さい標的からより多くのコンドリュールが形成しうることがわかった．我々は寡占成長期における微惑星の衝突放出による球状粒子形成でコンドリュールの形成タイムスケール (CAI 形成から 1-3Myr 後, Connelly et al., 2012) を説明できる円盤と初期微惑星質量のパラメータレンジを示した (Hasegawa et al., 2016a)．形成したコンドリュールが隕石中に発見されるためには微惑星に集積される必要がある．そこで衝突による球状粒子の形成時に，球状粒子がペブル集積により微惑星に集積されるのかどうかを調べた．微惑星が散乱され傾斜角が大きくなるとペブル集積の効率が低下する (Levison et al., 2015)．Hasegawa et al. (2016b) では微惑星の鉛直方向の軌道の幅と球状粒子のスケールハイトを比較することで球状粒子の形成と効率的な集積が可能なパラメータを求めた．

寡占成長期には，コンドリュールは微惑星だけでなく原始惑星によっても集積されるため，微惑星によるペブル集積条件を満たしていても微惑星が十分なコンドリュールを集積できるとは限らない．Matsumoto et al. (2017) では寡占成長期にある原始惑星と微惑星に対してコンドリュールの集積量を求めた．Hasegawa et al. (2016a, b) を参考にした標準パラメータの場合，形成したコンドリュール質量の半分が原始惑星に集積された．微惑星が集積するコンドリュールは微惑星質量が小さく，円盤面密度が大きいほど多くなった．集積したコンドリュールは微惑星上に降り積もり，その半径の $\sim 10^{-3}$ 程の層を形成する．これは隕石中のコンドリュール割合 $\sim$ 20-80%(Scott & Krot 2005) に比べて非常に小さい．しかし，衝突時に放出される物質は表層の $\sim$ 100 m 程度が占めていること (Wakita et al. 2017) を考慮すると，表層の薄いコンドリュール層は十分に隕石中のコンドリュールの質量割合を説明できる可能性がある．

P8

地球型惑星形成：水星・金星・地球・火星の同時形成の条件の解明

Terrestrial Planet Formation: Revealing the conditions for simultaneous formation of Mercury, Venus, Earth, and Mars

○パトリック ソフィア リカフィカ(Patryk Sofia Lykawka)[1]、伊藤 孝士(Takashi Ito)[2]

[1]近畿大学 総合社会学部(School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University)

[2]国立天文台 (National Astronomical Observatory of Japan)

Even after decades of theoretical studies on terrestrial planet formation, the simultaneous formation of the four terrestrial planets remains elusive (e.g., **Jacobson & Walsh 2015**). In particular, the formation of Mercury has been neglected in previous works. In addition, other important constraints in the inner solar system must be satisfied at the same time: absence of planets and one dwarf planet in the asteroid belt, origin of the Moon (timing), origin of water on Earth and the other terrestrial planets, orbital distribution of asteroids, among others.

In order to address these unsolved questions, we investigated the influence of the giant planets migration and resonance crossings among them in terrestrial planet formation (**Lykawka & Ito 2013**). More recently, for the first time in planetary sciences, we performed dedicated simulations to better understand the formation of Mercury (**Lykawka & Ito 2017**). Although these studies allowed us to constrain the dynamical behavior of Jupiter and Saturn, and the primordial disk conditions needed to reproduce Mercury, they could not satisfy all the constraints discussed above. As part of our new larger-scale project, we investigated terrestrial planet formation by performing new comprehensive N-body simulations, which contained embryos and disk planetesimals representing a primordial protoplanetary disk. To investigate the formation of Mercury and Mars, these simulations considered both mass depleted regions and truncation in the disk.

Our preliminary results show that Venus, Earth, and Mars analogs (considering both orbits and masses) successfully formed in several runs. Also, system containing Mercury analogs were obtained in lesser runs. To our knowledge, this is the first time a model is capable of reproducing the four terrestrial planets in the same individual systems. We will discuss the disk initial conditions that favor the successful formation of 3- or 4-terrestrial planet systems, and the main properties of the obtained Mercury, Venus, Earth, and Mars analogs.

本研究は、H28 近畿大学・奨励研究の助成を受けたこと、感謝します。

P9

周惑星円盤が微惑星の軌道とサイズの分布に与える影響

○樋口有理可[1]、谷川享行[2]、渡邊誠一郎[3]

[1]国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

[2]一関高専

[3]名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

木星などの巨大惑星は周囲の微惑星を散乱する。散乱された微惑星の一部はオールト雲彗星になり、また一部は直接星間空間に放出される。微惑星を散乱する巨大惑星が周惑星円盤を保持している場合、周惑星円盤のガス抵抗は微惑星の軌道進化に影響を与える。具体的には、惑星散乱による微惑星の速度変化を小さくする。また、その影響は微惑星のサイズだけでなく、惑星への最接近距離に依存する。それは周惑星円盤の密度が惑星に近いほど高いからである。一方、惑星散乱による微惑星の速度変化は、惑星への最接近距離とある程度の関係がある。これら、周惑星円盤からのガス抵抗による減速と惑星散乱による速度変化をそれぞれ解析的に表し、微惑星が最終的に持つ軌道長半径の分布を推測する。また、その微惑星のサイズ依存を表し、軌道とサイズの関係を表す。そして、周惑星円盤からのガス抵抗を考慮した微惑星の軌道進化を数値積分で求め、解析解の予測と比較する。

P10

たんぽぽ計画における有機物曝露実験報告（第１報）

○小林憲正[1], 三田肇[2], 癸生川陽子[1], 中川和道[3], 青木涼平[1], 原田拓[1], 三澤柊介[1], 佐藤智仁[1], 内藤敬介[1], 横尾卓哉[1], 峰松沙綾[2], 石山公啓[3], 今井栄一[4], 矢野創[5], 橋本博文[5], 横堀伸一[6], 山岸明彦[6]

[1]横浜国大[1], 福岡工大[2], 神戸大[3], 長岡技科大[4], JAXA/ISAS[5], 東京薬大[6]

地球上での生命の誕生と宇宙との関連がさまざまな観点から議論されている。「パンスペルミア説」では，微生物の惑星間移動の可否が鍵となるし，生命の素となる有機物が宇宙塵により供給されたとする説の検証においては，宇宙塵中にアミノ酸などの生体関連有機物が存在するかどうかが重要となる。これらの検証を目的とした日本初のアストロバイオロジー宇宙実験「たんぽぽ計画」[1]は 2015 年 4 月にダスト捕集用のエアロゲル捕集パネルおよび微生物・有機物曝露パネルが国際宇宙ステーション(ISS)に向け打ち上げられ，きぼう曝露部の ExHAM に取り付けられて同年 5 月に実験が開始された。2016 年 8 月には，約 1 年間曝露された試料が地球帰還し，分析が開始された。本講演では有機物曝露実験の解析状況を報告する。

宇宙曝露された有機物は，グリシン，イソバリン，それらの前駆体（ヒダントイン，5-エチル-5-メチルヒダントイン），複雑態アミノ酸前駆体 CAW（模擬星間物質($CO+NH_3+H_2O$)の陽子線照射生成物で，アミノ酸前駆体を含む）の 5 種で，いずれも ^{13}C でラベルしたものを用いた。曝露円盤の小孔に水溶液として添加後，飛散防止のためヘキサトリアコンタン($C_{36}H_{74}$)で表面を覆った。曝露円盤には(1)MgF_2 窓，(2)石英窓をとりつけ，宇宙曝露した。さらに，(3)紫外線を遮って宇宙曝露した Dark Control，(4) ISS 与圧部に保管した Cabin Control，(5)地上で保管した Ground Control も作製した。紫外線強度は薄膜状のアラニンの分解により評価した[2]。帰還後，小孔中の試料はメタノールおよび水で回収後，そのまま，あるいは酸加水分解後，イオン交換 HPLC，逆相 HPLC，GC/MS などで定量した。

1 年間宇宙曝露後の有機物回収率は，地上実験で評価したが，太陽紫外線の影響が大きく，宇宙線の影響は少ない事が予測された[3]。アラニン線量計の解析結果は，約1年間の宇宙曝露で浴びた紫外線量が予想よりもかなり少なかったことを示したが，これはきぼう曝露部の建造物による影の影響と考えられる。CAW 中のアミノ酸の分解が限定的であったのは予想どおりであったが，グリシンの分解が予想よりも少なかったのは，ヘキサトリアコンタンにより波長 160 nm 以下の真空紫外線が吸収されたことが大きく影響したと考えられる。一方，ヒダントインの回収率は予想よりも大きく，分解の波長依存性や，宇宙真空下での揮発性による可能性について検討中である。2 年間宇宙曝露した試料はすでにきぼう与圧部内に取り込まれ，近々地球帰還する予定である。曝露実験の結果は，エアロゲルにより捕集されたダスト中のアミノ酸分析結果などとも比較し，宇宙塵による有機物の運び込みの評価を行う予定である。

引用文献

[1] Yamgishi A. *et al.* (2009) *Trans. JSASS Space Tech.*, *7*, Tk49-55.

[2] Izumi Y. *et al.* (2011) *Orig. Life Evol. Biosph., 41,* 385-395.

[3] Kobayashi K, *et al.* (2014) *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, *12*, No. ists29, Pp_1-6.

P11

弱還元型惑星大気中でのアミノ酸生成のエナジェティックス

○青木涼平[1]，伊勢絢一[1]，木下美栄[1]，福田一志[2]，
小栗慶之[2]，柴田裕実[3]，癸生川陽子[1]，小林憲正[1]
[1]横浜国立大学，[2]東京工業大学，[3]大阪大学

生命の誕生に先立ち、アミノ酸などの有機物が無生物的に生成したと考えられる。1953年、ミラーは、原始地球大気を模擬したCH_4、NH_3、H_2、H_2Oからなる強還元型混合気体に、雷を模擬した火花放電実験を行い、アミノ酸が無生物的に生成することを確認した[1]。しかし、現在では原始地球大気はこのような強還元型ではなく、N_2やCO_2などを主とし、これに少量の還元型ガス(CO、CH_4など)が加わった弱還元型大気であったことが示唆されている[2]。そこで本研究では、様々な混合比のN_2、CH_4、CO_2の混合気体に様々なエネルギーを与え、弱還元型惑星大気中でのアミノ酸生成の可能性について検討した。エネルギー源は、火花放電(雷を模擬)、陽子線(宇宙線を模擬)、紫外線の3種類を用いた。

実験　出発物質として、N_2(50%)、CH_4(0-50%)、CO_2(バランス)の混合気体(全圧700 Torr)と、超純水5 mLを用いた。以下、各混合気体はCH_4比率で表す。

＜火花放電実験＞ Pyrex製容器に混合気体700 Torrと超純水5 mLを入れ、テスラコイルを用いて1対のタングステン電極間で放電を12時間(1分間隔のON-OFFサイクルを24時間繰り返し)行った。全エネルギーは864 kJと試算された。＜陽子線照射実験＞ Pyrex製容器に混合気体700 Torrと超純水5 mLを入れ、タンデム加速器(東京工業大学)からの2.5 MeV陽子線を2 mC照射した。CH_4比率の低いCH_4 1%, CH_4 0.5 %などの実験も行った。全エネルギーは3.16 kJであった。＜紫外線照射実験＞ 石英窓のついたPyrex製容器に混合気体700 Torrと超純水5 mLを入れ、紫外線ランプ(浜松ホトニクスL1835)を用いて紫外線を12時間照射した。全エネルギーは136 Jと推定される。

放電もしくは照射後に、容器内の生成物(水溶液)を回収し、その一部を酸加水分解(6 M HCl中で110℃、24時間加熱)した後、陽イオン交換HPLC法(o-フタルアルデヒドとN-アセチル-L-システインによるポストカラム誘導体化-蛍光検出)を用いてアミノ酸の定量を行った。

結果と考察　どの実験生成物も、酸加水分解前はアミノ酸がほとんど検出されなかったが、酸加水分解後には、出発物質の組成により種々のアミノ酸の生成が確認できた。これは、各実験により、遊離アミノ酸ではなく、アミノ酸前駆体が生成したためと考えられる。グリシン(Gly)の生成量が最も多かったため、以後、加水分解後のGlyの生成量とエネルギー収率(G = 生成分子数/100eV)を中心に議論する。

火花放電実験では、CH_4比率10%以下ではGlyの生成は確認できなかったが、CH_4比率15%では少量(12.0 nmol; $G = 1.3\times10^{-7}$)のGlyの生成が確認され、CH_4比率50%では最も多く(3.64×10^{4} nmol; $G = 4.1\times10^{-4}$)のGlyが生成した。CH_4比率10%～15%間にアミノ酸生成の閾値があることが示唆された。

陽子線照射実験では、CH_4比率0.5%でもGlyが生成し(6.83 nmol; $G = 2.1\times10^{-5}$)、基本的にCH_4比率が大きくなるほど生成量が増えた。CH_4比率50%でのGly生成量は1.53×10^{4} nmol ($G = 4.7\times10^{-2}$)であり、エネルギー収率は火花放電より高かった。火花放電とは異なり、アミノ酸生成に対するCH_4濃度の閾値がないことが示唆された。

紫外線照射実験では、CH_4比率0-30%ではアミノ酸の生成は確認できなかった。しかしCH_4比率40%、50%では極微量生成した可能性があり、これがコンタミネーションかどうかを確認中である。

以上から、与えるエネルギーによってアミノ酸生成の傾向が異なり、その反応機構が異なる可能性が示唆された。実際の弱還元型惑星大気のCH_4比率は極めて低いと想定されるため、雷や紫外線をエネルギー源としたアミノ酸生成の可能性は低いと考えられるが、宇宙線であればアミノ酸前駆体が生成された可能性が高いと思われる。一方、紫外線単独では、弱還元型惑星大気からのアミノ酸生成は困難であるが、惑星に降り注いでいた紫外線のエネルギーフラックスは極めて高いため、紫外線と宇宙線や放電とのシナジー効果を検証する必要がある。

参考文献[1] S. L. Miller, *Science*, 117, 528-529, 1953. [2] J. F. Kasting, *Science,* 259, 920-926, 1993.

P12

水質変成におけるアミノ酸前駆体形成に対するガンマ線の影響

○三澤 柊介[1]、癸生川 陽子[1]、依田 功[2]、橘 省吾[3]、小林 憲正[1]
[1]横浜国立大学、[2]東京工業大学、[3]北海道大学

始原的な炭素質コンドライトにはアミノ酸などの有機物が含まれており、これらの有機物が原始地球において生命の原材料物質となった可能性が考えられている。隕石有機物の起源については様々な説が考えられているが、1つには隕石母天体での水質変質過程における形成が挙げられる。Cody らは、ホルムアルデヒドなど、彗星などにも豊富に存在する単純な分子を水熱することにより、隕石に含まれるものとよく似た高分子有機物の形成を示した[1]。また、同様の系にアンモニアを加えると、高分子有機物と共にアミノ酸が形成されることがわかった[2,3]。このような水質変質の熱源は、おもに 26Al の放射性崩壊であると考えられている。したがって、本研究では水質変質過程において 26Al の放射性崩壊により発生するガンマ線が有機物形成にどれだけ影響するかを調べることを目的とした。

出発物質として超純水 200 μL に対し、モル比が水:ホルムアルデヒド:アンモニア =100:5:5 になるように試験管に加え、試験管内を真空にして封緘したものに、東京工業大学の ^{60}Co 線源を用いてガンマ線を様々な線量率と時間で照射した。比較のためオーブンで加熱した試料も作成した。またホルムアルデヒドから糖を形成するホルモース反応の触媒となる $Ca(OH)_2$ を入れた系も用意した。照射あるいは加熱後の試料は酸加水分解をしてその前後について陽イオン交換 HPLC でアミノ酸分析をした。

酸加水分解を行った試料からは、グリシン、アラニン、β-アラニン等のアミノ酸が検出された。加水分解を行わない試料からはアミノ酸はほぼ検出されなかった。$Ca(OH)_2$ を含む系のアミノ酸生成量は、加熱試料の方がガンマ線照射試料よりも多かったのに対し、含まない系のアミノ酸生成量はガンマ線照射試料の方が加熱試料よりも多くなった。さらに加熱試料はグリシンに対するアラニンの量が比較的少ないのに対し、照射試料は比較的多かった。以上により、ホルムアルデヒドとアンモニア水溶液へのガンマ線照射によりアミノ酸前駆体が形成されることが分かった。また、形成されやすいアミノ酸の種類が加熱とは異なるため、ガンマ線による反応機構は加熱とは異なる可能性が示唆された。

[1] G. D. Cody et al., PNAS, 108, 19171-19176 (2011).
[2] Y. Kebukawa et al., Astrophysical J., 771, 19 (2013).
[3] Y. Kebukawa et al., Science Advances 3, e1602093 (2017).

P13

How diverse is macromolecular organic matter in the Solar System?

〇癸生川陽子[1]
[1]横浜国立大学大学院工学研究院

地球外有機物の直接的な分析は主に隕石を対象として行われてきた。特に 1969 年に落下した Murchison 隕石から多様な有機物が見つかって以来，これらに含まれる化合物の同定や不溶性有機物(insoluble organic matter, IOM)と呼ばれる複雑な高分子有機物の構造分析が盛んに行われてきた。2000 年代以降，隕石母天体における変成過程に対応した隕石有機物の多様性の一連の研究が行われるようになり，隕石有機物は母天体変成過程を読み解く鍵としても重要な地位を得てきた。微小試料の分析方法の発展と共に，Stardust 探査機によって持ち帰られた彗星塵サンプルの有機物分析が行われたことや[1]，惑星間塵(interplanetary dust particles, IDPs) [2]及び超炭素質南極微隕石(ultracarbonaceous Antarctic micrometeorites, UCAMMs) [3]など様々な試料分析から，地球外有機物の多様性が明らかになってきた。また，1 つの隕石の中でも，nanoglobules と呼ばれる 1 μm 以下の微小球状有機物とそれ以外の IOM (Fluffy IOM と呼ばれることもある)では，分子構造や同位体組成に差が見られる場合もあることが分かっている[4]。我々は，普通コンドライトなど比較的熱変成の進んだ隕石に含まれている始原的クラストの分析を行ってきた[5]。このようなクラストは，普通コンドライトなどの丈夫な外壁に守られることにより，機械的もろさのため通常の隕石として地上に到達することの難しい揮発性成分を多く含んだ物質をも含んでいる可能性がある。このような地球外有機物の起源については様々なシナリオが考えられている。主要な形成の場としては分子雲などの星間環境，原始太陽系円盤，微惑星内部が挙げられる。このような多様な場で形成された有機物が複雑な混合・変成・再分配などを経て，現在に至っていると考えられる。

本発表ではまず，このような多様な有機物—ここでは隕石有機物の大部分を占める不溶性有機物や固体有機物に着目する—について，その化学的特徴をまとめ，太陽系の有機固体の系統的整理を試みる。そして様々な環境で形成されやすい有機物の特徴と上記の太陽系の有機物試料分析の結果を合わせて，太陽系有機物の形成・進化経路と分布の解読を試みる。

[1] Sandford, S. A., et al. (2006) *Science*, **314**, 1720-1724.
[2] Flynn, G. J., et al. (2003) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 4791-4806.
[3] Duprat, J., et al. (2010) *Science*, **328**, 742-745.
[4] De Gregorio, B. T., et al. (2013) *Meteoritics & Planetary Science*, **48**, 904-928.
[5] Kebukawa, Y., et al. (2017) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **196**, 74-101.

P14

金星探査機あかつきの初期成果

○今村剛[1]，佐藤毅彦[2]，中村正人[2]
[1]東大，[2]宇宙研

2016 年 4 月にあかつきが金星周回軌道で定常観測を開始してから，およそ 1 年が過ぎた．

金星の表層環境は地球とかなり違っている．二酸化炭素を主成分とする濃い大気に包まれ，地表気圧は 90 気圧に達する．温室効果のために，地表温度 465℃という灼熱の世界である．高度およそ 50-70 km には硫酸の雲が浮かび，惑星全体をおおっている．大気はあらゆるところで自転より速く西向きに流れており，スーパーローテーションと呼ばれている．このような基本的な特徴は 20 世紀に行われた探査により明らかになったが，そのような姿を持つに至ったメカニズムの解明はこれからである．我々は従来あまり追求されてこなかった気象学の問題に着目し，金星気象衛星を送り込んだ．金星と地球の比較を通して惑星の環境形成のしくみを理解することを究極の目的としている．

大気循環や雲形成の問題を解き明かすべく，あかつきには大気を観測するカメラが 5 つ搭載されている．二酸化硫黄などの化学物質やエアロゾルの分布を見る紫外イメージャ（波長 283 nm・365 nm），雲頂の温度分布を見る中間赤外カメラ（波長 10 μm），雲の深部や雲の下の一酸化炭素をとらえる 2 μmカメラ（波長 1.7～2.3 μm の間に 4 波長），雲や地表を見る 1 μmカメラ（0.9～1.01 μm の間に 4 波長），そして雷の発光や高層大気の蛍光（大気光）を超高速測光でとらえる雷・大気光カメラ（550～770 nm の間に 4 波長）である．金星の影の中で観測する雷・大気光カメラを除く 4 カメラは，金星全体を視野に収めた連続的な撮像を行う．それぞれの波長で異なる高度の大気現象を可視化し，これらを統合することにより大気の 3 次元の構造と変動をとらえることができる．さらに，雲の細かな模様が時間とともに移動する様子を解析することによって，それぞれの高度での風速分布とその時間変化を求める．カメラ群に加え，電波掩蔽観測のための電波源も搭載されている．この観測からは気温と気圧，雲が蒸発して生じる硫酸蒸気，電離層電子密度の高度分布が得られる．

これまでに得られたデータからは多くの新発見がもたらされている．雲の多波長画像には従来知られていなかった形態的特徴や運動が数多く見られ，物理的解釈が追いついていない．風速データからは雲層深部に赤道ジェットが見つかった．雲層の太陽光散乱特性からは雲粒や微量気体の新たな情報が得られつつある．電波掩蔽は雲層内に想定外の様々な日変化を見出しつつある．観測データの世界への公開が始まり，国内外での研究プロジェクトが加速している．本講演では，あかつきが金星大気の力学と物質循環の描像をどのように書き換えつつあるかを紹介する．

P15

金星探査機「あかつき」のデータアーカイブの現状とこれから

◯ 村上 真也[1], 山本 幸生[1], はしもと じょーじ[2], 山田 学[3], 山崎 敦[1], 佐藤 隆雄[1], McGouldrick, Kevin[4], 平田 成[5], 小郷原 一智[6], 高木 征弘[7], 佐藤 毅彦[1,8], 中村 正人[1]

[1]JAXA/ISAS, [2] 岡山大, [3] 千葉工大/PERC, [4] コロラド大学ボルダー校/LASP, [5] 会津大/CAIST, [6] 滋賀県立大, [7] 京産大, [8] 総研大

金星探査機「あかつき」は 2015 年 12 月に金星周回軌道への投入に成功し、現在に至るまで貴重な観測データを取得し続けている。これらの観測データは原則として観測から 1 年半後に公開される。このたび、金星周回軌道投入成功の 1 年 7 ヶ月後の 2017 年 7 月に、1st リリースを宇宙科学研究所の科学衛星データ公開システム DARTS で公開した。1st リリースは 2010 年 5 月の打ち上げから 2016 年 5 月までのデータを含む。今後、半年ごとに新規データを順次公開していく予定である。

データセットの多くは PDS3 に準拠する。また、すべてのデータセットは宇宙研の DARTS と NASA PDS においてアーカイブ・公開される。

UVI(紫外イメージャ), IR1(1μm カメラ), IR2(2μm カメラ), LIR(中間赤外カメラ) の画像データについては、生データ、較正済みのデータ、そして画像の各ピクセルでの幾何情報 (緯度・経度・位相角など) を FITS フォーマットでアーカイブした。視野方向補正をし、緯度経度格子へ投影・内挿したデータは NetCDF フォーマットでアーカイブし、その際に補正された幾何情報は NetCDF と FITS でアーカイブする。LAC(雷・大気光カメラ) についてはライトカーブのデータと RS(電波科学) で得られた大気の温度や密度の鉛直プロファイルのデータはテキストでアーカイブする。また、観測データの解析に必要な探査機の航行データなどを含む補助データを SPICE カーネルとしてアーカイブする。

データアーカイブの作成にあたっては、機器横断的なデータ利用を容易にするため、データ構造、ファイル命名規則、メタデータの名称などに統一性をもたせた。

SPICE カーネルのデータセットについてはレビューが終了している。UVI, IR1, IR2, LIR, RS のデータセットは PDS Atmospheres Node によるレビューを受けている最中である。

発表ではより詳しい現状と、今後の展望について紹介する。

P16

地上電波望遠鏡 SPART による金星中層大気における一酸化炭素の変動起源の研究

○原口大輝[1], 西田侑治[2], 青木亮輔[3], 松本怜[4], 築山大輝[5], 前澤裕之[6], 半田一幸[7], 神沢富雄[8]
岩下浩幸[9], 大矢正明[10], 前川淳[11], 宮澤千栄子[12] 佐川英夫[13]
[1]大阪府立大学, [2]大阪府立大学, [3]大阪府立大学, [4]大阪府立大学, [5]大阪府立大学, [6]大阪府立大学, [7]野辺山宇宙電波観測所, [8]野辺山宇宙電波観測所, [7]野辺山宇宙電波観測所, [8]野辺山宇宙電波観測所, [9]野辺山宇宙電波観測所, [10]野辺山宇宙電波観測所, [11]野辺山宇宙電波観測所, [12]野辺山宇宙電波観測所, [13]京都産業大学

系外惑星の大気環境やハビタビリティを理解する上で、中心星の活動が周囲の地球型惑星中層大気の物理・化学的環境に与える影響の理解は欠かせない。我々は、固有磁場を持たず、人為活動の影響を考慮する必要がない地球の兄弟惑星：金星・火星の中層大気が、太陽の活動環境化でどのように応答しているのかに着目し、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の口径 10 m のミリ波地上電波望遠鏡 SPART(Solar Planetary Atmosphere Research Telescope)を立ち上げ、太陽系の地球型惑星大気の監視観測を推進してきた。具体的には、一酸化炭素とその同位体 (12CO J=1-0 115.2712 GHz, J=2-1 230.5380 GHz, 13CO J=2-1 220.3987 GHz) の回転遷移による吸収スペクトルを観測している。このミリ波帯ヘテロダイン分光によるリモートセンシングは、周波数分解能が高いために分子を高い精度で同定できること、スペクトルの線幅の細い高高度領域の分子の高度分布も算出できるほか、赤外線などと比べて波長が長いためにダスト等の吸収散乱の影響を受けにくい、分子を高い精度で同定できる、といった特色をもつ。

金星・火星の一酸化炭素は、主として二酸化炭素(CO2)の光解離によって形成されたものである。得られた吸収スペクトルに対しリトリーバル解析を行った結果、2011-2017 年 の観測期間において、金星の高度 80 km 付近の CO 混合比は平均的には夜面において 60 ppmv 以下となり、Cycle-22 における過去の CO 混合比と比べて、Cycle-24 における CO 混合比は低水準に留まっていることが分かった。このことは、野辺山宇宙電波観測所の太陽電波偏波計 1 GHz 帯の太陽電波強度との比較などから、太陽活動(Cycle22～24)の大局的な低下傾向との関連が示唆される。一方で、この CO 混合比には、太陽活動の影響だけでは説明のできない短期変動も見られた。この原因を探るべく、我々は ESA/NASA の太陽・太陽圏観測衛星の SOHO の CELIAS/SEM による太陽の極端紫外線(波長:26-34 nm)との比較を行った。また、2015 年 12 月、宇宙航空研究機構(JAXA)の「あかつき」衛星が金星の大気重力波に誘発された巨大な弓状構造を捉えることに成功したが、こうした大気重力波が大気の化学的環境や物質の輸送に擾乱を与えている可能性も調査すべく、過去に想定される大気重力波イベントの時期との関連についても比較研究を行った。本講演では、これら一連の解析結果について報告する。

P17

金星探査機「あかつき」と ALMA による金星の連携観測プロジェクトの進捗報告

○青木 亮輔[1]、前澤 裕之[1]、田口 真[2]、福原 哲哉[2]、佐川 英夫[3]、
西合 一矢[4]、佐藤 隆雄[5]、Yeon Joo Lee[5]、今村 剛[6]、中村 正人[5]

[1]大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学専攻、[2]立教大学理学部物理学科、
[3]京都産業大学理学部、[4]国立天文台、[5]宇宙航空研究機構宇宙科学研究所、
[6]東京大学大学院新領域創生科学研究所

我々は口径 10 m の電波望遠鏡を用いて太陽系地球型惑星の大気の監視観測を推進している。これにより例えば金星の高度 80 km 付近の CO 混合比の全球平均が数日～数週間の短期スケールで変動する様子を捉えてきた。2015 年 12 月、「あかつき」衛星(JAXA)は、雲頂温度をトレースする中間赤外カメラ(LIR:波長 10 μm)により、大気重力波によって駆動される巨大な弓状構造を捉えた。「あかつき」衛星の赤外線や紫外線のセンサーは低層から雲頂にかけての温度や CO、SO_2 などの存在量や速度場を捉えることができるのに対し、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)のヘテロダイン分光法は、高度 75－110 km の微量分子を捉えることができる。そこで我々は、こうした大気重力波などが、これら分子種の 3 次元分布・時間変動に与える影響を捉えることで、H_2SO_4 雲の上層と低層を繋ぐ大気ダイナミクスと大気化学ネットワーク/物質循環のリンクを探るべく、2016 年 11 月 20 日(視直径:15 秒角)、12 月 1 日(視直径:16 秒角)、2017 年 5 月 14 日(視直径:31 秒角)に「あかつき」衛星と ALMA の連携観測を実施した。12 月 1 日は「あかつき」により弓状構造の一部を連続撮像することに成功している。5 月 14 日はアフロディーテ大陸西部が明け方に差し掛かる頃で、重力波が発生しない reference の時期として観測を実施した。ALMA は TP Array、7 m Array、12 m Array の 3 種類の array で UV 空間をカバーしているが、通常これらアンテナ群は独立にオペレーションされる。しかし金星大気の高速の輸送のため大気の時間変動が早いことから、今回の観測では全ての望遠鏡を同期観測させる新しい試みに取り組んだ。観測輝線は Band 7 (300 GHz 帯 ^{12}CO、^{13}CO、HDO、SO、SO_2 輝線;分解能 0.27 秒角)と Band 6 (200 GHz 帯 ^{12}CO、^{13}CO 輝線;分解能 0.40 秒角)である。現在 7 m Array と 12 m Array の QA2 データ配信が始まっており、Common Astronomy Software Applications package (CASA) によるシミュレータを用いて解析を開始し、クエーサーを用いた較正や CLEAN、ミッシングフラックスの確認を行っている。本研究では、これらミッションの進歩・解析状況を報告する。

市民参加型の画像解析による
現在の火星におけるダークパッチの形成率

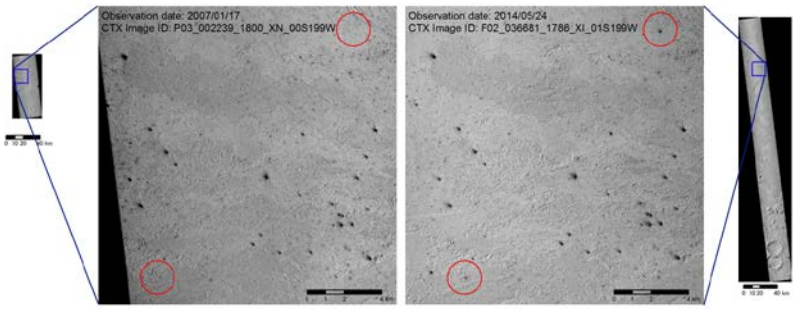
宮本英昭、逸見良道、Reid Parsons（東大）

Current production rate of dark patches on the surface of Mars
by image comparisons of citizen mapping

Hideaki Miyamoto, Ryodo Memmi, Reid Parsons

We are trying to evaluate the production rate of 10s to 100s meters in diameter features in a dark color (dark patches) newly formed on the current surface of Mars. Our approach is performing manual comparisons of about 3,000 CTX image pairs taken at different time by eyes of more than 30,000 citizens in a museum located at the center of Tokyo. We'll report our preliminary results of this investigation.

火星の現在における活動度は未だによくわかっていない。そこで私たちは、同一地点を異なる時間で撮影された約 3000 個の CTX 画像ペアについて、宇宙ミュージアム TeNQ にて 3 万人以上の市民の手を借りながらおよそ 10-100m スケールの新たな地形変化を抽出するという試みを行っている。現在のところ、およそ 8 百万平方キロメートルの範囲を観察し、およそ 300 個の新たなダークパッチを確認することができた。これは約 $1.1 \times 10^{-5}/km^2/yr$ 個に相当する生成率であり、これまでに行われてきたクレーター生成率に関する結果よりも 1 桁大きく、理論的な推定値よりも 2 桁大きな値となっている。この原因を解明するために、生成率の地域差や形態的な特徴などを調査しているが、現在のところ 1)ごく小さなクレーターであっても、表面が特に低熱慣性（高いダスト堆積率）である場合、表面粒子を広く巻き上げる影響があると想定されるため、これを画像で認識することで見かけ多く見えているか、2）どちらかというと地質構造に沿った集中部も見られなくもないことから、何らかの内因的原因による地形も含まれている、とする 2 つの仮説が考えられている。



Example of a CTX image pair and their close-ups with recently formed dark patches (red circles)

P19

球殻状鉄コンクリーションの
形成数値シミュレーションと形成環境の制約

◯柴田拓真、城野信一
名古屋大学大学院　環境学研究科

1.はじめに

アメリカ合衆国ユタ州のナバホ砂漠には，酸化鉄で形成されている球殻状の鉄コンクリーションが存在する。この鉄コンクリーションの類似物（ブルーベリー）が近年火星の表面で発見された。鉄コンクリーションの成因を明らかにすることは砂漠の古環境、ひいては火星の古環境を明らかにすることにつながると期待される。

我々の現地調査によって，従来とは違う以下のような新しい形成シナリオが示唆された。まず鉄イオンを含んだ酸性の地下水が地層中のカルサイト球と反応し、カルサイト球の周囲のみpHが上昇する。その結果、周囲の地層の空隙を埋めるように水酸化鉄が沈殿する。さらに水酸化鉄が脱水反応により酸化鉄に変わることで鉄コンクリーションが形成されるというものである。

このシナリオによると鉄コンクリーションの形成は、形成時の地下水に材料元素であるFe^{2+}とFe^{3+}のどちらが存在するかに大きく影響される、加えて地下水の水素イオン濃度・鉄イオン濃度などにも依存する。本講演会では、主にFe^{2+}が材料物質である場合についての数値シミュレーションの結果と現存する鉄コンクリーションのサイズおよび厚さから形成時の地下水のpH・鉄イオン濃度に制約を与えた結果を報告する。

2.手法

初期条件として、地下水中の水素イオン濃度・鉄イオン濃度・初期カルサイト球のサイズを与えて拡散方程式を解くことによって地下水中の各イオンの濃度分布の時間変化を再現する。同時に水酸化鉄の沈殿・溶解と炭酸カルシウムの溶解を計算し、鉄コンクリーションの形成過程を再現する。

3.結果

図1に鉄コンクリーション形成と地下水のpH、鉄イオン濃度の関係を示す。図1において基本的に水酸化鉄の沈殿反応が起こりやすい左上の地下水環境に近づくほど形成される鉄コンクリーションは厚くなっている。

数値シミュレーションの結果と現存する鉄コンクリーションとのサイズ・厚さを比較することで、今回計算した初期条件の中でも現地調査を行った地域の形成時の地下水環境にさらに制約を与えている。（図1）

ナバホ砂岩層では鉄コンクリーション形成時の地下水水素イオン濃度は多くとも10^{-5}(mol/L)以下であり、鉄イオン濃度が10^{-4}(mol/L)程度であった場合には多くとも水素イオン濃度が10^{-6}(mol/L)とほぼ中性に近い酸性状態であったと考えられる。

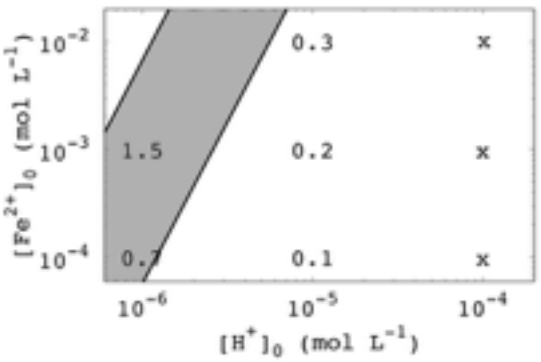


図1：鉄コンクリーション形成と地下水のpH、鉄イオン濃度の相図（初期カルサイト球が半径15 mmの場合）
相図内の数字は計算結果として形成される鉄コンクリーションの厚さ(mm)を示している。
ばつ印は水酸化鉄が十分に空隙を埋めず、鉄コンクリーションが形成されない条件である。

P20

高分解能大気大循環モデルを用いた 現在火星環境における水循環と HDO/H_2O 同位体分別のシミュレーション

○黒田 剛史 [1,2]

[1] 情報通信研究機構, [2] 東北大・理

MIROC をベースに開発された火星大気大循環モデル DRAMATIC MGCM を用いて、現在進行中、あるいは今後予定されている観測との連携を見据えて、現在の火星環境における水循環のシミュレーションを行っている。水平分解能約 330km でのシミュレーションでは、水蒸気のカラム量・氷雲の光学的厚さの季節～緯度変化(図 1,2)について観測(図 4,5)と概ね整合する結果を示しており、また水蒸気中の HDO/H_2O 同位体比についても同様の結果が出ている(図 3)。さらに水平分解能約 67km での高分解能シミュレーションからは、水輸送と大気力学(熱潮汐・傾圧不安定波)の相互関連について明確な特徴が示されており(図 6)、発表の中ではそれを含めて将来探査計画策定につながる議論を行う予定である。

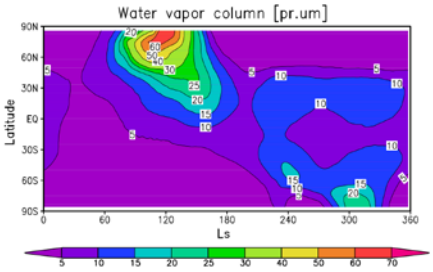


図 1:DRAMATIC MGCM (水平分解能約 330km)で得られた、経度平均水蒸気カラム量の季節～緯度変化。

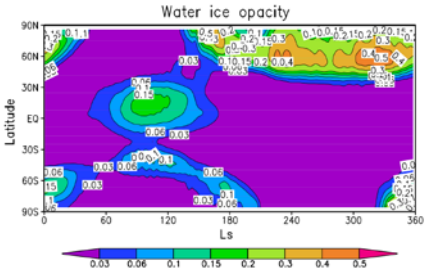


図 2:図 1 と同様、ただし氷雲の光学的厚さ(in ~12μm)。

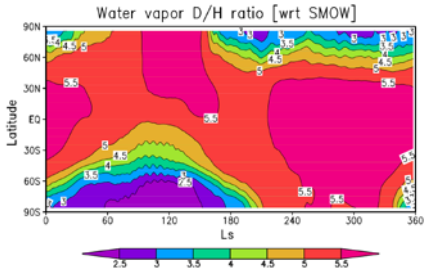


図 3:図 1 と同様、ただし HDO と H2O の蒸気カラム量の比について(単位:VSMOW, ~3.1×10^{-4})。

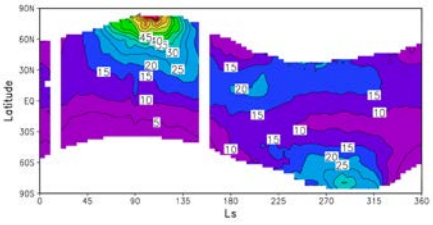


図 4:MGS-TES 観測(1999～2001 年, MY24-25 に相当)による水蒸気カラム量の季節～緯度変化。

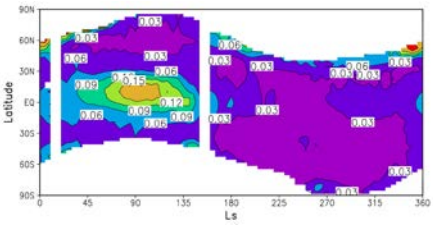


図 5:図 4 と同様、ただし氷雲の光学的厚さ(in ~12μm)。

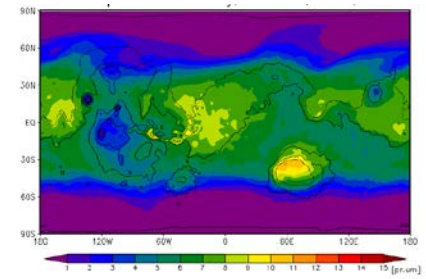


図 6:高分解能 DRAMATIC MGCM (水平分解能約 67km)で得られた、北半球春季の水蒸気カラム量のスナップショット。

P21

地球気候の太陽定数依存性: 海陸分布を考慮した大気大循環モデル実験

◯ 松田 幸樹 [1], 石渡 正樹 [2], 高橋 芳幸 [1,3], 林 祥介 [1,3]

[1] 神戸大学大学院理学研究科, [2] 北海道大学大学院理学研究院, [3] 惑星科学研究センター

1. はじめに

惑星気候の多様性を考える上で, 太陽定数は重要なパラメータの一つである. 南北 1 次元エネルギーバランスモデル (EBM) を定式化した研究 (例えば, Budyko, 1969) において, 惑星気候の太陽定数依存性が調べられた. それによると, 太陽定数に応じて全球凍結状態, 部分凍結状態, 氷なし状態という 3 つの状態が現れること, および, ある太陽定数に対して複数の状態が解となること (多重解の存在) が示された. また, 大気大循環や惑星放射の射出限界を陽に計算できる大気大循環モデル (GCM) を用いた先行研究においても, 惑星気候の太陽定数依存性が調べられ, EBM で得られた 3 種の状態や多重解が現れることが確認された (Ishiwatari et al., 2007). さらに, Ishiwatari et al. (2007) では, 暴走温室状態が存在することが確認された. 上記で挙げた 2 つの先行研究では, 海陸分布や大気組成の影響を考慮していない.

本研究では, 地球の海陸分布と大気組成を考慮した大気大循環モデルを用いて, 地球気候の太陽定数依存性を明らかにし, 様々な物理量の太陽定数依存性について考察する.

2. モデル設定

実験には惑星大気大循環モデル DCPAM* を用いる. 力学過程は, プリミティブ方程式系をスペクトル法を用いて解くことで計算される. 放射過程は, Chou et al. (2001) 等による地球放射モデルを用いる. 凝結過程は, Relaxed Arakawa-Schubert (Moorthi and Suarez, 1992) で表現される. 鉛直乱流混合過程は, Mellor and Yamada (1982) level 2.5 により表現される. 雲は, 移流, 乱流混合, 凝結による生成, 定数時定数による消滅を考慮して雲水・雲氷混合比を予報することで, 表現される. 陸面では, 土壌熱伝導モデルにより土壌温度を計算し, バケツモデル (Manabe, 1969) により土壌水分を計算する. 海は, 60 m の深さを持つ板海として取り扱う. 海表面アルベドは, 海表面温度が 271.15 K よりも低い時には 0.6 とし, 271.15 K より高い時には 0.1 とする. 雪アルベドは 0.6 とする. 地形データは ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009) を使用する. 陸面アルベド分布は Matthews (1983, 1984, 1985) によるものを使用する. オゾン分布は CMIP5 設定の気候値の東西平均を使用する. 本研究で行った実験で用いた解像度は, 緯度経度格子間隔が約 5.6 度であり, 鉛直方向の大気層数が 26 である. このモデルを用いて, 地球の気候の太陽定数依存性を調べるために, 様々な太陽定数と二つの初期条件を与えて 15 個の実験を実施した. 与えた太陽定数の範囲は 1100 Wm^{-2} から 1500 Wm^{-2} であり, 初期条件は 280 K および 200 K の等温大気である.

3. 結果

上記の設定で実験を行ったところ, 全球凍結状態, 部分凍結状態, 氷なし状態が存在することが確認された. また, 地球の海陸分布を考慮すると, 気候レジーム図が南北半球で異なる, 例えば, 氷なし状態が得られる太陽定数はおよそ 75 $\mathrm{W\,m}^{-2}$ 異なることが確認された. 次に, 太陽定数の変化に伴う子午面循環の変化について調べた. 太陽定数が増加すると, 子午面循環の上昇域が南方向へ移動する. 子午面循環の強度は単調増加せず, 南北半球ともに部分凍結状態を与える太陽定数において最大となる. 部分凍結状態の中で子午面循環の強度を比較すると, 南半球では太陽定数大きくなるにつれて弱くなるが, 北半球では太陽定数が変化してもあまり変化しない.

今後は, 暴走温室状態の有無や大氷冠不安定や小氷冠不安定の有無を確認する予定である.

*URL : https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/

P22

高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞帯状構造の消滅

○ 佐々木 洋平[1], 竹広 真一[2], 石岡 圭一[3], 中島 健介[4], 石渡 正樹[5], 林 祥介[6]

[1] 京大・数学,[2] 京大・数理研,[3] 京大・理,[4] 九大・理,[5] 北大・理,[6] 神戸大・理/CPS

木星と土星の表層の流れは，赤道周辺の幅の広い順行ジェットと中高緯度で交互に現われる互いに逆向きの幅の狭いジェットが特徴的である．Heimpel and Aurnou (2007, 以下 HA2007) は，これまでに考えられていた「深いモデル」よりも薄い球殻領域内の深部対流運動を考え，レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に，赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが共存する状態を数値的に再現した．しかしながら，彼らの研究では経度方向に 8 回対称性を仮定しており，全球の 1/8 の領域の運動しか解いていない．このような領域の制限は流れ場全体の構造に影響を与えている可能性がある．

このような問題意識のもとに, 我々はこれまで薄い球殻対流の数値計算を全球で長時間行い, 赤道域および中高緯度領域の帯状流が形成されるか否かを調べてきた. その結果, 長時間積分後には縞状構造が消滅し, 南北中高緯度に幅広の帯状流がそれぞれ 1 本ずつ出現する状態が得られた. このことは HA2007 の解は最終的な統計的平衡状態ではなく過渡的な状態であることを示唆している. しかしながら, HA2007 と我々の結果の特徴の相違が, 計算領域を全球領域にしたためなのか, あるいは超粘性拡散パラメータの違いによるものなのかが明らかでなかった. そこで, 本研究では超粘性拡散パラメータを含めた計算設定を統一し, 計算領域を全球領域並びに経度方向に 8 回対称性を仮定した 1/8 セクター領域とした数値実験を行った.

用いたモデルは回転球殻中のブシネスク流体の方程式系から構成される. 方程式系に現われる無次元数は HA2007 と同じ値を用いた. すなわち, プランドル数を 0.1, エクマン数を 3×10^{-6}, 球殻の内径外径比を 0.85, 修正レイリー数を 0.05 とした. 熱境界条件は両端で温度固定, 力学的境界条件は自由すべりである. 1/8 セクター領域にて時間積分したところ強い赤道ジェットと中高緯度の縞状構造が出現した. この中高緯度の縞状構造は, 消滅することなく長時間維持されつづけている. 一方で全球領域計算では, 中高緯度の縞状構造が一旦形成されるものの, さらに時間積分を進めると中高緯度が加速され縞状構造が消滅した. すなわち, 縞状構造が維持されるか消滅してしまうかは, 超粘性拡散設定ではなく計算領域に依存している. この縞状構造の消滅には, 1/8 セクター計算では表現できない経度方向波数 8 未満の成分による角運動量輸送が重要な役割を果たしていると予想される.

P23

着陸機による火星環境探査計画の検討

○臼井寛裕[1]・佐藤毅彦[2]・亀田真吾[3]・宮本英昭[4]・山岸明彦[5]・藤田和央[2]・石上玄也[6]・
火星環境探査リサーチグループ
[1]東工大、[2]JAXA、[3]立教、[4]東大、[5]東京薬科、[6]慶応

我々、火星環境探査リサーチグループ（RG）では、2020 年代後半の打ち上げを目指し、着陸機による火星探査計画の検討を行っている。火星は、液体の水を表層に保持していた地球外太陽系天体として、比較惑星学および宇宙生命学的研究を行ううえで理想的な天体といえる。また、近年の火星研究により、かつて古海洋として表層に存在していた水は、現在は地下氷としてグローバルに遍在している可能性が指摘されており、表層・浅部地下環境の共進化過程の理解の重要性を示している。本 RG 活動では、火星の地下環境に着目するという日本独自の視点と、それを可能にする新規な地下環境探索技術に基づき、火星の表層・地下環境進化の包括的な解明を目指している。本発表では、（1－3）観測機器の開発状況に加え、（4－5）探査機の着陸システムおよびローバー走破技術といった工学検討の結果を発表する。

（１）生命探査：主力測機である LDM（Life Detection Microscope）の大幅な軽量化を目指し、機器のコンセプト検討および各技術要素（色素添加機構・細胞濃集機構など）の開発を行った。
（２）化学探査：ローバーに搭載可能な小型の元素分析・年代測定装置を開発した。天然試料を用いた実験室内での K-Ar 年代測定の分析実証に加え、伊豆大島でのフィールド試験により、その場での K および Ar の同時検出に成功した。
（３）内部構造探査：高エネルギー粒子ミュオンを用いた内部構造探査（ミュオグラフィ）の可能性について、フォボスおよび火星環境について基礎検討を行い、その有効性を確認した。また、微小加速度計および電磁波を用いた火星内部構造探査の基礎検討を行った。
（４）ローバー技術開発：理学観測装置の搭載試験が可能なローバテストベッドの開発を完了した。このテストベッドには、（２）の年代測定装置を搭載し、フィールド（伊豆大島三原山）で実証実験を行った。
（５）輸送および EDL システム：火星着陸のための超音速パラシュート開発を目的とし、ヘリコプタを用いた飛行試験を行った。また、重力天体着陸技術の開発を目的とし、基礎動作確認が完了しているガスジェット式の着陸 FTB に改良を加え、自律式離着陸試験を行った。

P24

外縁天体表面の H_2O 氷結晶度測定

○ 寺居 剛 [1], 伊藤 洋一 [2], 大朝 由美子 [3], 古荘 玲子 [4], 渡部 潤一 [4]

[1] 国立天文台ハワイ観測所, [2] 兵庫県立大学, [3] 埼玉大学, [4] 国立天文台

外縁天体 (trans-neptunian objects; TNOs) は太陽から遠く離れた低温環境下 (数 10 K) で形成されたと考えられ，それらの表層に含有される H_2O 氷は当初は非晶質であったと推測される．しかし，(50000) Quaoar を始め (Jewitt & Luu 2004)，これまでの観測で良質なスペクトルが取得された TNOs のほとんどから結晶質の H_2O 氷が検出されている．結晶化されるには 100 K 程度まで加熱されなければならず，放射性元素による加熱 (Guilbert-Lepoutre et al. 2011) や氷火山活動 (cryovolcanism) による供給 (Cook et al. 2007)，微小隕石衝突 (Porter et al. 2010) などの原因が提案されているものの，未だ特定には至っていない．TNO 表面における H_2O 氷存在度の天体間の均質性／多様性や軌道要素・天体サイズとの関連性を明らかにすることは，結晶化メカニズムを解明するうえで重要な手掛かりとなる．

結晶質 H_2O 氷は波長 1.65 μm に特徴的な吸収帯を持ち，その強度を測定することにより氷の結晶度を調べることができる．ところが TNOs の多くは光度が非常に暗く，大口径望遠鏡をもってしてもそれらの近赤外線スペクトルを十分な精度で取得することは難しい．そこで我々は，すばる望遠鏡の多天体近赤外線撮像分光装置 MOIRCS および狭帯域フィルター NB1657 (中心波長 1.657 μm，波長幅 0.019 μm) を用いた測光観測により，高精度かつ効率的に TNO 表面の H_2O 氷結晶度を測定する手法を導入した．先行研究 (Brown et al. 2012) による近赤外線分光観測から天体表面における H_2O 氷の存在度が既知の TNO 7 天体を H バンド (波長範囲 ∼1.5–1.8 μm) および NB1657 フィルターで撮像し，うち 6 天体から有意なデータを得た．測定された H − NB1657 カラーの反射光成分を，モデルスペクトルでの値と比較した結果，結晶度の算出には至らなかった (38682) Huya を除く 5 天体全てで結晶度が 50% 以上であることが示された．

すでに結晶質 H_2O 氷の存在が知られていた大型天体 (直径 900 km 以上) の (136108) Haumea，(50000) Quaoar，(90482) Orcus の他にも，比較的小型の (315530) 2008 AP_{129} (直径 ∼450 km) や (42355) Typhon (直径 ∼200 km) でも結晶質 H_2O 氷の含有が確認された．これらは cryovolcanism や 長寿命核種 (^{40}K など) の生成熱では表層の H_2O 氷結晶化を説明することは難しい一方，短寿命核種 (^{26}Al など) ならば結晶化に必要な温度まで表層を加熱できる可能性がある (Guilbert-Lepoutre et al. 2011)．

また，Haumea と Quaoar が 80% 程度の高い結晶度を示したのに対し，それらと同程度の大きさである Orcus の結晶度は 50% 程度であったことも興味深い．そのような顕著な差を生み出した要因として，天体のバルク密度が関係している可能性が指摘される．Haumea および Quaoar のバルク密度はそれぞれ ∼2.6 g cm^{-3}，∼2.1 g cm^{-3} なのに対し，Orcus のそれは ∼1.5 g cm^{-3} と小さい．同じ大きさの天体でもバルク密度が大きいほどダスト成分を多く含有し，かつ熱伝導度が高いため，天体表層を加熱しやすい．それらを考慮した熱進化シミュレーション (Guilbert-Lepoutre et al. 2011) によると，天体表面の H_2O 氷を結晶化させるには 1.5 g cm^{-3} 以上のバルク密度が必要という結果が示されている．Orcus のバルク密度はまさにその境界値であり，表層の加熱が不十分であったため H_2O 氷の結晶化が不完全に終わったのかもしれない．

P25

氷・シリカ混合物の塑性変形・脆性破壊遷移に関する実験的研究

○保井 みなみ [1]，Erland M. Schulson[2], Carl E. Renshaw[2], Daniel Iliescu[2], Charles P. Daghlian[2]
[1] 神戸大学大学院理学研究科　[2]Dartmouth College

はじめに：太陽系に存在する氷天体上の様々な地形は，その地殻や表層を構成する氷と岩石の混合物の流動や破壊に関係している．ある応力を天体表層が受けたときに，それが流動するか，または破壊するかを決めるレオロジー特性の 1 つが，塑性・脆性遷移（D/B 遷移）である．水氷の D/B 遷移は詳細に調べられており，特に D/B 遷移が起こる歪速度については理論モデルが構築され，氷粒径，温度，封圧などの様々なパラメータに依存することがわかっている [Scholson, 1990; Renshaw and Schulson, 2001]．一方，氷・岩石混合物の D/B 遷移についてはほとんど研究が行われていない．そこで本研究では，氷・岩石混合物の D/B 遷移を室内実験で調べ，D/B 遷移が起こる歪速度に対する岩石含有率依存性を明らかにした．

実験方法：試料は粒径約 200～500 μm の氷粒子と直径 0.25 μm のシリカビーズを混合して作成した．試料の空隙率を 0%に近づけるため，上記の混合物と液体の水（0 ℃）を交互に円筒形の型に入れて押し固め，低温室で凍結した．シリカ体積含有率fは 0，0.06，0.18 とした．実験は，ダートマス大学セイヤー工科大学院の低温室に設置された変形試験機を用いて，等歪速度一軸圧縮実験を行った．歪速度は 10^{-5}～0.6 s^{-1} とした．温度は-10 ℃ である．

結果：圧縮荷重下での塑性変形と脆性破壊を区別するには，応力–歪み曲線の形状とその曲線上の最大応力と歪速度の関係を知る必要がある．特に最大応力は，純氷の場合，塑性変形モードでは歪速度の増加とともに大きくなり，脆性破壊モードでは歪速度の増加とともに小さくなることがわかっている．本研究での最大応力と歪速度の関係を示したのが図 1 である．このグラフと上記の特徴から，シリカ含有率が増加するほど，D/B 遷移が起こる歪速度は大きくなり，純氷では 10^{-3} s^{-1}，f =0.06 では 10^{-2} s^{-1}，0.18 では>0.6 s^{-1} となることがわかった．また，このグラフから流動則$\dot{\varepsilon} = B \cdot \sigma_{\mathrm{peak}}{}^{n}$（$\dot{\varepsilon}$は歪速度，$\sigma_{\mathrm{peak}}$は最大応力）を調べた結果，定数$B$は純氷が約 10^{-6} [s^{-1}(MPa)$^{-n}$] となり，シリカ氷（約 10^{-9} [s^{-1}(MPa)$^{-n}$]でほぼ一致）より 3 桁大きくなった．一方，べキnは純氷が 3.3，シリカ氷が 6.1～6.5 となり，シリカ含有率が大きくなると約 2 倍大きくなった．この結果は，先行研究の Yasui & Arakawa [2008]とも一致した．

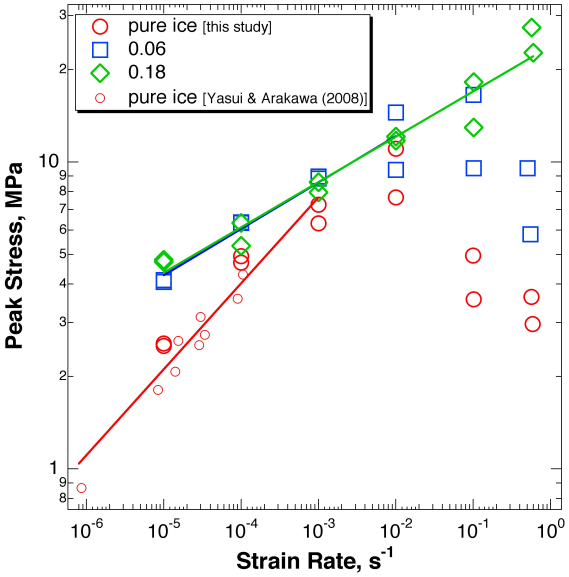


図 1：最大応力と歪速度の関係．

P26

P27

低温高圧下における H_2O 及び $MgSO_4$/NaCl 系での相境界観察

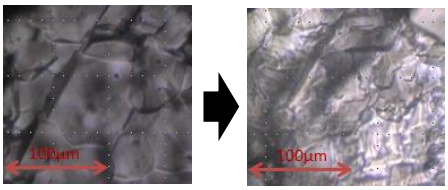
○原田啓多[1]　白田実希[1]　近藤忠[1]

[1]大阪大学大学院　理学研究科　宇宙地球科学専攻

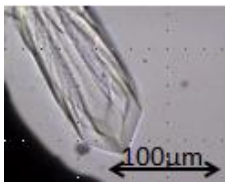
はじめに：木星や土星の幾つかの氷衛星では、近年の探査機の観測結果などから内部に H_2O の海の存在が示唆されている。その詳しい内部構造や進化過程を推測する上で、H_2O やさらに塩を含む系が低温高圧下に置いてどのように振る舞うのかを理解することは重要である。H_2O の相図は古くから低温実験・高圧実験や熱力学的制約によって決められているが、実験装置・温度圧力履歴・反応速度などにより、実際に観察される相が相図と大きく異なるという研究結果が報告されている[1]。また塩を加えた場合では、融点降下・水和物の生成・高圧氷の密度減少などが観察されている[2]が、水和物の種類や相図への影響など、明らかになっていない点が多い。本研究では、低温高圧下での H_2O 及び硫酸マグネシウム、塩化ナトリウムを加えた系での相境界の観察を行った。

実験方法：ダイヤモンドアンビルセルを用いて常圧～1.43GPa まで加圧し、ルビー蛍光法により圧力を測定した。温度は、冷却水を循環させた真鍮フレームとペルチェ素子を組み合わせた装置を新たに作成して-40℃～常温の範囲で制御し、アルメルクロメル熱電対により試料部の温度を測定した。また H_2O 及び水和物の相同定はラマン分光法と顕微鏡観察により行った。試料としては H_2O 及び 25wt%硫酸マグネシウム水溶液、25wt%塩化ナトリウム水溶液を用いた。

実験結果：純水での低温実験では、20℃以上の過冷却・0.2GPa 以上の過剰圧といった、相図とは異なる挙動が確認された。25wt％硫酸マグネシウム水溶液を室温で加圧していく過程では水和物の核形成と成長が観察された。先行研究では、加圧を続けると、氷 VI と水和物の二相になりその後、氷 VII と水和物の二相になることが示されている[3]が、今回は確認できなかった。以上の結果から、現在推測されている氷天体のモデルよりも、内部海が深くなっているモデルや、水和物と氷が混じった層や水和物だけの層に分化しているモデルを考えることができる。



（写真１）冷却に伴う H_2O の固相間相転移



（写真２）硫酸マグネシウム水和物の生成

参考文献：[1] M Bauer et al, PHYSICAL REVIEW B 77, 220105(R)(2008) [2] B. Journaux et al, Icarus 226 (2013) 355-363 [3] Ryo Nakamura , Eiji Ohtani, Icarus 211 (2011) 648-654

P28

分裂候補地球近傍小惑星(1566)Icarus 及び 2007 MK_6 の分光観測

○船橋和博[1], 澤井恭助[1], 加藤遼[1], 梅原諒[1], 阿部新助[1], Nicholas Moskovitz[2], 浦川聖太郎[3], 大塚勝仁[4]
[1]日本大学理工学部 航空宇宙工学科, [2]Lowell Observatory, [3]日本スペースガード協会, [4]国立天文台

地球近傍小惑星(NEAs)である 2007 MK_6 は(1566)Icarus の分裂破片であることが Icarus, 2007 MK_6 の力学的進化の類似性から推測されている[1]．また 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 及び 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，もともと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．また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]という距離にまで太陽に近づく．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崩壊され得る」[4]という研究結果から Icarus, 2007 MK_6 は太陽加熱により分裂した可能性もあり，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両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．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面であり，表面組成に不均質性が確認できると考えられる．そのため本研究では，可視光による分光観測(500-1000nm)から未分類の 2007 MK_6 の小惑星タイプを同定し，Icarus の自転によるスペクトルの変化と 2007 MK_6 に分光学的類似性があるかを調査する．

これらの観測は Lowell Observatory 4.3-m Discovory Channel Telescope と DeVeny 分光器(R=500)を用いて行い，Icarus は 2015 年 6 月 21 日(V=14.0)に，2007 MK_6 は 2016 年 6 月 15 日(V=18.5)に観測を行った．また 2007 MK_6 の分光解析の結果はこれまでに報告がなく，これが初の例となる．

本研究では観測の結果を 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 Sq～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．O 型と観測された小惑星の例は少なく，その代表例として(3628) Božněmcová が挙げられ，L6, LL6 グループの普通コンドライトなどが対応隕石種候補となっている[5]．

[1] K. Ohtsuka et al., : “Apollo asteroids (1566) Icarus and 2007 MK6 : Icarus family members?” *The Astrophysical Journal*, **668**, 2007. pp71-74.
[2] B. Warner et al., : “The lightcurve database” *Icarus*, **202**, 2009. pp134-146.
[3] JPL Small-Body Databasa Browser. : “*https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi*”
[4] M. Granvik et al., : “Super-catastrophic disruption of asteroids at small perihelion distances” *Nature*, **530**, 2016. pp303-306
[5] E. Cloutis et al., : “Asteroid 3628 Božněmcová: Covered with angrite-like basalts?” *Meteoritics & Planetary Science,* **41**, 2006. pp1147-1161

フォボスのクレーター緩和評価と他天体との比較に基づく表層進化過程の検討

[1]◯森田　晟也，[1]諸田　智克，[1]渡邊　誠一郎
[1]名古屋大学環境学研究科

火星には２つの衛星フォボス，デイモスが存在する．これらの衛星の成因には論争があり，未だ決着には至っていない．数値シミュレーションを用いた先行研究によると（Ramsley and Head, 2013），フォボスから放出された衝突放出物のうちの多くは火星軌道に捕獲され，フォボスに再衝突し，その再衝突により再び衝突放出物が生み出される．これは衛星特有の表層進化であると考えられる．そこで，本研究ではフォボスの表層進化の履歴復元を目的とし，クレーター形状の解析からこれを試みる．

天体表層での地質現象はその天体表層に存在するクレーター形状に影響を与える．具体的には，クレーター形成後の天体衝突により掘削された物質が周囲に再堆積する現象や（Soderblom, 1970），地震動によるがけ崩れ（Richardson et al., 2004）を原因として，クレーターは時間が経つにつれて浅くなる．以上のプロセスは拡散過程に従って進行すると考えられている．これらに加えてフォボスでは，特有の衝突放出物の再堆積が起き，これもクレーター地形の緩和過程に寄与する．

地質プロセスによって，クレーター地形の緩和速度や緩和の仕方が異なる可能性がある．そこで本研究では，フォボスのクレーター形状を詳細に調査し，地形拡散モデルと比較することによって緩和度を推定した．また比較天体として，同程度のサイズで，フォボスと同様に詳細な形状モデルが得られているエロスに着目し，それらのクレーター形状についても調査した．

フォボスでは 17 個，エロスでは 12 個の半径 1km 以上のクレーターの平均地形プロファイルを作成し，クレーターサイズ，深さ，最大傾斜角を計測した．この際に，クレーター中心から変曲点までの距離を「変曲点半径」とし，本研究では変曲点半径を用いてクレーターサイズを定義した．地形拡散モデルから計算されるクレーター深さ/変曲点半径比，最大傾斜角との比較により，各クレーターの緩和度 κt を算出した（κ は地形拡散係数，t はクレーターが形成されてからの年代を表す）．

結果として，フォボス，エロスの多くのクレーターは地形拡散モデルに矛盾しない形状をしていることが分かった．加えて，クレーターの最大傾斜はクレーターの深さを変曲点半径で規格化した値に対し比例関係があることが分かり，これも地形拡散モデルに対し整合的である．一方で，相対的に巨大なクレーターは深さに対し最大傾斜が大きい，平底形状である傾向が見られた．フォボスとエロスのクレーターの緩和度 κt と数密度の関係を比較したところ，エロスに比べてフォボスの方が，クレーター数密度の増加に対する κt の増加が大きいことが分かった．これは，エロスに比べフォボスの方がクレーター緩和が進行しやすいことを表していると考えられる．

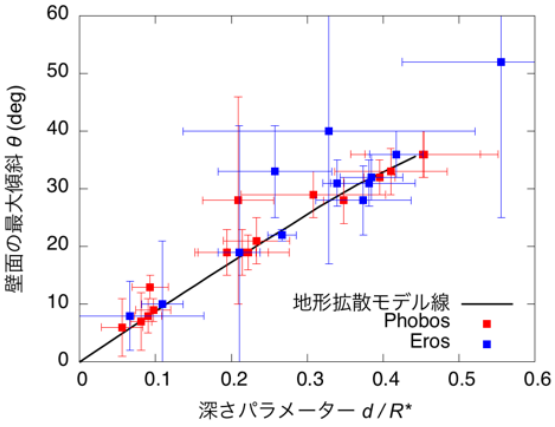


図 1:深さ/変曲点半径比 vs 壁面の最大傾斜

フォボスの高解像度画像の解析と数値シミュレーションによる表面のラフネスの評価

◯小島平[1]、宮本英昭[1]、逸見良道[1]、菊地紘[1]、船木康平[1]
[1]東京大学

着陸探査は、天体の起源や進化を明らかにするための様々な情報を得るための有効な手段であるが、探査機が着陸してから運用を終えるまで安全に探査を行うためには、目標天体の地形情報を正確に把握することが重要である.固体天体の表面に存在する多数の衝突クレーターやボルダーと呼ばれる岩塊は天体表面の起伏(ラフネス)を変化させる大きな要因であるため、将来的な着陸探査に向けて、実際の天体表面においてそれらが及ぼす影響について理解する必要がある[1].近年、探査機の近接観測によって天体表面の高解像度画像が得られ、より詳細な解析が可能になった.日本でも、2024年にはJAXAが火星の衛星であるフォボスとダイモスの接近観測、サンプルリターンを目的とした探査機MMXの打ち上げが予定されている.

本研究ではこれに関連して、MGSが撮像したフォボスの高解像度画像を解析し、これに類似した地形を数値シミュレーションによって再現することで、それらが地形に影響を及ぼす効果を統計的に評価することを試みた.先行研究[2]で用いられているMOCの画像(1.5m/pixel)を用いて、ボルダーが比較的多く見える1km四方の領域に限定し、クレーター及びボルダーをサブピクセルスケールのものまで極めて詳細にマッピングした[図１].その結果、確実にクレーターと思われるものが332個(クレーター候補は1133個)、確実にボルダーと思われるものが242個(ボルダー候補は2479個)見つかった.これをもとに累積サイズ頻度分布(CSFD)を求めた.また同じ領域で低解像度のHiRISE画像を用いてCSFDを求めた結果、高解像度で得られた結果にある程度外挿できることが確かめられた.　解像度以下で着陸探査機に影響を与えるような観測が困難な大きさ(0.5~2m)のボルダーの頻度は、得られたCSFDから推定し、それに従ってモンテカルロ法を用いて模擬的なボルダーを仮想的な平面に配置し、ある範囲内における地形の起伏を調査した.その結果、数mの範囲内であれば、探査機に影響を与える起伏は小さいことがわかった.

本発表では、実際に行ったマッピングや、数値計算の詳細について説明し、想定されるフォボスの表面の起伏について報告する.

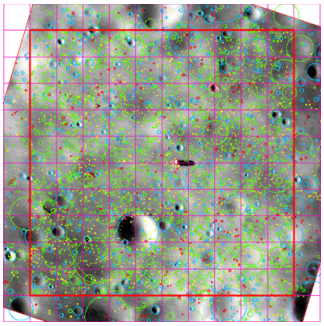


図1：フォボス表面の高解像度画像(MOC)におけるボルダー(red,yellow)とクレーター(blue,green)のマッピング

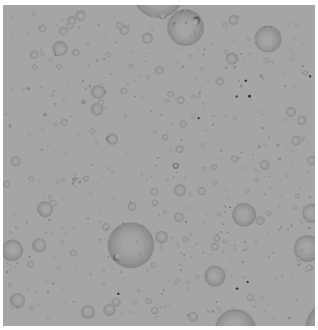


図2：図１のマッピングデータを元にクレーターとボルダーを生成したフォボス表面のシミュレーション

[1] Ernst et al.,2015,46th Lunar and Planetary Science Conference .
[2] Karachevtseva et al., 2014,Planetary and Space Science 102,74-85

P31

焼結アグリゲイトの低密度弾丸による高速度衝突実験

○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・目的

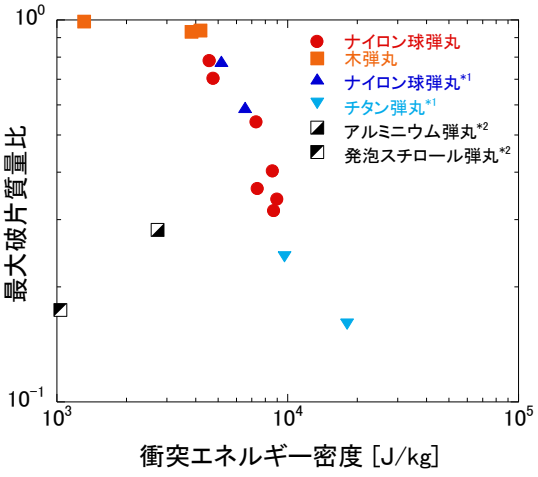
カイパーベルト天体や木星・土星軌道の氷質の小天体はラブルパイル構造を持つかもしれない(Trilling and Bernstein, 2006; Porco et al., 2007)。それらの天体は焼結により物理的に結合しているかもしれない(Sirono, 1999)。カイパーベルト天体や木星・土星軌道の氷質の小天体だけではなく、原始惑星系円盤のダストアグリゲイトも様々な物質により焼結が起こっている可能性がある(Okuzumi et al. 2016)。このような天体の衝突現象は密度が低い天体同士の衝突であると考えられるので、低密度の標的と弾丸を用いて衝突実験を行った。

実験方法

試料は直径 55 μm の中空ガラスビーズをるつぼに入れ、電気炉で 6 時間かけて 800℃まで上昇させたのち 800 ℃を 6 時間維持しおよそ一日かけて室温まで冷却して作成した。また、試料輪切りにすることにより圧縮強度の鉛直分布を求めた。作成した試料の密度はいずれも約 0.36 g/cm^3 である。衝突実験は宇宙科学研究所にある 2 段式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、撮影した画像から破片形状や破片速度を求める。

結果

衝突エネルギー密度と最大破片質量比の関係は右図のようになった。本研究と同じ焼結体を用いた Okamoto et al. (2015) の結果を再現し、標的に発泡スチロールを用いた Durda et al. (2003)に比べると同程度の最大破片質量比を得るためのエネルギー密度が 3 倍～10 倍となった。



＊1 Okamoto et al. (2015)
＊2 Durda et al. (2003)

P32

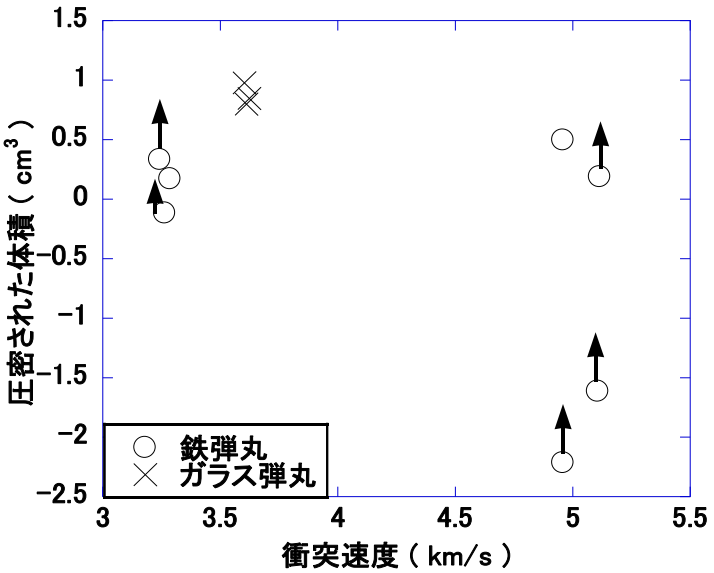
高空隙石膏標的に形成されたクレーターの表面下観察

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, [2]宇宙航空研究開発機構

背景：衝突クレーターに関して、クレーターの直径や深さといったものはさまざまな空隙率の標的について調べられている。それに比べて、衝突表面下の構造についてはあまり研究が行われていない。先行研究として、空隙率 23±1%の砂岩(Buhl et al., 2014)や空隙率 43.08±0.4%凝灰岩(Winkler et al., 2016)に対して衝突実験が行われており、各実験は、衝突速度を 5km/s に保ち、弾丸の直径を変化させ、運動エネルギーを変化させて、衝突表面下の変形や空隙率を観察している。一方、空隙率 50±2%(Yasui et al., 2012)の石膏に対しては、フラッシュ X 線画像で表面下に圧密が見られる。本研究では、空隙率 53～58%の石膏標的に対して衝突速度と弾丸の種類を変化させて実験を行い、クレーター直径・深さに加えて、表面下の圧密について調べる。

実験方法：衝突実験は宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて真空下(1.5~6.5 Pa)で行った。弾丸には球形のガラス(1/8 inch)と SUS(1/16 inch)を使用し、石膏標的に対して衝突速度 1.5~5.5 km/s の範囲で衝突させた。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の時間変化を観察するためにフラッシュ X 線画像を撮影した。

実験結果：圧密の度合いを見るために、衝突前後の標的の質量変化分の体積と実験の結果生じたクレーターにガラスビーズを充填して得られた体積を求めた。図で「↑」は、下限値を示す。「↑」がついてないものだけ見ると、わずかであるが圧密されていることが分かる。今後は、フラッシュ X 線画像を用いて、圧密部分の形状を見ていく。



P33

衝撃圧力分布から推定する重力支配クレータサイズ

○黒澤耕介[1], 髙田智史[2]

[1]千葉工業大学 惑星探査研究センター, [2]東京大学 地震研究所

太陽系の大気を持たない固体惑星/衛星を支配する地形は衝突クレータである. 衝突クレータのサイズ頻度分布はその天体の衝突史を求め, 熱進化や表層進化を推定するための重要な手がかりの一つである. このような研究を行うためには観測される衝突クレータからそのクレータを作った衝突がどのような規模(天体サイズ, 衝突速度)のものであったのか？を推定する手段をもつことが不可欠である. そのために多様な条件で室内衝突・数値衝突実験が行われ, 衝突条件と最終的に形成されるクレータサイズを推定するための枠組みが構築されている(e.g., Pi-group scaling rules).

現在広く用いられているスケーリング則は, (1)クレータサイズに関連するパラメータ(例えば衝突天体サイズ, 衝突速度, 重力加速度など)を抽出し, (2)次元解析によって無次元量を導き, (3)無次元量間の関数形を仮定し, (4)その係数を室内衝突・数値衝突実験によって決定する, という手順で構築されている. よくできた枠組みであるが, その適用限界は明確でないことに注意が必要である.

今回我々は既存のスケーリング則と相補的な方法として, 衝撃波伝播とそれに続く掘削流形成の物理から演算的に重力支配域におけるクレータサイズを推定する手法を提案する. 簡単な考察からクレータサイズは衝突天体が持つ運動エネルギーの 1/4 乗に比例して増加することがわかる. しかし, その係数を決定し, クレータサイズを定量的に計算するためには放出物が持ち去る運動エネルギーを求めることが必要となる. 過去の核爆発実験によって岩石物質中の衝撃圧力・粒子速度減衰率は調べられている. 適当な EOS を用いて断熱膨張関係式(リーマン不変量)を積分すると衝撃波伝播後の残留速度を計算することができる. 掘削流線を仮定すれば, ある流管中の重力ポテンシャルエネルギーと残留速度による運動エネルギーを比較することによってクレータ形成が止まる動径距離(=クレータサイズ)を解析的に計算することができる. 今回は修正 Z model(Z-EDOZ)によって掘削流線を与え, 花崗岩に対する Tillotson EOS を用いて残留速度を求め, クレータサイズを計算した. 仮定した Z の値や貫入深さに依存するが, 既存のスケーリング則とおおよそ調和的な結果を得た. この計算方法では同時に動径距離と放出速度の関係, 放出質量と放出速度の関係も得ることができる. それらについても既存のスケーリング則と比較した結果を報告する.

P34

巨大氷惑星に対する衝突現象の考察

○ 黒崎健二 [1]，犬塚修一郎 [1]

[1] 名古屋大学

近年の観測技術向上と観測データの蓄積により，太陽系外には地球の数倍程度の半径の惑星，すなわち海王星サイズの天体が多数報告されている．特に，Kepler 望遠鏡の成果により，海王星サイズの天体の報告数は最も多い，これらの天体は，その平均密度から，固体成分のコアに分厚い大気をまとった惑星か，氷成分に富んだ惑星であると考えられている．このような惑星は形成初期に巨大衝突を受けていると考えられているが，巨大衝突の発生により惑星の自転軸が変動する可能性 (Slattery et al. 1992) が指摘される他，内部組成が混合することも考えられる (Liu et al. 2015)．特に，氷成分に富んだ惑星が巨大衝突を受けてエンベロープや大気が氷成分で汚染されると，その後の熱進化に影響を与えることが示唆されているため (Kurosaki & Ikoma 2017)，巨大衝突によって決定される海王星型惑星の初期条件は，観測された惑星系と比較・検証する上で重要である．

本研究では，Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (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，衝突前後での内部での組成構造の変化や衝突後の材料物質の分配を議論するため，SPH 法の計算法の開発を行う．SPH 法は FDPS を基にした標準 SPH 法を採用し，水素の状態方程式は Saumon et al. (1995), 水の状態方程式を SESAME を用いた．作成したコードをもとに，衝突前後における計算法の精度や有効性などについて報告する．

雪標的に作られる衝突クレーター地形

○鈴木絢子[1]，保井みなみ[2]，荒川政彦[2]，長谷川直[1]
[1]JAXA/ISAS，[2]神戸大学

近年の惑星探査技術の発展により，高精細な固体天体表層の画像が取得され，細かな構造を調査・研究することが可能となった。強度を持つ固体天体上では，小さなクレーターは天体の重力よりも表層物質の強度で制御されていると考えられ，強度支配域の衝突クレーター研究への注目が高まっている（例えば，Kenkmann et al., 2011; Suzuki et al., 2012）。固体物質への強度支配域の衝突クレーター形成実験は長年に渡って行われており，半球形をしたピット領域とそれを取り巻くスポール領域からなる特徴的な衝突クレーターができることが知られている（例えば Dufresne et al., 2013 とその引用文献）。一方で，天然では顕著なスポールを持つクレーターがほとんど観察されていない。これは，実験室スケールでの実験結果を惑星スケールに外挿するという，衝突クレータースケーリング則の観点からは，解決すべき問題である。

標的の物質強度は，スポールの形成を制御する主要なパラメータの 1 つと考えられるが，岩石などの標的物質を用いた一連の実験では制御することが大変困難である。しかし，雪は，融点よりも低い温度で焼結し，焼結時間と強度に一定の関係があることが知られている（Arakawa and Yasui, 2011）。そこで我々は，スポール形成に標的強度が与える影響を調べるため，焼結時間を変化させた雪標的上の衝突クレーター地形を詳細に調べた。

実験は，神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻の低温実験室にて，室温-15℃の環境下で行った。標的雪試料は，氷塊を糸鋸・ブレンダーで細かく砕いたもののうち，直径 710μm 以下の粒子のみを，直径 14cm，高さ 13cm の金属容器に詰めて作成した。試料容器中の雪試料の質量を測定して求めたバルク密度と空隙率は，それぞれ約 0.6g/cm^3，約 35%であった。氷粒子を容器に詰めてから弾丸衝突までの時間を 15 分〜20 時間の範囲で変化させて，雪標的の強度を制御した。本研究では，積雪の硬度を計測する方法の一つである木下の方法（木下，1960）を参考に，金属円柱をある高さから試料表面に垂直に落下させ，そのときのくぼみの深さから求めた値を雪試料の強度とした。弾丸は直径 8mm，高さ 8mm，質量 0.36g の高密度ポリエチレン円柱で，スムーズな加速のため後端に直径 10mm，高さ 8mm，質量 0.014g の発砲ポリスチレン円柱を接着剤で貼付した。これを小型縦型ガス銃で水素ガスを用いて約 200m/s に加速した。高密度ポリエチレン円柱と発砲ポリスチレン円柱は，接着したまま飛翔し，標的に衝突してクレーターを形成した。

雪標的上にできたクレーターは，主に半球形をしたピット領域とそれを取り巻く不定形のスポール領域から成り，典型的な強度支配域のクレーターに類似している。ピット直径と深さは，標的強度が大きくなるにつれて小さくなった。一方，スポール領域を含むクレーター全体の直径は，強度と共に最初は増加し，ピークを迎えたのちに減少して，今回の実験の最長焼結時間 20 時間の場合ではついに消失した。

P36

隕石衝突に起因する金属ーケイ酸塩鉱物の分化過程を模擬した回収実験

○藤川勇志[1]、境家達弘[1]、寺崎英紀[1]、近藤忠[1]、重森啓介[2]

[1]大阪大学大学院理学研究科、[2]大阪大学レーザー科学研究所

初期の惑星は太陽の周囲に存在する始原物質が集積することで形成される。始原物質は主に鉄合金とケイ酸塩鉱物の混合物である。始原物質が集積している段階の微惑星においては鉄合金とケイ酸塩鉱物はランダムに分布していると考えられる。一方で現在の太陽系の惑星は鉄合金からなる核を中心にその周りをケイ酸塩鉱物のマントルが覆っていると考えられている。よって惑星が進化する過程でランダムに分布していた鉄合金が中心に集中し核を形成するプロセスが存在したと考えられる。近年の計算機によるシミュレーションでは天体衝突によって発生する局所的な金属ーケイ酸塩の分離が核形成の引き金になることが指摘された [1]。

我々はこの金属ーケイ酸塩分離のメカニズムとして衝撃圧縮による物質の移動に着目した。衝撃波を伴うような瞬間的な圧縮ではある圧力を超えると物質は溶融する。天体衝突においても同様に衝突直下のある領域が融解することが指摘されている [2]。金属とケイ酸塩のランダムに分布した初期の天体においてこのような衝突現象が起きた場合、溶融した領域の内部で金属・ケイ酸塩鉱物の空間的な分布が変化すると考え、これを模擬する実験を行った。

瞬間的な高温高圧を発生させる機構として大阪大学レーザー科学研究所の高強度レーザー「激光 XII 号」を用い、試料表面に対して 40〜200GPa の圧力を加え、回収を試みた。試料は金属・ケイ酸塩鉱物を粉末にしたものを様々な混合比で混ぜ合わせた物を用いた。

回収した試料に対して走査型電子顕微鏡や X 線回折での分析を行った。

本発表では回収試料の分析結果、及びそこから考察される惑星核の形成過程への応用について議論する。

[1]Ricard, Y. et al. (2009) *Earth and Planetary Science Letters* ,284 ,144-150

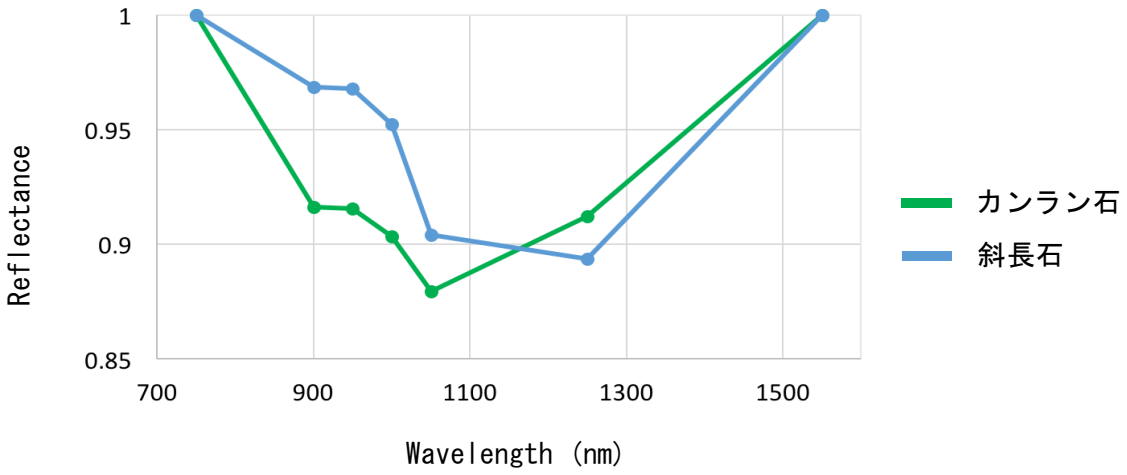
[2]Melosh, H. J. (1989) *Impact Cratering*

P37

危難の海盆地エジェクタ層中の鉱物分布

○我妻雄史[1], 平田成[1]
[1]会津大学

月の上層部はLunar Magma Ocean (LMO) が晶出した斜長石、カンラン石、輝石などによって構成されていると考えられている。しかし、これらの鉱物がLMO冷却プロセスの中でどのくらいの深さに分布したのかは諸説あり明らかになっていない。(Snyder et al., 1991 and 1992, Taylor et al., 1982) 月形成初期の内部構造を考察するには、現在の月の内部構造を明らかにすることが重要な役割を果たす。Yamamoto et al., 2010, 2012 では月探査機SELENE/Kaguya搭載のSpectral Profiler(SP)データを用いて斜長石、カンラン石の月全球分布を明らかにした。一方、特定の地域における鉱物の詳細な分布を解析することも、月の上層部構造を考える上で重要である。特に、大きな衝突盆地は深くまで掘削されているので、大きな衝突盆地周辺の鉱物分布を解析することは重要である。本研究では斜長石、カンラン石の存在が先行研究によって確認されていた危難の海盆地周辺の鉱物分布を、同じくSELENE/Kaguya搭載のMultiband Imager (MI) のデータを用いて明らかにした。MIはSPよりも空間分解能が高く、稠密な観測を行なっているので、特定の地域を詳細に解析することに適している。カンラン石は、1050 nmで最も強い吸収を示すことと、1 μm帯での吸収の全体形状に着目し、MIデータから顕著なカンラン石のスペクトル特徴を示す地点を抽出した。斜長石は、1250 nm で最も強い吸収を示すことと、同じく吸収の全体形状にも着目した。鉱物が見つかったクレーターの直径サイズからクレーターの掘削深さを求め、危難の海盆地エジェクタ層内の鉛直構造について考察を行なった。



本研究で設定した条件で抽出されたカンラン石、斜長石のスペクトルデータの例

P38

月周回衛星「かぐや」による地球起源酸素の観測

○寺田健太郎[1]、横田勝一郎[2]、齋藤義文[2]、北村成寿[2]、浅村和史[2]、西野真木[3]
[1]大阪大学, [2]宇宙科学研究所, [3]名古屋大学,

月周回衛星「かぐや」のプラズマ観測データにより、地球起源の 1-10 keV の O^+イオンが月面に到達していることを明らかにした。その結果について報告する。

P39

月面氷探査のための、霜付き鉱物の近赤外反射スペクトル測定と機械学習による最適な観測バンド組み合わせの決定

○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

１．　はじめに

月極域に存在するクレーター内部の永久影領域表面では氷の存在可能性が示唆されており、氷が月鉱物の表面に付着した場合に鉱物の表面反射スペクトルの形状に変化を与えると考えられる。そのため、反射スペクトル観測から月表面鉱物に付着した氷の存在を検出することが可能になると考えられる。本研究では実験室内で鉱物に氷を付着させ、その反射スペクトル測定を行った。また将来の月氷探査計画を考え、機械学習のアルゴリズムを用いて氷観測に最適な観測波長領域組み合わせの決定を行った。

２．実験

密閉した冷却ステージで氷点下まで冷却した鉱物に湿潤大気を通し、月表面鉱物に氷が付着する様子を実験室で模擬した。実験にはかんらん石粉末試料と月シミュラント（清水建設）を用い、液体窒素を用いて試料の冷却を行った。大気の流入には４５Lのビニール袋を用いた。画像分光データは近赤外領域（900nm～1700nm）に感度を持つ近赤外カメラ（XENICS Xeva-1.7-320）を用い、グリズムに通して分光した反射光を撮像して得た。撮像は湿潤大気を通す前と、以降はビニール袋１袋分の大気を通過させる毎に行い、試料への氷付着が肉眼で確認できるまで大気の通過と撮像を繰り返した。

３．反射スペクトル観測の結果・観測最適波長の決定

大気の通過回数を増やすにつれて、かんらん石粉末試料・月シミュラント試料ともに氷付着に伴う反射スペクトル形状変化を観測した。得られた反射スペクトルから観測最適波長の検討を行った。検討のため反射スペクトルデータの波長を900nm～1600nm、5nm間隔のデータ点にリサンプルした。波長の決定はサポートベクターマシン（SVM）に基づいて行った。通気前、通気１回目の反射スペクトルデータを氷なしグループ、通気２，３回目を氷ありグループと仮定し、２グループ間の超平面境界をSVMより算出し、氷検出に最適な波長を検討した。かんらん石粉末では1500nm、シミュラントでは1385nmが最適波長として得られた。かんらん石試料の観測波長1500nmは氷の吸収ピークを見ていると考えられるが、シミュラントでの最適波長1385nmは氷の吸収ピークから外れている。これはシミュラント自身が広範囲の波長光を吸収するため、氷そのものの光吸収の効果が見えにくくなり、氷付着に伴う光散乱の効果の方が吸収より強く現れたと考えられる。

P40

ディープラーニングを用いたMI画像中の影領域検出手法の検討

○伊東里保[1]、井上博夏[2]、石原吉明[2]、大竹真紀子[2]、大嶽久志[2]、中村良介[1]
[1]産業技術総合研究所、[2]JAXA

月面上には、Dark Mantle Deposit(DMD)のように反射率が特に低い領域が存在しており、月面上から新たにそういった領域を発見することが重要な課題とされている。月探査データの蓄積により月全球においてDMDの探索を行えるようになった一方で、例えば月周回衛星かぐやのMultiband Imager(MI)画像からDMDの自動検出を試みた場合、MI画像内にある輝度の低い領域（影）がDMD検出の妨げとなる。本研究の目的は、DMD検出の前処理としてMI画像上の影領域の除去を行うための、影領域検出手法の検討である。

まず初めに、MI画像に対応する地形データ（SLDEM）を用いて日照シミュレーションを試みた。その結果、シミュレーションにおいては日陰（つまり太陽光が当たらない場所）が殆ど存在しないにも関わらず、見かけ上はMI画像内に「影」領域が多数存在することが明らかとなった。このことから、人がこれまで影であると認識していた領域は、実際は日光が遮断されてできた日陰ではなく、太陽入射角等の違いにより周囲よりも相対的に輝度が低くなっていただけの場所である可能性が示唆される。一方で、こうした領域では、地形補正精度が十分でなくスペクトルの異常が多く見られる。よって、本研究では実際には太陽光がわずかながら入射していても、見かけ上暗く見える領域を「影」と定義し、DMD探索の対象からは外すこととした。

ディープラーニングは画像認識や物体検出等の分野で高い性能を得ている機械学習の手法の１つであり、MI画像に即した見かけ上の「影」を検出するためにも有効であると期待される。なかでも近年は、より本物に近い模擬画像を生成するネットワークと、その模擬画像が本物か偽物かを識別するネットワークを対立させながら学習を進めるGenerative Adversarial Network (GAN)が注目されている。本研究では、GANの手法の１つであるconditional GAN (cGAN)[1]を用いて影検出を試みた。緯度６０度以上のMI画像３枚と、各MI画像に対応する影/非影の二値画像のペアで学習を行ったGANは、入力されたMI画像に対応する影/非影の二値画像を生成する。

図１に、cGANによる影領域の検出結果を示す。教師として与えたMI画像と似た特徴を持つ領域においては概ね良好な検出結果が得られた。今後は、最終的な目的であるDMD検出タスクに対して有効な精度で影検出を行えるか等の検証も含めて、精度向上案の検討を行っていく。

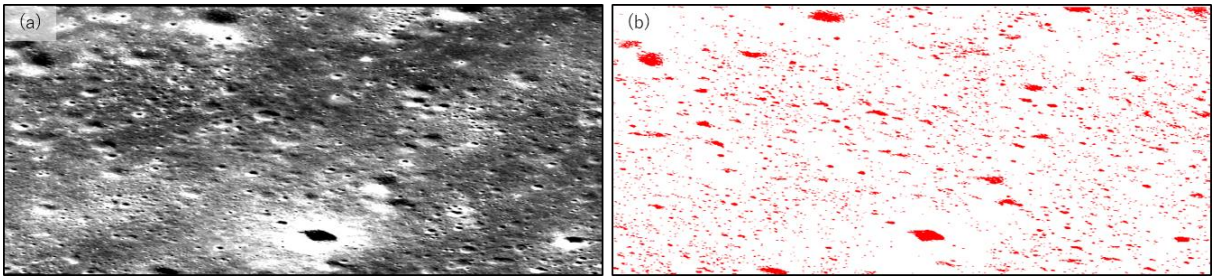


図１：影領域検出結果。(a)MI画像（MIA_3C5_03_04752S652E1122SC）、(b)cGANの検出結果。赤が影領域。

Reference: [1] Isola, Phillip, et al. "Image-to-image translation with conditional adversarial networks." arXiv preprint arXiv:1611.07004 (2016).

P41

危難の海から回収されたルナ 24 号レゴリス試料の地球化学的考察

○諸本 成海[1]、寺田 健太郎[1]、河井 洋輔[1]、橋口 友実[1]、佐野 有司[2]、鹿児島 渉悟[2]、高畑直人[2]、宮原 正明[3]

1. 大阪大学大学院理学研究科、2. 東京大学大気海洋研究所、3. 広島大学大学院理学研究科

1976 年に打ち上げられたルナ 24 号は、月の危難の海に着陸しドリル掘削により計 170g のレゴリスサンプルを採取した。ルナ計画・アポロ計画で採取されたサンプルに対する先行研究から、ルナ 24 号試料は Very-Low Ti 玄武岩に分類され、人類が手にする月試料の中では最も若い 29 億年の火成活動が報告されている。しかしながら、レゴリス試料は一粒一粒が起源の異なる粒子であること、また報告されている放射年代は後のインパクトイベントによって乱されている可能性が指摘されている。本研究では、まだ年代値が報告されていない深さ 130cm 付近のルナ 24 号のレゴリス試料の一粒一粒に関し、鉱物学的/地球化学的記載を、アパタイトを含む粒子については 2 次変成に強い局所 U-Pb 年代分析を行った。U-Pb 同位体分析の結果、アパタイトを含む粒子の多くは約 35 億年という、先行研究で報告されているよりやや古い結晶化年代を示したほか、一部の粒子はショックイベントによる放射年代の乱れを示した。得られた結果についてリモートセンシングの結果と比較し、危難の海における火成活動について、ミクロ／マクロの両面から年代学的考察を行う予定である。

月の雨の海におけるコペルニクス紀の断層活動

○嵩由芙子[1]，山路敦[1]，佐藤活志[1]
[1]京都大学大学院理学研究科

月表層に分布するリッジは、断層または褶曲構造であると解釈されている。その多くが海内部に弧状または放射状に分布しているため、海に堆積した玄武岩溶岩の荷重が原因で地殻が押し曲げられた結果形成されたと考えられてきた(e.g., Solomon and Head, 1979)。また、このテクトニクスは堆積同時変形であり、月の主要な火成活動は、３０億年前までに終了していることから、リッジの形成も３０億年前までに終了したと従来考えられてきた。

しかし、月周回衛星かぐやのレーダーサウンダーによる地下構造探査の結果、海の玄武岩堆積よりも後に形成されたリッジが晴れの海で見つかった(Ono et al., 2009)。これは、月のテクトニックな地形が海にローカルなテクトニクスだけでなく、他の成因でも形成されたいたことを示唆する。玄武岩溶岩の荷重の他に考えられる成因として、全球冷却に伴う収縮や、軌道進化に伴う変形などが挙げられる。

本研究では、雨の海地域のリッジに沿った断層活動がいつまで続いていたのかを二つの方法で調べた。まず、断層上に分布する、断層で変形したクレーターの形成年代に注目した。断層で変形したクレーターは、断層が活動を終了するよりも前から存在していたことを意味する。そこで、変形したクレーターの地形劣化度(Degradation level)を観察し、８億年よりも若い（コペルニクス紀に形成された）クレーターの位置を調べ、コペルニクス紀にも断層活動があった地域を明らかにした。もう一方の方法では、断層上に分布する変形していないクレーターに注目した。変形していないクレーターは、断層活動が終了した後で形成されたことを意味する。そこで、一次元クレーター年代法（Daket et al., 2017）を使って、断層活動終了年代を推定した。

その結果、雨の海では、コペルニクス紀まで広く断層活動があったこと、またあるリッジの断層活動終了年代を見積もったところ、約２億年前まで続いていたことがわかった。

Solomon, S. C. and Head, J. W. (1979), ‘Vertical movement in mare basins: Relation to mare emplacement, basin tectonics, and lunar thermal history’, *J. Geophys. Res.*, **84**, 1667–1682.

Ono, T., Kumamoto, A., Nakagawa, H., Yamaguchi, Y., Oshigami, S., Yamaji, A., Kobayashi, T., Kasaha-ra, Y., and Oya, H. (2009), ‘Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside maria of the moon’, *Science*, **323**, 909–912.

Daket, Y. (2017) ‘Copernican and Eratosthenian tectonics in the northwestern Imbrium region of the Moon revealed by conventional remote sensing techniques and newly developed one-dimensional crater chronology’, Ph.D. Thesis.

かぐや観測データによるスミス海の地下構造

○石山　謙[1]
[1]ISAS/JAXA

スミス盆地は、2°S, 87°E に位置しており、地球から目視することが困難な月の盆地の一つである。スミス盆地は、5 つのリング構造を持ち、メインリングの直径で~840km ある[Spudis, 1993]。この盆地は、先ネクタリアン代（約 39 億年前以前）に形成され、スミス盆地では、火山活動が約 31.4 億年前まで起こり、溶岩が冷えたことで海（玄武岩）領域が形成された [Hiesinger et al., 2010]。スミスの海の表面には、東西に沿ったリッジ（約 2.5°N, 85°E～90°E）が形成されている。また、噴出した溶岩は、約 1.28km の厚さまで堆積していることが盆地の直径と深さの関係によって推定された [Williams and Zuber, 1998]。盆地の地形や海の地下構造を理解することは、月の岩石の弾性パラメータや、衝突のメカニズムの解明に役立つと考えられている[e.g., Solomon and Head, 1980; Williams and Zuber, 1998]。したがって、本研究では、かぐや衛星に搭載された月レーダーサウンダー（LRS）の観測データを解析することで、スミスの海の地下層の有無や、その分布を調査した。

LRS は、スミスの海で、経度方向に~0.12°の間隔で、南北方向に沿って、データを取得され、地下層を明瞭に認識するために、合成開口処理が施されたデータ[Kobayashi et al., 2012]を利用した。LRS データからは、4 つの地下反射面が発見され、それらの深さは、~120m、~180m、~300m、~410m であった。これらの地下反射面は、玄武岩と玄武岩の間に堆積した薄いレゴリス層によって形成されている [Ono et al., 2009]。浅い 2 つの地下層は、スミスの海の全体で確認されたが、深い 2 つの地下層は、スミスの海の東西に沿ったリッジの南側のみで発見され、北側では発見されなかった。

深い 2 つの地下層がリッジの北側で発見されない理由は、その場所の海が浅いためである。リッジ上には、溶岩に埋没したクレーターがあり、そのリムは、高地の岩石から構成されている。その直径から海の厚さを推定すると、北側の領域は、~300m 以下の厚さしかない。これは、DeHon and Waskom [1976]の研究ともよい一致を示している。したがって、深い 2 つの地下層は、リッジの下にある高地と海の境界で阻まれており、北側まで、地下層が伸びてないと考えられる。また、荷重モデルに基づくと、海の厚さが大きく変わる場所よりも内側で、リッジが形成されやすい特徴がある[Solomon and Head, 1980]。したがって、スミスの海にあるリッジを形成するために、最適な月の岩石（特に、リソスフェア）の弾性体パラメータを推定できると期待される。発表では、本研究の中間報告を行う。

P44

MULTUM-SNMS を用いた Murchison SiC の同位体分析

○宮晃平[1]，寺田健太郎[1]，河井洋輔[1]，薮田ひかる[2]，松田貴博[1]，
豊田岐聡[1]，青木順[1]，石原盛男[1]，中村亮介[3]
[1]大阪大学大学院理学研究科，[2]広島大学大学院理学研究科，[3]大阪大学産学連携本部

マーチソン隕石をはじめとする始原的隕石中には、太陽系形成時の高温過程による同位体的均質化を免れたプレソーラー粒子と呼ばれる微粒子がごく微量(～ppm)に存在する。これら微粒子の同位体組成は太陽系のものとは大きく異なり、太陽系前駆天体における元素合成についての情報をもたらす。例えば、プレソーラーSiC 粒子の Sr, Mo, Zr, Ba, Eu などの同位体比が、AGB 星内の He 層における遅い中性子捕獲反応の中性子密度や温度などの指標となることが報告されてきた[1-4]。しかし、SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry)を用いた分析手法では 2 次イオン生成効率が 1%以下と低いために微量元素の分析が難しく、また RIMS (Resonant Ionization Mass Spectrometry)を用いた手法では元素固有の共鳴波長をもつレーザーによるイオン化を行うため、先行研究ではごく一部の元素の分析に限られてきた。この事は、粒子一つずつが異なる天体を起源に持つプレソーラー粒子の多元素同位体分析に対して、その分析手法に改善の余地があることを示唆している。

このような背景のもと、私たちの研究グループではポストイオン化 2 次中性粒子質量分析計(Secondary Neutrals Mass Spectrometer: SNMS)の開発を行ってきた。大強度のパルスレーザー(3.5mJ/pulse)を中性粒子に照射しトンネルイオン化させることで、原理的にはレーザーの波長に依らず全ての元素を同時にイオン化することが可能となる。また質量分析計には、質量分解能が 2 万の多重周回飛行時間型質量分析計 MULTUM を用いることで、広い質量範囲(10-200Da)において、濃度 100ppm 程度の検出感度での多元素の同時同位体分析が可能となりつつある[5]。

発表では、マーチソン隕石から化学処理によって単離した SiC 粒子について、その主成分である Si の同位体分析からプレソーラー粒子であることを明らかにし、また重元素同位体分析の現状について報告する。

[1] Terada, K. et al. (2006) NewAR 50, 582.
[2] Nicolussi, G. K. et al. (1998a) GCA 62, 1093.
[3] Nicolussi, G. K. et al. (1998b) PRL 81, 3583.
[4] Savina, M. R. et al. (2003) GCA 67, 3201.
[5] Terada, K. et al. (2017) JPS Conference Proceedings, 14, 011103.

P45

月面のレゴリスサンプリング法の開発

○新述隆太[1]、田坂直也[1]、山中千博[1]、橋爪光[2]
[1](大阪大学)、[2](茨城大学)

近年リモートセンシングによって月極域には微量ながら水が存在することがわかってきた。我々は、月面レゴリス中に含まれる水を採取し「その場」で水の同位体を観測する装置開発を目指している。
　試験的に製作したレゴリス回収装置は、2重管構造の掘削管をレゴリスに突き刺し、探査機着陸後に残余するヘリウムガスを噴射して、ガス駆動により、掘削および試料回収を行うものである。このとき、2重管外筒部より、ガスを噴射し、内筒部より試料を回収する。月面真空中においては、外部に漏れ出す部分もあるが、内筒部分に試料を吸い上げることは可能であり、その後、サイクロン型のフィルターとセラミックフィルターを通すことで、レゴリスの回収が可能となり、また後段の分析部分へのダストの混入は避けられる。この方式で深度ごとに集めたレゴリスを、加熱することにより含有水蒸気を回収する予定である。

今回、試作した装置を用いた実験を行うに当たり、月面レゴリス模擬物質として、富士山の玄武岩火山灰を粒径100μm 程度にしたものを作成した。なお今回の実験では、ヘリウムでなく圧縮空気を用いた。月面低温環境では砂の水分量により、表面硬度が変化するため、低温での回収量を地球重力下で評価した。結果として、レゴリス層が氷結して硬度が増加しない範囲（約5%以下）の水分含有では、この装置によりレゴリスがうまく回収されることがわかった。

JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計（GALA）で目指すサイエンス

Science objectives of the GAnymede Laser Altimeter (GALA) onboard JUICE spacecraft

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

[1]大阪大学，[2]北海道大学，[3]国立天文台，[4]総合研究大学院大学，[5]宇宙科学研究所，[6]千葉工業大学，[7]放射線医学総合研究所

2022 年の打ち上げに向けて準備が進む木星系探査機 JUICE は，世界初の月以外の衛星周回機であり，搭載するレーザ高度計 GALA は氷天体に対する世界初のレーザ測距を行う．JUICE は 2029 年の木星到着後，はじめは木星を周回しながらエウロパ，ガニメデ，カリストへのフライバイ探査を複数回行い，2032 年にはガニメデの極周回軌道へと投入される．３衛星へのレーザ測距を通して，氷天体初となる定量的な地形情報やアルベド，粗度情報を獲得し，氷テクトニクスの全容を明らかにする．また，衛星の潮汐応答をモニタリングすることによって，地下海の存否をはじめとする内部構造への新たな制約の取得も見込まれる．

我々は，欧州宇宙機関の大型計画として開発が進む JUICE へ搭載するレーザ高度計 GALA の開発を，ドイツ航空宇宙センター主導のもとで進めている．本ミッションの調査対象となる３衛星は，かつてガリレオ探査機がフライバイ調査を行ったが，アンテナの展開失敗などの数々のトラブルから取得データ量が限定されただけでなく，データの表面被覆率や空間解像度が極めて不十分であった．JUICE では，ガニメデに対し全球調査を行うことで知見を本質的に刷新し，表面から内部へ至る全容の解明を目指す．エウロパへのフライバイは２回のみだが，カオス領域と呼ばれる，その内部に地下湖とも言うべき局所的な液体水リザーバーの存在が示唆されている重要な地域を調査する．カリストへは十数回のフライバイを行い，探査機の軌道傾斜角を上げることでガリレオ探査ではカバーできなかった高緯度域も調査する．

GALA は，探査機と衛星間のレーザ測距によって衛星表面の起伏を計測する．それによって，氷衛星を彩る多様な地形形態やそれらの分布が把握でき，氷が支配する地質活動（氷テクトニクス）の理解を飛躍的に向上させる．また，周回軌道から測距を続けることで衛星形状や回転状態の時間変化を捉えることができる．つまり木星からの潮汐力による衛星の応答（変形や回転変動）を定量的にモニタすることで，地下海の存否を判別できる可能性があるほか，内部構造に関わる因子の精度が大きく向上する．さらにレーザの反射パルスの強度と形状は，レーザ波長での表面反射率や 10 m 規模の表面粗度を反映するため，表面の風化侵食の程度や組成の情報を，日射角などの観測条件に依存しない情報として得ることができる．

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

P47

SMILES-2 を用いた火星/金星大気の THz 帯リモートセンシングを見据えた放射輸送シミュレーション

○西田侑治[1], 前澤裕之[1], 真鍋武嗣[1], 塩谷雅人[2], 西堀俊幸[3], 鈴木睦[3], 佐川英夫[4], 水野亮[5], 長濱智生[5], 落合啓[6], Baron Philippe[6], 入交芳久[6], 鵜澤佳徳[6]

[1]大阪府立大学, [2]京都大学, [3]JAXA/ISAS, [4]京都産業大学, [5]名古屋大学, [6]NICT

現在、国際宇宙ステーション JEM/SMILES の後継となる SMILES-2(Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2) のワーキンググループが立ち上がり、サブミリ・テラヘルツ(THz)波帯での地球中間圏・下部熱圏の衛星観測が提案されている。このミッションでは、地球における O_3 層回復や地球温暖化などの予測精度向上や成層圏・中間圏の風速場、重力波/Planetary 波の影響などの総括的理解を目指しており、H_2O, N_2O, NO_2, NO, CH_3Cl, BrO, CO, H_2CO, OH, O_2, O_3 and O-atom などの分子種を観測ターゲットとし、487 GHz から 2.0 THz 帯までをカバーする複数バンドの観測を見据えている(Suzuki et al. Proc. of SPIE, 2015)。受信機には閉サイクルの 4 K 機械式冷凍機を搭載し、サブミリ波帯に対しては SIS 接合、THz 波帯にはナノ細線による HEB ミクサを集積した超伝導ヘテロダイン検出素子実装することを想定している。このヘテロダイン分光の手法は、周波数分解能が高く高高度まで分子の高度分布を算出できるほか、背景光源が不要である、ダスト等の吸収散乱の影響を受けにくい、といった特徴がある。長らく高感度ヘテロダイン検出器にとって THz 帯は未開拓な波長域であったが、我々はこれまでに NbTiN 超伝導細線を用いた THz 帯ホットエレクトロンボロメータ(HEB)ミクサ検出素子の開発を推進してきた。現在、SMILES-2 のリムサウンディング観測に対応可能な、ビーム指向性の優れた 1.8-2.0 THz 帯ホーン/導波路集光型 HEB ミクサ素子への改良を進めている。

SMILES-2 では、地球大気だけでなく、隙間時間を利用した太陽系地球型惑星の観測も視野にいれている。中心星の活動環境下において惑星の中層大気がどのように化学・物理的にバランスしているかは重要なテーマである。中でも、CO_2 の安定問題や、火星大気における CH_4 の消失過程など、大気の酸化過程の解明は急務の課題となっている。これには地上から観測が困難な H_2O や O_2 だけでなく、THz 帯に輝線をもつ OH や O 原子などの酸化剤の同時観測が鍵を握る。これらの分子・原子は、系外惑星のバイオマーカーの振る舞いの理解にも重要な役割を担う。本研究では SMILES-2 の応用を想定した、火星や金星の中層大気におけるこれらの分子種のスペクトル線の放射輸送シミュレーション、その他の天文観測応用、超伝導 NbTiN 細線を用いたホーン/導波路型 HEB ミクサ検出素子の開発状況について報告する。

P48

超小型火星探査機搭載 THz ヘテロダイン分光システムの開発検討

○松本怜, 西田侑治, 真鍋武嗣, 前澤裕之[1], 笠井康子, 黒田剛史, 落合啓, Richard Larsson, 佐藤滋[2], 今村剛, 和地瞭良, 阪上遼, 高橋亮平, 中須賀真一[3], 長谷川豊, 西堀俊幸[4], 佐川英夫[5], 笠羽康正[6]

[1]大阪府立大学, [2]情報通信研究機構, [3]東京大学, [4]宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所, [5]京都産業大学, [6]東北大学

近年火星大気では、ハーシェル宇宙望遠鏡(ESA)によって、酸素分子の混合比が低高度において増加する様子が捉えられたが、この低高度の酸素の挙動はまだ良く理解が進んでいない。また、局所的なメタンの発生も NASA の赤外望遠鏡やキュリオシティによって観測されているが、その起源や消失過程は未解明であり、二酸化炭素の安定問題含め、火星環境における基本的な化学反応ネットワークの理解が急務な課題となっている。我々は、東京大学工学系研究科の中須賀研究チームが検討を進めている火星に向けた超小型オービターやランダーを用いて、0.4 THz 帯ヘテロダイン分光システムを搭載し、火星大気のリモートセンシングを行う計画を推進中である。THz 帯ヘテロダイン分光は、高い周波数分解能により惑星大気の微量分子の高度分布を高精度に導出できる他、エアロゾル/ダストの影響を受けにくく火星全体を覆うようなダストストーム発生時でも低高度まで見通して大気の観測が可能であること、背景光源が不要であり昼夜の面を問わず大気を観測できる強みがある。これにより、火星大気中の O_2, H_2O, O_3, CO やそれらの関連同位体分子などの昼夜・四季を通じた観測的研究、Zeeman 効果による低高度の火星磁場の計測、惑星における酸素などのバイオマーカーのポテンシャルを探ることを目指す。

受信機には新規の円偏波分離デバイスと SBD ミクサと逓倍型の固体局部発振器を内蔵した常温のヘテロダイン検出器を、分光計にはマックスプランク研究所のチャープ変換型分光計を採用する計画である。超小型衛星であるため、現在の検討段階で搭載できる THz ヘテロダイン分光システムのバジェットは 7kg 程度以下の制限があり、システムの小型化や耐久性能、熱の影響の検討などがシビアとなる。Mars Climate Database によると着陸候補地の1つである火星の低緯度地域のイシディス平原は、1 公転周期の季節変動と日照変化によって地表付近の温度は年間を通して、190～250 K 程度まで変動することがわかる。着陸機の火星の大気圧環境を想定し、太陽からの輻射や気温の日変化などを考慮した time dependent な 3 次元熱流体シミュレーションを実施したところ、夜間はヘテロダイン検出器の許容動作範囲内に収まらないケースもあり、ヒーターや Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)の熱伝導、シールドの輻射率を効果的に調整するなどにより、構造・熱収支などの最適化の検討も進めている。本講演では、これら熱流体解析の結果や、THz ヘテロダイン分光システムの検討状況ついて報告する。

火星衛星探査計画 MMX とそのサイエンス 2017

○倉本 圭[1]，川勝康弘[2]，藤本 正樹[2]，玄田 英典[3]，今村 剛[4]，亀田 真吾[5]，松本 晃治[6]，宮本英昭[4]，諸田 智克[7]，中村 智樹[8]，小川 和律[9]，尾崎 正伸[2]，佐々木 晶[10]，千秋博紀[11]，橘 省吾[1]，寺田 直樹[8]，臼井 寛裕[3]，和田 浩二[11]，渡邊 誠一郎[7]，MMX サイエンスチーム

[1]北大，[2]宇宙研，[3]東工大，[4]東大，[5]立大，[6]国立天文台，[7]名大，[8]東北大，[9]神戸大，[10]大阪大，[11]千葉工大

MMXは、フォボスとダイモスの近傍観測と，フォボスレゴリス試料のサンプルリターンならびに試料の地上分析を組み合わせて，捕獲説と巨大衝突説の間で決着していない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、火星衛星からの視点で、火星圏変遷の駆動メカニズムを明らかにし、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。現在2024年の打ち上げと約5年の往還期間を設定し，探査機システム，搭載機器の検討、観測運用と着陸運用の検討が進行中である．以下にその概要を記すが、今後の検討の深化によって、修正が加えられる可能性があることには留意されたい．

搭載観測機器の構成と役割は次のとおりである。望遠カメラ(TL)および広角分光カメラ(WAM)は、両衛星の表面の全球スケールからm以下スケールまでの、マルチスケールでの撮像を主目的とする。衛星の地形地質学を格段に向上させるとともに、安全な着陸地点の選定、レゴリス試料の産状の把握にも活用される。仏CNESと共同開発する近赤外分光カメラ(NIRS4/MacrOmega)は、衛星表面の近赤外反射スペクトルデータをマルチスケールで取得し、表面物質の鉱物組成に制約を与える。特に、これまでの探査では未取得となっている含水鉱物の吸収特徴を捉えることを目指す。これらのカメラ群は、火星にも振り向け、大気のダストや氷雲の全球分布の連続観測を行う。NASAからの提供が予定されている中性子ガンマ線分光計（NGRS）は、衛星広域の表層元素組成に一定の制約を与えることを目的とし、特に水素濃度、Fe/Si比など、衛星の起源によって値が大きく異なると予想される指標について明らかにする。レーザー測距装置（LIDAR）は、探査機から衛星表面までの距離測定を多点で行い、衛星の三次元形状を精密に決定する。探査機の軌道追跡から得られる重力場のデータと併せて、衛星の地下の密度構造に制約を与えることを目指す。火星圏ダストモニター（CMDM）は衛星軌道周辺のダストフラックスを計測し、ダストの衝突や飛散放出による衛星表面の改質・進化過程に光を当てる。イオン質量分析器（MSA）は火星・衛星周囲の空間に分布する稀薄ガスの組成とそのフラックスを決定する。特に、衛星が捕獲起源の場合に期待される衛星内部からの水蒸気放出の有無を明らかにすることを試みる。またオプション機器として、地表の高解像度撮像やレゴリスの物理特性のその場計測が可能な分離カメラ（DCAM5）の搭載可能性が検討されている。

フォボス観測時の探査機の軌道には、疑似周回軌道を取る。これは軌道長半径をフォボスとほぼ同一にとり、離心率は若干異なる値にとることで、実質的にフォボス上空を常時周回させるようにするものである。疑似周回軌道におけるフォボスからの高度は段階的に下げ、最短で20km程度とし、カメラ群による高解像度撮像を実現する。ダイモスについては複数回のフライバイ観測が検討されている。着陸点の選定には、フォボスの基盤岩に由来する物質が取得できるという科学的観点と、平坦で障害物がないという安全性を両立することが求められる。従来の探査による撮像データが比較的豊富なフォボスについても、着陸の障害となりうる数10cmスケールの凹凸や岩塊を判別できるデータがないため、軌道上から高解像度撮像をおこなって着陸点の選定を行う。詳細分析が可能な粒径300μm以上の粒子を、統計処理に十分な個数得ることを目標に、10g以上のレゴリス試料のサンプリングを行う。その方式として、マニピュレータとコアラーの組み合わせが検討されている。

P50

MMX 搭載近赤外分光撮像器 MacrOmega による Phobos および Deimos 観測計画

○岩田隆浩[1], 中村智樹[2], Jean-Pierre Bibring[3], Vincent Hamm[3], Cedric Pilorget[3], 中川広務[2], 坂野井健[2], Sarah Crites[1]

[1]JAXA宇宙研、[2]東北大、[3]Institut d'Astrophysique Spatiale

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

MacrOmegaは、観測波長0.9～3.6μmのハイパーイメージャ型の近赤外線分光撮像装置であり、現在フランスと日本による共同開発を行っている。音響光学型可変周波数フィルタ(AOTF)と2次元HgCdTe検出器を用いて、6度×6度の視野(256pix×256pix)を1画像とし、波数分解能20cm^{-1}(観測波長3μmで波長分解能18nmに相当)で波長方向にスキャン観測する。またスキャンミラーを用いて、空間方向にもスキャンを可能にする計画である。MacrOmegaは、火星衛星PhobosおよびDeimosの反射スペクトルにおける含水鉱物、有機物による吸収スペクトルを検出するとともに、火星大気のH_2O, CO_2, CO,ダスト等の吸収スペクトルの観測を行う。本講演では、特にPhobosの観測計画について論じる。MMXのPhobos到着後より、MacrOmegaは高度約100kmの擬似周回軌道(QSO)から衛星全体のグローバルマッピングを行う。次いで高度約20kmのQSOでは、サンプリング候補地点周囲を約10m以下の空間分解能で、SN比300とする詳細観測を行う。さらにタッチダウン等の降下時には、より高い空間分解能での観測を行う。得られたデータに対して太陽位相角補正等の校正を施し、衛星表面各地点のスペクトルを算定する。その結果を地上でのCコンドライト測定試験と比較することにより、Phobos表面の水質変成、熱変成等の状態を推定する。

P51

宇宙線ミュー粒子を用いたトモグラフィー観測による火星の浅部地下構造探査：超小型検出装置の検討

○小池幸人[1]，洪鵬[1]，田中宏幸[1]，尾崎正伸[2]，宮本英昭[1]
[1]東京大学，[2]宇宙航空研究開発機構

火星表面には、厚さの分からないレゴリス層や、過去の溶岩流で形成されたと考えられている地形（Kedar et al., 2013）、地下の帯水層の存在を示唆する地形（McEwen et al., 2011）が存在し、浅部の地下構造探査によってそれらの起源や生成過程を調べることが重要となっている。そこで我々は地下の密度分布を調べるため、地球上で実績のあるミュー粒子を用いた地下構造探査（ミュオグラフィ）を火星上で行うことを検討している。ミュオグラフィは、他の地下構造探査と比較して、省電力ですむことや、複雑な逆解析を必要とせず、数 km から数 100 m のサイズの対象を観測できることが利点である（Tanaka et al., 2010）。しかし、火星表面では放射線環境が地球と大きく異なることと、探査機に搭載するには機器の小型化が必要なため、観測条件や装置の形状を最適化する必要がある。

小型化を行うことで、旧来のミュオグラフィ装置では実現し得なかった可動性が大幅に向上する反面、受光面が小さくなることで単位時間に検出できるミュオンの個数が減少してしまう。そこで Geant4（Agostinelli et al., 2003）を用いて、物質中におけるミュオンのエネルギー損失プロセス（電離損失、制動輻射、直接対生成、光核反応）を考慮して数値計算を行った。ミュオンを入射させる対象として、例えば火星表面での平均的な元素組成（Gellert et al., 2004）の岩石 1（大きさ 50 m、密度 ρ_1 = 3 g/cm^3 ）と、岩石 2（大きさ 50 m、密度 ρ_2 ）を並べて用意し（計 100 m サイズの岩石）、岩石 2 の密度を変数とした。これにより、岩石 2 の密度を変化させたときの、岩石を通過し得るミュオンの最小エネルギーを求めた。図 1 からは、例えば 50 m が密度 3 g/cm^3、残りの 50 m が密度 1 g/cm^3 以上の計 100 m の厚さの岩石を透過するには少なくとも約 46 GeV のエネルギーを持つミュオンが必要なことが分かる。

私達は上記に加え、将来の探査機搭載を視野に入れた超小型ミュオン検出装置の開発も検討している。装置の全体像は図 2 のようになっており、検出器は 64 本のプラスチックシンチレータ（ELJEN、EJ-200）と光電子増倍管（浜松ホトニクス, H12700A-03）で構成されている。小型高電圧電源装置はテクノランド社製（浜松ホトニクス、C9619-01 を使用）で、オシロスコープは横河 DL1200、1300 を使用した。

本発表では上記の具体的な数値計算の結果と、検出装置の開発状況を報告する。

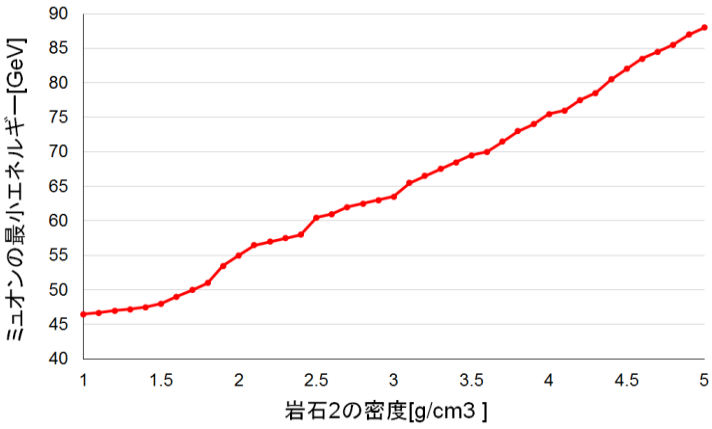


図 1. 100 m の岩石を通過できるミュオンの最小エネルギー（変数：ρ_2）

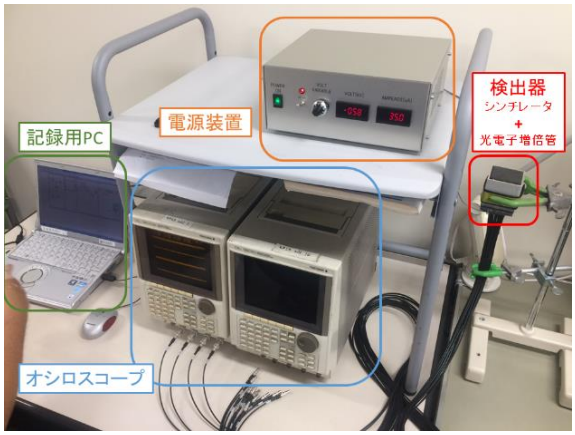


図 2. 超小型ミュオン検出装置の試作機

P52

火星衛星探査機(MMX)搭載火星周回ダスト観測装置

○小林 正規[1]、奥平 修[1]、千秋 博紀[1]、和田 浩二[1]、黒澤 耕介[1]、岡本 尚也[1]
佐々木 晶[2]、木村 宏[3]、中村 真季[4]
[1]千葉工業大学、大阪大学[2]、神戸大学[3]、名古屋大学[4]

太陽系の木星型惑星（木星、土星、天王星、海王星）にはすべて「環（リング）」があることがわかっている。どのようにしてリングができ、そしてそのリングが保持されるのか、正確なことは分かっていない。特に、土星の環は構造が多彩でA環からG環まであって、それぞれのリングで構成している粒子のサイズ分布が大きく異なっており、それぞれ違う成因が唱えられている。いずれのリングにも共通するのが、リングを構成する粒子の生成や、保持に関係する衛星の存在である。

一方、これまで地球型惑星（水星、金星、地球、火星）にはリングが見つかっていないが、フォボスとデイモスという２つの衛星を持つ火星には、隕石衝突などによってそれらの衛星から放出されたダスト粒子で構成されるリングを持つと予測されている。しかしながら、これまでに地球からの望遠鏡観測や火星周回の探査機による観測などが行われてきたものの、発見には至っていない。

講演者は、JAXAが計画している火星衛星探査計画（MMX）の探査機に、火星周辺のダスト環境を調べて火星ダストリングの有無を確認することができる大面積（1m^2）のダスト検出器を搭載することを提案しており、その開発を進めている。

本講演では、土星のリングを例にとって惑星のリングの構造や成因の研究について解説し、火星の周囲にあると予想されているリングについての理論研究およびそれに基づいて「リング」を観測するための大面積ダスト検出器の開発について紹介する。

P53

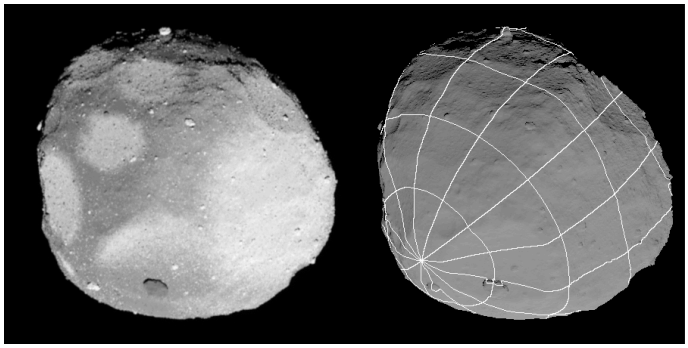
はやぶさ 2 着陸点選定訓練における小惑星形状復元

○平田成 [1]，平田直之 [2]，杉山貴亮 [1]，金丸仁明 [3]，千秋博紀 [4]，北里宏平 [1]，
田中小百合 [2]，西川直輝 [2]，
渡邊誠一郎 [5]，石原吉明 [6]，田中智 [6]，山口智宏 [6]，三浦昭 [6]，山本幸生 [6]，
はやぶさ 2 プロジェクト LSS データ解析検討チーム
[1]会津大，[2]神戸大，[3]大阪大，[4]千葉工大，[5]名古屋大，[6]JAXA,

小惑星探査機はやぶさ 2 の小惑星 Ryugu 到着後の観測，データ解析，着陸地点選定に備えて，2017 年春より夏にかけて，模擬データを用いた着陸点選定の訓練が実施された．著者らはこの訓練に形状モデル作成の担当チームとして参加した．画像から推定される小惑星の形状と，自転情報，副産物である探査機位置情報は，各観測機器データの解析の源泉として，また着陸地点選定の基礎情報として重要となる．

はやぶさ 2 形状モデルチームでは，本訓練で Structure-from-Motion (SfM)および Stereo Photoclinometry (SPC)という二種類の方法を適用し，形状モデルの作成を試みた．SfM は，画像中に設定された特徴点間の対応関係から，画像撮像時のカメラの位置，姿勢と対象物の三次元座標を同時に推定し，形状モデルを得ることができる．商用ソフトウェアで SfM を実装した例が複数あり，今回は Agi Software が開発，販売している PhotoScan を用いた．SPC はステレオ法と photoclinometry 法を組み合わせた手法であり，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実績がある．SfM は最小限の作業で迅速に形状モデルを得ることができるのに対し，SPC では手間はかかるものの，最終的には高精度の形状モデルの作成を行うことができるほか，同時に探査機の位置，姿勢，小惑星の自転情報についても推定値を出すことができる．

本発表では，訓練における形状モデル作成の手順について述べるとともに，得られた形状モデル，自転情報，探査機位置情報の精度評価を行う．さらに，訓練を通じて明らかになった課題と，実運用と解析方法への反映の方針についても報告する．



左図：着陸点選定訓練用に作成された模擬 Ryugu の画像と，推定された形状モデルから SfM で作成された同アングルの模擬画像

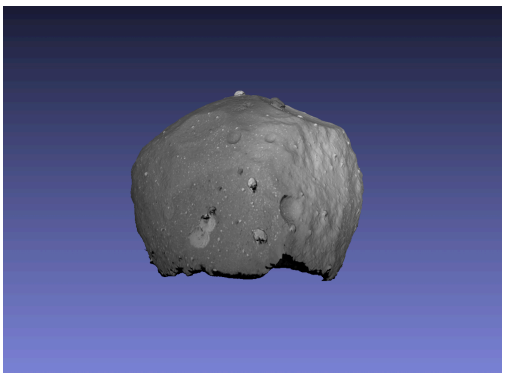
P54

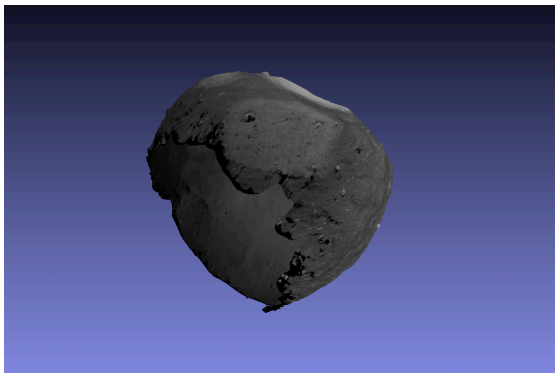
形状復元ソフト Photoscan のはやぶさ 2 着陸点選定訓練における活用の成果と課題

○杉山貴亮[1], 平田成[1], 渡邊誠一郎[2], 石原吉明[3], 田中智[3], 山口智宏[3], 三浦昭[3], 山本幸生[3], LSS データ解析検討チーム[4]
[1]会津大学, [2]名古屋大学, [3]JAXA, [4]Hayabusa2 Project

Hayabusa2 ミッションにおいて、小惑星の形状モデルはタッチダウン地点の選定や探査機運用に用いられる重要なプロダクトである。現在、本研究グループではコンピュータビジョン分野でポピュラーな Structure from Motion(SfM)及び Multi View Stereo(MVS)を利用した Agisoft 社の Photoscan を使用した小惑星の形状モデルの作成について検討を進めている。2017 年春より夏にかけて Hayabusa2 プロジェクト内で実施された模擬データを用いた着陸点選定訓練で、カメラ画像を模擬した模擬画像を用いて, Photoscan による形状モデルの作成手順の確認を行った。

運用訓練により、模擬画像からの形状復元が、設定した期間内である程度実施できることが確認された。一方、高解像度画像を用いた際に Photoscan の自動マッチングが成功しない場合があることが分かった。その場合は手動で画像マッチングを行う必要がある。また、SfM の形状復元の副産物として出力される探査機の位置・姿勢情報の推定値を用いて、小惑星の自転軸を推定する必要があることも分かった。





左図、右図共に中高度の高解像度画像から復元された形状モデルである。

観測データがない領域は、形状モデルでも抜けができてしまう場合がある。その場合、周りのポリゴンを維持したまま適切に塞ぐ必要があるため、そのための手順を確立させる必要がある。本発表では、模擬データと形状復元から得られたデータ比べて最終的な運用訓練での成果を紹介したいと考えている。

P55

「はやぶさ2」中間赤外カメラ TIR の軌道上運用と近傍運用計画

◦岡田達明[1,2], 福原哲哉[3], 田中 智[1], 田口 真[3], 荒井武彦[4], 千秋博紀[5], 坂谷尚哉[6], 神山 徹[7], 小川佳子[8], 出村裕英[8], 北里宏平[8], 関口朋彦[9], 長谷川 直[1], 松永恒雄[4], 今村 剛[2], 和田武彦[1], 滝田 隼[10,,1], Jörn Helbert[11], Thomas G. Müller[12], Axel Hagermann[13], はやぶさ2・TIR チーム

[1]JAXA 宇宙科学研究所, [2]東京大学, [3]立教大学, [4]国立環境研究所, [5]千葉工業大学, [6]明治大学, [7]産業技術総合研究所, [8]会津大学, [9]北海道教育大学, [10]北海道北見北斗高校, [11]ドイツ航空宇宙センター（DLR）, [12]マックスプランク地球外物理学研究所（MP-E）, [13]オープン大学

小惑星探査機「はやぶさ2」は、C 型小惑星 162173 Ryugu への 2018 年夏の到着に向けて航行している。軌道上では小惑星近傍観測運用にむけて、各種の試験運用や較正運用を実施してきた。本報告では中間赤外カメラ TIR の軌道上運用と近傍運用計画の最新状況について報告する。

TIR は金星探査機「あかつき」搭載 LIR[1]と同型機器で、2次元マイクロボロメータアレイを搭載する熱赤外カメラである。小惑星の熱画像を小惑星の1自転以上にわたって取得し、小惑星表面温度の時間変動を調査する[2]。一連の熱撮像を様々な時期・高度から行うことで、各地点の熱慣性分布、さらに表層粒径分布などを算出する。これらの結果をもとに、小惑星表層レゴリスの状態や表層進化過程を考察する。また、サンプル収量が粒径分布に依存するため、タッチダウン地点の選定にも活用する。小惑星熱物理モデルから温度予測を行い、タッチダウン運用の安全性や成立性の評価にも利用する。

TIR は軌道上運用において、以下の内容を実施してきた。打ち上げ後の機器機能確認や機器性能確認、月例の定期ヘルスチェックでの機器温度依存性の確認、背景宇宙観測によるダーク画像の取得、さらに観測運用を模擬した撮像間隔での機器温度の影響を確認。さらに、地球スイングバイ前後の地球・月観測を通じて、既知天体を用いた機器較正（較正カーブの評価と改良）や機器アラインメント確認、検出限界の確認等を行ってきている。太陽・地球のラグランジュ点（L5 点）付近での撮像観測（天体は不検知）。また、火星撮像では想定どおり不検知であり、検出限界への制約のひとつとなる。

TIR は小惑星近傍運用において、以下の観測をノミナルで計画している。HP/Box-A 観測運用（高度 20 km で1自転分、約 60 枚）、HP/Box-C 観測運用（高度 7～5 km で1自転分、約 60 枚）、中高度観測運用（高度 5km で1自転以上、100 枚以上）、重力計測運用（高度 20 km からの降下中から開始、高度 1 km まで約約 60 枚）、MASCOT データ中継ホバリング運用（高度 3 km で 24 時間、約 100 枚）、タッチダウン運用（高度数 m まで様々な高度で連続的に観測、約 100 枚）、SCI 分離運用（高度 500 m で分離後の SCI 追跡を 2 秒間隔で 16 枚連写）、SCI 退避中ダスト雲観測運用（退避中に 16 枚撮像を 1 時間ごとに 4 回実施）、ピンポイント・タッチダウン運用（高度数 m まで様々な高度で連続的に観測、約 100 枚）。なお、探査機からのダウンリンクに余裕がある場合は毎週1回 HP/Box-A 観測運用を実施する。これらの観測運用について、HP/Box-A、HP/Box-C、中高度観測について模擬小惑星を用いた観測運用・着陸地点選定のためのデータ処理・評価の訓練を実施した[3]。また、各運用について事前にコマンド作成等の確認をしておく予定である。

参考文献: [1] Fukuhara, T. *et al.* Earth Planets Space, 2011, [2] Okada, T. *et al.* SSR, 2017. [3] 坂谷尚哉他、日本惑星科学会, P56, 2017.

P56

はやぶさ 2 着陸地点選定訓練データを用いた熱慣性決定手法の評価

○坂谷 尚哉[1], 千秋 博紀[2], 荒井 武彦[3], 滝田 隼[4], 岡田 達明[5], 田中 智[5], 平田 成[6], 三浦 昭[5], 山口 智宏[5], はやぶさ 2 TIR チーム

[1]明治大学, [2]千葉工業大学, [3]国立環境研究所, [4]東京大学, [5]宇宙科学研究所, [6]会津大学

小惑星探査機はやぶさ 2 は小惑星 Ryugu への 2018 年夏の到着に向けて飛行を続けており、小惑星表面の 3 地点においてタッチダウン (TD) を実施しサンプルを採取する予定である。第一回目の TD 地点の選定は、到着後約半月かけて実施するリモートセンシング観測による科学的・工学的評価に基づいて行われる。それに向けて、2017 年 8 月現在、はやぶさ 2 プロジェクトでは模擬小惑星モデルを用いた着陸地点選定訓練 (LSS 訓練) を実施している。

中間赤外カメラ TIR チームが LSS 用に提供するプロダクトは以下の 7 つである。

1. 輝度温度画像
2. 放射輝度画像
3. 輝度温度マップデータ（緯度経度へ投影 + localtime 等の付帯情報）
4. 輝度温度マップデータ（形状モデルポリゴンへ投影 + localtime 等の付帯情報）
5. 熱慣性マップ
6. 代表粒径マップ
7. 長期温度予測

特に熱慣性は表面温度を決定する典型的なパラメータであり、また表層物質の物理状態の指標となるため、工学的にも理学的にも重要である。また、後の代表粒径マップ、長期温度予測の元データとなる。本発表では LSS 訓練データを用いた TIR のプロダクト作成、特に熱慣性マップ作成までの流れを紹介する。形状モデルを利用した非球形天体の熱慣性分布の推定手法およびその結果についても紹介し、TIR プロダクト作成時の問題点・本番に向けての今後の課題を整理する。

P57

はやぶさ２ONC データによる Ryugu 表面ラフネスの推定 着陸点選定訓練データを用いた検討

諸田智克[1]，千秋博紀[2]，横田康弘[3,4]，坂谷尚哉[5]，巽瑛理[6]，杉田精司[6]，
本田理恵[4]，本田親寿[7]，山田学[2]，平田成[7]，平田直之[8]，
三浦昭[3]，山口智宏[3]，田中智[3]，はやぶさ２光学航法カメラチーム

[1]名古屋大学，[2]千葉工業大学，[3]宇宙航空研究開発機構，[4]高知大学，
[5]明治大学，[6]東京大学，[7]会津大学，[8]神戸大学，

はやぶさ２の小惑星 Ryugu 近傍観測における重要な課題は，サンプルを取得するタッチダウン地点をどのように決定するか，である．特に安全性の観点から，数十 cm スケールでの表面起伏の情報をいかに得るかが重要である．我々はその１つの手段として，様々な測光条件における明るさの変化から，Hapke パラメータ，特にラフネスパラメータを推定することを検討している．はやぶさ２のホームポジションからの観測では Ryugu の自転を利用して全球的なマッピングを行う．そのため，Ryugu 表面のある領域の画像データは，様々な太陽入射角，射出角で得られるが，位相角はほぼ一定である．そのような測光条件のデータセットに対して Hapke モデルをフィッティングした場合に，ラフネスパラメータが安定して算出可能か，それらのパラメータは表面の起伏状態を正しく表せているか，が問題である．そこで我々はまず，様々なラフネスの模擬表面地形を作成し，表面の反射特性を仮定して，はやぶさ２の観測測光条件（位相角一定）を想定することで，模擬画像を作成した．それらのデータセットに Hapke モデルをフィッティングし，ラフネスパラメータを算出した．得られたラフネスパラメータと模擬表面地形の平均傾斜角を比較し，両者の相関性を評価した．図１は模擬表面地形の平均傾斜と推定したラフネスパラメータの間の関係を示す．この結果をみると，ラフネスパラメータは模擬地形の平均傾斜をよく表しており，位相角一定の測光条件のデータセットにおいても表面地形の起伏を十分に推定可能であることがわかった．ただし上記の検討では，カメラ固有の様々なノイズや測光条件の誤差などを考慮していない．そこで次により現実的な問題を扱うために，現在，はやぶさ２プロジェクトで実施している着陸点選定訓練のデータセットを使用し，Hapke モデルによる表面ラフネスの推定を行った．本発表ではそれらの結果をもとに数十 cm スケールの表面ラフネスの推定可能性について総合的に議論する．

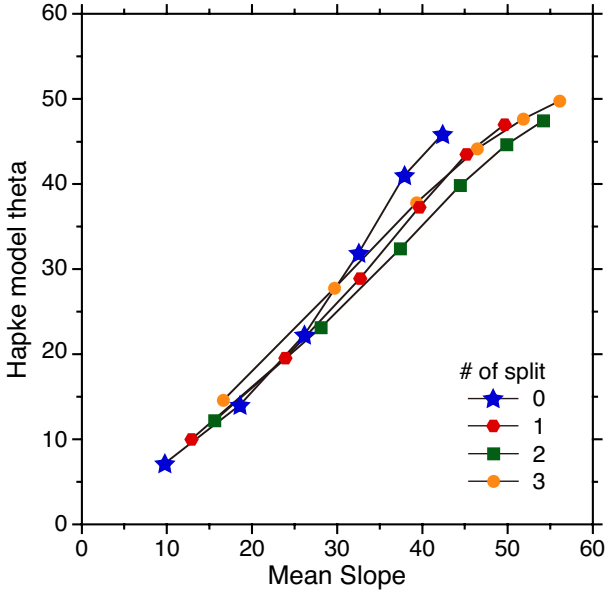


図１　模擬表面地形の平均傾斜と模擬画像から推定したラフネスパラメータの比較．

はやぶさ２ONC データの処理システムとプロダクト
着陸点選定訓練データの例

杉田精司 [1]，*諸田智克 [2]，巽瑛理 [1]，本田理恵 [3]，本田親寿 [4]，山田学 [5]，神山徹 [6]，
横田康弘 [3,7]，平田成 [4]，三浦昭 [7]，山口智宏 [7]，田中智 [7]，山本幸生 [7]，石原吉明 [7]，千秋博紀 [5]
はやぶさ２光学航法カメラチーム

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

はやぶさ２ に搭載された光学航法カメラ（ONC：Optical Navigation Camera）はその名の通り探査機のナビゲーションの役目を担うカメラであるが，着陸点の選定や科学観測においても中心的な役割を果たす．ONC は小惑星 Ryugu 表面の多バンド画像データを取得し，表面地形や組成情報を得る．本発表では現在行なっている着陸点選定訓練を例にして，ONC のデータ解析処理の流れとそれから生成される科学プロダクト，特に着陸点選定に重要となる，スペクトル特徴量に関するプロダクトを中心に紹介する．

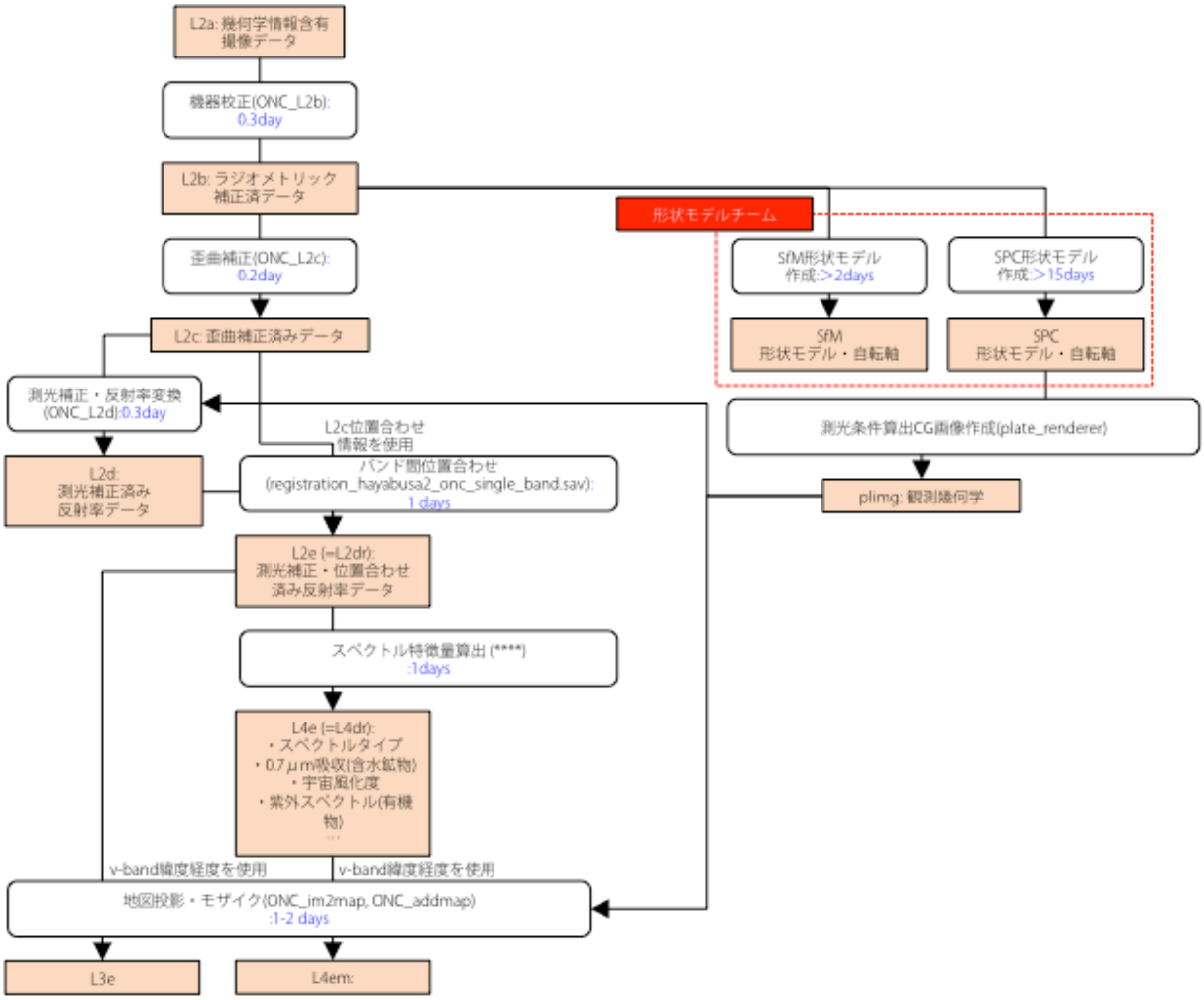


図 1　着陸点選定訓練における ONC のデータ処理フローとプロダクトレベルの定義．

P59

はやぶさ 2 着陸候補地点選定における地上系整備

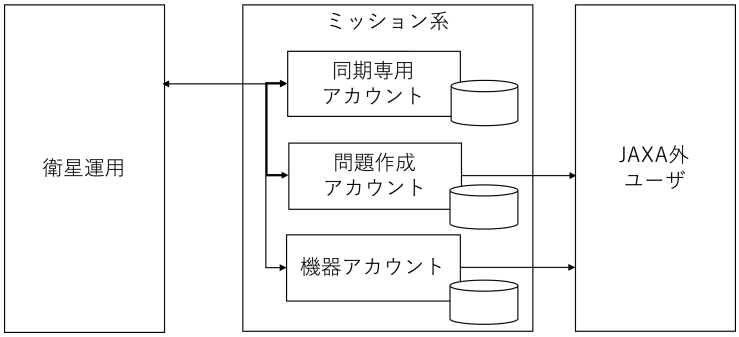
○山本幸生[1]，石原吉明[1]，山口智宏[1]，藤井　淳[1]
[1]宇宙航空研究開発機構

小惑星探査機はやぶさ 2 では，2018 年に行われる小惑星 Ryugu への着陸に向けた着陸候補地点選定(Landing Site Selection; LSS)に備えた地上系整備を進めてきた．小惑星近傍での探査機運用スケジュールは厳しく，運用主体のある宇宙科学研究所と遠隔地にいるミッション系メンバー間の円滑なデータ交換が必要である．はやぶさ 2 データアーカイブチームでは，恒久的なデータ保管とは別に，この LSS に特化したミッション系の地上データ処理の検討と実装を行った．

データ処理のフローを設計するにあたり幾つか留意する項目がある．極めて閉鎖的なネットワークで構築される衛星運用系と，JAXA 外部の関係者が多数利用するミッション系が利用するネットワークは分離されているため，この間のデータ同期はセキュリティ的な制約を受ける．利用可能なサーバー群はプロジェクトが自由に設計できるものではなく，堅牢性・運用性が考慮された別の専門部隊が管理している．また，LSS の事前訓練では問題作成側と回答側の 2 つのチームが定義され，問題作成側のデータが回答側に閲覧されることは許されない．問題作成側に関しては，本番の LSS では不要になるため，他システムと隔離されても運用上支障がないよう設計する必要がある．さらに作成されたデータをウェブブラウザで閲覧できるようにするためにオペレーティングシステムの特定アカウントに対してアクセス権限を与える必要がある．観測機器チームが作成したデータは，機器チーム側でアクセス権限を操作できなければならない．

これらの要求を解決するために，要求ごとに複数のアカウントを用意し，サーバー上に複数のデータコピーを保持することとした．本実装は，はやぶさ 2 のデータ容量が近年のストレージサイズと比較して小さいため可能となっている．上記制約と要求に加え，LSS 訓練終了後に，回答を容易に提示できるように考慮した．

本発表では，様々な制約と多様な要求を通常の UNIX システムの上で構築するための方法について報告する．



左図：着陸候補地点選定のために用意したシステムの概略図．要求ごとにアカウントが存在し，複数のデータコピーを保持している．

P60

磁気並進運動を用いた２成分粒子の質量比の計測

○山口若奈[1] 久好圭治[2] 植田千秋[2] 寺田健太郎[2]
[1]大阪大学理学部物理学科 [2]大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

自然界に存在する固体物質は、各々固有の反磁性磁化率を有している。反磁性体は磁場がゼロの状態では磁化を有さないが、磁場を加えた場合、逆方向に弱い磁化が発生し、その大きさは磁場の強度に比例する。先行研究では、磁場中で異種粒子の混合物を並進運動させることで、それらを磁化率ごとに分離・識別できることが分かっている[1]。

外惑星の衛星表面に存在する固体は、多くの場合、ドライアイスや氷などの揮発性固体と、シリケートを端成分とした混合物であると考えられる。その探査領域は広大であるため、試料採取の現場で、粒子の質量比を短時間で観測し、そのデータを送信しながら、広い領域を効率よく調査する必要がある。そこで個々の粒子の質量比を簡単に識別する方法として、物質の磁化率を用いる新たな原理を提案し、その有効性を実験で検証した。

２成分粒子の磁化率χは、質量比 $f=\dfrac{m_1}{m_1+m_2}$ を用いて

$$\chi = f\chi_1 + (1-f)\chi_2 \qquad (1)$$

と表される。ただし上式において、m_iは物質iの質量，χ_iは物質iの磁化率を表す（$i=1,2$）。したがって２つの端成分の物質およびそれらの磁化率χ_1，χ_2が既知の場合、混合物の磁化率χだけから、質量比fが分かる。

上記の方法の利点は、探査の現場に存在する２成分粒子の質量比と存在頻度のヒストグラムを、その場で効率的に推定できることである。これまでの分析法で同様のデータを得るには、個々の粒子を切断した上で、その断面の元素分析を行うなど、多段階の操作を必要とする。これに対し提案する方法では、磁気並進運動の観測だけで質量比が測定でき、粒子の質量や体積など、他の物理量の計測を必要としない。

検証実験では、寒剤を充填したガラス管内に小型の永久磁石を固定して磁場勾配を発生させ、これを木箱に設置する。この木箱を180cmの高さから自由落下させ微小重力空間を作る。自由落下中の混合粒子の運動をカメラで観測し、得られた速度から磁化率の値を求める[1]。この値と、式(1)から予想される値を比較することで、測定原理の妥当性を検証する。

今回は、はじめての試みとして、顕著な磁化率の変化が期待できるドライアイスと黒鉛の混合粒子の磁化率を、磁気並進運動から測定し、上記の計測法の有効性を検証する。

[1] K. Hisayoshi, C. Uyeda, K. Terada, Sci. Rep. (2017)

P61

宇宙望遠鏡搭載用高効率紫外線分光器の開発

○亀田真吾[1],村上豪[2], 塩谷圭吾[2], 小玉貴則[3], 成田憲保[4], 生駒大洋[4],
寺田直樹[5], 吉川一朗[6]
[1]立教大理, [2]ISAS/JAXA, [3]東大海洋研, [4]東大理, [5]東北大理, [6]東大新領域

これまでに3500個程度の系外惑星が確認され，地球型惑星も複数検出されており，太陽系のような惑星系が普遍的ではないことも明らかとなった．今後はK2, TESS(NASA), PLATO2.0(ESA)計画などの全天サーベイ観測が行われ，2020年代前半までに地球型系外惑星の検出数は飛躍的に増加する見込みである．惑星の特徴づけを目的とした計画も進められており，口径6.5mのジェームスウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）や30m地上望遠鏡計画に加え，系外惑星専用の宇宙望遠鏡計画(CHEOPS)も進行中である．

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

真空紫外線検出器には光電面にはヨウ化セシウムが蒸着されたマイクロチャンネルプレート(MCP)がよく用いられており（ひさき/EXCEED, PROCYON/LAICAなど）、20%程度の量子効率が達成されている。近年、MCPの開口率を向上させたファネル型が開発されたが、光電面にヨウ化セシウムを用いた場合にも実行効率が向上するかどうかは実験的には確認されていなかった。そこで、我々は光電面にヨウ化セシウムを用いたMCPを試作して効率の測定を行い、効率が1.5倍以上向上することを確認した。本発表では、この実験結果を報告する。

P62

局所 U-Pb 年代分析に向けた レーザーポストイオン化 SNMS の開発

○松田貴博[1], 河井洋輔[1], 宮晃平[1], 青木順[1], 本堂敏信[1], 石原盛男[1],豊田岐聡[1],
中村亮介[2],寺田健太郎[1]
[1]大阪大学大学院理学研究科, [2]大阪大学産学連携本部

太陽系の起源と進化を明らかにする上で、ウランの放射壊変系を利用した局所 U-Pb 年代分析は重要である。そのためには、天然鉱物に含まれる極微量の U と Pb の同位体比を高精度に測定する必要がある。これまで微小領域における同位体を分析する手法として、2 次イオン質量分析計(SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometer)が広く使用されてきた。しかし、SIMS は、2 次イオン化効率が数%以下と低く、1 次イオンビームによってスパッタされた試料のうち大部分が中性粒子として失われるため、試料のロスに対して感度が低いという問題が存在する。そのため、サブミクロン以下の極微小なサンプルに含まれる微量元素の同位体比を高精度で分析することが困難であった。このような SIMS の問題を解決するため、現在我々のグループでは、スパッタされた中性粒子をフェムト秒レーザーでポストイオン化する 2 次中性粒子質量分析計(SNMS: Secondary Neutral Mass Spectrometer)の開発を行っている。

これまでの先行研究では、1 次イオン源として集束性の高い Ga-FIB(Focused Ion Beam)装置を使用し、高出力レーザーによるポストイオン化を組み合わせることで、0.1μm 以下の高い空間分解能が得られることを確認した。さらに、イオン化した粒子を多重周回飛行時間型質量分析計(MULTUM)で質量分離させることで、20,000 以上の高い質量分解能を達成した。また、検出手法の改善としてイオンカウンティングを導入することで、イオンの検出効率を大きく向上させることに成功した。

本研究では、本装置が U-Pb 年代分析に適用できるか確認するため、ジルコンの U-Pb 年代分析において標準試料として用いられる 91500 ジルコン(ウラン濃度: 約 100ppm,年代: 1065Ma)及び、他機関の SIMS による分析で、年代がすでに求められているジルコン(Isua 産,ウラン濃度: 約 200ppm,年代: 3696Ma)について、本装置で測定を行なった。2 つの試料を測定した結果、両試料中において U と U 酸化物及び Pb のピークを検出することができた。Pb のピークについては、MULTUM でイオンを多重周回させることにより、Hf 酸化物や Ga イオンなどの妨害イオンを十分な分解能で分離することができた。測定後のスパッタ痕の直径は約 1μmであり、サブミクロンの空間分解能で 100ppm の検出感度が得られることを確認した。発表では、U-Pb 年代分析における本装置の現状の課題についても報告する。

P63

超小型深宇宙探査機EQUULEUS搭載「月面衝突閃光カメラDELPHINUS」の性能評価

◯増田 陽介[1], 布施 綾太[1],
阿部 新助[1], 柳澤 正久[2], 島田 隆司[2], 五十里 哲[3], 井倉 幹大[3],
矢野 創[4], 船瀬 龍[3]

[1] 日本大学理工学部航空宇宙工学科, [2] 電気通信大学, [3] 東京大学, [4] JAXA/ISAS

東京大学と JAXA が開発を進めている深宇宙探査機 **EQUULEUS** は, 地球-月系ラグランジュ点 (EML_2) への航行を通じて, 6U サイズ (約 30 × 20 × 10cm) という超小型宇宙機による地球月圏での軌道制御技術の実証に加え, 月面衝突閃光観測などの理学観測を計画しており, 2019 年に NASA の新規開発ロケット SLS(Space Launch System) により打ち上げられる予定である. 月面衝突閃光 (Lunar Impact Flash) とは, 直径 cm〜m サイズのメテオロイドが月面に数 10km/s の超高速で衝突するときに発生する短時間 (0.01〜0.1 秒) の発光現象のことである. そして, EQUULEUS に搭載される, 月面衝突閃光と地球近傍小天体 (Near-Earth Objects) の観測を目的とした可視光域のエリアセンサ・カメラシステムが **DELPHINUS** である. この DELPHINUS カメラにより, 地上の望遠鏡で観測される直径数 10m サイズ以上の小天体と, 流星観測及びレーダーや探査機によって計測される直径μ m〜mm サイズのダストを繋ぐ空白領域のメテオロイドのサイズ分布と時間変化 (フラックス) を明らかにすることが理学観測の主な目的である. 現在, EQUULEUS は, EM(Engineering Model) の環境試験を終え, DELPHINUS もまた, 環境試験で取得した試験データの解析等を行っている.

DELPHINUS は, 専用の基板に FPGA と呼ばれる書き換え可能なハードウェア素子と CPU を搭載し, 2 台の 1/3 インチ CCD カメラを制御している. この FPGA 基板上には, いくつかのメモリが搭載されているが, その容量は小さい上に, DELPHINUS による閃光観測では, 60fps という速度で絶え間なく撮影するので, 短時間で大量の画像データが生成されてしまう. そのため, 撮影した画像データの全てをメモリに保存することはできない. さらに, 宇宙線や CCD センサにのるノイズといった閃光類似イベントも誤検出してしまうため, いかに本物の閃光イベントのみをメモリに保存するかが重要となる. 従って, DELPHINUS カメラの開発には, 月面衝突閃光イベント候補をオンボードで検出し, 閃光周辺部分のみを切り出して保存するようなアルゴリズムが要求される.

現在我々が進めているのは, この月面衝突閃光検出アルゴリズムの構築と FPGA への実装であり, それと合わせて, 検出アルゴリズムを実証するためのソフトウェアシュミレータの開発も行っている. また, 同時進行で, 恒温槽試験で得られたデータの画像化, ダークフレーム特性の調査やカメラの限界等級調査といった CCD カメラの性能評価にも取り組んでいる.

本稿では, 今後の開発に向けて, これまでに取り組んできたことを紹介するとともに, 現在進めている月面衝突閃光検出アルゴリズムの検討案, そして DELPHINUS カメラの性能評価について, より具体的に報告する予定である.

大阪大学 豊中キャンパスマップ Toyonaka campus map

OSAKA UNIVERSITY

学内ランチマップ
営業中の食堂 ○

文系学部等
Humanities and Social Sciences

1. 言語文化研究科 Graduate School of Language and Culture
2. 文学部/文学研究科 School of Letters / Graduate School of Letters
3. 法学部/法学研究科 School of Law / Graduate School of Law and Politics
4. 高等司法研究科 Osaka University Law School
5. 経済学部/経済学研究科 School of Economics / Graduate School of Economics
6. 国際公共政策研究科 Osaka School of International Public Policy
7. 法経研究棟 Graduate School of Law and Graduate School of Economics Buildings
8. 豊中総合学館 Common Hall for Humanities & Social Sciences

理学部/理学研究科
School of Science / Graduate School Science

10. 理学棟 School of Science Main School House Graduate School of Science Main School House

基礎工学部/基礎工学研究科
School of Engineering Science Graduate School of Engineering Science

20. 基礎工学棟 School of Engineering Science Main School House Graduate School of Engineering Science Main School House
21. 基礎工学国際棟 Engineering Science In

ポスター会場

全学教育推進機構
Center for Education in Liberal Arts and Sciences

30. 全学教育推進機構 Center for Education in Liberal Arts and Sciences
64. コミュニケーションデザイン・センター(CSCD) The Center of the Study of Communication-Design (CSCD)

大阪大学会館 総合学術博物館
Osaka University Hall Museum of Osaka University (Office)

31. 大阪大学会館(旧イ号館) Osaka University Hall
    - 21世紀徳堂
    - 遺勲記念センター
    - 知的財産センター(IPrism ルーム)
    - 総合学術博物館(管理部門)

    Kaitokudo for the 21st Century
    Tekijuku Commemoration Center
    Intellectual Property Center (IPrism Room)
    Museum of Osaka University (Office)
32. 総合学術博物館(待兼山修学館) Museum of Osaka University (Machikaneyama Shugakkan)

N
0m 50m 100m

阪急石橋駅 Ishibashi Sta. of Hankyu Line
石橋口 Ishibashi Entrance
入構管理ゲート Information
大学会館北口 Osaka University Hall North Entrance
東口 East Entrance
刀根山口 Toneyama Entrance
正門 Main Gate (終日開門) (All Day Open Gate)
柴原口 Shibahara Entrance
大阪モノレール柴原駅 Shibahara Sta. of Osaka Monorail

附属図書館 サイバーメディアセンター
University Library Cybemedia Center

50. 総合図書館 Main Library
51. サイバーメディアセンター 豊中教育研究棟 Cybermedia Center, Main Hall of Toyonaka
52. サイバーメディアセンター データ・ステーション Cybermedia Center, Data Station
53. サイバーメディアセンター 豊中教育実習棟 Cybermedia Center, Toyonaka Educational Training Center

研究センター等
Research Institutes Center

60. 低温センター実験室 Low Temperature Center
61. 理学部J棟:南部ホール
62. RI総合センター分館 Radioisotope Research Center
63. 太陽エネルギー化学研究センター Research Center for Solar Energy Chemistry
64. グローバルコラボレーションセンター(GLOCOL) Global Collaboration Center (GLOCOL)
65. 極限科学研究棟 Research Complex Building for Science at Extreme Conditions
66. 超強磁場実験準備工作施設 High Magnetic Field Preparation Facility
67. 超強磁場第二実験施設 High Magnetic Field Facility II
68. 複合極限実験施設 Extreme Research Complex
69. ナノサイエンスデザイン教育研究センター(基礎工学G棟) Institute for NanoScience Design (INSD) (Engineering Science Bldg. G)
70. コミュニケーションデザイン・センター(CSCD)(オレンジショップ)(基礎工学I棟) The Center for the Study of Communication-Design (CSCD) (OrangeShop) (Engineering Science Bldg. I)
    金融・保険教育研究センター(基礎工学I棟) Center for the Study of Finance and Insurance (CSFI) (Engineering Science Bldg. I)
    知的財産センター(基礎工学I棟) Intellectual Property Center (Engineering Science Bldg. I)
91. 文理融合研究棟 Interdisciplinary Research Bldg.

福利・課外活動施設等
Welfare & Extracurricular Activities Facilities

50. 図書館下食堂/売店
71. 保健センター Health Care Center
72. 学生相談室 Counseling Room
73. 体育館 Gymnasium
74. 第二体育館 Gymnasium (2)
75. 学生会館 Student Union
    国際教育交流センター(豊中分室) Center for International Education and Exchange (Toyonaka Branch Office)
76. 明道館 Club House (Meidokan)
77. 生協食堂3F/売店
78. [redacted] Cafeteria (DenDen)
79. カフェテリアらふぉれ Lafeteria (La Foret) 懇親会会場
80. [redacted] Machikaneyama Hall
81. 卓球場 Table Tennis Club
82. 学生交流棟、食堂・売店(宙) Student Service & Union, Osaka University (Sora) Student Service Center
83. 刀根山寮 Dormitory Toneyama Ryo
84. 国際交流会館 International House, Toyonaka
85. 音楽練習室 Music Practice Room
86. 健康体育研究室 Health and Sport Science Research Building
87. まちかね保育園 Machikane Nursery School

- 喫茶・食堂 Restaurant
- 郵便局 Post Office
- キャッシュディスペンサー Cash Dispenser
- 大阪モノレール柴原駅 Shibahara Sta. of Osaka Monorail
- インフォメーション Information
- 駐車場 Parking
- スクールバス停留場 School Bus Stop
- 阪急石橋駅 Ishibashi Sta. of Hankyu Line
- AED設置建物 AED (Automated External Defibrillator)
- 主な急勾配の坂道 Main Steep Slope

豊中キャンパス周辺のラーメン

佐々木晶　無責任編集

石橋駅周辺　　ラーメン店の数こそ多いのだが、これっと思った店の寿命はとても短い。飲んだ後の締めならどこでもいいが、個人的には（ラーメンではなく）ライオンカレーのハーフサイズを薦める。
◯葵（あおい）国道176号線沿いだが、石橋と池田の中間くらい、石橋から歩くと20-25分か。ラーメンもつけ麺も、オリジナルな味付けでどれを食べても自家製の麺を美味しくいただける。

蛍池駅周辺　　最近、激戦区として取り上げられる。
◯麺屋ほい　鶏白湯は濃厚。自家製麺。
◯みつか坊主　関西を代表する味噌の名店。
◯吉岡マグロ節センター　トレーラーハウスを使った店。マグロ味濃厚。
◯まほろば亭　某研究室の御用達？　ノーマル醤油以外は替玉一杯無料

豊中駅周辺
◯麺哲　この店が関西のラーメンの地位を高めたと言われる。肉醤油を是非。自家製麺。
◯六道　こってり好きにはたまらない。自家製麺。
◯謙信　塩元帥出身。スープに林檎を。自家製麺。
◯麺屋マルショウ豊中本店　台湾ラーメン、台湾まぜそばで有名。新大阪駅、江坂に支店がある。

柴原駅周辺
◯南ばん亭　一杯がワンコインで食べられる。作りたての焼飯も人気。木曜休み。
◯喜凛　じんわりと響く無化調の鶏ガラ味。