日本惑星科学会
2015秋季講演会
予稿集

2015 年10月14 日(水) - 16 日(金)

東京工業大学地球生命研究所 ELSIホール

日本惑星科学会2015年度秋季講演会プログラム

2015年度日本惑星科学会秋季講演会実行委員会

●一般講演会

日時：2015年10月17日(土)　午後
場所：東京工業大学・地球生命研究所 ELSI-1 一階
〒152-8550　目黒区大岡山2-12-1
研究者と話そう：若手研究者10〜15名
対談：火星と氷衛星
登壇者　関根康人(東京大学地惑)
臼井寛裕(東京工業大学地惑)
司会　玄田英典(東京工業大学ELSI)

●秋季講演会

日程：2015年10月14日(水)〜10月16日(金)
場所：東京工業大学・地球生命研究所 ELSI-1
口頭発表会場：1階東側ホール
ポスター発表会場：1階西側
会場へのアクセスは下記の秋季講演会ホームページをご参照下さい.
https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2015/index.html
講演数：口頭　102件，ポスター56件
最優秀研究者賞特別講演および
最優秀発表賞選考(口頭＋ポスター)を含む

●プログラム概要

○10月14日(水)
08:30　受付
09:00　**特別セッション**　最優秀発表賞選考
10:40　**口頭発表セッション1**　惑星大気
11:35　**学生，PDポスター発表フラッシュ1**
11:50　昼食
13:00　**口頭発表セッション2**　氷衛星
14:50　**口頭発表セッション3**　火星，火星衛星
16:00　**ポスターセッション1**

○10月15日(木)
08:30　受付
09:00　**口頭発表セッション4**　衝突現象
11:35　**学生，PDポスター発表フラッシュ2**
11:50　昼食
13:00　**ポスターセッション2**
14:15　**口頭発表セッション5**　隕石，グレイン
15:45　**口頭発表セッション6**　惑星形成
17:20　**総会**
18:30　**懇親会**

○10月16日(金)
08:30　受付
09:00　**口頭発表セッション7**
惑星内部，系外惑星，アストロバイオロジー
10:50　**口頭発表セッション8**　はやぶさ2
11:50　昼食
13:00　**最優秀研究者賞特別講演**
14:00　**口頭発表セッション9**　月
15:30　**口頭発表セッション10**　小天体

●口頭発表プログラム

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

aloc@wakusei.jp

10月14日(水)

08:30-08:55　受付

08:55-09:00　開催挨拶，連絡事項

特別セッション(最優秀発表賞選考)

(座長：三河内岳)

09:00 S01　**磁気流体波動がガス惑星の大気散逸と大気構造に与える影響**　田中佑希(名大)

09:15 S02　**原始惑星系円盤における高空隙率ダストの光学特性とその応用**　田崎亮(京大)

09:30 S03　**月SPA盆地形成により生じたimpact meltの層序と分化**　上本季更(JAXA)

09:45 S04　**周惑星ガス円盤内で形成する巨大氷衛星が獲得する原始大気**　三上峻(北大)

10:00 S05　**大気中の氷成分凝縮がもたらす天王星熱進化問題への示唆**　黒崎健二(東大)

10:15 S06　**火星に環があったか？フォボスの地質学的検討と数値計算による検証**　菊地紘(東大)

10:30-10:40　休憩

口頭発表セッション1　惑星大気

(座長：杉山耕一朗)

10:40 O1-01　**衝突併合を考慮した系外惑星の雲モデル：定式化と地球の積雲観測との比較**
大野和正(東工大)

10:49 O1-02　**質量の異なる中心星周りにおける地球類似惑星の気候進化**　門屋辰太郎(東大)

10:58 O1-03　**原始太陽系星雲散逸期の火星形成：熱史と大気－内部間揮発性物質分配**
齊藤大晶(北大)

11:07 O1-04　**水素－水蒸気大気をもつ地球型惑星の海洋形成条件**　濱野景子(東大)

11:16 O1-05　**放射対流平衡モデルによる水蒸気大気の圏界面温度の推定**　大西将徳(神戸大)

11:25 O1-06　**木星大気放射冷却に対する雲対流の寄与**　高橋康人(北大)

11:35-11:50　**学生，PDポスター発表フラッシュ1**

11:50-13:00　昼食

口頭発表セッション2　氷衛星

(座長：佐々木貴教)

13:00 O2-01　**木星氷衛星探査計画JUICEの概要と日本からの参加**　齋藤義文(JAXA)

13:09 O2-02　**JUICE搭載サブミリ波分光計SWI**
笠井康子(情報通信研究機構)

13:18 O2-03　**JUICEレーザ高度計(GALA)による調査に向けたガニメデ表面の超高精細DEMの作成**　押上祥子(天文台)

13:27 O2-04　**JUICE Radio and Plasma Wave Investigation(RPWI)：氷衛星地下海への2つのアクセス可能性**　笠羽康正(東北大)

13:36 O2-05　**JUICEレーザ高度計(GALA)による潮汐変形計測から探るガニメデの内部構造**
鎌田俊一(北大)

13:45 O2-06　**JUICEレーザ高度計(GALA)がもたらすサイエンス**　木村淳(東工大)

13:54 O2-07　**微惑星の土星近接遭遇による潮汐破壊：潮汐破壊過程の物理と土星リングの形成可能性**
兵頭龍樹(神戸大)

14:03 O2-08　**ガス抵抗による微惑星の捕獲と軌道進化**　末次竜(神戸大)

14:12 O2-09　**惑星による小天体の一時捕獲： 小天体の軌道と順行/逆行捕獲との関係**
樋口有理可(東工大)

14:21 O2-10　**土星系におけるインパクター起源の推定**　平田直之(神戸大)

14:30 O2-11　**周惑星円盤のモデル化と衛星移動について**　藤井悠里(コペンハーゲン大)

14:39-14:50　休憩

口頭発表セッション3　火星，火星衛星

(座長：臼井寛裕)

14:50 O3-01　**火星衛星の起源について～現状整理と展望，サイエンスの展開～**　玄田英典(東工大)

14:59 O3-02　**リターンサンプルからさぐる火星衛星の起源**　橘省吾(北大)

15:08 O3-03　**火星衛星の構成物に関する観測的制約と今後の課題**　宮本英昭(東大)

15:17 O3-04　**火星大気表層ダスト・水循環の周回衛星観測**　今村剛(JAXA)

15:26 O3-05 **フォボス・デイモスの熱環境の再評価** 小川和律(神戸大)
15:35 O3-06 **火星衛星から探る火星圏** 寺田直樹(東北大)
15:44 O3-07 **微小鉄コンクリーションの形成に対する砂岩の粒度の影響** 城野信一(名大)
15:53 O3-08 **火星内部構造探査InSight：脈動で見る内部構造** 小林直樹(JAXA)

16:05-17:30 **ポスターセッション1**

10月15日(木)
口頭発表セッション4 衝突現象
(座長：中村昭子)
9:00 O4-01 **月形成仮説(Multi Impact Hypothesis対 Giant Impact Hypothesis)の厳密な比較評価** 種子彰(SEED Science Lab)
9:09 O4-02 **粉粒体天体内部の密度構造に関する実験的研究** 大村知美(神戸大)
9:18 O4-03 **衝突放出物の最大速度とその量：火星物質輸送への応用** 岡本尚也(千葉工大)
9:27 O4-04 **熱進化した氷天体の衝突破壊現象の解明** 岡本千里(神戸大)
9:36 O4-05 **玄武岩を用いた高速衝突実験における衝突破片の3次元形状の粒子サイズ依存性と，イトカワレゴリス粒子との比較** 門川隆進(京大)
9:45 O4-06 **密度の異なる弾丸を用いた高速度クレーター形成実験：衝突励起地震の弾丸物質依存性** 松榮一真(神戸大)
9:54 O4-07 **斜め衝突実験と月の縦孔への応用** 道上達広(近畿大)
10:03 O4-08 **多孔質球の斜め衝突実験：衝突破壊強度に対する衝突角度の影響** 保井みなみ(神戸大)
10:12 O4-09 **月の新鮮クレータ放出物におけるクレータ年代と風化度の関係** 諸田智克(名大)

10:21-10:30 休憩

(座長：玄田英典)
10:30 O4-10 **FDPSを用いた巨大衝突のSPH法による大規模数値計算** 細野七月(理研)
10:39 O4-11 **微惑星衝突の数値計算に向けたゴドノフSPH法の弾性体力学への拡張** 杉浦圭祐(名大)
10:48 O4-12 **WPH法による月形成シミュレーション** 河瀬哲弥(京大)
10:57 O4-13 **冥王星の黒い“クジラ”模様はカロン形成巨大衝突の痕跡か？** 関根康人(東大)
11:06 O4-14 **過冷却液滴の衝突による複合コンドリュール形成** 荒川創太(東工大)
11:15 O4-15 **微惑星衝突によるコンドリュール形成の力学的条件** 松本侑士(天文台)
11:24 O4-16 **ダスト・ガス比の高い場合の1次元平行平板衝撃波シミュレーション～コンドリュール形成モデルへの応用に向けて～** 勝田祐哉(東工大)

11:35-11:50 **学生，PDポスター発表フラッシュ2**

11:50-13:00 昼食

13:00-14:15 **ポスターセッション2**

口頭発表セッション5 隕石，グレイン
(座長：橘省吾)
14:15 O5-01 **コンドライト母天体内の流動作用によるコンドリュールの再配置：モデル** 留岡和重(神戸大)
14:24 O5-02 **コランダムの太陽風・星間粒子線照射による非晶質化過程の実験的研究** 瀧川晶(京大)
14:33 O5-03 **2次イオン質量分析計を用いたChelyabinsk隕石の局所U-Pb系絶対年代分析** 上岡萌(阪大)
14:42 O5-04 **小惑星・水星の宇宙風化作用における硫黄の効果：粒子サイズの影響** 岡崎瑞祈(阪大)
14:51 O5-05 **層状珪酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響：OH/H_2Oの生成量の推定** 仲内悠祐(総研大)
15:00 O5-06 **原始太陽系星雲への一様な^{54}Cr注入と**

隕石中の同位体比異常の時間進化について
中本泰史(東工大)

15:09 O5-07 **プレソーラー SiC の Ba 同位体比に基づく太陽系重元素の起源に関する考察**
寺田健太郎(阪大)

15:18 O5-08 **非晶質フォルステライト結晶化における水蒸気圧効果** 山本大貴(北大)

15:27 O5-09 **初期太陽系の有機-無機相互作用：南極雪微隕石分析研究の成果から**
薮田ひかる(阪大)

15:36-15:45 休憩

口頭発表セッション 6 惑星形成
(座長：田中秀和)

15:45 O6-01 **ダストから惑星への衝突合体成長**
小林浩(名大)

15:54 O6-02 **黄道光分布から読み取る小惑星の衝突破壊で生じるダストの典型的サイズ**
植田高啓(東工大)

16:03 O6-03 **「あかり」遠赤外・中間赤外線観測に基づく黄道光ダストバンド構造の検出**
大坪貴文(東大)

16:12 O6-04 **円盤降着による原始太陽の進化と惑星形成による太陽表面の汚染** 國友正信(名大)

16:21 O6-05 **電子加熱による磁気乱流の抑制が引き起こす重力不安定：中心星 X 線が与える影響**
森昇志(東工大)

16:30 O6-06 **原始惑星系円盤の圧力バンプにおけるダストの空間分布の進化と合体成長**
瀧哲朗(東工大)

16:39 O6-07 **M 型星における地球型惑星の形成過程**
押野翔一(天文台)

16:48 O6-08 **大領域惑星集積計算：ガス円盤内での惑星の外側への移動** 小南(台坂)淳子(東工大)

16:57 O6-09 **巨大惑星が作る原始惑星系円盤ギャップ構造の深さと幅について** 金川和弘(北大)

17:06 O6-10 **惑星散乱と潮汐相互作用**
長沢真樹子(久留米医大)

17:20-18:20 **総会**

18:30-20:00 **懇親会**
会場：東工大 ELSI-2 ラウンジ

10 月 16 日(金)

口頭発表セッション 7 惑星内部，系外惑星，アストロバイオロジー
(座長：千秋博紀)

9:00 O7-01 **大きなコアを持ちプレートテクトニクスを伴う地球型惑星のマントル進化**
小河正基(東大)

9:09 O7-02 **Disk Model を用いた小規模天体の重力場計算** 金丸仁明(阪大)

9:18 O7-03 **氷とアンモニアの融解曲線から推測する天王星と海王星の内部構造**
木村友亮(愛媛大)

9:27 O7-04 **ケプラー衛星データに基づくハビタブル惑星候補に関する海洋質量及び液体の水の保有率の推定と考察** 堂ケ崎知誠(フリー)

9:36 O7-05 **惑星数と質量で考える系外惑星の力学構造** 磯江麻里(天文台)

9:45 O7-06 **巨星周り系外惑星の電波放射の検討**
藤井友香(東工大)

9:54 O7-07 **水溶液中におけるギ酸とメタンジオールの分解反応過程：量子化学計算による解明**
稲葉知士(早稲田大)

10:03 O7-08 **粘土鉱物を用いた核酸塩基の吸脱着関係** 橋爪秀夫(物質材料研)

10:12 O7-09 **氷天体の内部海におけるクラスレートハイドレート形成によるアンモニウムイオン濃度への影響** 西谷隆介(阪大)

10:21 O7-10 **地球低周回軌道における宇宙塵の捕集と有機物曝露：たんぽぽ計画開始と帰還後の分析計画** 小林憲正(横国大)

10:30-10:45 休憩

口頭発表セッション 8 はやぶさ2
(座長：薮田ひかる)

10:45 O8-01 **はやぶさ2と今後の小天体探査**
渡邊誠一郎(名大)

10:54 O8-02 **地球外物質研究グループの発足と今後の展望** 安部正真(JAXA)

11:03 O8-03 **「はやぶさ」帰還粒子RA-QD02-0265の起源同定と小惑星表面における衝撃・風化作用**
上椙真之(JAXA)
11:12 O8-04 **「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラＴＩＲの軌道上動作確認** 岡田達明(JAXA)
11:21 O8-05 **炭素質コンドライト隕石の母天体変成の系統的研究：はやぶさ2データの「始原性」の評価に向けて** 小松睦美(総研大)
11:30 O8-06 **走査ー結像型X線顕微CT法を用いた水・有機物の3次元観察法の開発：はやぶさ2サンプル分析に向けて** 土山明(京大)

11:40-13:00 昼食

13:00-14:00 **最優秀研究者賞受賞講演**
武藤恭之(工学院大)

口頭発表セッション9 月
(座長：荒井朋子)
14:00 O9-01 **かぐやデータの統合解析用WebGISシステム(KADIAS)の開発** 石原吉明(JAXA)
14:09 O9-02 **月高地地殻に含まれる輝石の化学組成から推定するマグマオーシャンの初期組成**
大竹真紀子(JAXA)
14:18 O9-03 **月探査機「かぐや」の連続スペクトルデータを用いた海の玄武岩の鉱物組成の推定**
加藤伸祐(名大)
14:27 O9-04 **「かぐや」搭載α線検出器ARDによる月面ラドンガス放出の時間変動の観測**
小島浩一(神戸大)
14:36 O9-05 **月形成初期の全球膨張説 ～線状重力異常上の地形学的・物質科学的特徴からの制約～** 澤田なつ季(名大)
14:45 O9-06 **月の縦孔・地下空洞探査ーUZUME計画ーのミッションとシステムの構想II**
春山純一(JAXA)
14:54 O9-07 **惑星探査用広帯域地震計による地動観測試験** 山田竜平(天文台)
15:03 O9-08 **観測衛星による連続分光データを使った月面上のガラスが支配的な領域の全球捜索**
山本聡(環境研)
15:12 O9-09 **月の海の縦孔における浸食シナリオ**
横田康弘(筑波惑星研究会)

15:21-15:30 休憩

口頭発表セッション10 小天体
(座長：渡邊誠一郎)
15:30 O10-01 **アジア太平洋小惑星観測網(Asia-Pacific Asteroid Observation Network ー APAONー)の構築**
浦川聖太郎(スペースガード協会)
15:39 O10-02 **ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査：高分解能質量分析装置を用いた木星トロヤ群小惑星着陸その場観測**
癸生川陽子(横国大)
15:48 O10-03 **ソーラー電力セイル探査機搭載EXZITによる黄道光の立体構造観測**
津村耕司(東北大)
15:57 O10-04 **ソーラー電力セイル搭載大面積ダストセンサの開発とクルージング計測**
矢野創(JAXA)
16:06 O10-05 **アーク加熱風洞を用いた流星アブレーションの研究** 沼田宗一郎(日本大)
16:15 O10-06 **伊豆大島における無人観測ロボット実証試験大会の活動報告** 佐伯和人(阪大)
16:24 O10-07 **その場K-Ar年代計測装置実現のためのLIBSを使ったAr輝線検出実験**
芝崎和夫(立教大)
16:33 O10-08 **深宇宙探査技術実証機DESTINY**
川勝康弘(JAXA)
16:42 O10-09 **ホノルルIAU総会における天文宇宙用語の発音調査** 佐藤勲

－閉会

●ポスター発表プログラム

下記では発表番号，和文表題，第一著者名を掲載しています．学生とPDの発表者は，1日目と2日目に一人1分間のフラッシュタイムがあるので，用意しておいてください．ポスターは1日目朝から3日目午後のセッション開始前まで掲示できます(註)．

S01 **磁気流体波動がガス惑星の大気散逸と大気構造**

に与える影響 田中佑希(名大)
S02 **原始惑星系円盤における高空隙率ダストの光学特性とその応用** 田崎亮(京大)
S03 **月SPA盆地形成により生じたimpact meltの層序と分化** 上本季更(JAXA)
S04 **周惑星ガス円盤内で形成する巨大氷衛星が獲得する原始大気** 三上峻(北大)
S05 **大気中の氷成分凝縮がもたらす天王星熱進化問題への示唆** 黒崎健二(東大)
S06 **火星に環があったか？フォボスの地質学的検討と数値計算による検証** 菊地紘(東大)
P01 **非平衡な化学進化および電子遷移を含む1次元流体計算による集積中の巨大ガス惑星からの短波長放射の推定** 青山雄彦(東大)
P02 **金星雲層を想定した鉛直対流の3次元数値計算** 杉山耕一朗(JAXA)
P03 **タイタン大気中での複雑有機物生成のエナジェティックスとその原始地球での化学進化への示唆** 小林憲正(横国大)
P04 **タイタン大気におけるアセトニトリル(CH_3CN)の回転励起状態** 仲本悟(名大)
P05 **雲解像モデルを用いた木星大気のマイクロ波熱放射** 山﨑健吾(福岡大)
P06 **JUICE-PEP/JNA 高速中性粒子計測装置** 浅村和史(JAXA)
P07 **JUICEレーザ高度計(GALA)の受信系の開発** 小林正規(千葉工大)
P08 **JUICE木星系探査が目指す科学** 佐々木晶(阪大)
P09 **JUICE搭載多バンド分光カメラ「JANUS」ミッションII** 春山純一(JAXA)
P10 **土星Fリング-羊飼い衛星系の起源：土星メインリング拡散による衛星-リング系の形成** 兵頭龍樹(神戸大)
P11 **周惑星円盤への固体物質流入と衛星形成** 芝池諭人(東工大)
P12 **捕獲された固体物質の周惑星円盤内での分布** 末次竜(神戸大)
P13 **輝度温度から探るフォボス内部の氷の有無** 菊池冬彦(天文台)
P14 **月表面におけるボルダーの細粒化とそのタイムスケール** 安藤滉祐(名大)
P15 **サブミクロン局所同位体分析に向けたレーザーポストイオン化SNMSの開発** 河井洋輔(阪大)
P16 **空間量子赤方偏移仮説とビックバン仮説との比較検討** 種子彰(SEED Science Lab)
P17 **マルチインパクト仮説　原始惑星セラは何故潮汐断裂したか？** 種子彰(SEED Science Lab)
P18 **チチウスボーデの法則を再検討(1)** 種子彰(SEED Science Lab)
P19 **人工衝突クレーター周辺の誘電率・密度・クラック分布の測定** 石山謙(東北大)
P20 **高空隙率標的への斜め衝突クレーター形成実験** 岡本尚也(千葉工大)
P21 **鉄質天体へのクレーター形成の温度・速度依存性に関する実験的研究** 小川諒(神戸大)
P22 **砂標的に対する衝突クレーターサイズの真空度依存性の検討** 木内真人(神戸大)
P23 **水氷の高速衝突蒸発実験** 黒澤耕介(千葉工大)
P24 **海洋への天体衝突：水蒸気発生量** 黒澤耕介(千葉工大)
P25 **氷・砂レゴリス層へのクレーター形成実験** 高野翔太(神戸大)
P26 **粉粒体斜面に対する低速度衝突クレータリング実験** 林康介(金沢大)
P27 **Dark ray craters on Ganymede observed from Galileo and Voyager images** 徐璐媛(東大)
P28 **原始太陽系星雲における同位体比均質化プロセスの推定** 竹石陽(東工大)
P29 **Irradiation Diskにおけるタンデム惑星形成** 今枝佑輔(理研)
P30 **原始惑星系円盤からの赤外線分子輝線の高分散分光観測** 野津翔太(京大)
P31 **デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成：縁辺の位置に対する依存性** 城野信一(名大)
P32 **新たなギャップ密度分布式を用いたガス惑星の最終質量** 谷川享行(産業医大)
P33 **短周期系外惑星の存在限界と潮汐進化** 長谷川典史(東大)
P34 **惑星成長の微惑星初期サイズ依存性** 森島龍司(カリフォルニア大)
P35 **「はやぶさ」帰還試料のコンソーシアム研究：Ca-Mg-Na相及びFa-S-Ni相が含まれる粒子**

中藤亜衣子（JAXA）

P36 **「はやぶさ」帰還試料のコンソーシアム研究：シリカを含む粒子** 橋口未奈子（JAXA）

P37 **「はやぶさ」帰還試料のコンソーシアム研究：アグルーチネイト粒子** 松本徹（JAXA）

P38 **「はやぶさ」帰還試料コンソーシアム研究の進捗：硫化鉄粒子及びリン酸塩鉱物を含む粒子** 唐牛譲（JAXA）

P39 **JAXAにおけるはやぶさ2帰還試料受け入れ設備の仕様検討** 上椙真之（JAXA）

P40 **炭素質隕石の反射スペクトル位相角依存性測定** 高松知広（立教大）

P41 **重力データから観測された同一地溝上の火山の火成活動の関連性について** 山本圭香（JAXA）

P42 **月の熱の入江領域の地下密度構造の推定** 内田眞子（金沢大）

P43 **月レゴリス層の熱伝導率モデルとLRO/Divinerデータを用いた検証** 坂谷尚哉（JAXA）

P44 **月の南極ーエイトケン盆地における海の火成活動** 田口雅子（名大）

P45 **BepiColombo日欧共同水星探査ミッション：MMOプロジェクト最新状況報告** 早川基（JAXA）

P46 **ソーラー電力セイルによるクルージングフェーズサイエンス** 岩田隆浩（JAXA）

P47 **金星探査機あかつきの軌道投入計画と観測計画** 今村剛（JAXA）

P48 **月・惑星探査用飛行時間型質量分析装置の開発** 大石峻裕（東大）

P49 **流星群の4次元予報計算** 佐藤勲

P50 **木星ヘクトメータ波観測による木星氷衛星地下海洋探査の検討** 熊本篤志（東北大）

註）

1）プログラムの詳細は日本惑星科学会のホームページに記載されております．下記アドレスをご参照下さい．
https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2015/program.html

2）プログラムに関するお問い合わせは，秋季講演会LOC（下記メールアドレス）へお願いします．
aloc@wakusei.jp

予稿集

S01

磁気流体波動がガス惑星の大気散逸と大気構造に与える影響

○田中佑希[1] 鈴木建[1] 犬塚修一郎[1]
[1]名古屋大学理学研究科

近年数多くの太陽系外惑星が発見されており、その中には中心星に非常に近い軌道を公転する巨大ガス惑星、いわゆるホットジュピターと呼ばれるものが存在する。ホットジュピターを様々な波長でトランジット観測することによって、大気組成や大気構造に関する興味深い情報が得られつつある。その一例が、紫外線領域でのトランジット観測から明らかになった、水素原子からなる高温の超高層大気と、大気からの大量の質量放出現象の存在である。ホットジュピターの高層大気からは水素大気が超音速で流出していることが示唆されており、またモデル依存性はあるものの質量放出率の推定値も得られている。

質量放出の駆動源としては中心星からのＸ線・極端紫外線による高層大気の加熱が考えられているが、これまでに惑星磁場を考慮した質量散逸の駆動については考えられていなかった。そこで我々が提案しているのが、磁気流体波動によって駆動される太陽風的な質量放出現象である。惑星が磁場を持ち、惑星表面の乱流によって磁力線に擾乱が与えられた場合、磁力線に磁気流体波動が励起される。その波が上空へ伝播して散逸することにより、高層大気の急激な加熱とガスの加速が行われ、惑星からの質量放出を駆動する。本研究ではホットジュピターに典型的だと考えられるパラメータを用い、磁気流体シミュレーションを行った。その結果、磁気流体波動によって駆動された質量放出は、観測から推定されている値を説明できることが分かり、さらに高層大気も１万Ｋ程度にまで加熱されることを示した。

惑星からの質量放出は、惑星環境の観測的診断として重要であるのに加え、半径・質量・角運動量など惑星自身の長期進化にも影響を及ぼしうる。またこの駆動機構は、ホットジュピターのみならずより低質量の短周期惑星や、より低温の惑星に対しても適用可能であるため、幅広い視野からの研究が有効である。

原始惑星系円盤における高空隙率ダストの光学特性とその応用

○田崎　亮[1,2]、田中　秀和[3]、奥住　聡[2]、片岡　章雅[4,5]、野村　英子[2]

[1] 京都大学宇宙物理学教室, [2] 東京工業大学地球惑星科学専攻,
[3] 北海道大学低温科学研究所, [4] ハイデルベルク大学, [5] 国立天文台

近年、原始惑星系円盤中のダストは高い空隙率を持って成長することが理論的に示唆されている (Okuzumi et al. 2012、Kataoka et al. 2013)。しかし、理論的に示唆された高空隙率ダストの光学特性に問題点があるため、観測の観点からこの理論モデルを検証する段階には至っていない。高空隙率ダストの光学特性は、T-Matrix 法などの計算手法を用いることで、より厳密に計算可能である。しかし、これらの計算手法は計算コストが高く、あまり実用的ではない。現実的には、有効媒質理論と呼ばれる近似的手法が頻繁に使用されているが、その有効性は明らかでない。

上述した問題を解決するため、我々は散乱の際に生じる波の位相差を考慮した上で周囲の散乱場を決定する Rayleigh-Gans-Debye (RGD) 理論を用いて、高空隙率ダストの散乱係数及び角度依存性について調べた。また比較のため、従来、頻繁に用いられてきた有効媒質理論を用いた計算も行った。さらに、RDG 理論及び有効媒質理論でそれぞれ得られた近似解と、T-Matrix 法で得られた厳密解を比較した。その結果、近赤外線といった比較的短波長側の領域において、有効媒質理論は後方散乱の散乱強度を桁で過小評価してしまうことがわかった。一方で、RGD 理論を用いることで簡単に、かつ、精度良く T-Matrix 法で得られた散乱の角度依存性・波長依存性等を再現可能であることを示した。また、散乱角度によってダストの異なるスケールの構造が反映されることも明かにした。前方散乱は高空隙ダストの比較的大きな構造によって決まり、後方散乱は小さなスケールの構造で決まるのである。また、波長については長波長ほど大きい構造を反映する。これらの高空隙率ダストの光散乱の性質を利用することで、ダストのフラクタル構造に関する情報を得る手法を構築できるかもしれない。 RGD 理論を採用することで、これまで計算が困難であったサイズの大きな高空隙率ダストの光学特性計算が可能となる。講演においては、RGD 理論に基づいて計算された、原始惑星系円盤における高空隙ダストの観測予測についても議論を行う。

月 SPA 盆地形成により生じた impact melt の層序と分化

○上本季更[14]、大竹真紀子[1]、春山純一[1]、中村良介[2]、松永恒雄[3]、山本聡[3]、横田康弘[3]、石原吉明[1]、岩田隆浩[1]
[1]宇宙航空研究開発機構、[2]産業総合研究所、[3]国立環境研究所、[4]東京大学

月裏側に存在する South Pole-Aitken（SPA）盆地は、クレータースケーリング則から、巨大衝突により盆地中心部は地殻がすべて掘削され、地殻下の月上部マントルは、衝突時の熱や圧力で溶融し impact melt となって存在すると考えられている[Lucey et al., 1998]。月マントル組成は未解明であるが、この impact melt を観測し組成を推定することで、溶融前の月上部マントルの組成が解明できると考えられる。ただし、impact melt の組成を推定するには、観測できる月表層の impact melt の組成が、結晶分化を経た上層のものか、分化を経ておらず一様に溶融したままのものかを推定する必要がある。更に、月最古の盆地といわれる SPA と月形成時代に起こったとされる月マグマオーシャンの層序逆転（overturn）との時期関係が近年議論されているが、分化の有無がわかり、impact melt 全体の組成の推定から、溶融する前の月上部マントルの組成がわかれば、その岩石・元素組成が overturn 前後どちらの月上部マントルの組成として適当であるか検証でき、両者の時期関係を観測から推測できる。しかし、月においては、impact melt が分化しているという観測例はなく、SPA 盆地において分化しうる可能性がモデルから示唆されている[e.g. Morrison., 1998]のみである。また、SPA は非常に古いため、後のクレーターによる表層の岩石混合が激しく、従来の観測データでは解像度が低く観測波長域が狭いため、岩石組成分布の詳細な把握は不可能であった。そこで本研究では、高解像度、広観測波長域での観測が可能となった月周回衛星かぐやのデータを使用し、鉱物・地形情報から、盆地中心部の水平垂直双方向の岩石分布、鉱物の化学組成を詳細に調査した。これらにより盆地中心部の岩石層序を把握することで、各岩石層の起源を推定し、SPA の impact melt の分化の有無を検証した。

結果、盆地中心部において、最上層には従来見つかっている Low-Ca 輝石に富むエジェクタ層や mare 層［Ohtake et al., 2014］（いずれも層厚 2km 以下）が存在し、その下に High-Ca 輝石に富む層(H 層、約 7km)、その下にはエジェクタ層より鉄濃度の高い Low-Ca 輝石に富む層（L 層、層厚約 8 km 以上）が存在することがわかった。

H 層、L 層について、1.鉄濃度において、H 層は同じ High-Ca 輝石の組成をもつ mare より低く、L 層は同じ Low-Ca 輝石の組成をもつエジェクタ層より高い、2.盆地中心部に広範囲に広がっている、3.層が厚い、ということから、これら 2 層は SPA の impact melt であり、H 層（上）L 層（下）に分化しているということが推定できた（L 層の下層以深は観測からは不明）。更にこれら 2 層は、岩石・元素組成から、overturn 後の月上部マントル組成によってできうると考えられることから、月形成時に overturn が起こり、その後に SPA の衝突が起こったと推測できた。また、この 2 層の層序は、SPA impact melt の分化モデル［Hurwitz and Kring.,2014］のうち SPA が overturn 以降に起こったと想定するものともよく一致した。

周惑星ガス円盤内で形成する巨大氷衛星が獲得する原始大気

○三上 峻[1], 高橋 康人[1], 倉本 圭[1,2]

[1] 北海道大学理学院宇宙理学専攻, [2] 惑星科学研究センター

巨大氷衛星ガニメデ，カリスト，タイタンはサイズと平均密度が似るにも関わらず，その表層環境に顕著な差異が存在する．タイタンは太陽系の衛星として唯一厚い大気を持ち，その主成分である N_2 は，近年の探査機カッシーニのデータによれば，NH_3 のような他の窒素分子種に由来する可能性が高い．また慣性能率の値から，ガニメデの内部はカリストやタイタンに比べて非常に分化度が高いと推定されており，固有磁場や内部海のハビタビリティの観点から巨大氷衛星の内部構造の起源は注目されている．しかし，このような大気の形成や内部構造の形成過程については未だ不明な点が多い．これは，集積期の巨大氷衛星の物理状態について不明な点が多いことに起因する．

近年有力視される衛星形成理論によると，巨大氷衛星をはじめとする規則衛星は低温・低圧な周惑星円盤内で長い時間をかけて集積成長する．そのような形成条件では，集積期の氷成分の大規模な融解は生じなかったとする主張があるが，そこでは原始大気の保温効果が無視されている．実際には，低温の円盤で形成する巨大氷衛星は大量の円盤ガスを捕獲し，その結果材料物質中の氷の蒸発が起きることで，さらに厚い原始大気を獲得する可能性がある．

そこで本研究では，このような混合型大気の放射対流平衡構造とその保温効果について数値的に検討し，N_2 大気の起源と内部構造の多様性について考察した．原始大気は衛星ヒル半径において周惑星円盤と静力学的に接続し，大気成分には円盤ガス成分の H_2, He と材料物質中の氷に含まれる H_2O と NH_3 を考慮する．大気は成層圏と対流圏で構成され，氷蒸発成分は全層で飽和蒸気圧に従う．衛星形成場の円盤条件は Canup and Ward (2002) をもとに，ガニメデ，カリスト，タイタン軌道でそれぞれ 150 K, 100 K, 50 K, 円盤圧力は 1-100 Pa とした．また，集積中の衛星の原始大気による影響を考察するために，衛星質量を変えた計算も行った．以上の設定を基に，衛星地表面温度の関数として大気質量，大気上端における正味の熱放射フラックスを算出した．

いずれの円盤条件においても，地表面温度が 200 K を超える場合には，H_2O と NH_3 によって大気は厚くなり，大気上端からの熱放射フラックスは大気無しの場合より顕著に小さい．一方，地表面温度が低い場合，ガニメデ・カリストは大気中の氷蒸発成分の量が少ないために大気質量は小さく，熱放射フラックスは地表面温度の黒体放射に漸近する．これは背景温度が比較的高いために大気のスケールハイトが大きく，薄い大気しか獲得できないためである．一方，タイタン条件下では，背景温度が低いために大気のスケールハイトが小さくなり，獲得できる大気質量は大きくなる．この大気はタイタン重力に強く束縛されており，また大気が高圧なために熱放射フラックスが顕著に抑制される．また衛星質量を小さくした場合には，獲得できる原始大気の質量は小さくなり，特にタイタンが獲得しうる重力束縛大気の量は顕著に小さくなり，それに伴い放射を抑制する効果も小さくなる．

衛星質量を現在の衛星質量の半分に変えて計算したところ，ガニメデの場合，およそ 10^6 yr より短い時間で集積する際には，集積エネルギーの解放によって地表面温度が H_2O 氷の融点を超える可能性がある．同様に，カリストとタイタンが氷の融点を超えるためにはそれぞれ 5×10^5 yr, 8×10^5 yr より短い集積時間が必要となる．また，タイタンが獲得しうる重力に強く束縛された大気は，周惑星円盤散逸後も残存する可能性があり，残存大気中に比較的多く含まれる NH_3 が現在の N_2 大気の材料となった可能性がある．

大気中の氷成分凝縮がもたらす天王星熱進化問題への示唆

○黒崎　健二[1]　　生駒　大洋[1]
[1]東京大学　大学院理学系研究科　地球惑星科学専攻

天王星と海王星は同程度の質量・半径を持つが，それらの熱放射強度は互いに大幅に異なっている．天王星の熱放射強度は，海王星に比べて一桁以上小さいことが知られている(Hubbard et al.1995)．惑星形成論によると，形成直後の惑星内部は現在に比べて非常に高温である．そうした高温状態から巨大氷惑星の熱進化を追った先行研究（Fortney et al. 2011; Nettelmann et al. 2013）の結果は，海王星の現在の熱放射強度と整合的であるが，天王星の弱い熱放射強度と整合的でない．

天王星と海王星の熱進化を分けた原因の一つとして，巨大衝突の有無が挙げられる．天王星は自転軸が大きく傾いていることから，過去に巨大衝突を受けたことが示唆されている(Slattery et al. 1992)．一方，海王星には巨大衝突を受けた明らかな痕跡はない．天王星と海王星は，氷コアの周りに円盤ガスが降着して形成したと考えられている．巨大衝突を受けた天王星では，その氷成分が水蒸気として水素エンベロープに巻き上げられ混ざる可能性がある．したがって，天王星と海王星では初期の内部組成分布が異なったかもしれない．特に前者のような巨大衝突を受けた惑星は，大気中に水蒸気を多く保持することになるため，凝縮の潜熱が惑星の熱進化に影響する可能性がある．

これまでの巨大氷惑星の熱進化計算では，大気中に凝縮成分の存在を考慮せず，常に乾燥した大気を仮定してきた．そこで本研究では，大気中での氷成分凝縮を考慮した巨大氷惑星の熱進化モデルを構築した．惑星大気中において氷成分が凝縮すると，潜熱の解放により上層大気が高温に維持され，いわゆる「射出限界」(Nakajima et al. 1992)に相当する惑星放射で，惑星全体の冷却が起こるようになる．その結果，凝縮の効果を無視した場合と比較して，惑星の熱進化が早くなることがわかった．結果として，現在の天王星の熱放射強度が低いという問題を解決できる可能性が確認できた．このことは，天王星と海王星の熱進化および形成過程の違いを議論する上で重要である

S06

火星に環があったか？フォボスの地質学的検討と数値計算による検証

○菊地紘[1]　宮本英昭[1]　[1]東京大学総合研究博物館

火星には二つの衛星がある．三軸比，軌道要素，スペクトルが類似している一方で，表面の様相は大きく異なっている．特に大きな違いは，火星の衛星フォボスには特徴的な直線上の溝構造が網目状に存在しているが，もう一つの衛星ディモスにはみられない．火星の衛星の表面の進化において，この線状構造の形成過程を理解することは重要である．近年，フォボス高解像度画像が取得されたことで，線状構造の形成原因に制約が与えられてきた．これらはフォボス外からきた衝突物質によって形成したことが有力視されている[Murray and Heggie., 2014; Simioni et al., 2015]がまだ決着がついていない．観測されるような直線的な構造を持つためには，衝突物質は同一の進行方向をもち，かつ進行方向に平行に並んでいなければならない[Ramsley and Head., 2014]が，これを説明できる過程や軌道がわかっていない．そこで私たちは，線状構造を三次元数値モデルに投影することで衝突方向を推定した．これを初期パラメタとして，球形に分布した衝突物質に初速度を与え，火星の重力によって変形する方向と進行方向の関係を，N 体計算をもちいて調査した．その結果，衝突物質は火星を周回する軌道であれば，進行方向に平行に並ぶことがわかった．さらにこのときフォボスに衝突したときの物質同士の距離間隔を調べたところ，観測されるピットチェーンの間隔と概ね一致することがわかった．ディモスと衝突物質の軌道は交差しなかったため，線状構造が形成しなかったといえる．以上から火星の周辺を環のように薄く存在する物質がフォボスに連続して衝突したことが，フォボス表面に痕跡として残っていたと考えられる．

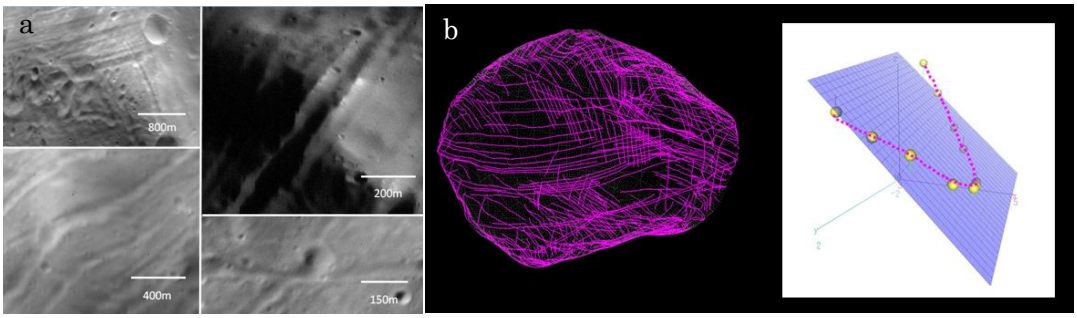


図 a：フォボスでみられる様々な種類の線状構造．　図 b：線状構造を三次元数値形状モデルに投影し，統計的に衝突方向を推定した．

図 c：数値計算の結果．衝突物質が火星を周回したき，衝突物質は進行方向と平行に並ぶことがわかった．

図 d：観測結果と数値計算で再現したピットチェーンクレーターの比較．

衝突併合を考慮した系外惑星の雲モデル：定式化と地球の積雲観測との比較

○大野和正（東工大)、奥住聡（東工大）

近年、透過スペクトルに吸収線を持たない系外惑星が発見されつつあり、光学的に厚い雲が大気を覆い隠しているという説が原因の 1 つとして考えられている。このような現象が発生するか判定するには、雲の光学特性と関係する雲粒のサイズ・数密度分布を雲モデルを用いて推定することが必要となる。従来の雲モデルの多くは、雲粒のサイズ・数密度分布を決める物理過程として主に凝縮を考えており、雲粒同士の衝突併合はあまり考えられてこなかった。しかし、雲粒同士の衝突併合は雲粒の数密度が減少するよう働くため、雲形成において重要である。

本研究では衝突併合に着目して、凝縮・衝突併合・落下の物理過程を考慮した 1 次元雲モデルを開発した。粒子のサイズは凝縮と衝突、数密度は衝突と落下によるフィードバックを受ける。本モデルはこれらの素過程を非物理パラメーターを用いることなく計算することで、凝縮雲の鉛直構造（サイズ・数密度分布）を大気の物理量の関数として求めることができる。

開発したモデルの妥当性を検証するため、RICO プロジェクトによる地球上の観測とモデル計算の比較を行った。RICO プロジェクトでは熱帯地方の海上に存在する小規模な積雲の貫入観測が行われ、得られた観測量は雲モデルの妥当性検証に有効である。モデル計算との比較の結果、地表湿度 70 ～ 80 % の幅内で RICO による観測を再現できることが分かった。RICO 観測は熱帯の海上で高湿度が予想されるため、この結果は現実と整合的である。また雲底より上層の分布は地表湿度にほとんど依存しない性質を利用して、雲底からの距離で規格化して観測値とモデル計算の比較を行った。その結果、モデル計算は観測の値よりも数密度が約 1/3 倍少なく、粒子直径は約 2.5 倍大きく見積もられていることが分かった。衝突併合が発生するほど粒子が成長しない場所で比較した場合も、数密度は観測値の約 3/5 倍少なく、粒子直径は約 1.7 倍 大きく見積もられる。これらの結果から、RICO によって観測された地域では雲と周囲の乾燥空気との混合が発生しており、凝縮成長が抑制されていることが示唆される。

O1-02

質量の異なる中心星周りにおける地球類似惑星の気候進化

○門屋 辰太郎[1], 田近 英一[2]

[1] 東京大学・理・地球惑星科学, [2] 東京大学・新領域・複雑理工学

地球類似惑星の表層環境は, その惑星が受け取る日射量に加え, CO_2 脱ガス率の影響も受ける. たとえば, CO_2 脱ガス率が低い場合には, 大気中 CO_2 分圧が低くなるため, たとえその惑星の公転軌道がハビタブルゾーン内に存在していたとしても, 全球凍結状態となる (Kadoya & Tajika, 2014). 日射量や CO_2 脱ガス率は時間とともに変化するため, 惑星がハビタブルであるか (i.e., 液体の水を惑星表面上に保持しうるか) について考えるには, 恒星進化にともなう日射量の増加やハビタブルゾーンの移動, 惑星内部熱進化にともなう CO_2 脱ガス率進化の影響を考慮する必要がある. 恒星進化や惑星内部熱進化は, それぞれ中心星や惑星の質量によってそのタイムスケールが異なる. そこで, 本研究では, 特に中心星質量に着目し, 日射量と CO_2 脱ガス率の進化にともなう気候進化の推定と類型化を行った.

低質量星周りの地球類似惑星を考えた場合, 光度進化が遅いため, 初期のハビタブルゾーンに対して, 継続的ハビタブルゾーンが占める割合が広いことが予想されてきた (Kasting et al., 1993). しかし, その一方で, CO_2 脱ガス率の進化は中心星質量に依らず, 時間とともに低下する. この結果, 惑星形成後約 30 億年 (CO_2 脱ガス率が現在の地球における CO_2 脱ガス率の数倍まで低下する時間) が経過すると, ハビタブルゾーンの大部分で地球類似惑星が全球凍結気候モードになるという結果が得られた. この結果に基づくと, 形成後長期間経過した中心星周りの惑星は, 連続的ハビタブルゾーン内に存在していても, 全球凍結状態として観測されることが予想される.

ただし, ここで用いた気候分類は, G 型星周りの地球類似惑星を想定し, 自転角速度が公転角速度に対し十分大きいことを仮定した場合の結果である. M 型星周囲のハビタブルゾーン内では, 惑星は同期回転している. こうした惑星では, 夜半球が氷に覆われ, ケイ酸塩風化による CO_2 の除去が抑制されることが予想される. また, 低質量星では放射温度が低いため, 放射のピーク波長が長波長に遷移する. 水氷がこうした長波長の放射を吸収するため, 水氷のアルベドが G 型星回りで想定されるよりも小さくなる. こうした傾向から, 低質量星周りの惑星は, 中心星放射量や CO_2 脱ガス率が同じ条件であっても, G 型星回りに比べ, 温暖な気候であることが, 定性的に予想される. そこで, この場合にどのような気候モードが実現されるかについての検討を行っており, その結果についても議論したい.

O1-03

原始太陽系星雲散逸期の火星形成：熱史と大気–内部間揮発性物質分配

○齊藤 大晶[1]，倉本 圭[1]
[1]北大理

現在の状態と対照的に，初期の火星大気は著しく厚く，温暖湿潤な状態であったと推定されている．しかしながらその具体的な組成や質量についてはよくわかっていない．隕石年代学を加味した最新の惑星形成論によると，火星は最古のCAI粒子の形成から約 3 Myr 以内に現在の火星質量の 1/2 にまで成長し，コアとマントルに分化していたと考えられている (Dauphas and Pourmand, 2011)．これは，火星の集積が基本的に原始惑星系星雲中で起こったことを示唆している． この場合，火星には星雲中ガス成分 (H_2, He) と微惑星衝突脱ガス成分 (H_2, H_2O, CH_4, CO) からなる混成型原始大気が形成した可能性ある．

我々はこれまでに1 次元放射対流平衡モデルを構築し，混成型原始大気の熱的構造について調べてきた．その結果，集積時間が 6 Myr 以内で，なおかつ火星材料物質にCI コンドライトの1割程度の濃度の揮発性成分が含まれていれば，原始火星が現在の火星質量の約 1/3 以上に成長すると，地表面温度が岩石融点の目安である 1500 K を超えうることがわかった．これは火星の集積中に大規模なマグマオーシャンが形成された可能性を示唆する．マグマには H_2O を溶解させる性質があることから，H_2O の一部は内部に分配されると考えられる．ただしこれまでの解析では背景の星雲ガス圧を固定し，原始太陽系星雲の散逸は考慮していなかった．星雲の散逸を考慮すると，原始大気の圧力が下がり，熱構造や保温効果は大きく変化する可能性がある．

そこで本研究では，星雲ガスの散逸を考慮にいれた解析を行い，成長段階にある原始火星（0.1〜1 火星質量）の熱的構造および，脱ガス大気質量をそれぞれ調べた．具体的には，Hill 圏密度を星雲ガス散逸前の値（1.1×10^{-7} kg m^{-3}, Kusaka, 1970）を基準に $1/10^{12}$ まで低下させながら，パラメータスタディを行なった．密度をもっとも下げた場合，Hill 圏においてクヌーセン数が 1 となる．また，マグマオーシャンが形成する場合，内部に H_2O が分配される量についても調べた．

解析の結果，星雲ガスの散逸により原始大気の圧力と質量が減少し，保温効果が弱まることが示された．それに伴い，地表面融解の開始時期は遅れるものの，集積時間と材料物質の組成を先と同様に与えた場合には，原始火星が 0.6 火星質量以上に成長するとマグマオーシャンが形成される．集積完了時には，大気圧は約 2000 bar に達し，現在の火星に比べて非常に厚い大気が形成される．また火星内部に分配される H_2O 量は，火星全球を厚さ約 10km で覆う水量に匹敵する．これは初期火星の温暖湿潤な描像と基本的には整合的と考えられる．今後，原始大気と内部に分配された大量の揮発性成分が集積完了後にどのようにふるまい，どのような痕跡を残すのか検討する必要がある．

O1-04

水素-水蒸気大気をもつ地球型惑星の海洋形成条件

Formation conditions of liquid water oceans under hydrogen-rich atmospheres

○濱野景子[1]，阿部豊[1]，大西将徳[2]
1 東京大学, 2 神戸大学

海洋を形成するためには，液体の水が存在できる地表温度・水蒸気分圧が必要である．その条件は現在の地球のような惑星を想定した，水蒸気-二酸化炭素-窒素大気についてよく調べられている．一方，惑星形成の過程でのネビュラガスの捕獲や水と金属鉄との化学反応により，初期の惑星大気は水素を含みうる．水素-ヘリウム大気を考慮した先行研究では，40 bar の水素大気をもつスーパーアースでは，G 型星から 10 AU 離れても水素の衝突誘起吸収により地表温度が 280K 以上に保たれることが示されている（Pierrehumbert and Gaidos, 2011）．また，十分な集積熱や潮汐加熱がある場合，浮遊惑星や巨大惑星の衛星でも温暖に保たれる可能性がある（Stevenson, 1999; Peters and Turner, 2013）．

水素-水蒸気大気を考える場合, 水素を加えることで大気の平均分子量が減少し，大気スケールハイトが増加する．その結果，地表での水蒸気分圧が飽和蒸気圧と等しいとすると，純粋な水蒸気大気と比べて水蒸気の気柱質量が増加し，大気の光学的厚さが増加する．これは逆に，地表の水蒸気分圧を海洋形成に十分な値に保つには，水蒸気大気に比べより多くの水が必要であることを意味する．

本発表では様々な大気量・地表の水素モル分率に対して，一次元放射対流平衡モデルを用いて，水素-水蒸気大気の構造を求める．海洋が形成する恒星入射フラックス・内部熱流と必要な水量との関係を示す．

O1-05

放射対流平衡モデルによる水蒸気大気の圏界面温度の推定

○大西 将徳[1]，はしもとじょーじ[2]，倉本 圭[3]，高橋 芳幸[1]，
石渡 正樹[3]，高橋 康人[3]，林祥介[1]
1 神戸大学大学院理学研究科，2 岡山大学大学院自然科学研究科，3 北海道大学理学院

1. はじめに

惑星表面に液体の水を長期間保持できるかどうかは惑星のハビタビリティを議論する上で重要な観点である．仮にある惑星に海が存在したとしても，海から蒸発した水蒸気の一部は大気上層で中心星放射により分解され，水素が宇宙空間に散逸していくことにより失われる．そのため液体の水が存在できる熱的環境にある惑星でも，海を長期間保持できない可能性がある．水の損失の速さは成層圏の水蒸気混合比が律速しており，その水蒸気量は対流圏界面の温度に依存する．

Kasting et al. (1993), Kopparapu et al. (2013) は，地球のような大気組成と海水量を持つ惑星に対して，その海洋が 46 億年にわたって維持されるための中心星放射の上限値（水損失限界）を推定している．彼らの研究では，計算の簡略化のため気温が 200 K となる高度を圏界面と置き，圏界面より下層は断熱温度構造，上層は等温が仮定されている．圏界面温度をこのように固定することについて，Kasting et al. (1993) は，暴走温室限界の推定に対してはほとんど影響しないが，水損失限界の推定には，圏界面温度が成層圏の水蒸気混合比を決めるので吟味が必要かもしれないと述べている．つまり，惑星表面に水を保持できる条件を議論するには，圏界面の温度がどのように決まるかを理解し，これらをきちんと推定することが重要である．そこで本研究では，1 次元放射対流平衡モデルを用いて，圏界面温度の推定と，その物理的な考察を行った．

2. モデル概要

モデル大気は窒素(地表で 1bar)と水蒸気の二成分からなり，水蒸気は対流圏で飽和しているが，成層圏では飽和蒸気圧を上限として上空に向かって体積混合比が増加することはないと仮定する．中心星放射は太陽スペクトルを与え，地表面温度（280 ～ 360 K）を振って，それぞれ放射対流平衡温度構造を求める．放射計算は，ラインバイライン計算と相関 k 分布法を併用し，放射伝達方程式は 2 流近似を用いた．

3. 圏界面温度の推定

灰色大気では，成層圏の温度 T_{top} は有効放射温度 T_{eff} を用いて，$T_{\mathrm{top}} = (1/2)^{1/4}\ T_{\mathrm{eff}}$ と近似できる．しかし非灰色大気では，波数によって光学的厚さにコントラストがあるため，成層圏の温度はより低温になることが物理的考察から得られる．これまでに行った試行計算によれば，地表面温度が 280 - 345 K の場合には，圏界面温度は 135 K 以下，水蒸気混合比は 1×10^{-11} 以下の低温の成層圏が実現する．一方で地表面温度が 350 - 360 K の場合には，圏界面温度は 200 K に近く，水蒸気混合比は 1×10^{-4} 以上となる結果が得られた．どちらの場合も，成層圏の温度は惑星放射の吸収と大気の射出のバランスでほぼ決まっており，地表面温度を変えた場合に，なぜ成層圏の温度に急激なジャンプが生じるか現在解明を進めている．地表面温度のわずかな違いにより圏界面の温度や成層圏の水蒸気量が大きく異なるとすれば，中心星の永年的な光度変化を受けて水損失の速度に 2 つのフェーズが存在することが予想される．

O1-06

木星大気放射冷却に対する雲対流の寄与

○高橋康人[1], はしもとじょーじ[2], 石渡正樹[1], 高橋芳幸[3], 杉山耕一朗[4], 大西将徳[3], 倉本圭[1]

[1]北海道大学, [2]岡山大学, [3]神戸大学, [4]JAXA/ISAS

惑星の大気システムの理解には、大気中の主要な熱輸送過程である放射と対流のメカニズムを明らかにすることが重要である。木星においては、特徴的な縞状の東西流や雲を形成する鉛直対流について、数値的な研究がなされてきた。しかしその一方で、これらの対流運動を駆動する放射熱輸送については単純化して与えられている場合がほとんどであり、これを系統的に調べた研究は皆無である。

そこでわれわれは、木星を対象とした鉛直一次元放射伝達モデルを構築し、それを用いて木星対流圏における放射冷却率プロファイルの理論的解析をおこなってきた。本モデルは非灰色大気バンドモデルであり、大気成分として H_2, He, CH_4, NH_3, H_2O, H_2S, PH_3, GeH_4 を考慮し、それに加えて木星環境下で存在すると考えられている NH_3, NH_4SH, H_2O の 3 種類の雲の寄与も導入している。

まず考察のリファレンスを得るために、雲の光学特性を無視した放射対流平衡構造を求めた。対流圏の温位には観測値を与え、凝結性物質の濃度は、飽和条件を満たす場合には飽和蒸気圧に従う。また十分下層での重元素濃度は、広く用いられている太陽組成の 3 倍とした。その結果、0.35bar 付近に対流圏界面(放射平衡領域と対流不安定領域の境界)が形成され、0.5bar 付近に最小値を持つ放射冷却率プロファイルが得られた。この大気モデルは木星の熱放射スペクトルも概ね再現する。しかしながら木星はほぼ全球が雲に覆われており、放射伝達に影響を及ぼしていると考えられる。そこで Sugiyama et al. (2014) で示された雲対流によって決定される雲量と凝結性成分の鉛直分布を導入した場合に、放射冷却率プロファイルが受ける影響について検討を行った。彼らの 2D 雲対流シミュレーションでは雲対流が静穏期と活発期を交互に繰り返す。我々のモデル計算からは、静穏期における雲密度の小さな状態では熱放射の伝達にほとんど影響しないという結果が得られた。静穏期の方が圧倒的に継続時間が長いことを考えると、この結果は雲なしの放射対流平衡モデルが木星の熱放射スペクトルを概ね再現できることと整合的である。その一方で、活発期の雲密度が高い状態では対流圏界面付近で強い冷却がもたらされることがわかった。発表では、この結果がもたらす対流運動へのフィードバックについて議論する。また、放射冷却全体に対する各成分分子や雲の寄与の内訳についてより詳しい解析をおこない、特に NH_3 ガスおよび雲による寄与が対流圏界面付近でどう機能するかについての考察も示す。

O2-01

木星氷衛星探査計画 JUICE の概要と日本からの参加

○齋藤義文[1]、佐々木晶[2]、東原和行[1]、藤本正樹[1]、JUICE-JAPAN WG
[1]宇宙科学研究所太陽系科学研究系、[2]大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

JUICE とは、ESA が 2012 年 5 月に選定したＬクラス計画であり、2022 年打ち上げ, 2030 年木星系到着, 2032 年ガニメデ周回軌道投入の予定である。木星到着後、まずは木星周回軌道から木星系の観測を実施し、ガニメデ周回軌道投入後はガニメデという太陽系最大の氷衛星の精査を行う。AO とその後の選定を経て決まった JUICE に搭載される 11 観測機器提供チームのうち、３つの機器(RPWI, GALA, PEP/JNA)については ISAS/JAXA から JUICE-JAPAN がハードウェアの一部を提供する事になり、2 つの機器(JANUS, J-MAG)についてハードウェアの提供は無いがサイエンス Co-I として参加することとなった。海外が主体となる極めて魅力的な大型計画へ日本から機器提供という形で参加することは今後とも活用されるべきである「海外計画への参加」という枠組みであり JUICE-JAPAN はその先駆けとなる。

JUICE の科学的課題は (1)系外惑星を意識した, 巨大ガス惑星の世界の理解, および、(2)アストロバイオロジーを意識した, 氷衛星（ガニメデ, エウロパ, カリスト）の探査である。木星周回軌道から木星系の観測（磁気圏, 木星大気, エウロパ・カリスト・ガニメデのフライバイ観測）を実施し、巨大ガス惑星の原型としての木星系探査を行うことで、「巨大ガス惑星系の起源と進化」を解明する事、４つのガリレオ衛星のうち、エウロパ・カリストのフライバイ観測、太陽系最大の氷衛星ガニメデの周回観測による精査を実施し、生命居住可能領域の探査を行うことで、「生命存在可能領域としての氷衛星地下海の形成条件」を解明する事、そして巨大な木星磁気圏と、磁気圏中に存在する氷衛星との相互作用を明らかにすることで、「太陽系最強の加速器木星磁気圏」を解明することである。

JUICE の打ち上げは、アリアン５で行われる。打ち上げ後は、地球・金星・地球・地球というスウイングバイを経て木星に到着する。ガニメデ周回軌道投入後は、ガニメデという太陽系最大の氷衛星の精査を目的とする。ガニメデ高度 500km での周回観測を実施し、最後はガニメデに衝突してミッション終了となる。ISAS/JAXA から JUICE-JAPAN として参加するハードウェア提供３機器(RPWI, GALA, PEP/JNA)とサイエンス参加 2 機器(JANUS, J-MAG)を足し合わせると、木星本体（JANUS）、木星磁気圏（PEP/JNA,RPWI,J-MAG）、氷衛星（GALA,J-MAG,JANUS）といった JUICE のサイエンス・テーマのすべてに、日本からバランス良く貢献が可能であることがわかる。

2013 年 9 月に正式に JUICE-JAPAN WG が設立された後、JUICE-JAPAN WG は、平成 26 年 2 月に小規模プロジェクトの募集に対して応募し、9 月に理学委員会による MDR/SRR を通過した。平成 27 年 2 月に宇宙研の所内 SRR、所内プロジェクト準備審査を受けたものの不合格となり、その後平成 27 年 4 月末に実施された所内 SRR の再審査を通過、翌月５月下旬に実施された所内プロジェクト準備審査の再審査も条件付きながら通過し現在に至っている。現在は、WG からプリプロジェクトへの移行時期である。今後、プリプロジェクト、プロジェクトと進み、平成２８年度には PDR、平成２９年度に CDR と進んでいく予定である。JUICE はプロジェクト終了までまだ約２０年かかる長期間に渡るプロジェクトである。適宜世代交替を進めながら是非ともこの魅力ある大型ミッションへの参加を成功させたいと考えている。

O2-02

JUICE 搭載サブミリ波分光計 SWI

Current development status of JUICE/SWI Japanese team

笠井 康子[1,2], 関根 康人[3], 佐川 英夫[4], 黒田 剛史[5], 碓井英雄[1], 西堀 俊幸[6], 真鍋武嗣[7], JUICE-SWI 日本チーム

1. 情報通信研究機構, 2.東京工業大学, 3.東京大学, 4.京都産業大学, 5.東北大学, 6. 宇宙航空研究開発機構, 7. 大阪府立大学

JUICE 搭載装置の一つにサブミリ波分光計 Submillimetre- Wave-Instrument（SWI）がある. 深宇宙探査機の歴史の中で, サブミリ波テラヘルツ波を用いた惑星観測はこれまで例がなく SWI が初めての提案となる. SWI の主な目的は木星中層大気の力学的挙動、衛星希薄大気の構造や成分、表面熱力学的性質を調べることで、サブミリ波テラヘルツ波帯における放射を大気周縁と直下方向から受信する。本講演では、SWI が拓く科学, それを達成するための観測装置, そして測器開発などの進捗状況を述べる

The Submillimetr-Wave Instrument (SWI) is one of the 10 scientific payloads on the JUpiter ICy moon Explorer (JUICE). The primary scientific objectives of SWI is to investigate the structure, compositions and dynamics of the middle atmosphere of Jupiter and exosphere of its moons, as well as thermophysical properties of the satellite surfaces. SWI observations will provide pioneering direct measurements of atmospheric compositions in Jupiter system. SWI plan to performed limb and nadir passive observations with frequency 530-600 and 1075-1275 GHz regions. Japanese contribution is the development of main-and sub-reflectors, actuators for the instruments, feasibility studies for observation performance, data processing, and scientific contributions. In this paper, the current status of development in Japan will be presented.

O2-03

JUICE レーザ高度計（GALA）による調査に向けたガニメデ表面の超高精細 DEM の作成

押上祥子[1] ○平田直之[2] 木村淳[3] 並木則行[1]

[1]国立天文台[2]神戸大学理学研究科[3]東京工業大学地球生命研究所

木星氷衛星探査機 JUICE に搭載される Ganymede Laser Altimeter (GALA)は，レーザ光の飛行時間を測定することによって衛星と天体表面までの距離を測定する機器である．GALA はガニメデの全球地形情報を得るだけでなく，潮汐変形や回転変動を捉えることにより，地下海の存在を明らかにすることを目指している．レーザが天体表面で反射したパルスの強度と形状は，天体表面のレーザ波長での反射率やレーザのフットプリントサイズである 50 m 規模のラフネスを反映するため，機器開発やデータ較正においては，こうしたラフネスや勾配についての影響を考慮に入れる必要がある．しかしながら既存の Digital Elevation Model(DEM)の解像度は約 200 m であり，機器開発に資するものではなかった．

表面勾配・ラフネスを定量的に解析する手法として，主に Photoclinometry と Stereoscopy がある．このうち Stereoscopy による DEM 作成にあたってはステレオペア画像(視差のある二枚の画像)が必要である．ガリレオ探査機によるガニメデの高解像度画像（最高解像度は約 10 m/pix）は約 200 枚得られているが，その撮像領域は限定的で，特に 50 m 四方の領域に存在する地形を考察できるような画像(25 m/pix 以上)は 16 枚しかない．我々がガリレオデータを再調査したところ，これらの高解像度画像の中に先行研究よりも 1000 倍近く高精細な DEM の作成が可能なステレオペア画像(25 m/pix 以上)が存在した．新たに作成した DEM(図 1 右)から，表面地形のラフネスや勾配分布について重要な示唆が得られた．従来，ガニメデの表面は 10 度以上の勾配がない滑らかなものとされていたが，新たに作成した DEM では 40 度程度の急勾配が多数存在することが明らかとなった．今後，この DEM をリファレンスデータとする Photoclinometry によって，さらに高精細な地形復元を試みる．

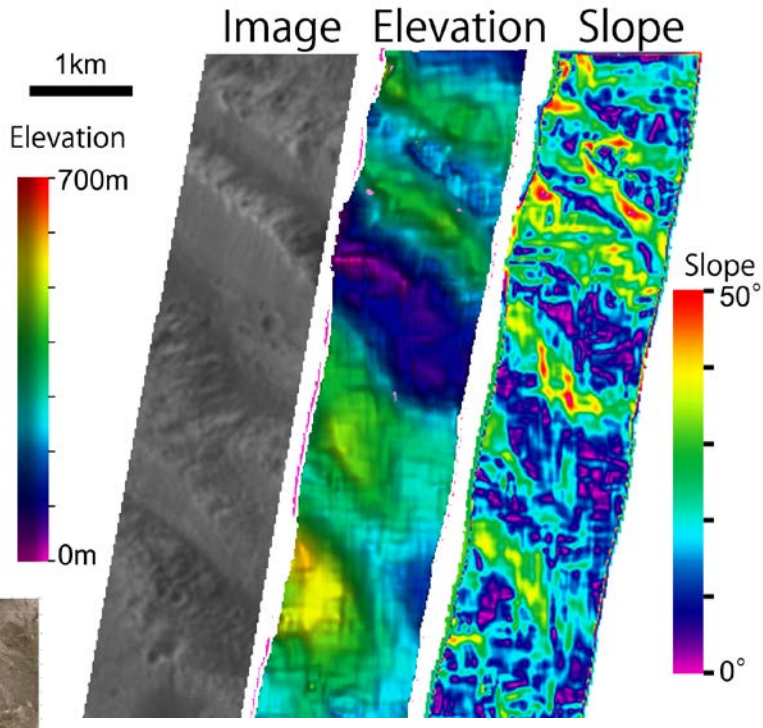


図 1．右）新たに作成したガニメデの高精細 DEM（左：実画像 #3639R)，中央：段彩陰影図，右：勾配分布図）．下）おおよその解析領域を示す全球画像．

O2-04

JUICE Radio and Plasma Wave Investigation (RPWI): Possible access to the subsurface ocean of icy satellites by two ways

Y. Kasaba[1], A. Kumamoto[1], H. Misawa[2], F. Tsuchiya[2], Jan-Erik Wahlund[3], RPWI-JAPAN Team

(1) Department of Geophysics, Tohoku University, Japan, kasaba@pat.gp.tohoku.ac.jp
(2) Planetary Plasma and Atmospheric Science Center (PPARC), Tohoku University, Japan.
(3) IRF Uppsala, Sweden

RPWI [PI: J.-E. Wahlund (IRF-Uppsala, Sweden)] on the ESA JUICE mission to Jupiter (launch: 2022) consists of Langmuir probe and electromagnetic wave measurements. It will provide the basic information of the exospheres, surfaces, and conducting subsurface oceans of Ganymede, Europa and Callisto and their interactions with surrounding Jovian magnetosphere. In this paper, we introduced possible sciences covered by this instruments coordinated with others, especially two topics which provide the possible access to the subsurface ocean.

RPWI first provide the precise density and temperature of cold plasma and electric fields in Jovian system. Exhaust plumes from cracks on icy moons will also be detected, as well as micron sized dust migrating in these plumes and their interactions. It can provide the global conductivity and current estimations of icy satellite ionospheres, which contributes to the estimation of those characteristics of the conductive subsurface oceans below the non-conductive icy crust.

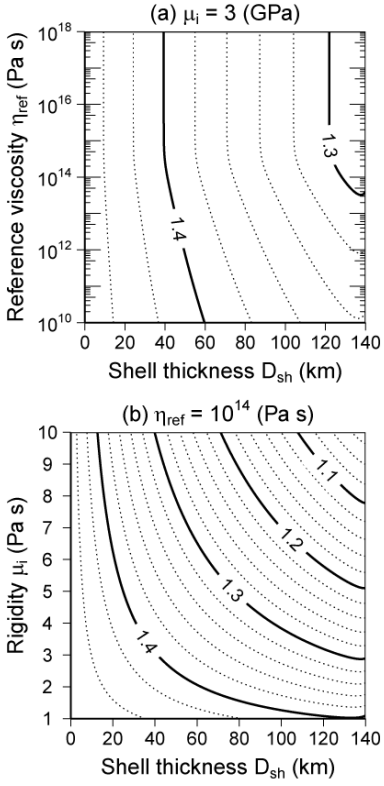
RPWI also first provides the highly resolved information of Jovian radiation emitted from Ganymede and Jupiter including lightning activity, by the first 3-axis E-filed measurement. As a byproduct, reflected Jovian emission can be expected from the boundary of crust (ice) and subsurface ocean (conductive water). It could observed by RPWI like the Lunar surface reflection in terrestrial auroral kilometric radiation seen by Kaguya Lunar Radar Sounder. RIME (Radar for Icy Moons Exploration) on JUICE uses 9 MHz radar pulse by 16 m tip-to-tip antenna and tries to detect the ocean under ~10 km icy crust. Since the frequency of Jovian radiation is wider, from several 100 kHz to several 10s MHz, RPWI can potentially provide complementary information of RIME, including the vertical distributions of conductivity and permittivity in the icy crust.

O2-05

JUICE レーザ高度計（GALA）による潮汐変形計測から探るガニメデの内部構造

○鎌田俊一[1]，木村淳[2]，松本晃治[3]，並木則行[3]，倉本圭[4]
[1]北海道大学 創成研究機構，[2]東京工業大学 地球生命研究所，
[3]国立天文台 RISE プロジェクト，[4]北海道大学 理学研究院

氷衛星が今も内部に多量の液体を保持しているか否かは，その衛星の熱進化の理解に加えて，アストロバイオロジーの観点でも重要である．欧州宇宙機関 ESA が主導する JUpiter ICy moons Explorer（JUICE）計画の主目的の一つは，木星の氷衛星ガニメデが内部海を持つか否かを明らかにすることである．天体の内部構造はその天体の潮汐変形に影響するため，JUICE に搭載されるレーザ高度計 GAnymede Laser Altimeter（GALA）を用いた潮汐変形計測は，特に重要な観測となる．ガニメデの潮汐変形に関する先行研究は存在するが，一様な氷粘性率を仮定した非常に簡略なモデルが採用されていたり，調べたパラメータ範囲も十分に広いとは言えない．本研究では，1 次元球対称ガニメデ潮汐変形モデルを構築し，氷地殻の粘性率の深さ依存性を考慮した場合の潮汐応答を，広いパラメータ範囲において調べた．その結果，内部海の有無は潮汐変形の振幅や位相遅延の取り得る範囲を変えることに加え，それらがどのパラメータに最も依存するかをも変えることが分かった．ガニメデが内部海を持たない場合，潮汐応答は氷地殻の物性にはあまり依存しないが，高圧氷の粘性率に大きく依存し，振幅や位相遅延は様々な値を取り得る．一方，ガニメデが内部海を持つ場合，潮汐応答は粘性率構造にはあまり依存せず，氷地殻の厚さと剛性率に強く依存する（右図）．後者の結果は，一様な氷粘性率を仮定した先行研究の結果と対照的である．さらに内部海がある場合，どのようなパラメータ値でも潮汐変形の振幅は大きく（$h_2 > 1$），位相遅延は小さい（$<10^\circ$）．そのため，高圧氷の粘性率が $<10^{12}$ Pa s と極端に非常に低くない限り，大振幅かつ小位相遅延は内部海の存在を示す．氷地殻の厚さは熱流量にも依存するので，潮汐変形計測はガニメデ内部の温度推定にも有効であることが分かった．



図：内部海がある場合の，潮汐応答の大きさを表す変位ラブ数（h_2）のパラメータ依存性．横軸は氷地殻の厚さ（D_{sh}）．縦軸は（a）氷地殻下端での粘性率（η_{Ref}），(b) 氷の剛性率（μ_i）．

JUICE レーザ高度計（GALA）がもたらすサイエンス

Science targets of the GAnymede Laser Altimeter (GALA) aboard Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE)

○木村淳[1]，並木則行[2]，鎌田俊一[3]，松本晃治[2]，押上祥子[2]，塩谷圭吾[4]，倉本圭[3]

[1]東工大地球生命研究所，[2]国立天文台，[3]北海道大学，[4]宇宙科学研究所

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

欧州宇宙機関が主導する木星氷衛星探査計画 JUICE（2022 年の打ち上げ，2030 年木星系到着，2032 年ガニメデ周回軌道投入）が始動し，我々はドイツ航空宇宙センター（DLR）主導のもとレーザ高度計 GALA の開発を進めている．JUICE における GALA の目的は，「JUICE が掲げる『生命居住可能領域の探査』の本質的役割を担い，氷に支配された天体の進化の解明に不可欠な情報を史上初めて獲得する」ことである．

JUICE の主ターゲットであるガニメデは，惑星級のサイズや金属核起源の固有磁場を持つなどの点で地球型惑星と並ぶもうひとつの固体惑星の代表的な様式と言えるが，従来の数回のフライバイ探査にとどまる知見は極めて限定的である．JUICE は史上初めての衛星周回探査によってガニメデの全容を把握し，見出される起源と進化の描像は太陽系内天体の多様性の起源を紐解く鍵となるだけでなく，太陽系内天体の認識に根ざした従来の概念を覆す多様な系外惑星の理解にも大きな寄与を果たす．

GALA は探査機と衛星間のレーザ測距によって衛星の地形情報を得る（ガニメデでは全球，エウロパおよびカリストではフライバイ領域）．氷天体に対しては世界初のレーザ測距となる．これにより多様な地形形態と分布が把握でき，氷衛星の地質活動（氷テクトニクス）の理解が飛躍的に向上するだけでなく，その活動様式をケイ酸塩鉱物でのそれと対比することで，地球のプレート・テクトニクスの再考察にも繋がる．また，木星による潮汐の大きさや回転変動の測定を通して地下海の存否が判別できるほか，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 規模の粗度を反映するため，表面の風化侵食の程度や組成の情報を日射角などの観測条件に依存しないデータとして得ることができる．こうした観測と理解の過程には地球における長年の研究の蓄積が活かされることは言うまでもない．例えば GALA が得る表面地形や粗度・アルベドのデータは，地球の極域や氷河に関する雪氷学や衝突・変形実験などによって得られた知見を通して氷テクトニクスの描像へと繋がる．また潮汐に関するデータは，地球や月（かぐやミッション）を対象に長年培われた測地学を基盤として，氷衛星の内部を見通す窓となる．

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

O2-07

微惑星の土星近接遭遇による潮汐破壊：潮汐破壊過程の物理と土星リングの形成可能性

○兵頭龍樹[1,2], Sébastien Charnoz[1], 大槻圭史[2], 玄田英典[3]

[1]Institut de Physique du Globe de Paris, [2]神戸大学理学研究科,

[3]東京工業大学・地球生命研究所

土星リングは99%が水氷からなっており、また他の巨大惑星リングに比べて非常に大きな質量を持っている(～10^{19} kg)。土星リングは、太陽系の進化過程で形成された副産物であると考えられることから、その起源解明は惑星形成過程の理解において重要な意味を持つ。しかしながら、今までにリング形成メカニズムがいくつか提案されたものの、未だに完全な理解には至っていない。

一方、ニースモデルによると後期重爆撃期(Late Heavy Bombardment)において土星は多数の微惑星と近接遭遇を経験する。本研究では、SPH計算を用いて、初期に周太陽軌道である比較的大きな分化天体(10^{21-23}kg)が土星に近接遭遇し、土星のロッシュ半径の十分内側に入った際に、どのような破壊が起こりえるのか、また破壊された場合にどの程度の質量が周土星軌道に捕獲されることで、土星リングの形成に繋がりうるのかを議論する。

O2-08

ガス抵抗による微惑星の捕獲と軌道進化

○末次竜[1,2]、大槻圭史[2]

[1]神戸大学自然科学系先端融合研究環、[2]神戸大学大学院理学研究科

巨大惑星の周りには数多くの衛星があり、これらは規則衛星と不規則衛星に分類できる。規則衛星は惑星近傍でほぼ円軌道で公転していることから、周惑星円盤内で固体が集積することで形成されたと考えられている。一方、不規則衛星の軌道は楕円で、逆行方向に公転しているものもあるため、捕獲された微惑星が起源だと考えられている。

近年、周惑星円盤への固体物質の供給過程が詳しく調べられた。その結果、従来の規則衛星の形成モデルでは考慮されていなかった微惑星も、周惑星円盤通過時のガス抵抗によって捕獲され、円盤に衛星の材料物質として供給されうることが明らかになった(Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)。先行研究では周惑星円盤の散逸過程は考慮していなかったが、実際には原始惑星系円盤の散逸やギャップ形成によるガス供給の減少によって散逸したと考えられる。こうした惑星形成終了直前でのガス密度の低い周惑星円盤によって捕獲された微惑星が不規則衛星になった可能性がある(Cuk & Burns 2004)。しかしながら、弱いガス抵抗による微惑星捕獲過程は不明な点が多い。そこで本研究では、軌道計算を用いて周惑星円盤の散逸過程を考慮した微惑星の捕獲について調べた。

ガス抵抗が弱い場合、微惑星は一回の近接遭遇で大きくエネルギー失いを捕獲されるのではなく、惑星周りを一時的に公転している間に次第にエネルギーを失うことで捕獲されることが明らかになった。こうした捕獲は微惑星の惑星周りの公転方向が順行でも逆行の場合でも起こる。また周惑星円盤の散逸の効果を考慮した場合、円盤の散逸時間が長いほどガス抵抗を受けている時間が長いため、離心率や軌道傾斜角が小さくなる傾向があることがわかった。一方、火星の規則衛星の起源についても火星の原始大気からのガス抵抗による微惑星捕獲が寄与した可能性がある。そこで球対称のガスによる微惑星の捕獲及び軌道進化についても議論する予定である。

O2-09

惑星による小天体の一時捕獲: 小天体の軌道と順行/逆行捕獲との関係

◯ 樋口有理可[1]　井田茂[2]

[1] 東京工業大学理工学研究科　[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。小天体が衛星として捕獲されるためには、3 体目の天体との重力相互作用、ガス抵抗、衝突などによる軌道エネルギーの散逸が必要である。我々はこの衛星軌道への捕獲の前段階として、準衛星軌道への一時捕獲を考えた。一時捕獲軌道のままではいずれ太陽周回軌道へ戻ってしまうが、準衛星軌道にあれば衛星軌道への進化に必要なエネルギー散逸量は少なくてすむ。よって、衛星軌道への進化の前半として一時捕獲を仮定することは妥当である。

そこで我々は、惑星による小天体の一時捕獲条件と、元の小天体軌道 (周太陽軌道) と、捕獲後の軌道 (周惑星軌道) との関係を解析的手法で調べた。小天体は周太陽軌道から惑星のラグランジュ点 L_1, L_2 を通り、周惑星軌道に移行すると仮定した。また簡単のため、軌道の移行は小天体が軌道の遠日点または近日点にいるときに起こると仮定した。この仮定は、小天体は周惑星軌道の遠点または近点において軌道移行するという仮定を含んでいる。

これらの仮定をおくことにより、元の小天体軌道と捕獲後の軌道を明快に関連付けることに成功した。また、一時捕獲されることが可能となる軌道要素の範囲を示すことができた。例えば、軌道傾斜角が約 9 度以上の天体は木星に一時捕獲されることはない。ほか、惑星から遠く離れた軌道長半径を持つ天体は順行で、惑星と近い軌道長半径を持つ天体は逆行で一時捕獲されるという関係を得た。これらの結果は別に行った数値計算の結果と合致する。この結果を元に、本発表では太陽系の惑星が持つ不規則衛星の起源についても議論する予定である。

O2-010

土星系におけるインパクター起源の推定

○平田直之[1]
[1]神戸大学理学研究科

太陽系固体天体上における衝突体(インパクター)の由来がどこにあるのかを解明することで，クレーター年代の妥当性評価や精度向上および小天体の軌道進化に対する更なる理解に大きく貢献できる．月での主要なインパクターは 3.8 億年前までは小惑星帯，3.8 億年以降は地球近傍小惑星に由来するということがクレーターサイズ頻度分布から明らかになった[1]．また内惑星におけるクレーター年代は外惑星には適応できないことも明らかとなった．一方，木星系や土星系といった外惑星系での主要インパクターはいまだに特定できていない．ここで大きな障害となっているのが，膨大な数の二次クレーターである[2]．

氷衛星を対象としたクレーターカウントはすでに数多くなされており，その結果としてクレーターサイズ頻度分布が取られているが，それらは純粋な一次クレーターの頻度分布ではない可能性が高い．なぜなら，例えば土星系では，衛星 A 上での衝突で生じた破片が(衛星 A のみならず)別の衛星 B に二次的に衝突する現象がかなり高頻度で起きていると考えられているからである[3]．そこで二次クレーターの影響を評価するためにクレーター生成率の半球集中に着目した．

小惑星・彗星等の一次インパクターは太陽中心軌道を持つ．惑星系内に由来する二次インパクターは惑星中心軌道を持つ．これらの違いによって，一次インパクターは先行半球側の方が後行半球よりも１５倍～１００倍大きいクレーター生成率を持つ[4]が，二次インパクターには半球差はほとんどない．この半球差を調べることで二次クレーターの影響を評価できると考えた．

これまでにカッシーニ探査機によって多くの画像が得られ，その結果として土星系の氷衛星はほぼ全領域をかなり詳しく調査ができるようになった．これらの画像を私は調査し，約 3000 個のクレーターを認めた．結果として，直径 20km 以下のクレーターでは半球集中はほとんど認められない一方で，20km 以上のクレーターには 10 倍程度の半球集中があることを発見した．この 20km で半球集中の有無が分かれることはおそらく偶然ではない．二次クレーターは親クレーターの 4%の大きさを超えないことが観測的に知られており[5]，土星系における最大の衝突盆地が直径 300~500km であることを考慮すれば，直径 20km のクレーターは二次的に生じうるがそれ以上のクレーター形成は難しい．換言すれば，土星系における 20km 以下のクレーターの主要インパクターは二次インパクターであると見られる．

直径 20km 以上のクレーターの場合，先行半球と後行半球とではクレーター数密度に 10 倍程度の差が生じているが，生成率はその数倍はあると見られる．なぜなら，先行半球側ではクレーターによって完全に飽和しているが後行半球ではそうではないからである．数十倍の強い半球集中をもたらす天体は，土星との相対速度のほとんどない太陽中心軌道をもつ天体であると見られる．そのような天体はケンタウルス族の小天体の他はない．先行研究でのクレーターサイズ頻度分布からもケンタウルス族由来とする可能性は既に指摘されており[6]，本研究の結果はそれとも整合的である．これらの詳細について講演する．

[1] R. G. Strom et al. Science 309, 1847-1850 (2005). [2] L. Dones et al. in Saturn from Cassini-Huygens, 613-635 (Springer, 2009). [3] E. B. Bierhaus et al., Icarus 218, 602-621 (2012). [4] K. Zahnle et al. Icarus 153, 111-129 (2001). [5] H. J. Melosh, Planetary surface processes. Vol. 13 (Cambridge University Press, 2011). [6] D. A. Minton et al. in 43rd Lunar and Planetary Science Conference Abstract #2669.

O2-011

周惑星円盤のモデル化と衛星移動について

○藤井悠里[1]、小林浩[2]、高橋実道[3]

[1]ニールス・ボーア研究所、 [2]名古屋大学、[3]東北大学

巨大惑星形成の際には、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ことが知られている。ガリレオ衛星に代表される規則衛星は周惑星円盤内で形成されたと考えられおり、周惑星円盤の構造や進化は衛星系の起源を知る鍵となる。中心惑星の形成期には、原始惑星系円盤からの流入により周惑星円盤にガスが供給され続ける。従来のモデルでは、ガスの粘性降着が十分であり周惑星円盤の面密度が小さく保たれると想定されてきた。

しかし、我々のこれまでの研究により、周惑星円盤では磁気回転不安定性による角運動量輸送が期待できないことが示唆されたため、その面密度は比較的大きくなることが予想される。面密度の大きな円盤は粘性係数が小さい場合でも簡単に加熱されて高温になってしまうため、ダストが溶けることによりガスのオパシティが変化し、円盤の構造が変化する。

本研究では、周惑星円盤の粘性係数をパラメータにとり、質量流入がある場合の円盤の面密度と温度構造をモデル化した。そして、T>~2000Kにおけるガスのオパシティの変化によって作られる構造によってType I 移動で内側に移動してきた衛星が中心惑星に落下せずに留まることができる位置があることを発見した。本講演では、これらの結果が衛星系の形成に与える影響について議論する。

O3-01

火星衛星の起源について
～現状整理と展望、サイエンスの展開～

○玄田英典[1]、樋口有理可[2]、Ramon Brasser[1]、小南淳子[1]、兵頭龍樹[3]、末次竜[3]、
関根康人[4]、木村淳[1]、臼井寛裕[2]、黒川宏之[1]、中田亮一[1]、井田茂[1]、大槻圭史[3]、
中本泰史[2]、火星衛星サンプルリターン計画科学検討チーム
[1]東京工業大学・地球生命研究所、[2]東京工業大学・地球惑星科学専攻、
[3]神戸大学・惑星学専攻、[4]東京大学・地球惑星科学専攻

太陽系の地球型惑星の中で衛星を持っているのは地球と火星だけである。月の起源に関しては物的証拠があることから、様々な研究がなされており、巨大天体衝突説が現在のところ、もっとも有力な説とされている。一方、火星の衛星であるフォボスとダイモスの起源については、幾つかの仮説は提案されているが、どの仮説が正しいのかを判断する材料が十分にそろっていない。そのような状況で、火星の衛星に探査機を送り、火星衛星のサンプルを地球に持ち帰ってくる計画（火星衛星サンプルリターン計画）が、日本で進んでいる。地球の月の場合と同じように、物的証拠を用いることによって、火星衛星の起源が明らかになることが期待されている。

そこで、本講演では、まず、火星衛星の起源に関する仮説の現状の整理を行う。フォボスとダイモスのスペクトルがD型小惑星に類似していることから、小惑星が火星に捕獲されたとする「捕獲説」と、フォボスとダイモスが火星の赤道面をほぼ円軌道で公転していることから月の起源との類推で天体が火星に衝突し、円盤が形成されて、その円盤から衛星が形成されたとする「衝突円盤説」（もしくは巨大衝突説）についてのこれまでの研究を概観する。

結論としては、いずれの説も、納得のいくレベルで火星の衛星を作れてはいない。そこで我々は、納得のいくレベルで火星の衛星を作ることに挑戦する。捕獲に関しては、従来考えられていた放物線軌道での捕獲ではなく、まず火星の準衛星軌道で捕獲し、その後で円軌道衛星に進化する可能性について検討する。衝突円盤説に関しては、円盤形成の数値計算を系統的に行い、フォボスとダイモスを作るのに適した衝突条件を求める。また、円盤から衛星の形成に関しても、これまで考慮されてこなかった効果（衛星同士の重力相互作用など）を考慮する。本講演ではそれらの最新の結果の報告を行う予定である。

最後に、火星衛星のサンプルリターンによって起源が特定できた場合、そのあとどのようなサイエンスが展開できるのかについても検討をする。

O3-02

リターンサンプルからさぐる火星衛星の起源

○橘 省吾[1]・臼井寛裕[2]・和田浩二[3]・関根康人[4]・岡崎隆司[5]・澤田弘崇[6]
火星衛星サンプルリターン計画科学検討チーム

[1]北海道大学自然史科学専攻 [2]東京工業大学地球惑星科学専攻 [3]千葉工業大学 PERC
[4]東京大学地球惑星科学専攻 [5]九州大学地球惑星科学専攻 [6]JAXA

火星衛星（フォボス・ダイモス）は低アルベドで赤みがかった反射スペクトルを示し，捕獲された D 型小惑星である可能性が指摘されている（e.g., Burns, 1992）．一方で，両衛星とも軌道傾斜角や離心率が小さいという特徴は，捕獲説で簡単に説明することは難しく，火星への天体衝突の破片の集積で形成されたという可能性も提案されている（e.g., Citron et al., 2015）．火星とともに集積した材料の残りである可能性も残される（Burns, 1992）．

火星衛星の起源を明らかにすることは，太陽系天体軌道ダイナミクス，惑星形成，衛星形成といった太陽系進化に関わる本質的問題に実証的制約を与えることに繋がる．(1) 火星衛星が捕獲始源小惑星であることが実証された場合，太陽系内側領域の岩石天体へ外側天体から揮発性物質がどの程度供給されたのかに対する制約を与えることに貢献する．これは初期火星の揮発性物質リザーバの初期条件を制約することにも繋がる．また，始源天体探査という点で「はやぶさ」(S 型)，「はやぶさ 2」(C 型) の延長という位置づけにもなる．(2) 火星衛星が月と同様に衝突で形成された天体である場合，衝突による衛星形成の普遍性の実証となり，惑星形成論への制約を与える．

これまでの観測からは火星衛星の起源は確定していない．サンプルリターン探査をおこない，回収試料の分析（鉱物相，組織，元素組成，同位体組成，有機物，揮発性元素）をおこなうことで初めて可能となる．例えば，始源小惑星なのか，衝突による高温を経験した物質なのかは存在する鉱物相や組織から明瞭に区別される．また，太陽系物質には酸素同位体組成や遷移元素の同位体組成の多様性（初期太陽系での同位体不均一性に起因したと考えられる）があることが知られており，回収試料の分析より，それらが既知の太陽系物質のいずれに近いのか，または未知の物質であるのかの判断も可能となる．

火星衛星表面試料から得られる科学的知見は衛星起源論に留まらない．小天体表面でのレゴリスの進化・宇宙風化作用についての物質科学的理解の深化に貢献する．また，両衛星は火星近傍を周回するため，火星への天体衝突で放出されたイジェクタを表面に含む可能性がある（10–100 ppm 程度; Ramsely and Head, 2013）．鉱物，同位体などから衛星物質と区別することで，火星表層史を記録した試料を世界で初めて手に入れることも期待される．

講演では火星衛星リターンサンプル分析の意義の他，検討中の回収試料量・回収手段についても紹介する．

O3-03

火星衛星の構成物に関する観測的制約と今後の課題

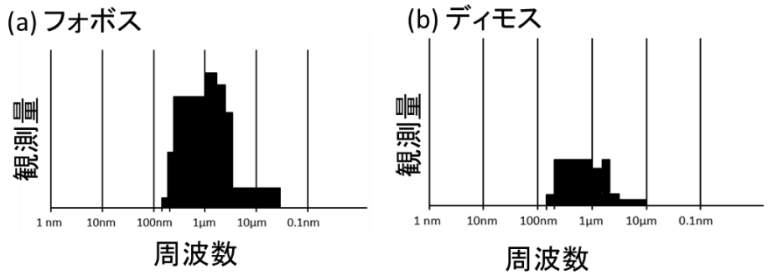
Observational constraints on materials forming Martian satellites and a future observational strategy

宮本英昭[1], 中村智樹[2], 亀田真吾[3], 松本晃治[4], 菊地紘[1], 新原隆史[1], 長勇一郎[3], 洪鵬[1], 火星衛星サンプルリターン科学検討チーム

[1] 東京大学, [2] 東北大学, [3] 立教大学, [4] 国立天文台

As a part of the presentations given by a discussion group for future sample-return mission to a Mars satellite, we present 1) reviews of previous observations on materials of the Martian satellites, 2) our new analyses and laboratory experiments, and 3) a future observational strategy/plan.

火星衛星サンプルリターン計画について、現在検討が進められている。火星衛星であるフォボスもディモス（ダイモス）も探査天体としては大変魅力的な天体であり、国際協調で双方を観測する計画が打ち立てられれば、極めて意義深い。フォボスについては、一通りリモートセンシングによる観測は行われているが、ディモスについてはまだ途上である（図）。一方で、データが比較的揃っているフォボスも含め、これらの衛星の起源として捕獲であるか、集積であるかの決着がついていない。反射スペクトルは捕獲説を支持し、低い密度もこれを示唆するように見受けられるのだが、ほぼ完全な円軌道を説明することが難しい。本講演では、こうした過去の観察の中で、特に両衛星の構成物質を推定するのに役立ちそうな観測事実についてのレビューを行う。また検討チームでは、データ解釈に必要な室内実験等の検討を進めている。そこでたとえば東北大で行っている、これまでに得られた炭素質隕石とその加熱実験生成物の反射スペクトルと火星衛星のスペクトルを 0.4～15μm（可視、近赤外、中間赤外）の波長範囲で比較検討や、東大で行っているＣ型隕石の誘電率測定や隕石分類のストラテジなどについて、今後の観測案や課題を明らかにしながら紹介する。



図：過去に行われた観測の成熟度を周波数とやや主観的な観測量と共に示す

O3-04

火星大気表層ダスト・水循環の周回衛星観測

○今村剛[1]，小郷原一智[2]，火星衛星サンプルリターン計画科学検討チーム
[1]JAXA 宇宙科学研究所　[2]滋賀県立大学

本構想では、火星衛星サンプルリターン機が周回軌道にとどまる期間中に火星大気と地表面のリモートセンシングを行い、大気-表層のダスト輸送と水循環の理解を目指す。赤道周回というユニークな軌道からはあらゆる地方時でグローバルかつ継続的に観測することが可能であり、この特徴を生かして従来観測できなかった現象をとらえてブレイクスルーを狙う。

火星の希薄大気では主成分である二酸化炭素の温室効果はほとんど働かないが、代わって大気中に浮遊する微細鉱物粒子（ダスト）が太陽光を吸収することにより加熱源となり、大気の熱構造や地表面温度を支配する。地表ダストの移動はアルベドや熱慣性の変化をもたらす。ダストの巻き上げを担う可能性のある流体現象の多くが顕著な地方時依存性や日変化を伴うと想像されており、これらは従来の太陽同期軌道の火星周回機によって得られる 1 太陽日に 1 枚の可視光画像ではほとんどとらえられなかった。とくにダストプルームや斜面風といった特定の地方時において短時間で発達する現象は、近年発見された高高度でのダスト混合比の極大をもたらす可能性も指摘されているが、観測的手がかりがない。本計画では可視広域撮像に加えて熱赤外での全ローカルタイム観測により、このようなダストストームの背後にある流体現象を特定する。加えて、地表面温度の日変化を広域で複数の時期に観測することによって熱慣性の長期変動をとらえ、地表ダストの地理的分布の支配要因を推定する。

ダストと並ぶ火星気候理解の鍵は水循環である。地表面や地下の氷や水和鉱物の分布は火星気候の長期変動の履歴を反映すると考えられており、また氷雲や極冠の消長はアルベドの変化をもたらす。ダストを核とする氷雲生成は大気からのダスト除去を促進する。このような火星の水の多様な姿は水の相変化を介した大気-地表間の水輸送に支配されているはずである。しかしその実態、なかでも数十 K に達する気温の日変化に伴う大規模な相変化に関しては、複数地方時における観測が乏しく理解が進んでいない。本計画では、中・低緯度のハドレー循環の上昇流域における氷雲形成と重力沈降が地表付近への水の濃集や南北半球間の水交換において果たす役割を、個々の気団における水の相変化を広いローカルタイムで追跡することにより明らかにする。この地域の氷雲形成は、Mars Odyssey の観測に基づく water equivalent hydrogen の赤道域でのローカルな極大を説明する可能性もある。可視や熱赤外での氷雲観測に加え、近赤外分光撮像による水蒸気マッピングを主たる手段とする。

火星周辺の水素コロナの変動を Ly-α 線を用いてモニターし、地下からの水の供給や宇宙空間への散逸量の変動をとらえることも検討中である。また、大気観測用カメラで火星や衛星の夜側の短時間の発光をモニターし、微小隕石の供給量を制約することも考えている。

O3-05

フォボス・デイモスの熱環境の再評価

○小川 和律[1], 坂谷 尚哉[2], 和田 浩二[3], 保井 みなみ[1], 荒川 政彦[1]
[1]神戸大学, [2]宇宙航空研究開発機構, [3]千葉工業大学・惑星探査研究センター

日本の次期惑星探査の一つの候補として、フォボスもしくはデイモスへのサンプルリターンミッションが検討されている。このミッションでは火星衛星の起源の解明と火星形成過程の制約、火星圏環境・大気の調査などを主目的として、現地でのサンプリングの他、リモートセンシングや着陸機のその場観測による調査などを提案している。技術的にはHayabusa2 のサンプリングや電気推進、月着陸実験探査機 SLIM の着陸技術などの応用が検討されている。これらの探査機や観測機器の設計のためには、衛星表面の熱環境ついて現在の知見を整理して、表層の温度や熱物性について適切な条件を設定する必要がある。同時にその結果から衛星表層・内部の物理状態について制約することが可能である。特に両衛星の内部には氷の存在が示唆されており、その存在範囲や状態を制約することが探査計画を検討する上での一つの鍵である。本研究ではこれらの目的のために両衛星の数値計算の熱モデルを構築し、結果を評価することを試みた。

両衛星の温度について詳細なデータは無いが、これまで地上望遠鏡に加えて Mariner 9、Viking、Phobos 2、近年では Mars Express、Mars Global Surveyor などが軌道上からフォボスの熱赤外域の観測を試みており、表面の温度変化はおよそ 120 〜 300 K であった。この結果から推定される表層の熱物性は月と似ており、直径 100 μm 以下程度のレゴリスが表層の大部分を覆っていると仮定すると観測温度と合致する。これらの結果をもとに、主に深さ方向一次元の解析的熱モデルによって表層・内部の温度変化や氷の存在可能性が議論されてきた。

上記レゴリスのような粉体の熱伝導率は、粒径や粉体圧力などの多くのパラメータによって大きく変化することが知られている。我々はこれまで様々な条件における粉体の熱伝導率の測定を行い、その結果を統合した熱伝導率の数値モデルを構築してきた。これを応用することで、衛星の表層・内部の熱伝導率を精度よく推定し、同時に上記観測結果を満たす粉体パラメータの範囲を限定することができる。さらにその結果をもとに数値計算による熱解析を行い、両衛星全体の温度変化について再評価を行った。本発表ではこれらの結果を報告した上で衛星の熱特性について議論し、氷の存在可能性について触れる。また推定される表面熱環境に一定期間滞在する上で必要となる機器の熱設計を検討する。

O3-06

火星衛星から探る火星圏

○寺田直樹[1], 関華奈子[2], 二穴喜文[3], Francois Leblanc[4], 松岡彩子[5], 横田勝一郎[5],
齋藤義文[5], 山崎敦[5], 三浦弥生[6], 馬上謙一[7], 岡崎隆司[8], 中村智樹[1],
亀田真吾[9], 長勇一郎[9], 火星衛星サンプルリターン計画科学検討チーム
[1]東北大学, [2]名古屋大学, [3]IRF, [4]LATMOS, [5]JAXA, [6]東京大学,
[7]北海道大学, [8]九州大学, [9]立教大学

火星衛星（フォボスおよびダイモス）は、数十億年前から現在までの超長期にわたり火星起源物質と相互作用し、火星と共進化して来た。火星大気から常時散逸する重イオンは数百eVから数keV以上に加速されて火星衛星の表面を叩き、表面物質を風化・変質させるとともに、衛星軌道周辺に分布するガストーラスの形成に寄与する。また、火星物質は衝突に伴う放出物としてもたらされ、衛星表層に蓄積していると推測されている。

火星-衛星の相互作用と共進化の歴史は、その一部が衛星表層物質に刻み込まれている。また、現在もその相互作用・共進化は継続しており、現在進行形のプロセスを火星起源粒子の捕獲やその場観測によって調査が可能である。本発表では、火星衛星周辺ガスの探査ならびに火星起源粒子の捕獲により期待される火星圏の科学について発表する。

O3-07

微小鉄コンクリーションの形成に対する砂岩の粒度の影響

河上志織[1]，○城野信一[2]，吉田英一[3]

[1]長野県庁，[2]名古屋大学大学院環境学研究科，[3]名古屋大学博物館

火星表面のメリディアニ平原において，ブルーベリーと呼ばれる mm サイズの酸化鉄の球状コンクリーションが発見されている．同様の酸化鉄球コンクリーションが地球上でも発見されており，よく知られているのはアメリカ合衆国ユタ州のナバホ砂岩層に含まれるものである．ナバホ砂岩層に含まれる酸化鉄球コンクリーションはモキマーブルとも呼ばれている．モキマーブルのサイズ分布には cm サイズと mm サイズとにピークがあり，このうち mm サイズの微小コンクリーションに着目する．鉄コンクリーションは，砂岩中の空隙に酸化鉄が沈殿し固化したものであり，その後に風化が進行すると周囲の砂岩は崩れて鉄コンクリーションだけ露出することになる．
Barge et al.(2011) の室内実験によると，砂岩粒子を模擬するために用いたガラスビーズの粒径を変化させると，生成する mm サイズのコンクリーションの数と大きさが変化することが明らかとなった．ここから，微小鉄コンクリーションの形成において，母岩である砂岩の粒径が重要であることが示唆される．そこで本研究では，ナバホ砂岩層で採集した砂岩の粒度分布を計測し，微小鉄コンクリーションのサイズとの相関を調べた．また，薄片を作成し組織を観察した．
ユタ州南部のグランドステアケースエスカランテ国定公園内で採取した砂岩 30 個を試料として用いた．この砂岩を分解し，砂岩粒子と微小鉄コンクリーションを分離する．この状態で顕微鏡写真を撮影し，画像解析することで砂岩粒子および微小鉄コンクリーションの粒度分布を求めた．
微小鉄コンクリーションの量と砂岩の粒度との相関を見ると，砂岩の粒径が 150 ミクロン以上である場合のみ微小鉄コンクリーションが形成されていることが分かった．
薄片を観察した結果，様々なサイズの酸化鉄沈殿が形成されていた．サイズ分布を算出すると，50 μm 付近にピークが見られた．一方で微小鉄コンクリーションのサイズ分布においては 1.2 mm にピークがあった．ここから，微小鉄コンクリーションのサイズ分布において，50 μm 付近と 1.2 mm の二カ所にピークが存在することが明らかとなった．ここから，砂岩粒子の粒径以上への成長に対して何らかの阻害要因が働いていることが示唆される．

火星内部構造探査InSight：脈動で見る内部構造

○小林直樹[1]

[1]ISAS/JAXA

NASA Discoveryプログラムの12番手であるInSight（Interior Exploration Using Seismic Investigations, Geodesy, and Heat Transport）は人類初の本格的な火星内部構造探査である．打ち上げを目前に控え急ピッチで開発が進んでいる．主要な観測装置として広帯域地震計，熱流量計，回転運動計測のための電波中継機が搭載される．本計画では地球型惑星の形成と進化の理解の鍵となる内部構造即ち内部の層構造と構成物の組成（コアのサイズ・状態・組成，マントルの組成と層構造，地殻の厚さと層構造）の知見を得ることを目的としている

InSightではこれらの情報を特に３つの主要観測項目である地震計測，精密測位，熱流量計測によって引き出す．本計画では，残念ながら複数地点での地球物理学的観測ステーションによる多点観測は実現できないが，最新鋭・高性能の観測機器である超高感度広帯域地震計（SEIS），自潜式のモールによる熱流量計（HP3），X-帯の電波トランスポンダーによる２方向精密ドップラー追跡（RISE）を用いて内部構造に迫る．それらに加えて，微気圧計，気温，風速計，磁力計も搭載する．

2016年3月に打ち上げられ半年ほどかけて火星に到着する．着陸地点はElysium Planitiaの南部平原である．着陸および測器の設置にはPhoenixで培われた技術を継承して用いている．ロボットアームとカメラを用いて着陸機の甲板に配備されている地震計や熱流量計を地面に設置する．10日ほどの初期運用の後，およそ1火星年かけて火星内部構造解明に向けて観測を行う予定である．

地震計測では，火星内部の地震活動度や火山活動が直接調べられるが，この他にモールの貫入時の振動や隕石の衝突による地動を計測し，表層構造や地殻構造を調べる試みもなされる．本発表では特に地表風によって励起される脈動による内部構造の解析について紹介する．地表風による地動の励起レベル，励起された脈動の振幅スペクトルから内部構造の情報を引き出す手法について議論する．

04-01

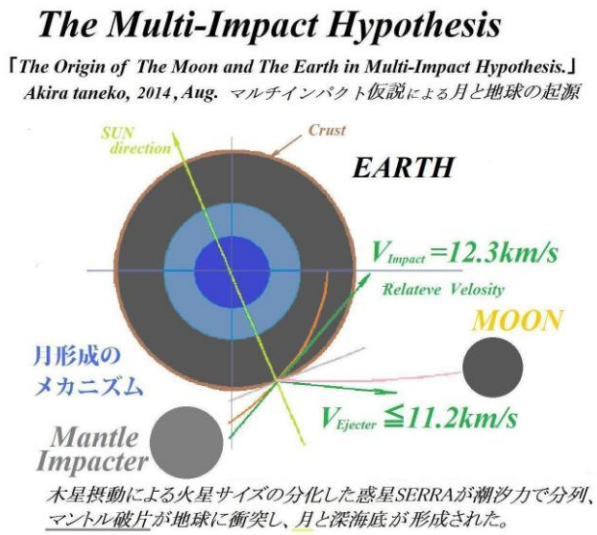
月形成仮説(Multi Impact Hypothesis 対 Gaiant Impact hypothesis)の厳密な比較評価

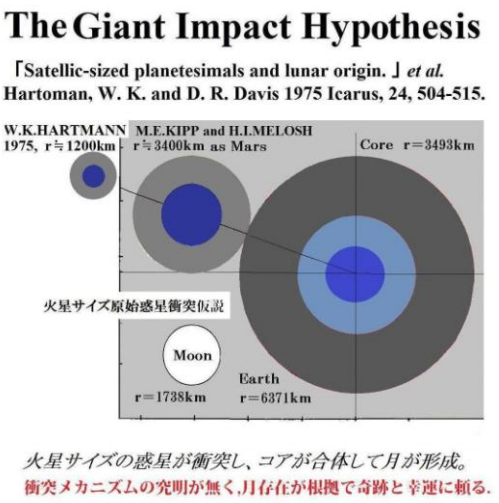
Rigorous comparative evaluation of the moon formation hypothesis

(Multi Impact Hypothesis versus Gaiant Impact hypothesis)

種子彰　TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2015-10.

衝突のイメージ(断面図)　インパクターのサイズと方向・組成　　両仮説の比較





①　名称	マルチ・インパクト仮説	ジャイアントインパクト仮説
②　衝突体･サイズ	原始惑星 SERRA の分列片 as 月	原始惑星 THEIR as 火星サイズ
③　衝突体 F-Zone	小惑星帯位置　軌道半径 2.8au	地球位置 1.0au Feedengue-Zone
④　衝突体構造	木星潮汐によるマントル分裂片	分化したコア・マントル成層体
⑤　メカニズム	木星摂動による潮汐軌道変形	公転面での斜め後方衝突
⑥　衝突確率	◎必然　確率大	×偶然　確率極小
⑦　衝突時速度	12.3km/s(cf.第二次宇宙 11.2m/s)	0km/s～8 m/s
⑧　衝突角度	≒ 36.5 deg	≒ 30 deg　(by M.E.KIPP 1986)
⑨　形成時期	約 40 億年前　(要軌道変形時間)	約 46 億年前 (太陽系形成初期)
⑩　衝突時の地球	分化・固体地殻・内部半溶融？	溶融分化・マグマオーシャン時
⑪　月の溶融	部分溶融・地殻マントル密度	完全溶融・月マグマオーシャン
⑫　月の表裏差異	剥離した地殻・マントルで説明	×　別のメカニズムが必要
⑬　月形成位置	≒60・Re(地球半径)≒月の位置	≒3・Re(地球半径) potential En.
⑭　衝突エネルギ	約 8.01×10^{30} J　衝撃が少ない	約 2.05×10^{31} J MI の 2.56 倍
⑮　地球深海洋底	マントル片衝突とアイソスタシー	×形成不可能・要別メカニズム
⑯　他の効果	(a) 地球 70%の海形成　二山頻度	(a) 月形成のためだけの仮説
	(b) 5 度以上生物種大絶滅の理由	(b) 月がマントルだけの組成に成る衝突条件の計算と整理
	(c) 木星の大赤斑の起源	

結論　　二つの仮説の徹底比較，違いが明確になる。　*衝突の必然メカニズムがあった。*.

粉粒体天体内部の密度構造に関する実験的研究
Experimental study on density structure of granular body

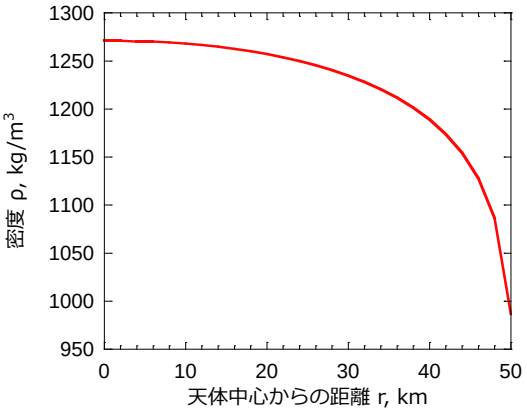
○大村知美[1]、木内真人[1]、Guettler Carsten[2]、中村昭子[1]
[1] 神戸大学大学院理学研究科, [2] Max-Planck-Institute for Solar System Research

空隙率は強度や熱的性質に影響するため、天体の進化を推測する上で不可欠なパラメータである。この空隙率は荷重を受けることで変化する。空隙率の変化は粒子の再配置によって起こるが、再配置のメカニズムは構成粒子の配位数によって異なる。粒子の配位数が 6 以下の場合、粒子は主に転がりによって再配置される。しかし、粒子の配位数が 6 を超えると粒子はすべりを伴って再配置されるようになる。配位数は空隙率の減少と共に増加し、配位数が 6 に達するのは空隙率が 0.7 のときである (Wada et al., 2011)。低密度小惑星の Macroporosity は~0.3-0.6 であるとされ (Colnsolmagno et al., 2008)、このような天体が粉粒体で構成されているとすると、天体内での粒子の再配置はすべりを伴うことがあると考えられる。また、自己重力による土圧は天体中心からの距離によって異なるため、天体内部は密度構造を持つと考えられる。

本研究では、天体を構成する粒子塊を模擬した粉体層の圧縮実験を行い、土圧と空隙率変化の関係を、構成粒子の持つすべり摩擦力に注目して調べた。また、実験より得た土圧と密度の関係式から粉粒体天体内部の密度構造を見積もった。

実験には粒子形状、粒子径分布の異なる 8 種類の粉粒体を用いた。ふるいを用いて粉粒体を容器にふるい入れて実験試料を作成した。実験試料の初期空隙率は 0.5-0.8 の範囲で試料により異なる。これらに遠心加速装置と圧縮試験機を用いて荷重をかけ、土圧と空隙率の関係を得た。実験における圧力範囲はそれぞれ遠心加速装置では 10^2-5×10^3 Pa、圧縮試験機では 10^4-10^6 Pa である。圧縮されやすさは試料によって異なった。グラフの圧縮曲線の傾きと構成粒子の持つすべり摩擦力の関係を調べると、すべり摩擦力の大きい試料ほど圧縮されにくい (圧縮曲線の傾きが小さい)傾向が見られた。

実験結果より見積もった粉粒体天体内部の密度構造は右図のようになった。右図は、本研究で用いたフライアッシュ (メジアン径 4.8 μm、真密度 2000 kg/m^3)で構成されていると仮定した、半径 50 km の粉粒体天体内部の密度構造である。天体中心部の密度は天体全体の平均と比べ 7 %ほど高い。



O4-03

衝突放出物の最大速度とその量: 火星物質輸送への応用

○岡本 尚也, 黒澤 耕介, 和田 浩二, 松井 孝典
千葉工業大学惑星探査研究センター

現在火星衛星サンプルリターン探査の検討が急速に進められている. 火星衛星はその形成時から火星近傍に存在しており, 火星から流出した物質が表層に降り積もっている可能性が指摘されている. もし火星衛星の試料とともに火星表層物質を採取することができれば, 火星表層進化に関する情報を得ることができると期待される.

火星への天体衝突が起こると, 衝突掘削により表層物質が上空へ放出される. 大部分の物質はすぐに地表に落下し, 放出堆積物をつくるが, 一部の高速放出物は火星衛星軌道と交わる長楕円軌道に投入される. 特に Phobos は火星に近い軌道を回っているため, 軌道交差に必要な射出速度がおよそ 4 km/s と比較的低速であり, 衛星表層には火星物質が蓄積していると期待できる. Ramsley and Head (2013)は様々な仮定をもとに Phobos の表面レゴリス粒子の 250 ppm が火星由来物質であると推定している. 彼らは Melosh (1984)の解析モデルを用い, Phobos へ到達可能な高速放出物の割合を求めているが Melosh 自身によって, 衝撃波と希薄波の干渉の取り扱いに問題があり数値解法を用いる必要性が指摘されている[Melosh & Ong, 2011].

我々は現在衝突実験と数値衝突計算の両面から衝突放出物の最高速度を決定する物理過程について検討を進めている[岡本ら, 2015, 月惑星シンポジウム].本研究ではこの知見を Phobos から火星への天体衝突による物質輸送に適用することを試みる.まずは簡単のため iSALE shock physics code を用いて垂直衝突時の高速放出物を調べた. 直径 10 km の玄武岩が火星への平均衝突速度である 9.6 km/s でかんらん岩層に衝突する状況を計算した.トレーサ粒子を配置し粒子の軌跡と速度を追跡した.その結果, (1)深さ方向にはいわゆる Interference zone から (2)動径方向には衝突天体半径の 1.2 倍程度の極近傍から放出されるもののみ Phobos へ到達可能な放出速度を得ることができることがわかった.千葉工大 PERC で実施中の衝突実験では 100 ns, 500 mm の時空間分解能で放出物の観測が可能であり, 計算値との詳細な比較によってその計算モデルの妥当性を評価できる. 発表においては, 得られた実験結果と数値計算モデルとを比較し, その結果を議論する.

謝辞: iSALE の開発者である G. Collins, K. Wünnemann, J.Melosh, B. Ivanov D. Elbeshausen の各氏に感謝致します.

O4-04

熱進化した氷天体の衝突破壊現象の解明

岡本千里[1]，荒川政彦[1]，保井みなみ[1]，高野翔太[1]
[1]神戸大学大学院理学研究科

はじめに

太陽系の外惑星領域には，氷を主成分とする微惑星の衝突破壊・合体から形成した氷惑星やその氷衛星，さらに冥王星を含む太陽系外縁天体など様々な氷天体が存在する．近年の観測技術の進歩や惑星探査の実施により，氷衛星や太陽系外縁天体は，平均密度が約 2,000kg/m^3 程度かそれ以下であり，高い氷含有率を持つことが分かってきた．氷天体は，その形成過程において熱進化により岩石コアと氷のマントルからなる層構造を持つ可能性があり，このような分化した氷天体が衝突することにより，多様な天体が作られたと考えられる．例えば、太陽系外縁天体のハウメアは衝突族を持ち，分化した母天体の衝突破壊によって形成した岩石コアの生き残りである可能性が示唆されている(Brown et al., 2007)．従って、分化した氷天体の衝突現象を調べることは，氷衛星や太陽系外縁天体の衝突・進化と多様性の起源を知るために重要である．そこで本研究では，分化した氷天体の衝突破壊を模擬した衝突実験を行い，氷天体の衝突破壊現象における内部構造依存性を明らかにする．

実験方法

衝突実験は，神戸大学に設置した 2 段式軽ガス銃を用いて実施した．分化した氷天体として，岩石のコア，氷のマントルからなる天体を想定し，石膏コア―水氷マントルからなる 2 層構造の氷天体模擬標的を用いた．試料直径は 50～80mm であり，内部構造を系統的に変化させるため，標的内部の石膏コアサイズを 0～40mm と変えることで，標的の全質量に対するコアの質量比を変化させた．弾丸として，直径 4.75mm のポリカーボネートを使用し，衝突速度 1.5km/s-7km/s で実験を実施した．実験は真空下で実施され，実験後，破片の回収を行い，衝突破壊の結果生じた破片質量やサイズ分布など調べた．また，衝突現象は高速カメラによりその場観測して破片速度を計測した．

結果および議論

コア質量比（R_{CM}；石膏コア質量/標的全体質量）を変化させた試料に同程度のエネルギー密度を与えた実験で，コアが破壊するものとしないものに分類できることが分かった．さらにコアが破壊した標的でもコアの最大破片質量が異なる結果を得た．この実験により得られたコアの最大破片の質量から，石膏コアにどの程度衝突エネルギーが分配されたのか見積もることができる．その結果，コアへのエネルギー分配率は，コア質量比と正の相関を持ち，コア質量比が増加するにつれて，効率的にコアが破壊されることが分かった．一方，コアが非破壊の場合，コアに分配されるエネルギーが，コアの破壊強度を超えなかった可能性が高い．Okamoto and Arakawa (2008)から，コアが破壊するかどうかはコア物質の衝突破壊強度（Q^*）とマントル中での衝撃圧力の減衰率に依存することが分かっている．今回用いた石膏コアの衝突破壊強度と氷マントルでの衝撃圧力の減衰率(Shirai et al., 2008)から，コアが非破壊から破壊へと転じるエネルギー密度の境界値（Q_{t_b}）を見積もった結果，$Q_{t_b} \propto Q^* \cdot R_{CM}^{-0.8}$ という関係式を得た．この氷マントル-岩石コア標的中の岩石コアの破壊境界条件は，実験結果から得られたコアの破壊境界を説明できることが分かった．

O4-05

玄武岩を用いた高速衝突実験における衝突破片の３次元形状の粒子サイズ依存性と、イトカワレゴリス粒子との比較

○門川隆進[1] 土`山明[1] 道上達広[2] 長谷川直[3] 中野司[4] 上杉健太郎[5]

[1]京都大学 理学研究科 地球惑星科学、[2]近畿大学工学部、[3]JAXA、[4]産業総合研究所、[5]JASRI/SPring-8

室内実験において、衝突破壊における破片の形状の分布は、衝突条件に依らず、特徴的でかつ普遍的な分布となる可能性が指摘されている[1]。それによると、破片の長軸a:中間軸b:短軸c の比が、分布に拡がりはあるものの、平均として2:√2:1 となる。しかしながら、この3軸比は激しいカタストロフィック破壊によって得られたデータのみであり、より広い条件での検証が必要である。このため、道上ら[2]は、クレータリングからカタストロフィック破壊までの広い条件での衝突実験を行い、衝突エネルギー密度と破片形状の関係を研究し、その軸比は必ずしも2:√2:1とならないことを見出した。

小惑星探査機「はやぶさ」によって小惑星イトカワからレゴリス粒子が地球に持ち帰えられ、その３次元形状分布が明らかにされた[3]。3次元形状分布はレゴリス粒子の生成条件を反映していると考えられる。小惑星イトカワがどのような過程・衝突を経てきたのかを推測するために、室内高速衝突実験がおこなわれ破片の3次元形状分布の比較がなされているが[4]、その実験条件は限定的である。一方、道上ら[2]の実験では、3軸比が得られている破片サイズ（>4 mm）はイトカワレゴリス粒子のサイズ（20μm-300μm）と比べて大きい。

そこで本研究では、道上ら[2]の広い条件でおこなわれた高速衝突実験で得られた破片について、レゴリス粒子サイズに対応する微小粒子の3軸比測定を行った。これにより、衝突破片の3次元形状分布について粒子サイズ依存性を議論するとともに、イトカワレゴリス粒子や月レゴリス粒子[5]との比較を行った。衝突実験は、JAXA宇宙科学研究所の2段式水素ガス銃を用いて玄武岩(モンゴル産:一辺が5.0, または7.5cmの立方体)のターゲットに直径7.14mmのナイロン球の弾丸を約3.7, 5.1km/sでおこなったものである[2]。回収された破片のうち微小なもの（中軸長：約50μm-1mm）について、SPring-8のマイクロX線CTを用いてその3軸長を測定し、3次元分布についてK-S検定を用いて比較をおこなった。

カタストロフィック破壊実験における破片粒子の3次元形状分布の測定結果からは、以下のことがわかった。(1)同じ実験において、今回測定した微小サイズ破片の形状分布や平均3軸比は大きい破片粒子のものとは有意に異なる。(2)イトカワレゴリス粒子の形状分布とは統計的に区別することができず、平均3軸比は2:√2:1に近い。一方、月レゴリス粒子とは有意に異なる。(3)また、ダナイトでのクレーター形成実験の50-200μm破片の形状分布と有意に区別することができなかった。今後、[2]のクレーター形成実験の微小破片粒子についても測定をおこない、これらの結果から議論する予定である。

参考文献

[1]Fujiwara et al.(1978) Nature 272,602-603
[2]道上ら (2014) 日本惑星科学秋季講演会予稿集 012-03
[3]Tsuchiyama et al.(2011) Science 333,1125-1128
[4]土`山ら(2014) 日本惑星科学秋季講演会予稿集 08-03
[5]土`山ら(2014) 日本地球惑星科学連合大会予稿集 PPS25-15

O4-06

密度の異なる弾丸を用いた高速度クレーター形成実験：衝突励起地震の弾丸物質依存性

○松榮 一真[1], 荒川 政彦[1], 保井 みなみ[1], 辻堂 さやか[1] 高野 翔太[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

はじめに

探査機はやぶさで観測された小惑星イトカワの表面地形のように、小惑星表面はボルダーなどのレゴリスで覆われていることが明らかになった。レゴリスで覆われた小惑星の表面地形は、天体衝突のような外的要因によって変化すると考えられている。例えば小惑星エロスに小さなクレーターが少ない理由は、天体衝突による衝撃がエロス全体を揺さぶり、クレーター内壁のレゴリスが崩れるからだと考えられている(Richardson et al.2005)。このように天体衝突によって発生する振動は小惑星の表面地形進化に影響を及ぼすが、一方、衝突励起振動に着目した実験は少ない。これまで我々はポリカーボネート弾丸を用いて 0.2-6.9km/s の速度でクレーター形成実験を行い、石英砂中を伝播する衝突励起振動の減衰過程を調べた。そして、クレーター半径で規格化した距離を用いると、衝突速度によらず衝突励起振動の減衰過程を表すことが可能であることを明らかにした ((経験式：$g_{max}=156\pm50(x/R)^{-2.98\pm0.5}$、松榮 他 2014 秋季大会)。そこで今回は、様々なスペクトルタイプの小惑星衝突を想定して、密度の異なる弾丸物質を用いたクレーター形成実験を行ったので、その結果を報告する。

実験方法

衝突実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸に直径 4.7mm のポリカーボネート球を用い、衝突速度 0.2-6.9km/s で実験を行った。さらに、直径 2mm の密度の異なる弾丸(密度 ρ:1.2-14.8g/cm^3)を用い、0.2-5km/s の速度で実験を行った。標的試料には平均粒径 500μm の石英砂(バルク密度:1.48g/cm^3)を用いた。標的表面に加速度計(日本アビオニクス製 SV1113:電荷感度 5.47pC/sm^{-2}, 応答周波数:0.5Hz-10kHz)を、衝突点からの位置を系統的に変化させて設置した。なお、設置深さは 2.5cm である。加速度計の信号はチャージアンプを通した後、A/D 変換速度 100kHz のデータロガーで記録した。なおチャンバー内は 1000Pa から 10Pa で真空引きしている。

実験結果

密度が異なる弾丸が衝突した際に形成される衝突クレーターのサイズは、π-スケーリング則で表すことが可能である(Hoslapple,1993)。今回の実験では、このスケール則のカップリングパラメータのベキ乗数μは 0.44、νは 0.35 となった。衝突時に観測された加速度波形は、弾丸の密度に関係なく単一のピークを示す波形で、その持続時間は約 0.5-1ms であった。衝突励起振動の最大加速度は距離と伴に減衰し、クレーター半径で規格化した距離で表すと弾丸物質によらず一つの経験式 $g_{max}=130\pm80(x/R)^{-3.2\pm0.5}$ で表されることがわかった。この経験式はポリカーボネート弾丸の式とほぼ同じであり、最大加速度の距離減衰が、弾丸密度に関係なく標的物質のみによって決まることを意味する。今後、密度が異なる弾丸におけるクレーター形成過程についてさらに詳しくに研究するため、3 成分加速度計を用いた観測を行う予定である。

O4-07

斜め衝突実験と月の縦孔への応用

○道上達広[1]，長谷川直[2]，春山純一[2]
[1]近畿大学工学部，[2]ISAS/JAXA

月や火星には深さ・直径共に数 10m から 100m におよぶ縦孔が近年，探査機によって多数観測されるようになった．縦孔の中には，地下空洞に開いた「天窓」であることが確実なものもある．こうした縦孔は，科学的に多くの興味があるとともに，将来的に人類が月や火星に進出したとき，長期滞在に適する基地として有望な場所でもある．我が国の月探査機「かぐや」によって最初に発見された縦孔は３つで，直径，深さ共に 60-100m に及ぶ．その後，米国の月探査機ルナー・リコネサンス・オービターによって，さらに小さい縦孔や，浅い縦孔が多く観測されている．

縦孔の形成メカニズムの有力なひとつの説として，隕石衝突，すなわち，天体の地下空洞の天井に隕石が衝突，それが引き金となって崩落し，縦孔が形成された可能性がある[1][2][3]．観測された縦孔は様々な形を持っており，特に月の大きな縦孔は，火星の縦孔に比べて長軸と短軸の長さの差が明らかな楕円形をしている．クレーターにおいて，多くは円形であるが，楕円形のクレーターは隕石の斜め衝突によって形成される．そのため，月の大きな縦孔が隕石の斜め衝突によって形成された可能性がある．そこで，月の空洞を模擬した標的に対して，斜め衝突実験を行い，その実験結果と観測された縦孔との比較検討をして，縦孔形成についての考察を行った．

衝突実験は JAXA 宇宙科学研究所の２段式軽ガス銃を用いた．標的は豊浦標準砂を少量のセメントと水で固めたモルタルを作製した.大きさは縦と横が30cm前後,厚さ4cmで中心近くの縦20cmの領域の厚さは 1cm に加工した（地下空洞を模擬した加工）.標的の圧縮強度は 3.2MPa,引張強度は 0.8MPa である.弾丸には直径 7.14mm のナイロン球を用い,衝突速度約 2.4km/s で衝突角度（標的表面からの仰角）2 度から 90 度で衝突実験を行った.高速度カメラは標的の側面と上面に設置し共に１秒当たり数千コマの割合で破片の飛び出す様子を撮影した.

今回用いたモルタル標的において,得られた実験結果は，縦孔は衝突角度 20 度から角度が小さくなるにつれて，徐々に楕円形になることが分かった．これらの形状は，楕円率，断面ともに月の縦孔の形状と類似している．月の大きな縦孔の楕円率は 1.2 から 1.6 程度で，今回の実験結果を適用すると，それらが形成される衝突角度は 20 度から 10 度である．実際の天体がこれらの角度で衝突する可能性は十分ある．以上のように，斜め衝突実験によって形成される縦孔は，月の縦孔の形状ととても類似しており，月の縦孔が隕石の斜め衝突によって形成された可能性を示すことができた.

参考文献

[1] Haruyama, J. et al., 2009, GRL 36, L21206.　[2] Martellato, E., et al., 2013, Planet Space Sci. 86, 33.
[3] Michikami, T., et al., 2014, Planet Space Sci. 96, 71.

O4-08

多孔質球の斜め衝突実験：衝突破壊強度に対する衝突角度の影響

○保井みなみ，松榮一真，荒川政彦，高野翔太
神戸大学大学院理学研究科

背景：小惑星は微惑星の生き残りと言われているが，衝突破壊・再集積過程を経て進化した．そのため，小惑星の進化過程を明らかにするには，小天体の衝突破壊過程の研究が重要である．衝突破壊過程は小惑星の内部構造に強く依存するが，小惑星は空隙率が高いものが多く，そのため衝撃波の減衰が大きく，衝突破壊強度に大きく影響することが示唆されている（Arakawa et al., 2002）．多孔質小惑星の衝突破壊強度を調べるため，Okamoto and Arakawa (2009)は多孔質石膏球の正面衝突による高速度衝突実験を行い，玄武岩と比べて 10 倍程度高い強度を持つことを示した．しかし，実際の天体衝突現象は斜め衝突が支配的であるため，斜め衝突実験により衝突破壊強度を調べる必要がある．そこで本研究では，石膏球への高速度斜め衝突実験を行い，衝突破壊強度に対する衝突角度依存性を調べた．

実験方法：実験は神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いた．弾丸には直径 4.7mm のポリカーボネイト球，標的には直径 5cm または 7cm の石膏球を用いた．石膏球は密度約 0.9g/cm^3，空隙率が 60%である．衝突速度は約 3.8km/s と約 6.8km/s とし，衝突角度は 10°から 90°（正面衝突）まで系統的に変化させた．衝突の様子は高速ビデオカメラで撮影した．撮影速度は 1 万～10 万コマ/秒，露出時間は 20μs である．

結果：図 1 に衝突角度と最大破片質量（元の標的質量で規格化）の関係を示す．このグラフから，エネルギー密度が約 3000J/kg では 45°以下，約 10^4J/kg では 15°以下までは，最大破片質量がほぼ同じになった（高エネルギー密度では約 0.2，低エネルギー密度では約 0.4）．斜め衝突では衝突方向の法線速度成分 $v\sin\theta$（v は衝突速度，θは衝突角度）が衝突破壊に重要であると考えられているが，図 1 から予想される様に，法線方向を考慮したエネルギー密度 Q_{ob} と規格化最大破片質量の関係は，θが大きい場合は，Okamoto and Arakawa (2009)の正面衝突の結果とほぼ一致するが，θが小さくなると，最大破片質量が小さくなる傾向が見られた．このことから，θが小さくなると，接線速度成分に由来するせん断応力を衝突破壊に影響することが予想される．

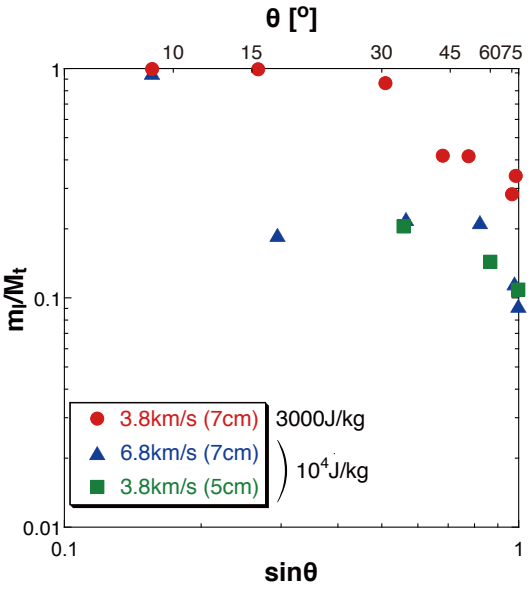


図 1　$\sin\theta$（θは衝突角度）と規格化最大破片質量の関係

月の新鮮クレータ放出物におけるクレータ年代と風化度の関係

○諸田 智克[1]，加藤麻美[1,2]
[1]名古屋大学環境学研究科，[2]明星電気株式会社

月の新鮮なクレータは漏れなく光条と呼ばれるクレータから放射状に伸びた高反射率の構造を伴っている．光条はクレータ形成時に地下から掘り出された新鮮な放出物と，放出物の月面への再衝突で掘り返された新鮮物質からなると考えられている [Hawke et al. 2004]．それらの高反射率の新鮮物質は宇宙空間への露出年代に従って宇宙風化作用によって次第に暗化し，最終的には周辺物質の反射率と同等となり，光条は消失する．

月の光条クレータを同定した過去研究によって，反射率のコントラストが判別しやすい低中緯度において，直径 20km 以上の光条クレータが 67 個発見されている [Wilhelms 1987; McEwen et al. 1997; Grier et al. 2001]．月表側にある Copernicus クレータの光条はほぼ風化しきっていることが分かっている．Grier et al. [2001] はその他の光条クレータの放出物の風化度を調査し，その風化具合にもとづいて光条クレータの相対年代を決定した．その結果，42 個の光条クレータは Copernicus よりも若いと判断した．

我々は 67 個の光条クレータに対して，クレータ年代学にもとづく相対年代の調査を行ってきた（図１）．その結果，Copernican に分類される直径 20km 以上の光条クレータは 27 個であった．この結果は宇宙風化度にもとづく相対年代と大きく異なっている．そこで我々は，この違いは風化速度の地質依存性が影響していると考え，クレータ年代と風化度の関係性を調査し（図２），そのずれが表面の FeO 量で説明可能かを調べた．

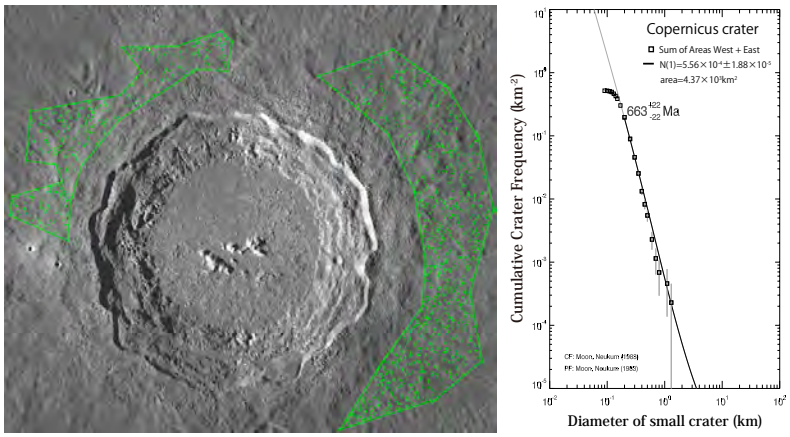


図１　Copernicus クレータ放出物におけるクレータカウンティング（左）サイズ頻度分布（右）

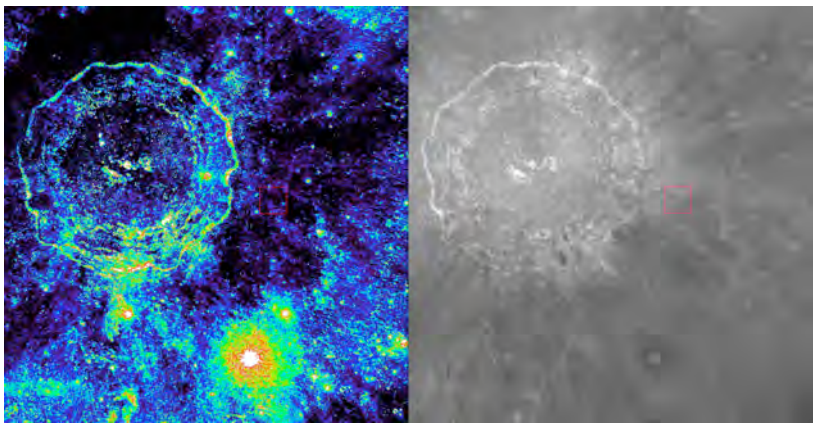


図２　Copernicus クレータ周辺の OMAT（左）とかぐや MI750nm 反射率データ（右）

FDPSを用いた巨大衝突のSPH法による大規模数値計算

○ 細野 七月[1], 岩澤 全規[1], 谷川 衝[1], 似鳥 啓吾[1], 村主 崇行[1], 牧野 淳一郎[1,2]

[1] 理化学研究所 計算科学研究機構 [2] 東京工業大学 地球生命研究所

巨大衝突とは、2つの原始惑星の衝突の事であり、惑星科学においては、月の起源として非常に重要な意味を担っている。これまで様々な巨大衝突の数値計算がSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法と呼ばれる流体数値計算手法を用いてなされてきた。このSPH法による計算結果の妥当性を調べるため、巨大衝突の数値計算の解像度収束性が調べられ初めて来たが、現在の所10^6粒子程度が最大であり、それ以上に関しては今だ詳しく調べられてはいない。SPH法の計算結果の妥当性を調べるためには、更なる高解像度化が必要と言えるが、そのためには大規模並列計算が必要である。しかしながら、そのような大規模並列コードは開発に多大な時間と労力が必要であり、簡単では無い。そこで近年、我々はFramework for Developing Particle Simulator (FDPS) と呼ばれる、粒子法向け大規模並列計算Frameworkを開発した。FDPSは、ユーザー側は大規模並列計算に特有な複雑な処理などを一切記述することなく、大規模並列計算コードの開発を可能にする。FDPSは既にSPH法に関して適用されており、京コンピューター上で76544ノードまでスケールした事を確認した。本公演では、このFDPSを用いて開発されたSPHコードを用いて巨大衝突を行い、10^7粒子を用いた巨大衝突の数値計算について、結果を見せる。また、可能であれば10^8粒子を用いた結果に関しても、見せる予定である。

微惑星衝突の数値計算に向けたゴドノフSPH法の弾性体力学への拡張

○ 杉浦圭祐[1]、犬塚修一郎[1]

[1] 名古屋大学 理論宇宙物理学研究室

固体惑星は天体衝突の繰り返しによる合体成長で形成されたと考えられている。従って惑星の起源を詳しく理解するにあたって、小天体同士の衝突による破壊及び合体の効果を詳細に理解することは極めて重要である。しかし小天体は km 以上のサイズを持つため、室内実験で衝突を再現することは不可能である。よって数値計算を用いて小天体の衝突破壊・合体の効果を評価する必要がある。

近年小天体の衝突計算が、Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH) 法という流体の数値計算方法を弾性体力学に応用することで行われている (e.g., Benz and Asphaug 1999)。一般に広く使われている簡略な SPH 法は標準 SPH 法と呼ばれている。しかしこの標準 SPH 法には、固体が引き伸ばされた時に生じる張力を表す負の圧力の状態において、Tensile Instability という粒子同士がくっついてしまう不安定性が存在する (Swegle et al. 1995)。Monaghan (2000) ではこの不安定性を人工圧力という粒子が近づいた時に反発力になる項を導入して解決したが、この解決方法は元の方程式にない項を導入した不自然なものである。さらに Mehra et al. (2012) では、この人工圧力の項では高速衝突計算における Tensile Instability を防ぐことができなかったと報告されている。従って天体の衝突計算を SPH 法で行うにあたって、より自然で堅牢な解決方法が必要である。

SPH 法における Tensile Instability の起源はその離散化誤差である。標準 SPH 法では離散化をする際に荒い近似を使用しているため、一般の粒子配置では空間 1 次精度すら達成できない。一方でゴドノフ SPH 法 (Inutsuka 2002) では離散化を注意深く行い、空間 2 次精度を達成している。よってこの高精度なゴドノフ SPH 法を用いれば Tensile Instability を自然に解決することが可能であると考えられる。本研究では線形安定性解析の手法を用いてゴドノフ SPH 法の安定性を評価し、自然で新しい Tensile Instability の解決方法を開発した。さらにゴドノフ SPH 法を弾性体力学へ拡張した。本研究の方法が Tensile Instability に有効であることを示すため、図 1,2 に示すような金属板の振動の計算を行った。その結果、本研究の方法では正しく計算できたが、適切な方法を選ばなかった場合引き伸ばされている負の圧力の領域で非物理的な亀裂が入ってしまうということがわかった。

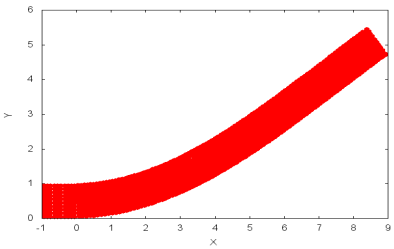


図 1: 本研究の方法を用いた場合の計算結果。

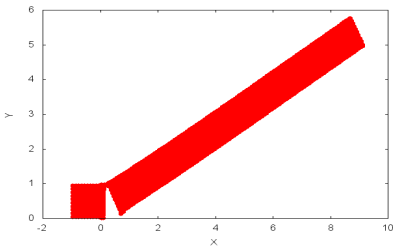


図 2: 適切な方法を選ばなかった場合の計算結果。

O4-012

WPH 法による月形成シミュレーション

○河瀬哲弥[1]，佐々木貴教[1]，細野七月[2]
[1]京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室
[2]理化学研究所 計算科学研究機構

最も有力な月形成のモデルとしてジャイアント・インパクト説がある。この説では、原始地球に火星サイズの原始惑星が衝突したと考えられている。その結果、衝突物のマントルが飛び散り、差動回転円盤が形成される。その後、この円盤物質が自己重力で集積し、合体成長することで月が誕生したとされる。この説は月のコアか他の太陽系天体のコアと比べて小さいなどいくつかの観測事実をうまく説明できる。

実際ジャイアント・インパクト説で月形成が可能かどうかを確かめるため、月形成のシミュレーションが多くの先行研究でなされてきた。しかし、それらはジャイアント・インパクトから円盤形成までを粒子法流体スキームの1つであるSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)、円盤内での月形成をN体計算で行うといった 2段階のものであった。このため、段階間で多くの仮定を必要とし、最終的な結果に不定性が残っている。ジャイアント・インパクトから月形成までの一貫とした流体シミュレーションが行われてこなかった理由は、差動回転円盤の長時間の計算に標準SPH法が適していないからである。今のところ原因として、人工粘性もしくは圧力勾配の2説が考えられるが、未だ不明確である。近年、この問題を克服した新しい粒子法流体スキームである WPH法(Weighted Particle Hydrodynamics)が開発された。これにより差動回転円盤の流体シミュレーションが長時間可能となり、 衝突から月形成まで一貫とした流体シミュレーションができる可能性が出てきた。

本研究では、N体計算で行われた円盤内での月形成をWPH法で計算し、両者の結果を比較する事を目標とした。現在、まだ簡単なモデルではあるが、WPH法を用いることで差動回転円盤の長時間の計算が可能であること、および N 体計算の結果と同様に一個の重い天体が形成される可能性があることがわかった。今後は WPH 法でジャイアント・インパクトから月形成まで一貫したシミュレーションを行う予定である。

O4-013

冥王星の黒い“クジラ”模様はカロン形成巨大衝突の痕跡か？

Pluto’s elongated dark area “the Whale” as evidence for a Charon-forming impact?

○関根康人（東京大学）、玄田英典（東京工業大学）

NASA 探査機ニューホライズンズは、2015 年７月に冥王星への接近フライバイを行った。その際、最も顕著な特徴の一つとして、東西に延びる黒褐色の領域が冥王星の赤道域に広範囲に渡り存在している（通称、“クジラ”模様）ことを明らかにした。本研究では、冥王星の衛星カロン形成時の巨大衝突によって、この東西に延びた黒褐色の領域（クジラ模様）が形成した可能性を議論する。

カロンは、主惑星である冥王星に対して大きな質量を持つことから（冥王星の質量の 10～15%程度）、地球―月系と同様に巨大衝突によって形成した可能性が示唆されている (Canup 2005)。しかし、それを具体的に実証する物質科学的証拠は得られていない。一方、冥王星はカイパーベルト天体の一つであり、内部や表面には水氷だけでなく彗星に見られるような様々な始原的な揮発性分子を含んでいると考えられる。これら成分の内、ホルムアルデヒドやアンモニアなどの可溶性分子は、水氷が溶解・加熱され水溶液になると、ホルモース反応に代表される重合反応を溶液中で起こし、高分子有機物となることが知られる (Cody et al. 2011; Kebukawa et al. 2013)。

本研究では、カロンを形成した巨大衝突によって、冥王星表面の氷物質が広範囲に加熱を経験し、一時的に生じた溶液中で上記の始原的分子が黒褐色を呈する有機物となった可能性を調べる。具体的には、彗星組成を模した水溶液（ホルムアルデヒド、アンモニアを含む）を 30℃～150℃で 1～3 日間加熱し、生成した有機物の紫外可視スペクトルを得る。有機物は、その生成温度条件によって脱水反応の進行度が異なるため、低温では黄色、高温では黒色というように、紫外可視光での反射率に生成温度の依存性が生じる。本研究では、実験で得られた有機物と冥王星表面の黒褐色物質の紫外可視スペクトルを比較することで、黒褐色物質の分布する領域の到達温度を推定する。さらに、数値流体シミュレーションによって、得られた冥王星表面の到達温度とその空間分布、形成する衛星（カロン）の質量を満たすような衝突条件が現実的な範囲で存在しうるかを調べる。以上により、冥王星の黒褐色の物質とその分布が、カロン形成時の巨大衝突によって実現しうるのかを明らかにすることで、冥王星―カロン系の巨大衝突起源説の検証を行う。

参考文献：[1] Canup, 2005. Science, 307, 546; [2] Cody, et al. 2011, PNAS, 108, 19171; [3] Kebukawa et al. Astrophysical Journal, 771:19

過冷却液滴の衝突による複合コンドリュール形成

Compuond Chondrule Formation by Collision of Supercooled Melt

◯ 荒川 創太, 中本 泰史
◯ Sota Arakawa, Taishi Nakamoto

東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻
Dept. of Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

複合コンドリュールとは, 2 つ以上の独立なコンドリュールが付着して形成されたものであり, コンドリュール全体の 5% 程度存在する (Gooding & Keil, 1981). 複合コンドリュールについてはいくつかの特徴が知られている. まず, コンドリュール全体に占める完全溶融を経験したものの割合は 10% 程度である (Gooding & Keil, 1981) のに対し, 複合コンドリュールを構成しているコンドリュールの 70% 程度は完全溶融を経験している (Wasson et al., 1995). このことは, 複合コンドリュール形成が局所的なイベントである可能性を示している. また, 複合コンドリュールを構成するコンドリュールのうち, 球形を保っているもの (primary と呼ぶ) とそうでないもの (secondary と呼ぶ) のサイズは primary の方が 2, 3 倍大きい (Wasson et al., 1995). これは 大きいコンドリュール組成の液滴が先に固まったことを表している. 現在, 複合コンドリュール形成に関するモデルはいくつか提案されている (Sekiya & Nakamura, 1996; Ciesla et al., 2006; Miura et al., 2007; Hubbard, 2015) が, 複合コンドリュールの存在確率および性質 (形状, 最高到達温度など) を明確に説明できる形成機構はまだない.

今回, 我々は, 他の固体物質と接触していない状態ではコンドリュール組成の液滴が数百 K 以上の過冷却状態になり得る (Nagashima et al., 2006) ことに注目した. 過冷却状態のコンドリュール組成の液滴がすでに結晶化したコンドリュールに衝突することで複合コンドリュールが形成されると考え, このメカニズムで形成される複合コンドリュールの特徴, および形成確率について考察を行った. 過冷却状態の液滴が他の物体との衝突によって固まる確率は, 断面積に比例するため, 大きな液滴ほど先に固まる. その結果, この機構で形成される複合コンドリュールは観測される性質をよく再現する. また, 全溶融コンドリュールの 30% 程度が複合コンドリュールであることから, 相対速度が合体条件を満たすまで低下した時点において少なくとも 60% のコンドリュールがまだ固まっていない必要がある. このことから, 微小ダストの数密度および液滴の相対速度に制約を与えることができた.

Some models of compound chondrule formation have been proposed, but no one can explain the frequency and features clearly. We notice that molten chondrules can be supercooled over several hundred Kelvins if there is no contact with other solid. We think that compound chondrules are formed by collisions between supercooled melt and crystallized chondrule. Compound chondrules formed by this mechanism reproduce observed properties. Moreover, we can infer the number density of small dust particles and relative velocity of supercooled melt.

微惑星衝突によるコンドリュール形成の力学的条件

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

[1] 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト, [2] 国立天文台理論研究部, [3]EACOA fellow

コンドリュールは mm サイズの球状粒子である。この形状は先駆帯が溶融することでコンドリュールが形成したことを示している。コンドリュールは CAI の形成後 1-3Myr 程の間形成しており (e.g., Davis et al., 2014)、コンドリュールを溶融する加熱過程は太陽系の惑星形成過程と調和的に説明される必要がある。Johnson et al. (2015) は、微惑星が高速で衝突した際の impact jetting によるコンドリュール形成の可能性を示唆した。彼らの計算によれば、2.5 km/s 以上の速度で微惑星が衝突すると、高温を経験した物質が微惑星から脱出しコンドリュールとなる。また彼らは微惑星の集積時にこの衝突速度が達成されるかを Monte Carlo 法から調べている。この計算において、彼らは初期の微惑星を直径 100 km から 1000 km で、メインベルト小惑星に類似の分布で与えている。しかし、このサイズの微惑星ではすぐに暴走成長を始めてしまう (e.g., Ohtsuki et al. 1993)。暴走成長時の微惑星サイズの累積分布は非常に急になる (e.g., Kokubo & Ida 2000)。これと比べると Johnson らの初期条件では高質量側の微惑星数を過大評価している。この初期条件によって結果の衝突速度が過大評価されている可能性がある。そこで我々は Kokubo & Ida (2000; 2002) などの N 体計算を基にした解析を用いて、円盤ガス中での微惑星の成長時における衝突速度を再評価した。この結果、初期円盤の面密度や微惑星質量を多少有利に振っても、衝突速度は 2 AU - 3 AU で 1 km/s - 2 km/s の平均値となった。離心率の分布を考慮しても 2.5 km/s を超える微惑星の割合は少なく、impact jetting によるコンドリュール形成で小惑星帯で予想されるコンドリュール質量を説明することは困難である (Hasegawa et al., submitted)。しかし、何らかの摂動で微惑星のランダム速度を ∼1 km/s 程度上げることができれば、impact jetting でもコンドリュールを説明できる可能性はある。我々は木星の摂動を考慮したガス円盤内での微惑星集積の N 体計算を行い、コンドリュールを形成する微惑星衝突が起きるのかどうかを調べた。木星は現在の質量で与えた。この結果、木星の摂動によって微惑星のランダム速度が増加し、現在の小惑星帯のコンドリュール質量の説明に十分なコンドリュール質量が得られた。ただ、この計算では木星が現在の質量で形成していることを仮定して $> 10^6$ 年の計算を行っているが、木星の形成時期は不明である。そこで木星質量等をパラメータとして変化させた N 体計算を行い、テスト粒子のランダム速度の変化を調べた。原始惑星のみの摂動ではコンドリュールが十分な質量を得られない一方、木星の影響のみではテスト粒子は十分な数が 2.5 km のランダム速度を得ることはできなかった。しかし原始惑星と原始木星を考慮することで、コンドリュールを形成する衝突速度を稼ぐことができることがわかった。

ダスト・ガス比の高い場合の
１次元平行平板衝撃波シミュレーション
～コンドリュール形成モデルへの応用に向けて～

○勝田 祐哉[1]　中本 泰史[1]
[1]東京工業大学

コンドリュールとは、隕石中に含まれるケイ酸塩組成組織であり、㎜サイズの球形をしている。コンドリュールは隕石の主要な構成要素であり、その数は非常に多いが、具体的な形成プロセスについては未だに議論がなされている。

岩石学的な特徴から、コンドリュールの形成過程について様々な制約条件が求められている。ここから、コンドリュールは、原始太陽系星雲内のダストが数秒間で 2000 K 程度まで加熱されることで溶け、数時間をかけて冷えて固まることで形成されたと考えられている(Jones et al. 2000)。このような加熱プロセスとして様々なモデルが提唱されてきたが、我々は衝撃波加熱モデルに注目している。

衝撃波加熱モデルとは、衝撃波面を通過する際に生じるダストとガスの相対速度により、ダストがガス摩擦を受けて加熱されるというモデルである。このモデルで問題となるのが衝撃波の発生源であるが、我々は楕円軌道を回る微惑星が作る弧状衝撃波に注目している。

微惑星周りの弧状衝撃波モデルについては、いくつかの計算が行われてきた。これまでの計算では、太陽系元素組成から推測されるダスト・ガス質量比を仮定しており、ダストが衝撃波に与える影響というのは議論されてこなかった。一方、岩石学的な特徴から、コンドリュール形成時の周囲の酸素分圧が推定されている。その酸素分圧をダストの蒸発で再現するには、ダスト・ガス質量比は太陽系元素組成から求められる値の 100 倍から 1000 倍である 1:1 から 10:1 程度が必要となる。

そこで、本研究ではダスト・ガス比が高い場合について１次元平行平板で衝撃波の振る舞いについて調べた。簡単のため、本研究ではダストは十分に小さいとして、ダストはガスと共に運動すると仮定する。また、ダストは 2000 K で昇華し、単原子分子理想気体になるとする。解析的な見積もりから、衝撃波後面の諸物理量がダスト・ガス比に対してどのような反応を示すかを調べた。その後、数値計算コード開発を行い、弧状衝撃波に対して拡張する準備を行った。

解析的な見積もりから、全体の密度を一定にしてダストの割合を変化させた場合、ダストの割合が高いほど衝撃波後面の温度が高くなることが分かった。これは、以下のように理解ができる。まず、衝撃波後面の圧力は衝撃波面での動圧によって決まり、ダストの割合によらない。しかし、ダストの割合が高いほどガス密度は小さくなるため、衝撃波後面で同じ圧力を達成する為に、温度か密度が上がる必要がある。しかし、質量保存から密度は大きく上がらず、温度が高くなる。これは、ダストの熱容量を考えても変わらない。数値計算の結果も解析結果と一致し、今後、コンドリュール形成モデルへの応用への見通しも得られた。

O5-01

コンドライト母天体内の流動作用による コンドリュールの再配置：モデル

○留岡和重[1]，大西市朗[2]

[1]神戸大学理学研究科，[2]日本電子株式会社

炭素質コンドライトは，主にコンドリュールと包有物そしてそれらの間を埋める細粒のマトリックスからなる。この組織は，基本的には原始太陽系星雲物質が集積して形成されたと広く考えられている [e.g. 1, 2]。

最近，我々は，電子顕微鏡を用いてモコイア CV3 炭素質コンドライトの直径 400 μm 以上の全てのコンドリュールと包有物，そしてそれらを囲むリム（以下これらをコンドリュール／リムと総称する）を詳しく調べた [3, 4]。その結果，それらのコンドリュール／リムは様々な程度の水質変成を受けており，中には熱変成の影響を示すものもあることがわかった。我々の研究結果は，これらの変成は隕石母天体内で起こったことを示している。一方，驚くべきことに，コンドリュール／リムの間を埋めるマトリックスは，それらの変成が及んだ痕跡を示さない。これらの結果は，コンドリュール／リムの変成が現在の隕石の設定で起こったのではないことを意味している。これらの結果にもとづいて我々は，コンドリュール／リムは，実は隕石母天体内のホスト隕石があった場所とは異なる領域からやってきた破片（クラスト）だというモデルを提出した（Fig. 1）[3, 4]。

我々が調べたコンドリュールと包有物がこの隕石の全てのコンドリュールと包有物を代表していると仮定できるとすると，この結果と解釈は，モコイア隕石全体の岩相形成に関して次のような重要な問題を提起している。それは，この隕石の岩相形成が原始太陽系星雲物質の直接集積では説明できないということであり，また隕石母天体上における衝突による角礫岩化作用でも説明できないということである。我々は，モコイア隕石の岩相は，母天体内の異なる領域で破砕作用により分離したコンドリュール／リムとマトリックス粒子が，流動状態で運搬され，混合し，集積し，岩石化することによって形成されたというモデルを提出する。おそらくこのプロセスは，母天体内の複数の異なる領域で，循環的に何度も繰り返されたのではないかと思われる。

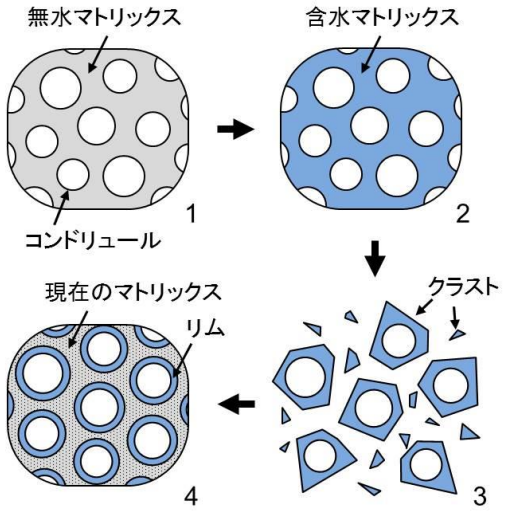


Fig. 1 コンドリュール／リムの形成モデル [3, 4]
1. 無水の前駆岩相，2. 水質変成，3. 破砕，4. クラストの運搬，摩耗，マトリックス粒子との混合，岩石化．単純化のためコンドリュールの変成は描いていない．(Modified from Fig. 3 in [5])

引用文献：[1] Wood J. A. (1963) Icarus 2,152-180. [2] Cuzzi J. N et al. (2005) In Chondrites and the Protoplanetary Disk, 732-773. [3] Tomeoka K. & Ohnishi I. (2010) GCA 74, 4438-4453. [4] Tomeoka K. & Ohnishi I. (2014) GCA 137, 18-34. [5] Tomeoka K. & Ohnishi I. (2015) GCA, in press.

O5-02

コランダムの太陽風・星間粒子線照射による非晶質化過程の実験的研究

○瀧川 晶[1,2], 松本 徹[3], 渡部直樹[4], 三宅亮[2], 土`山 明[2]

[1]京都大学 白眉センター, [2]京都大学 大学院理学研究科, [3]JAXA, [4]北海道大学 低温科学研究所

小惑星や月のレゴリス物質は，微隕石の衝突や太陽風の照射による宇宙風化を受けて表層の構造変化や鉄ナノ粒子の生成などをおこすことが知られている．一方，進化末期星にみられるような結晶質ダストが，星間空間から観測されないことは，星間空間における低エネルギーの宇宙線照射や超新星爆発由来の衝撃波により加速された粒子線の衝突により結晶質ダストが非晶質化したためと考えられる(e.g., Waters et al. 1996; Kemper et al. 2005)．

これまでに始原的な普通コンドライト隕石の酸処理残渣から発見されたプレソーラーコランダム粒子は，数十から100nm程度の凹凸をもつ荒れた表面に特徴付けられる(Takigawa et al. 2014)．これらの構造は，粒子表層に粒子線照射による損傷層が形成され，隕石酸処理により溶解した結果である可能性がある．オリビンやエンスタタイトなどのケイ酸塩に関しては，太陽風および星間空間での粒子線照射を模擬した水素やヘリウムなどの粒子線照射実験が行われているが (Carrez et al. 2002; Jäger et al. 2003; Demyk et al. 2004; Matsumoto et al. 2013)，コランダムに関しては，20-50keVのHe^+, H_2^+イオン照射実験はあるものの (Takigawa et al. 2013)，太陽風や星間空間における400km/s程度の衝撃波通過によるガスダスト衝突過程による非晶質化過程は調べられていない．

そこで，本研究ではこれまでの研究を拡張し，コランダムに対する低エネルギーでのイオン照射実験をおこなった．試料はコランダムの単結晶を用い，(0001),(11-20),(1-100)面を照射面とした．4 keVのHe^+イオンを10^{17}-10^{19} ions/cm^2 照射し，イオン照射量の違いによる構造変化を調べた．照射後のサンプルは，表面構造を電界放射型走査電子顕微鏡で観察し，集束イオンビーム加工で照射断面を切り出し，透過型電子顕微鏡で内部構造を観察した．

過去の実験で，(11-20)と(1-100)面では20 keV以上で，(0001)面では50keVのHe^+イオンを10^{18} ions/cm^{2}以上照射した試料に，非晶質化層を伴うブリスターの形成が確認されていたが(Takigawa et al. 2013)，4keV He^+イオンを10^{18} ions/cm^{2}照射した(11-20)と(1-100)面も，10^{19} ions/cm^{2}照射した(0001)面にもブリスターはみられなかった．照射断面の観察により，少なくとも10^{18} ions/cm^{2}以上イオン照射した試料に関して，表面から約50nm程度の領域に明らかな非晶質化層がみられ，低エネルギーのイオン照射によりブリスター形成を伴わない非晶質化が起こることがわかった．

O5-03

２次イオン質量分析計を用いたChelyabinsk隕石の局所U-Pb系絶対年代分析

○上岡萌[1]・寺田健太郎[1]・河井洋輔[1]・日高洋[2]・宮原正明[2]・木村光佑[2]・佐野有司[3]・高畑直人[3]・石田章純[3]・大谷栄治[4]・小澤信[4]・Skublov Sergey[5]・Olga N. Koroleva[6]・Konstantin D. Litasov[7]・Nikolai Pokhilenko[7]

（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻[1]・広島大学大学院理学研究科[2]・東京大学大気海洋研究所[3]・東北大学理学研究科[4]・Institute of Precambrian Geology and Geochronology[5]・Institute of Mineralogy Ural Branch RAS[6]・V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Science[7]）

2013年2月にロシアのチェリヤビンスク州に隕石が落下した。回収された隕石試料は鉱物学的な記載からLL5普通コンドライトであると報告された(Galimov et.al 2013)。また落下軌道が目撃されているため軌道計算により近日点距離0.82天文単位、遠日点距離2.64天文単位の地球近傍小惑星（NEA：Near Earth Asteroid;）と判明している（Zuluaga et.al 2013）。加えて隕石試料中には天体衝突に伴う超高圧・高温条件の下で生成したヒスイ輝石が発見されており(Ozawa et al. 2014)、小惑星帯を起源とする母天体が衝突により軌道が変化しNEAとなった可能性が示唆される。本研究では、Chelyabinsk母天体の熱進化、およびNEAの軌道進化の歴史解明に向けて２次イオン質量分析計を用いた局所U-Pb系同位体比測定による絶対年代分析を行い、形成年代やショック年代の算出を試みた。

まず、走査型電子顕微鏡SEM-EDSを用いてUの濃集するリン酸塩鉱物の同定を行い、アパタイトとメルリライトが存在することを確認した。概して、ショックの痕跡のない隕石片中のリン酸塩鉱物のサイズは比較的大きいのに対し（＞10μｍ）、ショックベイン中に産出するリン酸塩は細粒（～5μm）であった。前者は広島大学のSHRIMPで、後者は東京大学大気海洋研究所のNanoSIMSを用いて局所U-Pb同位体比測定による年代分析を行い、形成年代とショック年代を算出した。今回の発表では一連の分析により得られたChelyabinsk隕石の形成年代、およびショック年代の考察結果について報告する。

O5-04

小惑星・水星の宇宙風化作用における硫黄の効果: 粒子サイズの影響

○岡崎瑞祈[1]、佐々木晶[1]、廣井孝弘[2]、土`山明[3]、三宅亮[3]、松本徹[4]、平田岳史[3]
[1]大阪大学、[2]ブラウン大学、[3]京都大学、[4]宇宙航空研究開発機構

宇宙風化作用とは、大気のない天体表面が宇宙空間に直接晒されることで反射スペクトルが変化する現象である。そのメカニズムは、太陽風や微小隕石の衝突などによるナノ鉄微粒子の形成とされているが、ナノ秒パルスレーザーを鉱物表面に照射することで宇宙風化作用を実験室で再現することができる。また、はやぶさが持ち帰った試料からも粒子表面に10nm以下の宇宙風化層が見つかったが、その上部にナノ硫化鉄微粒子が分布していることが分かった。硫黄は小惑星で普遍的な物質であり、イトカワ粒子の中でもトロイライト（FeS）を中心とした粒子が見つかっている。また水星表面は、鉄やチタンが非常に少なく、硫黄が地球や月の岩石の１０倍以上も含まれることが分かっている。これらのことから、硫黄は揮発性に富むため天体表面で起こる宇宙風化作用に関係があるのではと推測し、宇宙風化作用における硫黄の効果を検証することを目的とし、実験を行った。

サンプルは、カンラン石をベースに硫化鉄を2.5wt%、5wt%、10wt%、20wt%混ぜた試料を作成した。レーザーの強度は10mJ、照射領域を250-2500nmの範囲で反射スペクトルを測定した。その結果、硫化鉄が含まれる場合は、スペクトルが赤化が強くまた近赤外領域も暗化していることが確認された。また、照射領域をFE-SEM、実体顕微鏡で観察したところ、表面が加熱され溶けたようになっており、硫化鉄に光沢が出て周囲を暗く汚していたことから、硫黄が飛んで周囲のカンラン石表面の宇宙風化層にトラップされた可能性が示唆された。レーザー照射部のカンラン石表面をTEM観察すると、表面に厚さ200nm程度のアモルファス層があり、層の下部と最表面に10nm程度の微粒子が確認できた。アモルファス層下部の微粒子はナノ鉄微粒子であったが、最表面の微粒子は鉄を含むものの、硫黄は検出できなかった。以上から、硫化鉄微粒子の形成が反射スペクトルの変化を大きくしている可能性が示唆されたが、硫化鉄微粒子の存在は確認中である。また45-75μmのカンラン石に対し、45μm以下の硫化鉄を2.5wt%加えた試料で実験を行ったところ、45-75μmの硫化鉄を10wt%加えた試料と同等の反射スペクトルの変化が確認できたことから、硫化鉄が細かいと反射スペクトルの変化により大きな影響を及ぼすことがわかった。このことから今回は混ぜる硫化鉄の粒子サイズの影響を調べるため、カンラン石は粒子サイズ45-75μmに対し、硫化鉄をカンラン石と同サイズの45-75μm、25-45μm、25μm以下と粒子サイズを振った試料で実験を行う。

層状珪酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響：OH/H_2O 生成量の推定

◯ 仲内 悠祐[1,2], 松本 徹[2], 安部 正真[2,1], 土 ` 山 明[3], 北里 宏平[4], 鈴木 耕拓[5]

[1] 総合研究大学院大学, [2] 宇宙航空研究開発機構, [3] 京都大学,
[4] 会津大学, [5] 若狭湾エネルギー研究センター

大気の無い天体表層における太陽光反射スペクトルは、表層物質の同定や、それらの存在量の推定に有用である。しかし、そのような天体表層は宇宙空間に暴露されているため、微小隕石衝突や太陽風・銀河宇宙線の照射による宇宙風化作用により天体表層の反射スペクトル形状が変化してしまう。実際、隕石やそれらの構成鉱物に対する宇宙風化実験は多く行われ、反射スペクトルの変化が再現されている（e.g. Sasaki et al. 2001）。そのため、天体表層の太陽光反射スペクトルを用いた、より正確な物質同定や存在量の推定には、宇宙風化作用の理解が重要である。

はやぶさ２プロジェクトでは近赤外分光計 NIRS3 を用い、$1999JU_3$ の表層における太陽光反射スペクトルをもとに鉱物を同定や、その含水量の推定を行う。これらの情報は C 型小惑星に存在する物質の均質・不均質を理解する重要な手がかりとなり、さらに小惑星内部における水質変成時の水の挙動を理解する手がかりになると考えられている。NIRS3 では 1.8μm - 3.2μm の波長範囲を観測し、反射スペクトルにおける OH や H_2O の吸収特徴からそれらの存在量等を見積もる。

しかし、上記のように小惑星表層の反射スペクトルは宇宙風化作用により変化していると考えられる。一般的に宇宙風化作用は、反射スペクトルのスロープを変化させ、吸収特徴における吸収強度の減少を示す。しかし、太陽風プロトンによる宇宙風化作用では他の作用と同様にスロープの変化はするものの、OH や H_2O の吸収特徴において吸収強度の増加を示すことが明らかとなってきた（e.g. Nakauchi, LPSC, 2014）（図１）。この変化は、太陽風プロトンの照射により OH や H_2O が生成している事を示している。

これまでの研究では、小惑星に存在すると考えられる層状珪酸塩鉱物に対して太陽風を模擬した水素イオンを照射し、OH や H_2O の吸収特徴における吸収強度の増加量が、鉱物により異なる事が明らかになった。本発表では、試料表層に生成された OH や H_2O の量を理論的に算出する事を試みた結果を発表する。

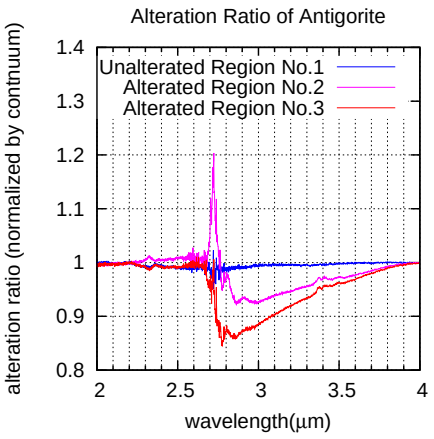


図 1: 太陽風模擬プロトンを照射していない試料基準領域に対する、未照射・照射領域の反射スペクトルの比。Alteration Ratio は 2.5μm と 4μm 間の直線フィッティングにより、continuum を除去している。

O5-06

原始太陽系星雲への ^{54}Cr の一様な注入と隕石中の同位体比異常の時間進化について

○中本泰史[1]，竹石陽[1]
[1]東京工業大学・地球惑星科学

クロムには，質量数が 50, 52, 53, 54 の 4 種類の安定な同位体がある。コンドライト隕石から分化隕石，鉄隕石にまでいたるいろいろな隕石中に含まれている ^{54}Cr の同位体比は，1 万分の 1 の程度で変動していること（同位体比異常があること）が知られている。

Sugiura & Fujiya (2014)は各隕石母天体の形成年代を推定し，形成年代と ^{54}Cr の同位体比異常の値の間に 1 対 1 の関係があることを見出した。彼らはこの傾向を，隕石母天体を形成する物質に含まれる ^{54}Cr の量が時間と共に増加したためと解釈した。そしてこの解釈に基づき，^{54}Cr を含む固体微粒子が，すでに存在している原始太陽系星雲に後に外部から注入されたと考えてモデル計算を行い，見出された同位体比異常と時間の関係を満たす固体微粒子注入は起こり得ると結論づけた。

ところが，Sugiura & Fujiya (2014)が行った外部からの固体微粒子注入モデル計算には，やや不自然と思われる部分がある。彼らのモデルでは，外部からの固体微粒子は原始太陽系星雲のうち，太陽からの距離 R（モデルパラメータ）を含む幅 5 AU 程度の領域にのみ注入される。しかし，超新星爆発から来る固体微粒子が特定の位置にのみ到達するというのは，不自然に思われる。例えば，分子雲コアに対する超新星爆発衝撃波の及ぼす影響を調べた数値計算では，原始太陽系星雲の少なくとも 10 箇所程度には固体微粒子が供給されるだろうとの結果が得られている (Vanhala & Boss 2002)。すなわち，原始太陽系星雲のより広い領域に対し，一様に近い形で注入される方が自然であろう。

そこで本研究では，原始太陽系星雲に対し後から ^{54}Cr が一様な面密度で供給されるモデルを考え，隕石母天体形成領域の ^{54}Cr 濃度が時間と共にどのように変化するかを調べた。また本研究では，原始太陽系星雲の形成と質量移動も，非定常問題として計算した。

本研究のモデル計算では，隕石母天体領域の ^{54}Cr 濃度が時間と共に上昇するという結果が得られた。これは，次のように理解できる。まず，形成される原始太陽系星雲の面密度は一般に R の減少関数である。ここに，一様な面密度で ^{54}Cr を含む固体微粒子が追加されると，^{54}Cr の濃度は R の増加関数となる。原始太陽系星雲内の乱流によって固体微粒子の拡散が起こるが，拡散のフラックスは濃度勾配に比例するので，初期に濃度が低い領域の濃度は時間と共に上昇することになる。隕石母天体形成領域の初期 ^{54}Cr 濃度はその外側の領域よりも低いので，その濃度は時間の増加関数として上昇する。そして，その領域にある固体微粒子を取り込んで隕石母天体が短時間で形成されたとすれば，隕石母天体中の ^{54}Cr 同位体比が時間と共に増加するという結果が得られる。本研究のモデルには原始太陽系星雲内の乱流粘性パラメータ α が含まれているが，この値については，他の研究から推定されている値である $\alpha = 10^{-3}$-10^{-2} 程度において，Sugiura & Fujiya (2014)で見出された同位体比異常−時間の関係と定量的に調和的な結果が得られた。

Sugiura, N. and Fujiya, W. 2014, Meteoritics and Planetary Science 49, 772-787
Vanhala, H.A.T. and Boss, A. 2002, Astrophysical Journal 575, 1144 - 1150

O5-07

プレソーラーSiC の Ba 同位体比に基づく 太陽系重元素の起源に関する考察

○寺田健太郎[1]、河井洋輔[1]、岩本信之[2]、青木和光[3]、吉田敬[4]
([1]大阪大学、[2]原子力開発機構、[3]国立天文台、[4]京都大学)

一般に、天然に存在する鉄よりも重い核種の約半数は、遅い中性子捕獲反応（以下、s プロセス）で生成されたと考えられている。最近の元素合成理論によると、この s プロセス核種が生成される物理環境として、

(i) 中小質量星の AGB 星段階の熱パルス休閑時、He 層上層部の比較的低温・低中性子密度でおこる $^{13}C(\alpha, n)^{16}O$ 起源。 [T<10keV, N_n~10^7 /cm^3]
(ii) 中小質量星の AGB 星段階の熱パルス時、He 層底部の高温・高中性子密度でおこる $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 起源。 [T=25-35keV, N_n=10^8~10^{10}/cm^3]
（iii）大質量星の He コア燃焼時の高温環境における $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 起源。[T=25-35keV, N_n=2×10^7 /cm^3]

などが提唱されている。我々は、$^{153}Eu/^{151}Eu$ 同位体比が温度や中性子密度に敏感であることに着目して以来(Terada et al. 2006)、プレソーラー粒子の Eu や Ba 同位体比測定と、AGB 星 He 層内における Eu, Ba 同位体比の温度-中性密度依存性について報告してきた。本講演では、隕石の同位体比の実測から恒星内部の温度・中性子密度の直接制約を試みる我々のこれまでの取り組みを紹介するとともに、r プロセス核種の起源についても考察する。

O5-08

非晶質フォルステライト結晶化における水蒸気圧効果

○山本大貴[1]、橘省吾[1]

[1]北海道大学大学院理学院

原始惑星系円盤及び彗星の赤外線観測から、非晶質・結晶質ケイ酸塩ダストの存在が示されている[1]。一方、星間空間のダストは完全に非晶質であることが指摘されている[2]。これらの事実は原始惑星系円盤の結晶質ケイ酸塩ダストは、非晶質ケイ酸塩ダストを前駆物質として、円盤中で結晶化したことを示唆する。これまで非晶質ケイ酸塩の結晶化実験が多数行われてきたが、水酸基を含む非晶質ケイ酸塩ダストが無水非晶質ケイ酸塩ダストに比べ、大きな結晶化速度を持つことが確認されている[3]。これは主要円盤ガスである水蒸気が非晶質ケイ酸塩ダスト結晶化に影響を与える可能性を示唆している。

本研究では、非晶質ケイ酸塩ダスト結晶化における水蒸気圧の効果を求めるため、非晶質フォルステライトの様々な水蒸気圧条件下での加熱結晶化実験をおこなった。実験は真空赤外炉を用い、P_{H2O}~10^{-9} bar・953–1023 K、及び P_{H2O}~500 Pa・923–973 K の条件でおこなった。また、石英ガラス管に試料を $Ca(OH)_2$ または $Mg(OH)_2$ とともに封入し、箱形炉を用い、P_{H2O}=0.65 bar・773–873 K の条件での実験もおこなった。実験後試料は赤外分光法や粉末X線回折(XRD)、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて分析をおこない、結晶化度の時間変化を結晶化における核形成・核成長の理論式 Johnson-Mehl-Avrami 方程式により解析した。

P_{H2O}~10^{-9} bar 条件での結晶化時定数 τ は、加熱温度に対してアレーニウスの関係を示し、結晶化における活性化エネルギー Ea~410 kJ/mol 及び頻度因子 v_0~1.78×10^{17} s^{-1} を得た。また結晶化メカニズムを示す Avrami 定数 n は~1.5 であり、これは核形成を伴わない既存核からの 3 次元的な構成元素の拡散律速結晶成長を示し、XRD において出発物質にフォルステライトの核子が既に存在していたことと調和的であった。P_{H2O}~500 Pa における活性化エネルギー及び頻度因子は Ea~272 kJ/mol, v_0~4.34×10^{10} s^{-1}、P_{H2O} ~0.65 bar では Ea~89 kJ/mol, v_0~14.9 s^{-1} であった。P_{H2O}~10^{-9} bar 及び 500 Pa で得られた Avrami 定数 n が温度によらず大きく変化しないと仮定し、実験結果を低温へ外挿すると 873 K において P_{H2O}~10^{-9} bar で τ~232 日、P_{H2O}~500 Pa で τ~4.8 日、P_{H2O}=0.65 bar で τ~3.7 時間となり、水蒸気存在下で非晶質フォルステライトの結晶化が促進されることがわかる。

フォルステライト組成ガラス構造[4]のアナロジーから、非晶質フォルステライト構造中に拡散した水蒸気がネットワークを形成する MgO_X ユニット中の Mg-O バンド、SiO_4 四面体間の Si-O-Si バンドを切断する網目修飾体として作用し、結晶化を促す触媒となっていると考えられる。

衝撃波加熱モデルによれば、衝撃波後面で水蒸気圧が数百 Pa まで上昇することが提案されており (e.g. [5])、本結果は衝撃波加熱時において周囲の水蒸気が非晶質ケイ酸塩の結晶化を促進することを示している。

References: [1] Henning Th. 2010. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*48:21–46. [2] Kemper F. et al. 2004. *Astrophysical Journal* 609: 826–837. [3] Jäger C. et al. 2003. *Astronomy and Astrophysics* 408: 193–204. [4] Kohara S. et al. 2004. *Science* 303:1649–1652. [5] Ciesla et al. 2003. *Science* 299: 549–552.

O5-09

初期太陽系の有機-無機相互作用：南極雪微隕石分析研究の成果から

○薮田ひかる[1]、野口高明[2]、伊藤正一[3]、中村智樹[4]、大久保彩[5]、岡崎隆司[6]、橘省吾[7]、寺田健太郎[1]、海老原充[8]、永原裕子[5]

[1]阪大理、[2]九大基幹、[3]京大理、[4]東北大理、[5]東大理、[6]九大理、[7]北大理、[8]首都大理

従来の地球外有機物研究は炭素質コンドライト隕石を対象としたものが多かったが、隕石有機物は母天体上で著しい二次的変質を経験した太陽系始原物質の最終生成物であり、母天体変成条件を高い精度で評価できる長所を持つ反面、起源を決定するには限度があるという不足点もある。地球外有機物の起源と生成環境に制約を与えるには、有機物だけではなく化学・物理的に関係しあった無機物の分布・組成を共に理解することが非常に重要である。我々はこの5年間、隕石よりも始原的な進化段階の有機-無機相互作用を解明する目的で、南極雪微隕石(MM)の総合的な分析化学研究を行ってきた。

南極ドームふじ基地周辺から採取した表層雪を茨城大学のクリーンルーム(クラス1000)で融解ろ過し、走査型電子顕微鏡(SEM-EDS)分析で微隕石と同定したうちの10試料を研究した。各試料を金板に圧入後(一部の試料はインジウム圧入またはエポキシ包埋)、北海道大学の同位体顕微鏡(Cameca ims-1270 SIMS/SCAPS)で同位体イメージングを行い、その後、集束イオンビーム(FIB-SEM)で厚さ100 nmの超薄片に加工し、Advanced Light SourceのBL5.3.2.2で走査型透過X線顕微鏡(STXM)分析を行い、最後に透過型電子顕微鏡(TEM)で観察した。

非晶質ケイ酸塩GEMS が検出された試料は無水MMに分類し(Noguchi et al. 2015)、中でも極度に有機物含有量が高く、窒素に富む試料を超炭素質MMとして同定した。また、鉄に富む含水ケイ酸塩の割合から、軽度～強度に水質変成を受けた含水MMに細分類できた。これらの微隕石では重水素の濃集が見出されない有機物も多く、炭素質コンドライトの分類を問わず一般的に重水素濃集が検出される不溶性有機物とは対照的な特徴を示した。概して無水MMでは有機物が広域に分布し、水質変成度の強い含水MMで有機物に乏しかった。また、一部の無水MMでは含水MMに比べて、酸素を含有するカルボニル基C=Oの割合が芳香族炭素C=Cよりも相対的に高いのに対し、水質変成が進んだ含水MMほどC=Oの割合がC=Cより低くCMコンドライト隕石中の不溶性有機物組成に類似した。但し、中にはこの傾向に当てはまらない試料もあったことから、南極雪微隕石の有機物組成のバリエーションは変質作用初期の度合いを反映するだけでなく起源物質や成因の違いを記録していることが期待できる。

O6-01

ダストから惑星への衝突合体成長

◯ 小林 浩[1]

[1] 名古屋大学

惑星は原始惑星系円盤中の固体成分微粒子 (ダスト) が集まって形成される。衝突・合体による成長を考えるとガス抵抗による停止時間が公転周期程度の時に中心星落下が成長よりも早いという大問題があったが、現実的なふわふわしたダストならば合体・成長が可能なことが近年わかってきた。このようなふわふわしたダストは合体・成長と中心星落下を同時に解くと、中心星から 10-20AU 程度より内側の領域で落下を逃れ形成され、外側では落下してその領域に濃集するため固体成分が非常に大きくなる。本研究ではそのような状況でその後の天体の合体・成長を解き、惑星形成状況を調べた。惑星のような大きな天体を形成する時には、その重力によって周りの天体の衝突速度を上げるため、衝突・破壊が重要になる。天体のランダム速度は天体間の重力相互作用だけでなく、原始惑星系円盤の乱流によっても上昇する。天体のサイズ分布は天体のランダム速度に依存するため、それらを同時に解き、天体間の衝突や重力相互作用、天体と乱流との相互作用を考慮して、惑星の形成のシミュレーションを行った。乱流の効果は非常に重要であり、天体の重力による衝突断面積の増加を起こさなくする。その結果、暴走成長が起こりにくくなる。一度暴走成長が起こると系の総質量を決める天体のサイズは変化せずに少数の大きな天体を形成する。そのため、暴走成長が起こったサイズの天体が原始惑星の周りに残り、原始惑星の成長のための材料となる。原始惑星が大きくなると暴走成長を始めたサイズの天体のランダム速度が上昇して衝突・破壊が起き、その破片はガス抵抗により短時間で中心星に落ちてしまうので原始惑星の成長を阻害する。1km 大よりも大きな天体は大きいほど衝突によって壊れにくいので、暴走成長が始まるサイズが大きいほど大きな原始惑星ができる。ダストの合体・成長中に固体の面密度は増加するので、その効果を加味しガス面密度を 3 倍の最小質量円盤として、固体面密度をその 0.17 倍とおいて 1km サイズの天体からシミュレーションを行ったところ、音速と円盤のスケールハイトで規格化した無次元の乱流粘性が 10^{-3} 程度だと暴走ガス降着を引き起こしガス惑星へとなり得る 10 倍の地球質量ほどの原始惑星が 1 千万年以内に形成できることを発見した。また、本公演では、ダストから惑星までの一連の衝突成長をより現実的に考えた状況について議論を行いたい。そして、原始太陽系星雲がどのような乱流分布を持っていたか現在の惑星から見積もりそれについても議論を行いたい。

黄道光分布から読み取る小惑星の衝突破壊で生じるダストの典型的サイズ

◯ 植田高啓 [1], 竹内拓 [1], 小林浩 [2]

[1] 東京工業大学,[2] 名古屋大学

惑星形成の主要モデルであるコア集積モデルでは、微惑星同士の衝突時に生じるダストの量やサイズによって惑星の成長できるサイズが決まるため、衝突破壊で生じるダストの量やサイズは惑星形成において重要なテーマの一つである。

太陽系内には、小惑星同士の衝突や彗星からの放出で生じたダストが漂っており、これらの太陽光散乱光は黄道光と呼ばれる。ダストは、太陽光の輻射エネルギーを吸収・再輻射することで徐々に角運動量を失って太陽方向に落下する。落下してきたダストの一部は、地球の共鳴軌道に捕獲されて離心率が上昇し、非軸対称な空間分布をつくる。赤外線天文衛星「あかり」などのデータからは、地球の進行方向前方に比べて、後方の方が中間赤外域で放射強度が 3 – 4% 程度強いと見積もられる。

本研究では、太陽からの輻射を考慮したダスト・太陽・地球の三体問題についての三次元軌道計算を多数回行うことで、ダストの空間分布とダストサイズの関係性を調べた。この研究では小惑星帯における小惑星同士の衝突破壊によって生じたダストに着目し、ダストの離心率や軌道傾斜角の初期条件は、小惑星帯の離心率・軌道傾斜角分布をもとに乱数的に与えた。計算の結果、大きいダストほど非軸対称性を作りやすく、黄道光の非軸対称性は主に 1.5μm よりも大きなダストによるものであることがわかった (図 1)。これは、大きいダストほど落下速度が遅く、共鳴に捕獲されやすいためである。本発表では、ダストの軌道計算の結果について述べ、観測で見られる放射強度分布を再現できるようなダストサイズ分布について議論する。

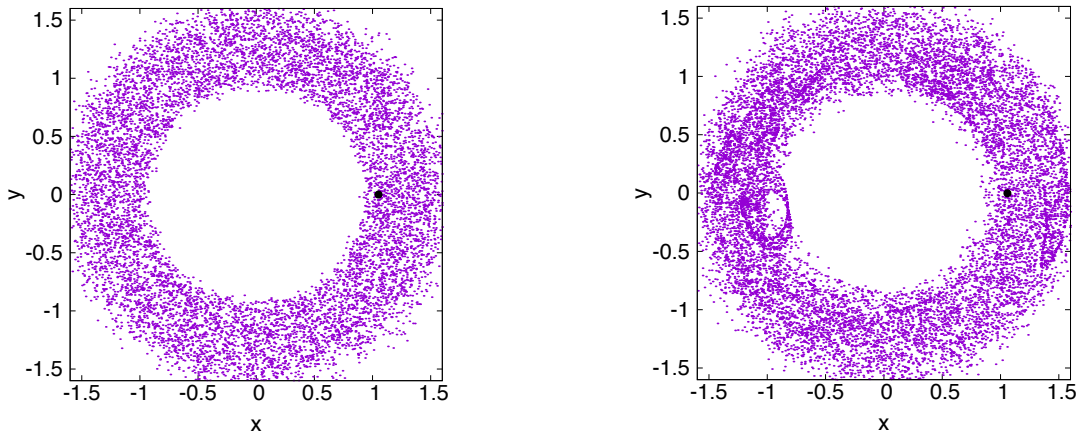


図 1: 粒子半径 1.43μm(左図) と 14.3μm(右図) のダストの空間分布。地球の位置を黒い点で表している。サイズが大きい粒子は共鳴に捕獲され、非対称な密度構造をつくる。

「あかり」遠赤外・中間赤外線観測に基づく黄道光ダストバンド構造の検出

◯ 大坪貴文 [1], 土井靖生 [1], 臼井文彦 [1],
瀧田怜 [2], 川田光伸 [2], 北村良実 [2], 中川貴雄 [2],
松浦周二 [3], 有松亘 [4], 服部誠 [5], 石原大助 [6], 近藤徹 [6]

[1] 東京大学, [2]ISAS/JAXA, [3] 関西学院大学, [4] 国立天文台, [5] 東北大学, [6] 名古屋大学

日本の赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ観測は、中間赤外線波長域 (9, 18 μm) と遠赤外線波長域 (65, 90, 140, 160 μm) を計 6 つの測光バンドでカバーし、1 年以上に渡るミッション期間中に全天の 97% 以上の観測を達成した。遠赤外線全天画像データ (65, 90, 140, 160 μm) に関しては、2014 年 12 月に広く一般に対し公開されている。この「あかり」遠赤外線データは、銀河系内や系外銀河の研究だけでなく、我々太陽系内の惑星間塵からの熱放射である黄道光の研究にとっても貴重なデータである。

黄道光中のダストバンド構造は、過去の赤外線衛星 IRAS や COBE/DIRBE の観測でも空間的微細構造として受かっているが、「あかり」の遠赤外線全天画像データでも、短波長側の 2 バンド (65, 90 μm) で黄道面付近と黄緯 $\pm 10^\circ$ の数 MJy/sr レベルの小惑星ダストバンド構造が明確に検出できている。IRAS や DIRBE の観測期間は 10ヶ月程度であったため、黄経によってはその観測でカバーできていない領域もあったが、「あかり」の全天画像データによって 60 μm よりも長い波長域での $\pm 10^\circ$ のダストバンド構造をほぼ全黄経に渡って詳細に解析できるようになった。「あかり」が観測した黄道光微細構造は、IRAS や DIRBE の観測結果と全体としては一致しているが、現在広く用いられている DIRBE の観測に基づいた黄道光モデル (Kelsall et al. (1998), Wright (1998) など) では再現できない。

一方、我々は「あかり」で黄道光の中間赤外線分光観測もおこなった。黄道光スペクトルには 10 μm 帯のシリケイト・フィーチャが見つかっており、特に 11.3 μm の結晶質オリビンのフィーチャが確認されている。そのシリケイト・フィーチャの形状には黄道面付近、黄緯 $\pm 10^\circ$、高黄緯で違いがあり、特に黄緯 $\pm 10^\circ$ の小惑星ダストバンドでは結晶質オリビンのフィーチャが弱い。これは、他の領域と供給源が異なる惑星間塵を見ているものと考えられ、小惑星起源のダストを検出している可能性がある。本講演では、「あかり」の遠赤外・中間赤外の両方の観測結果を紹介し、黄緯による惑星間塵の違い、特に小惑星起源ダストの性質について議論する。

O6-04

円盤降着による原始太陽の形成と惑星形成による太陽表面の汚染

○國友正信[1], Tristan Guillot[2], 竹内拓[3], 井田茂[3]
[1]名古屋大学, [2]コート・ダジュール天文台, [3]東京工業大学

近年の観測から，太陽は特異な表面組成を有していることが明らかになった．太陽の表面組成は太陽類似星に比べて，難揮発性成分に欠乏し揮発性成分に富んでいるのである．本研究では，惑星形成により難揮発性成分に欠乏したガスが原始太陽に降着し，太陽表面を汚染した可能性を追求する．ただし，この過程によって表面組成を変化させるためには，原始惑星系円盤の質量が中心星の 1% 程度であるため，前主系列星の表面対流層が十分薄い必要がある．従来の描像で考えられていたように前主系列星が全対流している場合，降着物質は星全体で混合されるため，降着物質が及ぼす表面組成の変化は限定的である．しかし，従来の前主系列進化の描像は，球対称降着によって星が形成されると仮定した計算結果に基づいている．一方で，星周円盤からの降着を考慮すると，円盤および星の表面からの効率的な輻射冷却を通じて，降着物質のエントロピーが低くなることが期待される．そこで本研究では，低エントロピー降着を考慮して原始星および前主系列星の進化を計算し，前主系列星の内部構造進化を再検討した．結果として，低エントロピー降着の場合，従来に比べ前主系列星の半径が約 1 桁，光度が 2 桁も小さくなることがわかった．進化トラックの変更は星の年齢や質量の推定に影響を及ぼすため，重要な結果である．さらに，小さい半径はビリアル定理から高温を意味するため，内部構造の進化も大きく変更される．従来の描像では前主系列星は初期に全対流しており，2 千万年程度かけて表面対流層が収縮すると考えられていた．一方で低エントロピー降着の場合，原始太陽の表面対流層は 1 千万年程度で収縮することがわかった．つまり，原始太陽系星雲の寿命が 1 千万年以上であれば，太陽の表面は難揮発性成分に欠乏した組成に汚染されうることがわかった．講演では低エントロピー降着での恒星進化が原始惑星系円盤や短周期惑星の軌道進化に与える影響についても議論する予定である．

電子加熱による磁気乱流の抑制が引き起こす重力不安定：中心星X線が与える影響

◯森 昇志[1,2], 國友 正信[2], 奥住 聡[1]

[1] 東京工業大学, [2] 名古屋大学

原始惑星系円盤のガスは、角運動量を円盤外側へと輸送することで中心星へと降着する。角運動量輸送機構の起源の一つとして、 磁気回転不安定性 (MRI) による乱流粘性がある (Balbus & Hawlley 1991)。中心星から遠い領域では MRI は十分発達すると考えられているが、そこでは MRI 乱流に付随する強電場が電子を加熱する (電子加熱; Inutsuka & Sano, 2005)。電子加熱が起こると、高温の電子がダストに衝突し吸着されやすくなり、電離度が減少し、結果として磁場が散逸する (Okuzumi & Inutsuka, 2015)。磁場の散逸は MRI を安定化するため、電子加熱によって磁気乱流が抑制されると考えられる。

我々はこれまでに、中心星からおよそ 80AU 以内の赤道面付近で磁気乱流が大きく抑制されうることを示した (2014 年惑星科学会秋季講演会; Mori & Okuzumi, submitted)。そのような乱流が抑制された領域には、円盤外縁から降着してきたガスが蓄積してゆき、重力不安定になる可能性が指摘されてきた (e.g., Martin & Lubow, 2011)。我々はこれまでの計算から、中心星からの X 線がない場合、電子加熱によって遠方において重力不安定が引き起こされることを示した。これは遠方で惑星形成を引き起こす重要な機構である。

本発表では、電子加熱によって重力不安定が起きる場所の X 線光度依存性について報告する。中心星からの X 線があると、円盤表層で磁気乱流を活性化させ、重力不安定を起きにくくすると考えられる。しかし、観測から X 線光度に大きなばらつきがあることが分かっている。我々は、円盤内のある場所における重力不安定にならない最大の質量降着率 (臨界質量降着率) を、電子加熱を考慮した磁気乱流強度の計算から求めた (図 1)。円盤外縁から降着するガスの降着率が、この臨界降着率を上回る場合、ガスがその場所に蓄積し続け重力不安定になる。計算の結果、中心星の X 線光度が若い太陽型星の典型的な値 $L_{X0} = 2 \times 10^{30}$ erg s^{-1} である場合、10AU より内側で最大降着率が 10^{-7}M$_\odot$/yr を下回ることが分かった。これは、円盤の実際の降着率が 10^{-7}M$_\odot$/yr であれば、10AU 以内で重力不安定が起こることを意味する。一方で、X 線光度が $0.1L_{X0}$ のとき、30AU 以内で重力不安定が起きる。このように弱い X 線光度でより遠方の重力不安定が起こりやすいのは、X 線の減少によって円盤表層の MRI 活性層が薄くなることで、乱流粘性が小さくなるためである。講演では、本研究の結果をもとに遠方での惑星形成についても議論する予定である。

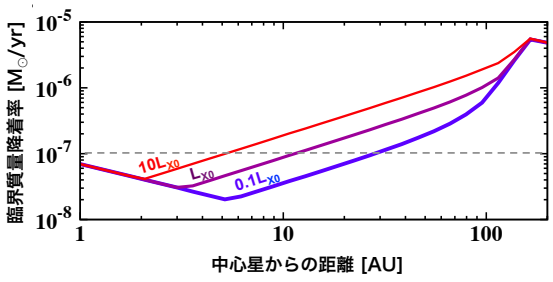


図 1 縦軸は円盤の各場所における臨界降着率、横軸は中心星からの距離を表す。臨界降着率より大きい降着があった場合、重力不安定が起こる。赤線は中心星 X 線強度が $L_{X0} = 2 \cdot 10^{30}$ erg s^{-1} 、紫線は L_{X0} の 0.1 倍、青線が L_{X0} の 0.01 倍にしたときのグラフである。

O6-06

原始惑星系円盤中の圧力バンプにおけるダストの空間分布の進化と合体成長

◯ 瀧哲朗[1], 奥住聡[1], 藤本正樹[2,3], 井田茂[3]

[1] 東京工業大学, [2] 宇宙科学研究所, [3] 東工大地球生命研究所

微惑星の形成過程は惑星系形成理論における重大な未解決問題のひとつである．微惑星形成の理論的困難は大きく分けて２つあり，それぞれ「中心星落下問題 (Adachi et al., 1976)」,「衝突破壊問題 (Blum & Munch, 1993)」と呼ばれている．前者は，成長したダストに対する原始惑星系円盤からのガス抵抗が，ダストを中心星方向に急速に移動させてしまうというものである．後者は，円盤内で駆動されるダストの相対速度が，ダストが合体成長可能な速度を上回ってしまうというものである．特に地球型惑星の材料と考えられている岩石微惑星の場合は，岩石ダストの合体可能な速度が小さいことから，この問題がより深刻であるとされている．惑星系形成理論を完成させるためには，これらの問題点を同時に回避した微惑星形成モデルの構築が必要である．

本研究では圧力バンプ (Whipple, 1972; Haghighipour & Boss, 2003) と呼ばれる原始惑星系円盤内の局所構造に注目した．これまでの我々の研究から，圧力バンプは落下するダストを捕獲してダスト空間密度を増加させるとともに，ダストの相対速度を減少させる性質をもつことが明らかになっている．これらの結果は，圧力バンプがダストの合体成長にとって有利な環境であることを意味している．簡単な見積もりによると，最も落下しやすいサイズのダストが圧力バンプを通過するまでに到達する最大サイズは数 km となり，圧力バンプにおけるダストの合体成長は岩石の場合を含む一般的な微惑星形成モデルの候補として有力である．

今回，我々は円盤動径方向の１次元モデルを用いて，圧力バンプにおけるダスト-ガス系のダイナミクスの計算にダストの合体成長を導入した数値実験を行った．ダスト・ガスの空間分布の進化とダストのサイズ進化を自己無撞着に計算することで，相互に影響しあう空間分布とサイズ分布の進化の描像を明らかにした．さらに初期に与えるダストサイズ分布についてパラメータサーベイを行い，形成されるダスト・微惑星の最大サイズと形成効率を調べることで，圧力バンプにおける微惑星形成の可能性についても議論する．

O6-07

M型星における地球型惑星の形成過程

◯ 押野翔一[1], 松本侑士[1], 小久保英一郎[1]

[1] 国立天文台

Kepler 宇宙望遠鏡による系外惑星の探査の結果、現在数千個にのぼる惑星候補天体が発見されている。また、質量が決定されている惑星も 1900 個を超えている。その中で主に惑星が発見されているのは FGK 型星であり、M 型星については 100 個程度の惑星しか見つかっていない。これは M 型星の波長のピークが赤外域に存在するため、これまで行われてきた可視光によるサーベイでは観測が難しかったためである。しかし、近年すばる望遠鏡用に開発が進められている赤外ドップラー装置 (IRD) をはじめとする機器による系外惑星探査計画が複数進められており、今後 M 型星における惑星の発見が増加すると考えられる。M 型星では G 型星に比べ中心星温度が低いためハビタブルゾーンが地球より中心星近くに位置する。内側に存在する惑星からのシグナルは外側より短い周期で確認できるため、ハビタブルプラネットの発見の可能性がより高くなると期待されている。本研究では、中心星重力が異なる場合に出来る惑星系について、惑星形成の最終段階である巨大衝突段階について N 体シミュレーションを用いて調べた。中心星質量が小さくなる事により物理半径ヒル半径比は小さくなる。その結果、太陽型星に比べ M 型星は惑星に及ぼす重力が小さくなり、惑星の重力圏が広くなる。そのため M 型星では惑星同士の間隔が太陽型星より広い惑星系になる結果が得られた。

O6-08

大領域惑星集積計算：ガス円盤内での惑星の外側への移動

◯小南淳子[1]、台坂博[2]、牧野淳一郎[3]、藤本正樹[4]

[1]東京工業大学地球生命研究所、[2]一橋大学、[3]RIKEN AICS、[4]JAXA

本研究では微惑星集積について、アイスラインを含めた広い領域で、ガス抵抗とタイプ1惑星移動の効果をいれた、現実的なN体計算を行った。惑星集積シナリオを構築するため、現在まで多くのN体計算が行われてきたが、粒子数の制限により局所的な計算に限られてきた。本研究では、既に開発した並列N体計算コードにガス抵抗とタイプ1惑星移動の効果を導入した。ガス抵抗とタイプ1惑星移動は微惑星や原始惑星を中心星方向に落としてしまう効果として知られている。本研究で扱う微惑星の重力による惑星の外側への移動はそれらに対抗する効果となりうるのかを検証した。

微惑星円盤はアイスラインの外側で面密度が大きくなる。そのため、微惑星の暴走成長は微惑星円盤の内縁だけでなくアイスラインのすぐ外側でも起こる可能性がある。その成長した天体は周囲のガスをまとい、ガス惑星を形成する可能性がある。本研究ではアイスラインの外側で暴走成長した原始惑星の周りの微惑星は原始惑星に集積したものと仮定し、計算を行った。その結果、ガス抵抗により周囲の微惑星のランダム速度は減少し、微惑星の重力による惑星の外側への移動は助長されることがわかった。また、この外側への移動はタイプ1惑星移動の効果より強い場合があることもわかった。

O6-09

巨大惑星が作る原始惑星系円盤ギャップ構造の深さと幅について

○金川和弘[1]、田中秀和[1]、武藤恭之[2]、谷川享行[3]、竹内拓[4]

[1]北海道大学低温科学研究所、[2]工学院大学、[3]産業医科大学、[4]東京工業大学

原始惑星系円盤内で十分に成長した惑星は周囲の円盤ガスとの重力相互作用によってガスを吹き飛ばし、惑星軌道に沿ったリング状にガス密度が減少した領域(ギャップ)を作る。このような巨大惑星によって形成されたギャップ構造は、近年多数発見されているリング状の隙間を持つ「前遷移円盤」の形成を説明する有力な説の一つである。ALMA やすばる望遠鏡などによる原始惑星系円盤の直接撮像観測が盛んに行われている現状において、原始惑星系円盤の直接撮像観測から得られたギャップ構造（例えば、ぎゃぷの深さや幅）から惑星に対してどのような制限を与えられるのかを議論することはきわめて重要である。

本研究では、巨大惑星が原始惑星系円盤に作るギャップの深さについて解析モデルを構築し、ギャップの深さとその中に存在する惑星質量の関係を導出した。
この関係は従来研究による数値流体シミュレーションで得られたギャップの深さと惑星質量の関係ともよく一致する。
この関係を用いることでギャップの深さが正確に観測された場合、その中に存在する惑星の質量を見積もることができる(Kanagawa et al. 2015b)。
さらに、本研究では惑星周辺のガス構造の 2 次元構造の数値シミュレーションを様々な惑星質量、円盤粘性、円盤アスペクト比で行い、ギャップの幅と惑星質量の関係を調べた。

本講演では、惑星質量と惑星が作ったギャップの深さおよび幅との関係について紹介する。また、惑星とギャップの深さ・幅の関係を用いて原始惑星系円盤ギャップの撮像観測からどの程度惑星についての情報を得られるのかについても議論したい。

O6-010

惑星散乱と潮汐相互作用

○長沢真樹子[1]，荒川創太[2]，井田茂[2]
[1]久留米大学，[2]東京工業大学

複数の木星型惑星が形成され，その後に軌道の不安定が生じる過程では，ホットジュピターが形成されたり，逆行惑星が形成されたり，連惑星の形成が行われたり，地球型惑星の領域に高離心率の木星型惑星が形成されたりと，太陽系には見られないタイプの軌道を持つ惑星が形成される場合がある．

ホットジュピターが形成されるのは，惑星同士の散乱の際に，中心の星と惑星の近点の距離が，0.1AU 以下となるような，ごく近くの接近が生じる場合である．また，連惑星が形成されるのも，惑星同士が，惑星の半径程度のごく表面近くまで接近する場合である．どちらの場合も，潮汐力によってエネルギーの散逸が起き，惑星が中心星まわり，あるいは他の惑星の周りに惑星が捕獲されることになる．潮汐力を含めた 3 惑星の軌道計算からは，ホットジュピターは惑星散乱時の 1 割から 2 割程度で形成され（Nagasawa et al. 2011 など），連惑星は 1 割程度の確率で形成されることが求められている（Ochiai et al. 2014）．

惑星に働く潮汐力は，惑星の構造などによって大きな不定性を持っていて，あまりはっきりと決められない．しかしながら，一般的には潮汐力は距離の 5 乗といったような強い冪で天体間の距離に強く依存していることが知られている．また，惑星散乱においては，惑星同士の近接は，潮汐力が働くよりも素早く生じることもわかる．こうした性質のために，潮汐捕獲が生じるかどうかは，潮汐力の強さの大きさそのものにもむろん依存はするものの，実際には，惑星と中心星，あるいは惑星同士で，どの程度の近接が生じたかによって決まってしまうことになる．実際に潮汐散逸を含めない軌道計算から連惑星形成率を求めると，潮汐を含めた計算と良い一致を示すと同時に，潮汐力の近接距離依存性を，最接近距離の 4 乗から 8 乗の冪まで変化させても，形成率がほとんど変化しないことが確かめられる（Arakawa et al. 2015，連合大会）．これらのことから，潮汐力を含めない，多体計算によって，広いパラメータ範囲で，惑星散乱の結果について検討が行える．

惑星の数が多くなったときに，ホットジュピターの形成される確率は 3 惑星の場合の 2 倍程度に増加し，安定性も増すことが示唆されている（Beauge & Nesvorny 2012）．従来の計算方法では，潮汐計算がボトルネックとなって，高精度の大量の計算を行うことが難しかったが，ホットジュピターや連惑星形成確率が，惑星数を増やした時にどのように変化するかについても，最接近距離の観点から調べることができると思われる．

O7-01

大きなコアを持ちプレートテクトニクスを伴う地球型惑星のマントル進化

○小河正基[1]

東京大学大学院総合文化研究科

様々なサイズのコアを持つ系外の地球のような惑星内部の進化を予想するため、内部熱源を持たない熱浴としてのコアの上に置かれたプレート運動を伴うマントルにおける火成活動・マントル対流結合系の数値シミュレーションを行った。コア・マントルカップリングの観点からは、このような惑星の内部進化は三つの段階にわかれる。第一段階ではマントルはコアから均質に強く加熱され活発な対流が起き撹拌均質化される。この対流は連続的で惑星表面を広く覆う火成活動を引き起こす。やがてコアが冷却すると惑星進化は第二段階に入る。この段階では、マントルにおける放射性元素の強い内部発熱のため、下部マントルから間欠的に大規模はマントル湧昇流が発生し（バースト）強い火成活動が起こる。バーストによる撹拌のためマントルは比較的均質に保たれるが、火成活動により生成された玄武岩の一部はコア・マントル境界上に溜まる。プレート運動はカオティックである。さらに時代が下りマントルの内部熱源が減衰すると惑星進化は第三段階に入る。この段階ではプレート運動は安定化しコア・マントル境界には沈み込んだ玄武岩地殻の溜まりすなわち玄武岩パイルが形成される。玄武岩パイルのため、コア・マントル境界での熱流量には大きな水平不均質が生じる。地球ではコアの熱容量が小さいため第一段階は冥王代の最初期に限られ地質調査によっても検出される可能性は低いが、コアの熱容量がマントルの二倍ある惑星では、第一段階が十億年以上続くと期待される。コア・マントル境界での熱流とその分布はダイナモを駆動するうえで重要な役割を果たしており、磁場を観測することによりその惑星の進化の段階を推測できるのではないかと期待される。

O7-02

Disk Model を用いた小規模天体の重力場計算

○金丸仁明[1]　佐々木晶[1]　佐伯和人[1]

[1]大阪大学大学院理学研究科

近年、小惑星をはじめ、小規模でより始原的な太陽系天体への探査の機運が高まっている。

小惑星が周囲に作る重力場は、天体の形状や地形、内部構造といった物理的な特徴を反映するものである。惑星探査ミッションにおいては、探査機の軌道を追跡することで天体の重力場を測定している。一方、小惑星のシェイプモデルは、地上からのレーダー観測をもとに作られる。探査を行えば、カメラの画像やレーザー高度計による地形データに基づいてより詳細なシェイプモデルを作ることができる。小惑星はバラエティに富んだ構造、密度分布の多様性をもっており、自転軸のふらつきから重心と形状中心のずれもわかってきている。

Yu Takahashi, D.J. Scheeres (2014)では、Castalia と 1999KW4 の二つの小惑星について、密度一定を仮定した場合と適当な密度分布モデルを仮定した場合とで球面調和関数を比較して、小規模天体の重力場の観測データから内部構造を推察する手法が提案されている。小惑星の重力場を考えるときに問題となるのは、天体内部の密度分布の自由度が高いため、周囲の重力場からユニークに決定することが困難だということである。そこで、いくつかの密度分布モデルを仮定して重力場のシミュレーションを行い、観測データと比較することが重要である。

本研究では、Disk Model に着目して小惑星の重力場のシミュレーションを行っている。適当な半径、厚さ、密度といったパラメータを与えた円盤のポテンシャルを計算し、その重ね合わせによって天体の形状や密度分布を表現する。円盤の対称性を用いてパラメータを減らし、内部の密度分布を逆問題的に解くことを目指す。これまで Itokawa や OSIRIS-REx　(NASA) の目標天体である Bennu を対象に、重力場の観測データやシェイプモデルを用いて研究を行ってきた。シェイプモデルから密度一定を仮定して重力場を計算し、そこに円盤状の密度異常を仮定して重力場の計算を試みた。

今回はこれまでの経過や今後の展望について報告する。

O7-03

氷とアンモニアの融解曲線から推測する
天王星と海王星の内部構造

○ 木村友亮
愛媛大学　地球深部ダイナミクス研究センター

はじめに

天王星や海王星の氷惑星の内部磁場は非双極的でかつ非軸対称であり、他の地球型惑星やガス惑星のそれらとは異なった特徴を持つことで知られている。ダイナモ計算は岩石コアよりも浅い氷層の領域に非対流層が存在することでこのような磁場が生成されることを示した。その後、第一原理計算に基づいた内部構造モデルは氷の融解曲線が惑星の断熱温度勾配曲線と交差することを予想し、氷がこの非対流層を構成している可能性を示した。このように、ダイナモ理論と第一原理計算の予想から内部構造の理解が進んだが、これら内部物質の融解曲線は実験的に確かめられておらず、非対流層を含めた内部構造モデルの検証が行われていない。本研究では、氷層の主要物質である氷(H_2O)とアンモニア(NH_3)の高圧融解曲線を実験計測し、その結果を基に、天王星と海王星の内部構造を考察する。

実験方法

試料をダイヤモンドアンビルセルで加圧し、CO_2 レーザーを用いて加熱を行った。融解に伴う加熱効率の不連続な変化に基づいて試料の融点を決定した[1]。サイモンの式を用いて得られた融点データをフィッティングし、融解曲線を決定した。

結果と考察

本研究で得られた氷の融点は、70 GPa で 1400 K と、第一原理計算のそれよりも十分に低く、天王星と海王星内部では氷として存在していないことがわかった[1]。一方、アンモニアの融点は 45 GPa で 2500 K と氷よりも十分に高く、また、本研究も含めた実験計測点により見積もられた融解曲線は、天王星と海王星の断熱温度勾配曲線と交差することがわかった。つまり、アンモニアは氷惑星の深部で固体として安定であることが明らかになった。固体のアンモニアは、液体よりも粘性が低いことが予想されるため、対流を抑制し、非対流層を構成している可能性が考えられる。従って、非対流層は、これまで提唱されていた氷ではなく、アンモニアで構成されている可能性が高い。

参考文献

[1] T. Kimura, Y. Kuwayama, and T. Yagi., J. Chem. Phys. **140**, 074501 (2014).

O7-04

ケプラー衛星データに基づくハビタブル惑星候補に関する海洋質量及び液体の水の保有率の推定と考察

◯ 堂ケ崎知誠 [1]

[1] フリーランス天文ライター

最近の研究により，ハビタブルゾーンの構造がより一層明らかになってきた．現時点では多数発見されている系外ハビタブル惑星候補の海洋についての物理的な情報は何も得られていない．Kopparapu の理論モデルによると，太陽系において既知である地球の海は暴走温室効果限界で完全に消失すると推定されている．このときの平衡温度はアルベドを 0.3 と仮定しておよそ 1813.3615K に達すると計算から予想した．これらを踏まえて Kasting et al. 1993 の惑星のフラックスの数式及び熱量保存則を用いて距離及び平衡温度を同時に変化させ，惑星が持つフラックスの流量を増減させることで，暴走温室効果限界に対する地球の海洋質量は 1.48×10^{21} kg であると導き出した．さらにこのとき，海洋質量を惑星質量で規格化して表すことができる液体の水の保有率は 0.00024(〜0.024%) である．この値を 1.0 として，表面に液体の水を持つ能力を有する惑星の液体の水の保有率を”ハビタブル指数 (居住可能指数)”と呼んでいる．これらは系外衛星にも応用が可能である．さらに全微分することでアルベドが 1 の地点に対するアルベドの損失率及び液体の水の消失率を記述できる．また惑星が星から受ける熱量が 0 の時，液体の水が氷へ相転移する氷点距離を推定することもできる．太陽系の場合，地球の海は 2AU で氷になると予想した．

本研究では NASA Exoplanet Archive の公開データを用いて，平衡温度が 180〜260 K の範囲で液体の水を保有していると見込める系外惑星 51 個と比較対象となる地球と火星について取り扱った．その中でも特に地球と同等の海洋質量及びハビタブル指数を持つ惑星は M 型星周りの惑星 KOI-3138.01 及び G 型星周りの 2 個の惑星 KOI-5948.01，KOI-6108.01 を系外地球候補に分類した．惑星が表面に液体の水を多く持つにはハビタブルゾーンの内端から中心付近の領域に存在し，少なくとも惑星の半径は地球の 2 倍以上の大きさが必要で，中心星の有効温度またはスペクトルに依存しないという結論に至った．

本講演では，系外惑星の海洋質量及びその表面における液体の水の保有率の算出方法を提案すると共にこれら及び惑星の各種物理量 (半径，質量など) とハビタブルゾーンとの関係について議論する．

Exoplanetary System Dynamics: Planetary Multiplicity and Mass Effects

○磯江麻里[1,2], 小久保英一郎[2,1], Edwin L. Turner[3,1]

[1] 東京大学, [2] 国立天文台, [3] プリンストン大学

近年の系外惑星探査の観測技術の向上に伴い、複数の惑星からなる惑星系が多数発見されている。本研究では、2014 年 12 月までに視線速度法によって観測された 375 系 500 個の惑星と、ケプラー望遠鏡によって発見された複数惑星系の 365 系 899 惑星 (含む惑星候補天体) を用い、惑星数や惑星質量と惑星系の力学構造の関係を統計的に明らかにすることで、惑星系形成・進化モデルへの新たな制限の可能性を探る。惑星系は、系の惑星数、中心星の質量で規格化した惑星質量、中心星の進化段階の 3 個のパラメータで分類し、それぞれの惑星系の構造を統計的に調べた。惑星質量は 10^{-4} で二分し、中心星は主系列星と巨星に分けている。今回は特に惑星系の角運動量欠損 (AMD) とヒル半径で規格化した隣接惑星間軌道間隔に注目した。

その結果、系の AMD は惑星数の増加に伴い減少することがわかった (図 1)。これは系内の惑星が多くなるほど、系が安定であるためにはそれぞれの惑星の軌道が円軌道に近くなければならないことを意味する。また、KS 検定により、大質量惑星と小質量惑星の軌道離心率の分布は異なることがわかった。特に 0.4 より大きい軌道離心率は大質量惑星系にのみ存在する。更に、主系列星周りの小質量惑星系では、軌道間隔が 15-30 の範囲で惑星数との間にべき乗の反相関性があることが確認された (図 2)。また、中心星の進化が進むにつれ、軌道間隔が狭くなる傾向がある。

講演では複数惑星系の力学的構造の統計的性質についてまとめ、その形成論的な意味について議論する。

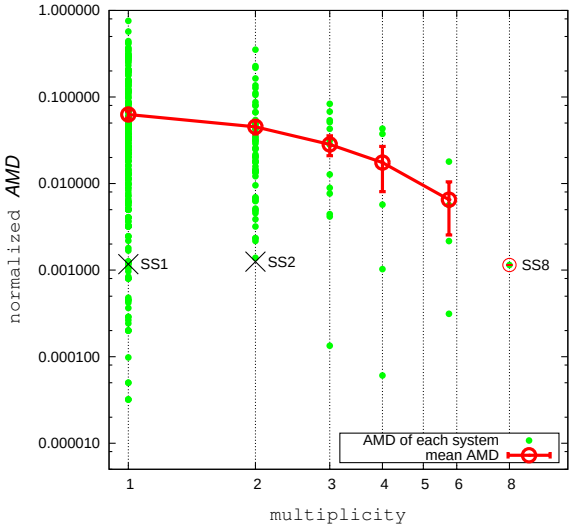


図 1: 角運動量欠損 (AMD) の惑星数依存性

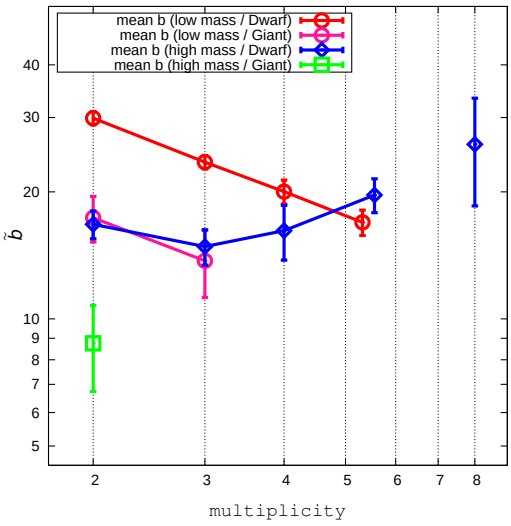


図 2: 軌道間隔/ヒル半径の惑星数依存性

O7-06

巨星周り系外惑星の電波放射の検討

○藤井友香[1], David S. Spiegel[2], Jason Nordhaus[3], Mehrdad Mirbabayi[2], Tony Mroczkowski[4], Aaron Parsons[5], Neil Zimmerman[6], Nikku Madhusudhan[7]

[1]東京工業大学地球生命研究所, [2]Institute for Advanced Study, [3]Rochester Institute of Technology, [4]United States Naval Research Laboratory, [5]University of California Berkeley, [6]Princeton University, [7]University of Cambridge

太陽系内惑星が惑星磁気圏と太陽風との相互作用で電波を放射していることから、系外惑星も同様の機構で電波を放射していると推測される。太陽系内惑星の観測から、恒星風のエネルギーと電波放射強度との間の比例関係（“電波のボーデ則”）が示唆されており ([1]) 、これに基づいた系外惑星の電波放射の見積りが行われてきた ([2]-[5]など)。中でも主星の近傍を周るホット・ジュピターは大きな恒星風のエネルギーを受けるため、木星よりも桁で大きな電波フラックスを持つと予想され、既存のあるいは将来の望遠鏡での検出も期待されている。

さて、惑星を持つ恒星がやがて進化し巨星段階に入ると、恒星の光度は何桁も上昇し、5AU 程度離れた軌道にある惑星でも典型的なホット・ジュピターと同程度まで高温になる ([6]) 。またこのとき恒星風の密度も 5-8 桁程度大きくなるため、上述の“電波のボーデ則”を外挿すれば、巨星周りの木星型惑星も強い電波源となる可能性がある。これをふまえて、これまでに提案されている電波放射強度と惑星磁場のスケーリング則を用いて巨星周りの木星型惑星の電波強度を見積った結果、これらの電波フラックスは木星の 2-3 桁程度大きくなり、ホット・ジュピターに対する見積もりと同程度になることが分かった。そこで、恒星風の電離度の低さや恒星風プラズマによる電波カットオフの影響などの巨星周りの惑星に特有の状況を考慮した上で、検出可能性を議論する。

[1] Desch, M. D., Kaiser, M. L. (1984) Nature, vol. 310, p. 755-757
[2] Farrell, W. M., Desch, M. D., Zarka, P. (1999) JGR, Volume 104, p. 14025-14032
[3] Zarka, P. et al. (2001) Ap&SS, Volume 277, Issue 1/2, p. 293-300
[4] Lazio, T. J. W. et al. (2004) ApJ, Volume 612, pp. 511-518
[5] Grießmeier, J. M., Zarka, P., Spreeuw, H. (2007) A&A, Volume 475, pp.359-368
[6] Spiegel, D. S., Madhusudhan, N. (2012) ApJ, Volume 756, article id. 132

O7-07

水溶液中におけるギ酸とメタンジオールの分解反応過程：量子化学計算による解明

○稲葉知士
早稲田大学国際教養学部

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

量子化学計算では、Gaussian09 ソフトウエアを用いて、それぞれの分解反応の活性化エネルギーを求めた。室温程度では、プロトンのドブロイ波長が活性化障壁の幅と同程度になり、プロトンのトンネル効果が重要となる。そこで、トンネル効果を考慮した分解反応の反応率を求めた。また、水溶液中での分解反応では溶媒である水分子が触媒となって、分解反応の活性化エネルギーを大きく下げる。そのため、水分子を含む超分子の分解反応を考えることによって、水溶液中での分解反応の活性化エネルギーを求めた。

水分子が分解反応に関わることにより、分子の最初の構造を大きく変えずにプロトンを移動させることが出来るために、活性化エネルギーを大きく下げることが出来た。水溶液中に存在する水分子同士は、隣の水分子と水素結合を形成することで水クラスタを形成することが知られている。水クラスタ内では、水分子間の距離が小さくなり、クラスタ内でのプロトンの移動が容易になる。そのため、水分子からなるクラスタは、分解反応の活性化エネルギーをさらに下げる。また、メタンジオールの分解反応では、メタンジオールの周囲に存在する水分子との水素結合も分解反応の活性化エネルギーを下げる働きがあることも明らかになった。量子化学計算で得られた分解反応率は、実験で得られた分解反応率と一致することが示された。本研究の成果は、海底熱水噴出孔における化学反応ネットワークの今後の理解において、量子化学計算が果たす重要な役割を示すものと考えられる。

[1] Inaba, S. (2014) The Journal of Physical Chemistry A, 118, 3026-3038
[2] Inaba, S. (2015) The Journal of Physical Chemistry A, 119, 5816-5825

O7-08

粘土鉱物を用いた核酸塩基の吸脱着関係

○橋爪秀夫[1]
[1]物質・材料研究機構

[はじめに] 粘土鉱物と生体有機物の吸着関係については古くから調べられており、特に、生命の起原と粘土の関係はバナールやケアンズ-スミスにより鉱物や粘土が生命の起原に何らかの役割をしたのではないかと言った[1,2]。生命の起原を目的とした粘土鉱物と生体有機物の相互作用の研究は、アミノ酸やその高分子または核酸や構成物質と粘土鉱物の吸着や粘土鉱物を触媒としたアミノ酸やヌクレオチドの高分子化などが行われている。粘土鉱物には層状や短冊状、チューブ状、中空球状の形体がある。多くの層状粘土鉱物は層間に陽あるいは陰イオンがあり、生体有機分子と層間イオンがイオン交換をすることが可能なものもある。その場合生体有機分子は層間イオンとして層と水素結合などで結合する。層間の生体有機分子を高分子化すると、分子が大きくなり他のイオンと交換が起こらない可能性もある。層状粘土鉱物の層間に核酸塩基をイオン交換により包接し、包接した核酸塩基の脱着を試みた。
[実験] 粘土鉱物は天然のワイオミング産モンモリロナイトを用いた。モンモリロナイトは超純水に分散し、2μm 以下の粒子を集めた。核酸塩基はアデニンを用いた。5mmol/dm^{-3} のアデニン溶液の pH を 1～9 までを準備し、その溶液 6cm^{-3}にモンモリロナイト 100mg を加えて 1 週間放置し、懸濁液の pH を測定した。遠心分離により固液を分離し、初期溶液と上澄み液を全有機炭素計(TOC)により分析し、初期濃度と上澄み液の濃度差から吸着量を求め、吸着量の pH 依存性を調べた。また pH2 のアデニン溶液 0.1dm^{-3}に、1g のモンモリロナイトに加え、20 時間撹拌し、アデニンを包接した。固相 100mg に超純水 6cm^{-3}を加え 20 時間、遠心分離後、液相を TOC により分析し、脱着による吸着量を求めた。
[結果] アデニンの pH 依存について,pH が～3 では吸着量は約 0.2mmol・g^{-1}で一定であるが、pH4 付近から吸着量が減少し、pH8 以上ではほとんど 0 になる。これはアデニンの解離定数が 4.15 と 9.80 であることから pH が 4.15 以下では正電荷を持つことからモンモリロナイト層間のイオンと交換するためと考えられる。pH4 以上では正電荷から電荷がなくなり始め pH が 9.8 以上では電荷を持たなくなる。このため、吸着量は pH4 から減少し 8 付近でほぼ 0 になったと考えられる。脱着について、5mmol/dm^{-3} のアデニンでは吸着量は 0.2mmol・g^{-1} であり、超純水による脱着による吸着量は 0.003mmol・g^{-1} であった。pH を変化することによるアデニンの脱離について今後検討を行う。
[参考文献]1)Bernal,J.D. (1951) The physical basis of life. Routledge & Kegan Paul, London. 2)Cairns-Smith, A.G.(1982) Genetic takeover and the mineral origins of life. Cambridge University Press, Cambridge.

O7-09

氷天体の内部海における クラスレートハイドレート形成によるアンモニウムイオン濃度への影響

○西谷隆介[1]、谷篤史[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

氷天体の一部はアストロバイオロジーの場の一つとして考えられており、2022年にはESAによるガニメデを中心とした木星の氷衛星における生命活動可能性の調査（JUICEミッション）が計画されている。氷天体がアストロバイオロジーの場として考えられる理由として、氷殻の内側にある内部海の存在が大きい。観測、理論、実験の分野から研究がされており、氷殻の組成、熱の輸送、内部海での化学種の動態などについて検討が進んでいる（Sohl et al 2010、Spohn and Schubert 2003）。一方、内部海は低温・高圧力という条件のため、クラスレートハイドレートが生成しやすい条件となっている。クラスレートハイドレートとは、ゲスト分子（一般にガス分子であることが多い）が水分子でできた籠（ケージ）に包接された化合物で、理論的な考察によりエウロパ内部海においてその存在が予想されている（Pieto et al 2005）。

こうしたクラスレートハイドレートが内部海において生成する場合、メタンやCO_2などのガス以外にも取り込まれる分子が予想される。その一つがアンモニウムイオンである（Swongmin et al 2015）。アンモニウムイオンは生命活動に必要な窒素を含むイオンで、エウロパにおいて存在する可能性が議論されている（Kargel 2000）。内部海に存在するアンモニウムイオン（アンモニウム塩）の量の評価は、氷天体の生命活動可能性の議論に重要な役割を担うほか、内部海の融点にも影響すると考えられる。その過程においてアンモニウムイオンがクラスレートハイドレートにどの程度取り込まれてしまうのか、またそれが内部海のアンモニウムイオン濃度にどの程度影響するのかを評価する必要がある。そこで本研究では、クラスレートハイドレート形成による内部海のアンモニウムイオン濃度への影響を検討した。

実験では、クラスレートハイドレートのゲスト分子として、メタンやCO_2といったガス分子の代わりにTHF（テトラヒドロフラン）を使用した。その理由は、高圧ガスを使用せず、また温和な温度条件（0℃以上）でクラスレートハイドレートを形成できるためである。所定濃度のアンモニウムイオンを含むTHF水溶液を準備し、これを冷却することでTHFハイドレートを生成させた。その際、すべて固体にならないよう温度調節し、液体部分に含まれるアンモニウムイオンの濃度を紫外可視吸光光度計により測定した。定量法はインドフェノール法に従った。

予察的実験では、THFクラスレートハイドレートにアンモニウムイオンが取り込まれる様子が確認された。講演では、その影響について定量的に議論する。

地球低周回軌道における宇宙塵の捕集と有機物曝露：たんぽぽ計画開始と帰還後の分析計画

○小林憲正[1]・藪田ひかる[2]・矢野創[3]・三田肇[4]・癸生川陽子[1]・奥平恭子[5]，石橋之宏[6]，中川和道[7]・今井栄一[8]・田端誠[9]，河合秀幸[9]，橋本博文[3]・山岸明彦[10]・たんぽぽWG[3]

[1]横浜国大,[2]大阪大，[3]JAXA/ISAS,[4]福岡工大，[5]会津大，[6]九州大，[7]神戸大，[8]長岡技科大，[9]千葉大，[10]東薬大

炭素質コンドライトや彗星中にアミノ酸（前駆体）を含む多様な有機物が検出されたことなどから，地球生命の誕生に地球外有機物が重要な役割を果たした可能性が議論されている。地球外有機物の運び手をしては，衝突時の分解などのおそれが少ない微細な宇宙塵（惑星間塵）が重要であると考えられる。たんぽぽ計画は，国際宇宙ステーション曝露部で 2015 年 5 月に開始された日本初のアストロバイオロジー宇宙実験であるが，その中で，超低密度エアロゲルを用いて高速で飛来する宇宙塵等を捕集し，分析することや，宇宙塵中の有機物の宇宙での安定性を評価するためにアミノ酸関連分子の宇宙曝露を行うこと等が含まれる。本講演では実験の現状と，地上への回収に予定されている帰還後の分析計画について報告する。

たんぽぽ計画の概要　たんぽぽ計画は，微生物の惑星間移動の可能性や，宇宙塵による地球への有機物供給の評価などを目的とする複合的アストロバイオロジー実験であり，国際宇宙ステーションのきぼう曝露部に設置された簡易取り付け装置ExHAMに，捕集パネルと曝露パネルを取り付け，1–3年後に地上に回収，分析する予定である。捕集パネルには超低密度シリカエアロゲルを入れ，超高速で移動するダストを捕集する。捕集するダストには，宇宙塵の他，地球生物圏から脱出したダスト，スペースデブリなども含まれる。曝露パネルでは，金属板にあけた穴にアミノ酸や微生物等を入れ，これにMgF_2窓を付けて宇宙線および真空紫外線に曝露する。この他，１～3年宇宙環境に曝露する。今回曝露される有機物はイソバリンなどのアミノ酸と，その前駆体であり，遊離アミノ酸とアミノ酸前駆体の宇宙での安定性の比較を行う。装置は，2015年4月に米国で打ち上げられ，5月26日から曝露が開始された。

地上予備実験　高速で飛来するダストをエアロゲルで捕集可能かを検証するために，JAXA/ISASの二段式軽ガス銃を用いた予備実験を行いった。高速で射出したマーチソン隕石粉末をエアロゲルで捕集し，有機物の変成の可能性を調べた。また，曝露実験の予備実験としては，アミノ酸（グリシンなど）およびその前駆体（イソバリンなど）に紫外線や重粒子線などの照射を行い，宇宙曝露1年後の回収率を推定した。1年間の宇宙曝露により，遊離アミノ酸はほとんど分解するが，アミノ酸前駆体は数十%の回収率が予想された。

地球回収後の分析　実験開始後1年(2016年)で，最初の試料を地上に回収する予定である。回収されたエアロゲルは，宇宙研内のクリーンブース内で衝突トラックの3次元分析を行って，ダストの起源を推定する。その後，ダストを含む部分を「キーストーンマシーン」で切り出し，その後，「はやぶさ」帰還試料と同様な方法で局所有機物・鉱物・同位体分析を行う。また，抽出性有機物はHF処理により抽出し，二次元高速液体クロマトグラフなどを用いて兆微量のアミノ酸の定量を行う予定である。曝露有機物は曝露パネルからメタノールおよび水で取り出し，LC/MSなどでアミノ酸回収率と反応生成物の分析を行う予定である。

O8-01

はやぶさ 2 と今後の小天体探査

○渡邊誠一郎[1,2]、はやぶさ 2 統合サイエンスチーム[3]
[1]名大環境、[2]JAXA/ISAS、[3]はやぶさ 2 プロジェクト

小惑星探査機「はやぶさ 2」は 2014 年 12 月に打上げられ、2015 年 12 月の地球スイングバイを目前に控えている。探査対象天体は C 型の地球接近小惑星 1999 JU_3 であり、母天体における水質変成を記憶する含水鉱物の存在や有機物の存在などが期待されている。惑星の主要材料物質である、岩石、炭素質物質、氷がどのように集まり、混合され、物理的／化学的変化を遂げたのか、それと小惑星の表面反射スペクトル型の関係はどうなっているのか、地球への材料物質供給はどのように進行したのかなどという根本的な問題に対して、探査による実証のメスを初めて入れるのがはやぶさの成果を踏まえたはやぶさ 2 ミッションなのである。つまり、私たちは「小惑星からの惑星科学」を標榜している。

小天体からの SR 計画は目白押しである。米国による OSIRIS-REx 計画は B 型小惑星 Bennu からの SR を目指し，2016 年秋に打ち上げ予定である。さらに米国は彗星コアからの SR 計画も検討されている。日本でも、はやぶさ 2 に続く 20 年代前半の打上げに向けた戦略的中型ミッション計画として、火星衛星サンプルリターン（PD/SR）計画の検討が進められている。火星の衛星であるフォボスとデイモスは表面反射率が低く、鉱物の吸収に乏しく長波長側で反射率の高い（赤い）トレンドの可視-近赤外スペクトルを持つため、D 型小惑星に近いとされ、捕獲により形成された可能性がある。しかし，衛星の赤道面内で円に近い軌道は捕獲説では説明が難しく、火星への巨大衝突による破片円盤から形成されたとの論文もあり、成因は未だ不明である。PD/SR 計画は成因を明らかにするものと期待される。

そこで、本講演では、はやぶさ 2 のサイエンスに立脚して、今後の小天体からの惑星科学を展望したい。まずは、太陽系における物質輸送過程の解明が重要な柱となる。小惑星帯での天体移動、外惑星領域からの混入（巨大惑星移動の影響、彗星起源の小惑星など）、地球接近小惑星の供給と喪失、スペクトル型の起源、地球型惑星への物質供給（組成、供給率の時間変化）などが整理される必要がある。また比較小天体学も重要である。なにより微惑星のアナログ天体として、微小重力下での衝突特性などの物理特性を明らかにすること、表層の砂礫層やレゴリス層の様態・進化過程（火星衛星の場合、小惑星と比較した周惑星環境の特殊性の理解が重要である）、表面微粒子学（マイクロクレーター，微小溶融付着物，宇宙風化）などに興味が持たれる。さらに小天体での物質進化の解明は、宇宙における生命の準備過程（前生命進化）の理解に欠かせない。^{26}Al による加熱が母天体上での水質変成や有機物の多様化をもたらした証拠を SR で明らかにしていくことが求められる。

O8-02

地球外物質研究グループの発足と今後の展望

○ 安部正真[1,2], 岡田達明[1], 矢田達[1], 上椙真之[1], 唐牛譲[1], 中藤亜衣子[1], 橋口未奈子[1], 松本徹[1], 熊谷和也[1], 仲内悠祐[2]

[1]宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所

[2]総合研究大学院大学

2015 年 7 月 1 日付けで、地球外物質研究を強化するために、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所内に新組織である地球外物質研究グループが設置された。これまで「はやぶさ」帰還試料のキュレーション事業を業務として行ってきたキュレーションチームが中心となり組織されている。新組織では、地球外試料の受入・配分に加え、試料分析及び研究業務を行う。地球外物質研究を強化し、惑星科学の柱であるサンプルリターン探査におけるサンプル分析研究の中核拠点となるべく、定常組織として設置された。本グループは、科学成果の最大化を図るべく、機構外の研究者にも開かれた研究及び人材育成を含む事業へと拡大する。当面の活動として、具体的には、はやぶさ２やオシリス・レックスの試料受入準備を行うほか、はやぶさ帰還試料をはじめとする地球外物質試料等を用いた研究・教育活動を推進する。さらに、その後続くサンプルリターンミッションの企画立案・試料受入検討をはじめとし、今後のリターンサンプル研究を行う中核組織として、物質科学研究の推進と人材育成も行っていく方針である。新組織に配属される研究者自身も、サンプルの受入れ・配分の実務にとどまらず、研究に重点を置き研究成果の創出を行う。また新組織の研究者を中心に科学コミュニティーが集い、サンプル研究の拠点として成果最大化を図る体制を構築する。試料分析研究において最適な人材配置と分析能力の向上のための技術開発等を進める。これにより、取り扱う地球外試料のポテンシャルを引きだすような分析計画を企画し、科学成果の最大化を図ることができると期待されている。サンプルリターン計画は今後の惑星科学の柱となっていくものであり、国際協力が必須となる中、宇宙航空研究開発機構の中に置いても重要な組織として、リーダーシップを保持する人材を配置することで、国際的なサンプルリターン計画を推進する上で機構の地位の確保とともに、日本に有利な交渉を進めることが可能になると考えている。

O8-03

「はやぶさ」帰還粒子 RA-QD02-0265 の起源同定と小惑星表面における衝撃・風化作用

○上椙真之[1]、八亀彰吾[2]、Dennis Harries[3]、Falko Langenhorst[3]、唐牛譲[1]、矢田達[1]、岡田達明[1]

[1]宇宙航空研究開発機構

[2]東京大学

[3]*Friedrich Schiller University Jena*

人類初の小惑星からのサンプルリターンを成功させた探査衛星「はやぶさ」は、S 型小惑星イトカワからの微小なレゴリス粒子の採取に成功し、これまでの分析から、地上に飛来する隕石との関連、太陽系における固体物質進化、小惑星等の微小天体の進化に対し、多くの知見を与えてきた[1-20]。

この「はやぶさ」のキャッチャーからの粒子回収プロセスで、ピックアップされた履歴の無い粒子が保存先のスライドガラスや、電子顕微鏡観察用のホルダ上で発見されることがある。これはピックアップの際に破壊した粒子の一部や、ピックアップに使用するマニピュレータへの、ピックアップの際の顕微鏡の視野外への粒子の跳躍・付着などが原因と考えられている。

本発表ではこのような起源未同定の 20μm 程度の粒子、RA-QD02-0265 の走査型電子顕微鏡、電子プローブマイクロアナライザを用いた起源同定過程を紹介する。また、この過程で確認された、粒子表面の特徴的なナノスケールの衝突痕のクラスターの透過電子顕微鏡の観察結果によって得られた、小惑星表面での衝撃変成作用及び宇宙風化作用の相関などについて報告する。

References : [1] Nakamura et al. 2011. *Science* 333:1113-1116. [2] Yurimoto et al. 2011. *Science* 333:1116-1119. [3] Ebihara et al. 2011. *Science* 333:1119-1221. [4] Noguchi et al. 2011. *Science* 333:1221-1225. [5] Tsuchiyama et al. 2011. *Science* 333:1225-1228. [6] Nagao et al. 2011. *Science* 333:1228-1231. [7] Nakamura et al. 2012. PNAS 109:624-629. [8] Nakashima et al. 2013. *EPSL* 379:127-136. [9] Noguchi et al. 2014. MAPS. 49:1305-1314. [10] Tsuchiyama et al. 2014. MAPS. 49:172-187. [11] Mikouchi et al. 2014. EPS. 66:82 [12] Noguchi et al. 2014. EPS. 66:124 [13] Nakamura et al. 2014. MAPS. 49:215-217.[14] Noguchi et al. 2014. MAPS. 49:188-214. [15] Tanaka et al. 2014. MAPS. 49:237-244.[16] Harries et al. 2014. EPS. 66:163. [17] Keller et al. 2014. EPS. 66:75 [18] Langenhorst et al. 2014. EPS.66:118. [19] Wakita et al. 2014. MAPS. 49:228-236.[20] Ebihara et al. 2015 MAPS. 50:243-254.

O8-04

「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラTIRの軌道上動作確認

○岡田達明[1], 福原哲哉[2], 田中智[1], 田口真[3], 荒井武彦[1], 今村剛[1], 千秋博紀[4], 出村裕英[5], 小川佳子[5], 北里宏平[5], 関口朋彦[6], 神山徹[7], 中村良介[7], 松永恒雄[8], 長谷川直[1], 和田武彦[1], 滝田隼[9,1], 坂谷尚哉[1], 堀川大和[10,1], 斎田浩太郎[9,1], 遠藤憲[5], Joern Helbert[11], Thomas Mueller[12], Axel Hagaermann[13], はやぶさ2・TIR チーム

[1]ISAS/AXA, [2]NICT, [3]立教大, [4]千葉工大, [5]会津大, [6]北海道教育大, [7]産業総合研, [8]国立環境研, [9]東京大, [10]総合研究大学院大, [11]DLR, [12]MPE, [13]オープン大

「はやぶさ2」搭載の中間赤外カメラ(TIR)は、小惑星表層からの熱放射を2次元撮像するための観測装置である。検出器には 328x248 有効画素からなる2次元ボロメータアレイを用い、内蔵ペルチェ以外の冷凍装置は不要で、装置全体が小型軽量である。市販サーモグラフィ装置をベースに宇宙仕様化し、金星探査機「あかつき」に搭載されている LIR[1]と同設計であるが、小惑星観測用に広い温度観測域をもつようチューニングし、地上較正を行った。「はやぶさ2」は 2014 年 12 月 3 日に H-IIA ロケットによって種子島宇宙センターから打ち上げられた。各機器の健全性確認や機能・性能評価を順に進め、イオンエンジンによる軌道修正を行い、2015 年末の地球スイングバイに向けて準備が続けられている。

TIR は 12 月 11 日に健全性を確認した後、12 月 17 日に性能確認を行い、以後に毎月 1 回の割合で性能確認、および機器温度設定を変えて検出器出力の変化量を調査している。この目的は、小惑星観測の開始が打ち上げから 3.5 年後であり、宇宙環境下で劣化が生じる場合の経時変化を追跡しておくこと、そして小惑星近傍の低高度での観測時に、小惑星からの熱放射を受けることによって機器温度が上昇する場合の補正手段を、軌道上で確立しておくためである。

TIR の画像出力は積算無しの場合と、128 枚積算の場合を取得している。画像出力は積算無しの場合は 12bit であるが、積算する場合は積算枚数分が加算され、画像処理のために低減されて 15bit になる。TIR の画像のバックグラウンドのばらつきレベルは 12bit 相当で±1 諧調であり、打ち上げ前と変化ない。また、不良画素の増加はなく、適切に温調されている限り異常はみられない。温度感度については温度と熱放射率が既知の対象を観測する必要があるが、その機会は直近でも地球スイングバイ時の地球と月のみである。普段は深宇宙を観測しており、システム熱真空試験時の恒温パネル(冷却時:-110℃)と比較して 30 諧調以上低く、精度は低下するものの-110℃以下も測定可能なことが確認された。一方、高温側は少なくとも 150℃は測定可能なことが地上試験で確認済みである [2]。機器温度依存性の調査については、0.1℃精度の議論には無視できない変化がある。機器温度と出力値には良い線形関係が見られており、今後、0.1℃精度の議論に定量性を担保すべくデータを蓄積してゆく予定である。

地球スイングバイ時の地球と月の観測は、既知温度の対象を熱撮像できる打上後唯一の機会である。また地球と月が両方写る配置の画像は、中心位置のずれ(アラインメント)だけでなく、回転方向のずれを確認できる貴重な機会でもあり、是非活用したい。輝度と指向ベクトル方向の両方の確認が可能なように調整中である。発表では、TIR の軌道上動作確認の最新状況と、地球スイングバイ時の観測運用計画について紹介する。

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

O8-05

炭素質コンドライト隕石の母天体変成の系統的研究：はやぶさ 2 データの「始原性」の評価に向けて

○小松睦美[1], Timothy Fagan[2], 山口亮[3], 三河内岳[4]
[1]総研大, [2]早稲田大, [3]極地研, [4]東大

炭素質コンドライト隕石は、それぞれの隕石種ごとに様々な程度の母天体変成を受けている。「はやぶさ2」探査の対象としている小惑星 1999JU3 の始原性を評価するためには、隕石種を横断した母天体変成プロセスを理解する必要がある。本研究では、様々な程度の母天体変成を受けた CV、CO、CR コンドライト隕石について、ラマン分光スペクトルと鉱物学的特徴とを組み合わせた変成度の比較を行い、「始原性」の評価を試みた。

ラマン分光スペクトルの特徴

隕石のラマン分光分析による不溶性有機物(IOM)の進化の観察は、熱変成度の推定に有効な手段である(e.g., [1][2])。先行研究では、砕いた隕石試料を用いた G-band(~1600cm^{-1})と D-band(~1350cm^{-1})の分析がされているが、本研究では、鉱物学的観察も並行するため、薄片試料と研磨試料を用いた分析を行った。本研究による研磨試料の分析でも、CV 隕石である Efremovka, Allende は先行研究の値と近い値を示し、分析の整合性が得られた。

本研究で用いた試料では、CR 隕石(NWA1152, Y791498, A881595, A881828)と Y-81020(CO3.05)は高い FWHM-D(full width at half maximum of the D-band)値(>200 cm^{-1})を示し、I_D/I_G (ratio of intensities of the D- and G-bands)は低い値(<1.06)を示し、また試料間の両値のばらつきも比較的少ない。これは熱変成を殆ど受けていないことを示唆している。一方で、CV 隕石(南極産・非南極産)は試料毎に異なる FWHM-D と I_D/I_G を示す。特に Allende は最も低い FWHM-D 値と I_D/I_G 値を持ち、熱変成が進んでいることを示している、CO 隕石は、岩石学タイプ 3.05 である始原的試料 Y-81020 の 1 試料のみ分析を行った。FWHM-D 値、I_D/I_G 共に CR 隕石と近い値を示し、熱変成を殆ど受けていないことを示唆しているが、始原的 CO 隕石は CR 隕石に比べて、低い蛍光(background)を示す。

鉱物学的特徴との関連性

上記で分析した同試料の鉱物学的観察及び化学組成から推測する熱変成度の程度は、ラマンの特徴と概ね合致している。CR 隕石は、熱変成の面では始原的であるが、水質変成を受けている為、鉱物学的観察により水質変成の度合いを正しく評価する必要がある。CV 隕石でも、一部の隕石は CR 隕石に近いラマンパラメーター値を持ち、熱変成の影響の少ない試料も存在している。今後は、CR 隕石のより詳細な変成度の評価及び CM 隕石との比較を行い、母天体での変成プロセスについて検証することで、「はやぶさ 2」データ解釈への応用を目指す。

[1] Quirico et al. (2003) Meteorit. Planet. Sci., 38, [2] Bonal L. et al. (2006) *Geochim. Cosmochim. Acta, 70,* 1849-1863. 795–881.

O8-06

走査-結像型X線顕微CT法を用いた水・有機物の３次元観察法の開発：はやぶさ２サンプル分析に向けて

○土`山明[1]、竹内晃久[2]、上杉健太朗[2]、鈴木芳生[2]、中野司[3]、三宅亮[1]、
松野淳也[1]、マイケルゾレンスキー[4]
[1]京都大学理学研究科、[2]JASRI/SPring-8、[3]AIST、[4]NASA/JSC

小惑星探査機はやぶさ２はC型小惑星1999JU$_3$からサンプルを採取し、2020年12月に地球帰還予定である。採取予定のサンプルは水質変成を受けた炭素質コンドライトあるいは類似物と考えられ、鉱物・水・有機物から構成されていると考えられる。炭素質コンドライト中の水のほとんどは水酸基あるいは水分子として含水鉱物中に存在するが、液体の水も水質変成により生成された炭酸塩などの鉱物粒子中にミクロンイズの流体包有物として存在している可能性が高い[1]。また、空隙は流体が水質変成時にかつて存在した痕跡と捉えることができる。一方、ミクロンサイズの様々な形状をもつ有機物(例[2])が存在しているが、無機物(鉱物)-空隙(流体)-有機物が複合体としてどのような組織をもっているかはよくわかっていない。これらの３次元構造は、無機物-水-有機物の相互作用がどのようにして起こったのかを知るために重要であるだけでなく、非破壊で得られた流体や有機物の３次元分布の情報は、その後の詳細な局所分析をおこなうためにも極めて有効である。従って、このような情報を得るための手法開発は、炭素質コンドライトの水や有機物や起源を探るだけでなく、はやぶさ２サンプル分析の準備のためにも必要不可欠である。

我々の研究グループは、これまで炭素質コンドライト中の鉱物粒子から流体包有物を非破壊で３次元的に探査する手法を開発してきた。この手法では、薄片の光学顕微鏡・SEM観察により求めた関心領域について、FIB（集束イオンビーム）マイクロサンプリングにより目的の鉱物粒子を切り出し、結像型吸収X線CTによりそのサブミクロンでの空間分解能で３次元構造を求めるものである。これにより流体包有物候補（数-10μm程度）を見出すことができたが、その吸収コントラスト像のみからは包有物中に流体が残っているかを判断することはできなかった[1]。走査-結像型X線顕微CT（SIXM）を用いることにより、吸収コントラスト像と同時に位相コントラスト像を３次元的に取得することが可能となり、流体の存在の有無の確認だけでなく、微細組織中での有機物と空隙との識別ができる可能性もある。

本研究では、このような手法の確立とはやぶさ２サンプル分析の準備を目的として、いくつかの試料のSIXM撮影実験をおこなった。まず比較的単純な組織をもち確実に流体あるいは有機物をもっている参照試料として、流体包有物を含む石英試料（変成岩中）および二枚貝（クロタイラギ）の撮影をおこない、それぞれ流体や有機物の存在を位相コントラストから定量的に確認できることを明らかにした。さらに、流体包有物候補をもつ炭素質コンドライト隕石試料のSIXM撮影をおこない、２つのX線エネルギーを用いた吸収コントラストによる鉱物の同定(analytical dual-energy tomography [4])を併用することにより、それぞれの構成物の同定とその３次元分布を得ることを試みた。

[1] Tsuchiyama et al. (2014) *MAPS*, 49: A404.
[2] Matsumoto et al. (2013) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 116: 84.
[3] Takeuchi et al. (2013) *J. Synchrotron Rad.*, 20: 793.
[4] Tsuchiyama et al. (2013) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 116: 5.

かぐやデータの統合解析用 WebGIS システム（KADIAS）の開発

○石原吉明[1]・大嶽久志[1]・増田宏一[1]・藤田岳人[2]・山本彩[2]・大竹真紀子[1]・春山純一[1]
[1]宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所　[2]リモート・センシング技術センター

アポロ計画以降最大の月探査であった「かぐや」は、地形カメラ・マルチバンド分光カメラをはじめ、多種多様な観測機器を搭載し、多くの月観測データをもたらした。それらの生観測データから各機器チームにより、校正・解析されて生み出された科学データプロダクトは、「かぐやデータアーカイブシステム（http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/）」を通じて一般公開されている。これまでに「かぐや」により得られた月観測データをもとに、多くの査読論文が出版されており、月科学の発展に大きく貢献してきた。しかしながら、日本では「はやぶさ」や「かぐや」以前に独自の探査機で得た探査データが無かったことから、月惑星探査データの解析を行う研究者は少なく、またデータのアーカイブに用いられる独特なファイル形式（Planetary Data System; PDS 形式）なども障害となり、探査データ解析の裾野の広がりは鈍い状態である。また「かぐや」ミッションでは搭載された複数の観測機器のプロダクト（地形・鉱物・元素・重力場・磁場・地下構造など）を組合せた解析（統合解析）により、月の起源と進化に迫ることを目指していたが、各研究者は専門分野以外のデータの取扱いに必ずしも精通しておらず、これまで本格的な統合解析の例は少ない。このような状況を打破し、「かぐや」データの利用拡大や探査データ解析に携わる研究者人口の拡大、統合解析のさらなる促進を目指して、新たにウェブアプリケーションの開発を行った。

我々は学部生レベルの初学者や、これまで探査データの解析を行ってこなかった研究者が、最初に壁を感じるファイル形式の問題を解消し、また基礎的なバンド演算等の簡易解析がウェブブラウザ上で可能な、KAguya Data Integrated Analysis System (KADIAS)（http://kadias.selene.darts.isas.jaxa.jp/）を開発した。KADIAS では研究者の興味に応じ、月面上の任意の場所について、WebGIS 上でインタラクティブに多種のデータを確認・比較・簡易解析を行い、必要なデータや解析結果を一度に取得可能となっている。また、データは物理量変換済みの GeoTiff 形式、地理情報付きのバイナリ配列形式もしくは単純な可視化済みの画像ファイルで取得出来、PDS 形式を意識せずに一般的なアプリケーションで利用可能である。これらの機能はこれまでの「かぐやデータアーカイブシステム」にはなかった機能であり、探査データ解析の初学者だけでなく、すでに探査データの解析を行っている研究者にとっても、データ解析、論文や各種資料用の作図の効率化の面で有用である。KADIAS は本講演会の開催時には一般公開の予定であり、本システムにより「かぐや」データを利用した研究、ひいては月惑星探査データ解析の裾野が広がることを期待する。

O9-02

月高地地殻に含まれる輝石の化学組成から推定するマグマオーシャンの初期組成

◯大竹真紀子[1]，山本聡[2]，松永恒雄[2]，小川佳子[3]
1:JAXA/ISAS 2:国立環境研究所 3:会津大

はじめに：月の全球組成，特にケイ酸塩部の全球組成を推定することは月と地球の組成を比較する上で重要である．月と地球の組成を比較することは，月の形成過程として最も有力な巨大衝突説で想定される衝突において，月を構成する物質がどの程度，それぞれ地球と衝突天体を起源とするのかを知ることになり，さらに巨大衝突による地球型惑星形成過程の検証や衝突条件を制約することにも繋がる．月のケイ酸塩部の全球組成はこれまで，地球物理的な観測による月質量など制約や，月試料の分析値を基に地球と月間での組成類似性を仮定した値を基に推定されてきた．本研究では，月探査衛星の観測データを用いてこれを実測値から求めることを試みた．

解析手法：今回着目するのは高地地殻中に含まれる輝石の化学組成である．「かぐや」によって得られた月面反射スペクトルを用い，鉱物種・鉱物組成によって変化する吸収中心波長の情報から輝石の化学組成を求めた．一方で，岩石学的なマグマオーシャンの分化モデルから，初期のマグマオーシャンのAl/Ca比に応じて，そこから形成される地殻中の苦鉄質ケイ酸塩鉱物（輝石）の組成が変化する性質が知られている．この性質を使い，実測から求めた輝石の化学組成から初期マグマオーシャンのAl/Ca比について考察した．

結果と考察：月高地地殻の表層（混合層）と，それより下部にある初期地殻を構成する主要な岩石相（ほぼ100%純粋な斜長岩）の反射ルペクトルの解析から，表層と初期地殻の主要な岩石相の両方で，含まれる輝石として量的に最も多いのは低カルシウム輝石であることが解った．マグマオーシャンの分化モデルからは複雑な高地地殻形成過程を考えない限り，初期マグマのAl/Ca比がコンドライト的な組成の場合，高カルシウム輝石より多くの低カルシウム輝石を地殻中に結晶化させることができない．よって今回の解析結果は，初期マグマオーシャンのAl/Ca比がコンドライト的では無いことを意味する．これは全球規模で実測値から初期マグマオーシャンのAl/Ca比に制約を与えた最初の例であり，今後，定量的にAl/Ca比に制約が与えられる可能性を示す．

O9-03

月探査機「かぐや」の連続スペクトルデータを用いた海の玄武岩の鉱物組成の推定

○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]
[1]名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻 [2]宇宙航空研究開発機構

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の内部の大規模な構造変化の有無を理解する上で，月の海の玄武岩の組成を調べることは有効である．玄武岩の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り，それによって月マントルの進化モデルを制約できると期待される．月の海を構成する溶岩流の噴出年代とチタン含有量の関係を調査したこれまでの我々の研究から，約 23 億年前を境にしてチタン含有量が有意に上昇していることが分かっている．このチタン含有量の違いはマグマソースの違いであると考えられ，23 億年前以前を「Phase-1 火成活動」，23 億年前以後を「Phase-2 火成活動」と呼ぶこととする．そして，Phase-2 火成活動は嵐の大洋・雨の海の一部の領域で短期間に集中して起きていること，選択的に高いチタン含有量であることから，月深部に起源を持つホットプルームによるものであるという仮説を提唱している．

月の熱進化モデルを議論するためには，玄武岩のチタン含有量だけでなく，鉱物量比や他の元素組成を調べることが重要である．これまでには，アポロ・ルナの岩石試料やリモートセンシングデータを用いた月の海の玄武岩の研究によって様々な月マントルの構造や玄武岩のマグマソースのモデルが提案されてきた．しかし，Phase-2 火成活動期のアポロ・ルナ試料は存在せず，月探査衛星「チャンドラヤーン-1」による反射スペクトルデータを用いた海の玄武岩の研究では，波長分解能の不足のために，鉱物量比の定量的な議論にまでは至っていない．本研究では，月探査機「かぐや」の高波長分解能・高 S/N のスペクトルデータを用いて，月の海の玄武岩の鉱物量比や元素組成を調べることで，Phase-2 玄武岩のマグマソースが月マントル内部のどこであったか議論する．本発表では，嵐の大洋・雨の海領域の代表的な High-Ti 玄武岩(Phase-2)・Low-Ti 玄武岩(Phase-1)のスペクトルの特徴の違いについて議論する．

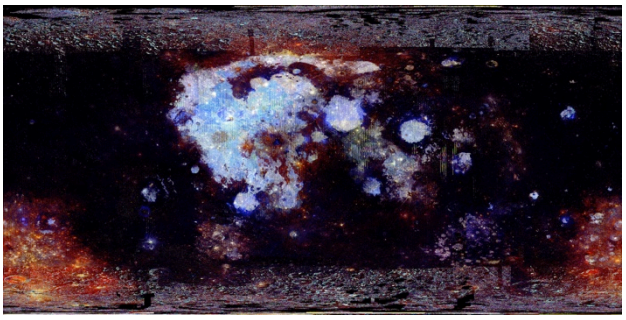


図 1 月全球の吸収深さマップ(R:950nm，G:1050nm，B:1250nm)

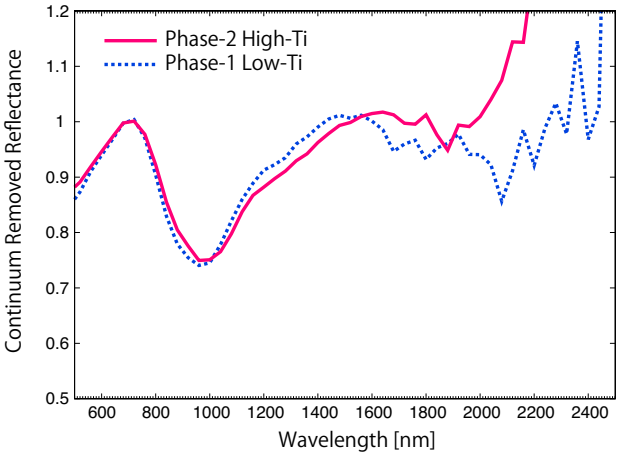


図 2 High-Ti 玄武岩(Phase-2)・Low-Ti 玄武岩(Phase-1)のスペクトル

O9-04

「かぐや」搭載α線検出器 ARD による 月面ラドンガス放出の時間変動の観測

Time variation of radon gas emanation on the lunar surface observed by the Kaguya /ARD

○小島浩一[1]，木下克之[1]，伊藤真之[1]，高島　健[2]，三谷烈史[2]，西村　純[2]

他 ARD チーム

[1]神戸大学大学院　人間発達環境学研究科，[2]宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

月表層下に含まれる ^{238}U は崩壊過程で ^{222}Rn を生じる．ラドンは希ガスであるため，その一部は裂孔や断層などを通り月面上に放出される．^{222}Rn は半減期 3.8 日で 5.490MeV のα線を放出して崩壊し，半減期 22 年の ^{210}Pb を経て生成した ^{210}Po は半減期 138 日で 5.304MeV のα線を放出して崩壊する．従って ^{222}Rn のα線は観測前数日間のラドンガス放出の指標となり，^{210}Po のα線は過去数十年のガス放出の累積分布の指標となる[1]．このようなα線は Apollo 15, 16 [2] 及び Lunar Prospector [3]によって検出されたが，統計精度の限界等のために，それぞれのミッションでラドンα線強度の時間的変化を解析するには至らなかった．我々は，月周回衛星「かぐや」（SELENE）に搭載された大面積のα線検出器（ARD）によって得られたデータを解析し，ラドンガス放出の指標である ^{222}Rn のα線強度の時間的変化を初めて直接的に確認した．

ARD の観測期間 2008 年 1－6 月を，ほぼ全球が観測される 2 週間ごとに区分し，各期間について sliding-window アルゴリズムを用いて ^{222}Rn のα線シグナルを評価した．この結果，統計的有意性が 4σ 以上のイベントを 10 件検出した．検出領域には，雲の海，雨の海，及び月の裏側では初の ^{222}Rn　α線シグナル検出となるモスクワの海周縁部等が含まれる．検出された全てのイベントでラドンガス放出の継続時間は 2 週間以下であることが確認された．

今回得られた結果から，月面のラドンガス放出が比較的短い時間スケールの現象であり，放出箇所も変化することが確認された．今後，ラドンガス放出が検出された場所，時間について他の観測情報との比較解析を行ないたい．なお，上記イベントのいくつかについて，NASA/Lunar Impact Monitoring Program のデータを調べたが，対応する時期に衝突発光の記録はなかった．

References

[1] H. W. Kraner et al., Science, 152, 1235, 1966

[2] P. Gorenstein, P. Bjorkholm, Science, 179, 792, 1973

[3] S. Lawson et al., Journal of Geophysical Research, 110, E09009, 2005

[4] J. Nishimura et al., Advances in Space Research, 37, 34, 2006

月形成初期の全球膨張説
～線状重力異常上の地形学的・物質科学的特徴からの制約～

○澤田　なつ季[1]・諸田　智克[1]・加藤　伸祐[1]・石原　吉明[3]・平松　良浩[2]
1 名古屋大学　2 金沢大学　3 宇宙航空研究開発機構

月はマグマオーシャン（LMO）の状態から始まり、その後マントル再溶融による火山活動があったと考えられているが、LMO 固化～マントル再溶融までの熱進化の経緯については明らかになっていない。その一つの原因は、月歴史の初期は天体衝突の頻度が高かったために、それ以前に起こったであろうマグマ活動やテクトニクスの情報が、天体衝突によって不明瞭になっているからである。一方、Andrew-Hanna et al. (2013) は月の重力分布図から線状重力異常（LGA）を発見し、その成因が月歴史初期の全球膨張によるマグマの貫入であると推定した。

我々は LGA に着目して(図 1)、月初期の全球膨張とマグマ貫入説の検証を行ってきた。20 箇所の LGA を研究対象として、LGA 周辺の地形学的解析に基づいて、大多数の LGA(20 ヶ所中 18 ヶ所)では谷のような構造を示すことを明らかにした。このことから LGA 上の地形は月形成初期の全球膨張に起因する伸張場で形成したと考えられる。

LGA がマグマ貫入起源と仮定すると、その後の天体衝突により貫入岩が表面に露出した可能性がある。そのような露頭の発見は、LGA がマグマ貫入起源である仮説に対する最も直接的な証拠となる。そこで我々はかぐやのマルチバンドイメージャー(MI)[2]データから Fe・Ti 含有量[Otake et al. 2012]や表面のスペクトルの吸収深さを用いて、LGA 近傍で貫入岩の露頭を探索した。貫入岩と特定できる露頭は発見されていないが、部分的に高い Fe 量を示す領域が存在した。講演では、表面のスペクトルの吸収深さの特徴からこれらの高 Fe 領域の起源が貫入岩によるもの、地殻の下部物質によるものかについて議論する。

[1] LOLA Date Archive (http://imbrium.mit.edu/LOLA.html)
[2] Kaguya Date Archive (http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja)

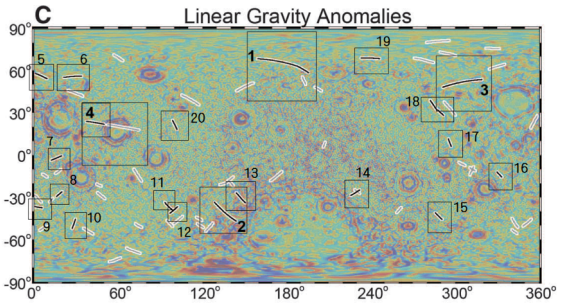
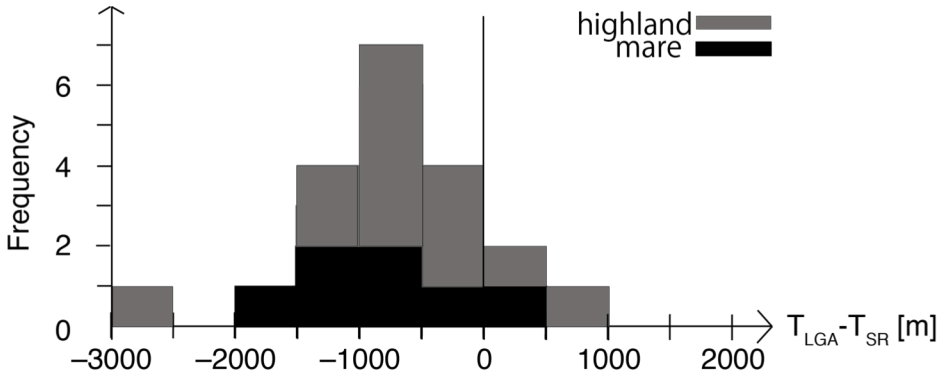


図 1(左図)LGA の分布図
[Andrew-Hanna et al., 2013 より加筆]
図 2(下図)
各 LGA 上の標高 T_{LGA} と周辺標高 T_{SR} の差を表したヒストグラム



O9-06

月の縦孔・地下空洞探査（UZUME）計画の
ミッションとシステム構想　II

○春山 純一、西堀 俊幸、山本 幸生、岩田 隆浩、鈴木 絢子、山本 圭香、永松 愛子、石原 吉明、河野 功、大槻 真嗣(宇宙航空研究開発機構)、諸田 智克、西野 真木（名古屋大学)、清水 久芳、宮本 英昭（東京大学)、白尾 元理（惑星地質研)、橋爪 光、佐伯 和人（大阪大学)、小林 憲正（横浜国立大学)、横堀 伸一、山岸 明彦（東京薬科大学)、押上 祥子（国立天文台)、長谷部 信行（早稲田大学)、長谷中 利昭（熊本大学)、道上 達広（近畿大学)、横田 康弘、山本 聡（国立環境研究所)、小松 吾郎（ダヌンツィオ大学)、小林 敬生（韓国　地質資源研究院)、道川 祐市（放射線医学総合研究所)、有隅 仁（産業総合研究所）

SELENE（かぐや）地形カメラにより、数10m直径・深さを持つ縦孔が、マリウス丘、静の海、そして賢者の海に発見されている。また、その後の観測により、これらの縦孔、そしてこの縦孔を天窓として地下空洞が広がっていることが確認されてきている。我々は、これら縦孔、地下空洞の探査を、UZUME (Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration)計画として、提案してきた。これまでの議論により、初号機としては、技術実証、それに続いて、サンプルリターンを含む月縦孔・地下空洞の詳細科学調査、そして、その先に、生命探査を含む火星の縦孔・地下空洞探査となる3号機を2030年までに行うというプロジェクトシナリオを考えている。

初号機は、縦孔へのアプローチ、降下、縦孔底・地下空洞観測が課題である。アプローチの方法としては、現在二通りで考えている。一つは、ロボットシステムによる月面移動、もう一つは、投てきシステムによるアプローチである。いずれの技術も今後の月探査・月開発に有用な技術である。初号機における科学ミッションの詳細は、現在、検討中であるが、まずは未だ誰も訪れたことの無い月縦孔、地下空洞の地形、物質情報の集積を中心と考えている。そのほか、温度計測、放射線計測を検討している。

ところで、孔底への直接軟着陸ということも、技術実証としてのみ考えるならば、挑戦がいがあるものである。しかし、縦孔底には、水など、希少で科学的な価値の高い揮発性物質が存在する可能性があり、縦孔底を着陸時に噴射されるガスで汚染することは避けたい。そこで、着陸は縦孔から離れた所にすることをベースラインにしている。

O9-07

惑星探査用広帯域地震計による地動観測試験

○山田竜平[1]、白石浩章[2]、浅利一善[1]、Tanguy Nébut[3]、Philippe Lognonné[3]、田中智[2]
[1]国立天文台 RISE 月惑星探検計室、[2]宇宙航空研究開発機構、
[3]Institute de Physique du Globe de Paris

過去の惑星地震探査において、NASA の Apollo ミッションでの月面地震観測により、唯一天体内部で発生する自然地震（月震）を検出し、そのデータから内部構造の情報を得る事に成功している。一方で、観測された月震波は月表層の破砕構造により、極めて激しい散乱を受けており、P, S 波の到達時刻の読み取りや、P,S 波の後に後続波として到達し得る反射波や屈折波の検出が困難となっている。Apollo で設置した地震計では月震波を観測できた周波数帯域が限られていたが、もし、月表層の破砕構造よりも長い周期（見積もりでは 10 秒以上）の月震波を検出できるようになれば、散乱の影響が緩和された月震波のデータを得る事も可能となる。長周期での月震観測が実現されれば、これまで識別できなかった月内部の弾性波速度境界での反射波や屈折波を識別する事が期待できるようによる。

そこで、我々は、周期 10 秒以上での有効な月震データを得るため、新しい惑星探査用の広帯域地震計の開発を行った。この開発にはすでに性能が確立されているペネトレータ搭載用の短周期地震計を利用しており、2 種類の広帯域地震計を開発している。その一つが電磁式の速度型広帯域計であり、短周期地震計に設計したフィードバック回路を接続して、固有周波数を 1Hz から 0.05H まで延ばす事に成功している(Yamada et al.,2015)。もう一つが容量変位型広帯域計であり、地震計の振り子とケースとの間に電極板を取り付け、容量変化から地動を観測できるようにしている。容量変位型の地震計にもフィードバック回路を接続する事で、感度を長周期側まで拡張することができている。

本研究では、この 2 種類の広帯域地震計の微小振動に対する地動応答を調べるため、水沢江刺地球潮汐観測所において地動観測試験を実施した。この試験のリファレンスセンサーとして、地球の地震観測で一般的に使用される広帯域地震計 STS-2 を利用し、観測波形間の比較を行った。この結果、2 種類の地震計とも長周期の地動成分に応答し、～0.1～10Hz 程度の間で概ね STS-2 と類似した波形を観測できる事が示された。本発表では、この観測試験結果の詳細についての報告を行うと供に、月震観測への適用性について議論する予定である。

O9-08

観測衛星による連続分光データを使った月面上のガラスが支配的な領域の全球捜索

○山本 聡[1]，中村 良介[2]，松永 恒雄[1]，小川 佳子[3]，石原 吉明[4]，諸田 智克[5]，平田 成[3]，
大竹 真紀子[4]，廣井 孝弘[6]，横田 康弘[7]，春山 純一[4]
[1]国環研，[2]産総研，[3]会津大，[4]JAXA/ISAS，[5]名古屋大，[6]ブラウン大，[7]筑波惑星研究会

2007年に打ち上げられた月探査衛星かぐや搭載の連続反射分光計であるスペクトルプロファイラ(SP)により、月全球の約7,000万地点において連続反射分光データ(ハイパースペクトルデータ)が取得された[1]。これらの全SPデータに対するデータマイニング手法を使った特定スペクトルサーベイ研究により、極めて純度の高い斜長岩(Purest AnorthositeまたはPAN)に富む領域[1,2,3]、低Ca輝石(Low Ca pyroxeneまたはLCP)に富む領域[4]、カンラン石に富む領域[5]、スピネルに富む領域[6]、高地領域における高Ca輝石(High Ca proxeneまたはHCP)に富む領域[7,8]の月全球分布が明らかにされてきた。また、特定吸収帯を持たないスペクトルに着目することで、劣化したPANの分布なども明らかにされている。一方、最近の惑星リモートセンシング研究では、例えば火星において非晶質ガラスと解釈されうる反射分光スペクトルを示す領域の存在が報告されている[9]。そこで本研究では、全SPデータを用いたデータマイニング手法により、ガラスが支配的な領域の全球捜索を行った。その結果、月の全球にわたって数100箇所程で、ガラススペクトルが支配的と考えられる場所を検知した。それらの多くは衝突盆地や大きな衝突クレーター構造に付随する形で見つかっている。本発表では、ガラススペクトルの検出地点の地質的特徴およびスペクトル的特徴を基にして、ガラスの起源とそこから推定される月地殻～マントルの構造/進化についての議論を行う。

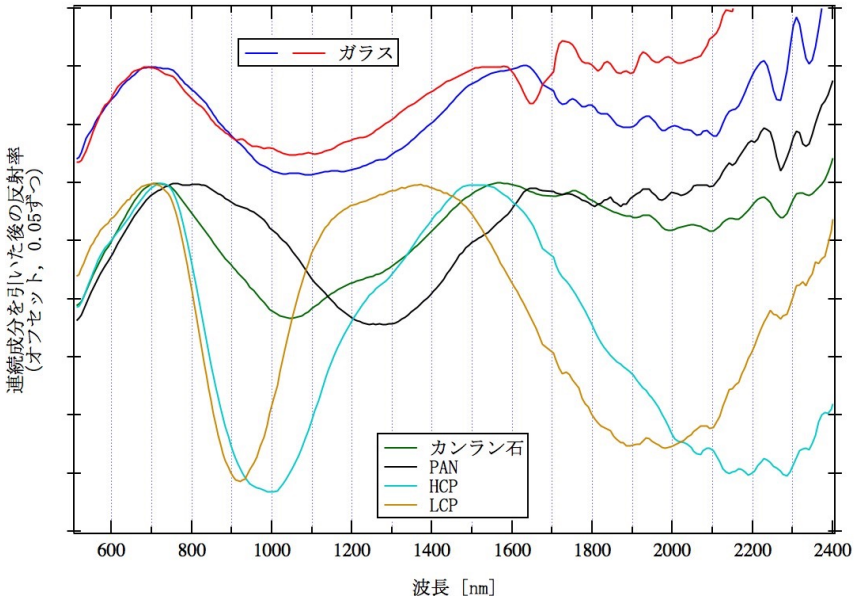


図1：SPによって見つかった月面上のガラスが支配的な領域のスペクトル(連続光成分(コンティニューム)を引いたあとのスペクトル)。比較のために、月面上で見つかっている月主要鉱物(カンラン石[5]、PAN[3]、HCP[8]、LCP[4])に富む領域の反射スペクトルについても示している。

[1] Matsunaga, T. et al. 2008, GRL, 35, L23201. [2] Ohtake, M. et al. 2009, Nature, 461, 236. [3] Yamamoto, S. et al. 2012, GRL, 39, L13201. [4] Nakamura, R. et al. 2012, NGEO, 28, NGEO1614. [5] Yamamoto, S. et al. 2010, NGEO, 3, 533. [6] Yamamoto, S. et al. 2013, GRL, doi: 10.1002/grl.50784. [7] Ogawa et al. 2011, GRL, 38, L17202. [8] Yamamoto, S. et al. 2013, JGR, doi: 10.1002/2014JE004740. [9] Cannon and Mustard 2015, Geology, doi: 10.1130/G36953.1.

月の海の縦孔における浸食シナリオ

○横田康弘[1,2]、春山純一[3]、山本聡[2]、松永恒雄[2]、大竹真紀子[3]
[1]筑波惑星研究会、[2]国立環境研究所、[3]JAXA/ISAS

近年、月の海に140～数10 m規模の縦孔が複数発見された[1,2,3,4]。これまでに月の海で8個、高地で2個の縦孔が報告[4]された。海の縦孔は、その地下空洞の成因の一つとして溶岩チューブ等の火山活動が提案されており、月の科学にとって重要な観測対象である。

今回、我々は新たに海で 2 個を発見した。これで海の縦孔は合計 10 個となった（図 1）。その10個中4個に、孔の外側から底部まで連続する斜面（以下、連続斜面）が存在する。このように事例数が増えたことで、縦孔の比較研究を行える状況が整いつつある。

縦孔の開くメカニズムとしては、元々存在した地下空洞の天井への隕石衝突というシナリオ[1]が提案され、室内実験[5]や数値計算[6]からその可能性が示されてきた。他方、連続斜面がレゴリスで覆われている等の地形的特徴は、現在の地形は最初に開いた状態そのままではなく微小・小隕石の衝突による変化（風化・浸食等）も受けていることを示唆する。本講演では、連続斜面と堆積物に着目して、縦孔地形が形成された後の浸食について議論する。

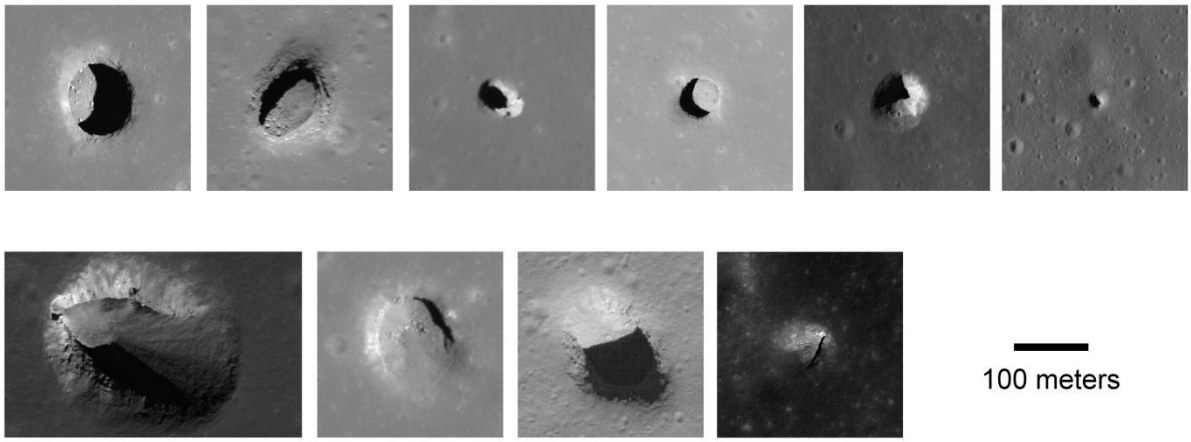


図1. Lunar Reconnaissance Orbiter Narrow Angle Camera画像による海の縦孔一覧。上段は連続斜面の無い縦孔、下段は連続斜面の存在する縦孔である。

参考文献：[1] Haruyama, J. et al.(2009) GRL, 36, L21206. [2] Haruyama, J. et al.(2010) LPSC #1285. [3] Robinson, M.S. et al.(2012) Planet. Space Sci., 69, 18-27. [4] Wagner, R.V. and M.S. Robinson(2014) Icarus, 237, 52-60. [5] Michikami, T. et al.(2014) Planet. Space Sci., 96, 71-80. [6] Martellato, E. et al.(2013) Planet. Space Sci., 86, 33-44.

O10-01

アジア太平洋小惑星観測網 (Asia-Pacific Asteroid Observation Network -APAON-) の構築

浦川　聖太郎[1]、奥村　真一郎[1]、吉川　真[2]、渡部　潤一[3]、APAON メンバー

[1] 日本スペースガード協会、[2]JAXA、[3] 国立天文台

太陽系小天体の地球衝突問題への対策 (スペースガード) は、人類が取り組むべき重要な課題であり、国連においてもその方策が議論されてきた。特に、2013 年 2 月のロシア・チェリャビンスク州への隕石落下により、スペースガードの重要性が再び強く認識されるようになった。現在、スペースガードを目的とした地球近傍小天体 (NEO) の発見を行うサーベイ観測は、米国アリゾナ州を中心とした Catalina Sky Survey(口径 1.5m/口径 1.0m/口径 0.68m) や、ハワイの Pan-STARRS(口径 1.8m) で成果が上がっている。これらの観測所では口径 1.5m を超える望遠鏡の集光力と広視野カメラにより、30 秒程度の露出時間で 20 等級より深い限界等級を実現し、NEO の発見を行っている。一方、発見された NEO を追観測し、軌道を正確に導出することもスペースガードでは重要である。追観測では、対象となる NEO の動きが分かっている。このため、望遠鏡を NEO の動きに追尾させることで長時間露光を行ない、限界等級を向上させることができる。従って、追観測は比較的小型の観測装置であっても十分に実施が可能である。しかし、これまで追観測の十分な実施がアジア太平洋地域で行われていなかった。そこで我々のグループでは、アジア太平洋地域の観測所、研究者、アマチュア天文家に呼びかけ、アジア太平洋小惑星観測網 (Asia-Pacific Asteroid Observation Network -APAON-) の構築を行ない、この地域での NEO 観測の充実を目指した。2013 年から呼びかけを開始し、現在、APAON 参加者の国や地域は日本、タイ、インドネシア、マカオ、台湾、中国、マレーシア、ウズベキスタン、モンゴル、韓国となっている。APAON を構築することで、追観測における天候リスクの低減や、多種多様な観測装置を用いることによる充実した科学観測が期待できる。また、スペースガード観測を通じたアウトリーチも行なうことも構想している。APAON の活動を通じ、これまで以上にスペースガードに貢献ができるようになると考えている。本講演では、これまでの APAON の取り組みと今後の展望について発表する。

O10-02

ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査：高分解能質量分析装置を用いた木星トロヤ群小惑星着陸その場観測

○癸生川陽子[1]、青木順[2]、矢野創[3]、岡田達明[3]、中村良介[4]、松本純[5]、大木優介[5]、伊藤元雄[6]、河井洋輔[2]、岩田隆浩[3]、松浦周二[3]、森治[3]、ソーラーパワーセイル WG[3]
[1]横浜国立大学、[2] 大阪大学、[3]宇宙航空研究開発機構、[4]産業技術総合研究所、[5]東京大学、[6]海洋研究開発機構

木星軌道上の L4、L5 Lagrangian 点に存在するトロヤ群小惑星の起源に関しては以下の 2 つが考えられている。(1)木星が形成された時に周囲の微惑星が捕獲された。(2)木星以遠の惑星の大規模な移動に伴い、海王星以遠にいた小天体がトラップされた。これらの起源を解明することは惑星系の形成やその後の大規模な移動に関する重要な知見を与えるものである。そこで、今年 2 月に戦略的中型計画として提案されたソーラー電力セイルによる外惑星領域探査の一環として、子機による木星トロヤ群小惑星着陸その場観測の検討を進めている。

水や有機物など揮発性成分の同位体組成はこれらの形成条件を反映しているため、太陽系の形成や進化過程を明らかにするためのすぐれた指標となる。そこで、子機に搭載した質量分析装置(マルチターン飛行時間型質量分析システム)を用いて、天体表面及び内部の揮発性物質の分子種及び安定同位体分析を行う。天体表面には、有機物、特に隕石や彗星にみられるような複雑な高分子有機物が含まれていることが予測される。このような固体成分は1000℃程度での熱分解により単純なガス分子(H_2, N_2, CO, H_2O)にした上で、水素・窒素・酸素・炭素の安定同位体測定を行う。太陽系小天体の水素と窒素の同位体組成(D/H 比及び $^{15}N/^{14}N$ 比)は、一般に太陽から遠いほど重くなる。したがって、これらの同位体分析を行うことにより、天体の形成場所や有機物の起源に制約を与えることができる。さらに、30cm 程度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では存在できない揮発性の高い氷を採取できる可能性が高まる。とくに H_2O 氷の水素・酸素同位体組成は、天体の形成や太陽系内の物質分布・混合プロセスへの重要な指標となる。また、ステップヒーティング(10℃/min、最大 800℃程度まで昇温)を行うことにより、氷および揮発性の高い分子から、高分子有機物の熱分解により発生するフラグメント分子までの質量分析を行い、元素組成や分子構造の推定を行う。

以上により、木星トロヤ群小惑星の起源と進化、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、さらには地球などへの揮発性物質の供給源の制約へとつながることが期待される。

O10-03

ソーラー電力セイル探査機搭載 EXZIT による黄道光の立体構造観測

○ 津村耕司[1], 松浦周二[2], 白籏麻衣[3], 新井俊明[1], 大西陽介[4], 佐野圭[5], 中村良介[6], 森治[7], 矢野創[7], 岩田隆浩[7], 臼井文彦[5], 大坪貴文[5], 川田光伸[7], 和田武彦[7], 他 EXZIT 検討チーム, ソーラー電力セイル WG

[1] 東北大学, [2] 関西学院大学, [3] 国立天文台, [4] 東京工業大学, [5] 東京大学, [6] 産業技術総合研究所, [7] 宇宙航空研究開発機構

木星トロヤ群小惑星の探査を目的としたソーラー電力セイルに搭載する赤外線観測装置 EXZIT(Exo-Zodiacal Infrared Telescope) を我々は開発中である。EXZIT の主要な科学目的の一つは、木星に向かうクルージング中に黄道光の立体構造観測を行うことである。黄道光とは惑星間塵による太陽光の散乱光であるため、黄道光の分光観測を太陽から遠ざかりながら行うことで、惑星間塵の主成分について数密度、組成、アルベド等をそれらの空間分布とともに明らかにできる。特に、探査機が小惑星帯を通過する前後での惑星間塵の性質の違いを比較することで、小惑星起源と彗星起源の惑星間塵を切り分けて観測することができ、太陽系の構造に関する新たな知見を得ることができる。さらに小惑星帯以遠では、太陽系外縁部起源や星間空間起源のダストといった、今までの地球近傍の黄道光観測で調べられてきた惑星間塵とは異なる成分の検出も期待できる。
EXZIT 搭載の望遠鏡は、拡散光観測に必要な高バッフル性能の軸はずしグレゴリアン式を採用することで、4 度以上の広視野の設計解が得られている。惑星間ダストの鉱物組成を同定するため、焦点面に透過波長が 1 次元的に連続変化する光学フィルタ (LVF：Linear Variable Filter) を設置することで、近赤外波長 0.6-3.5 μm で比波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda \sim 20$ の観測を実現する予定である。ソーラー電力セイルはスピン安定の姿勢制御方式をとるため、視野が時間的に波長変化方向に移動するので、この LVF 分光によりスペクトルと空間情報が同時に高効率に得られる。

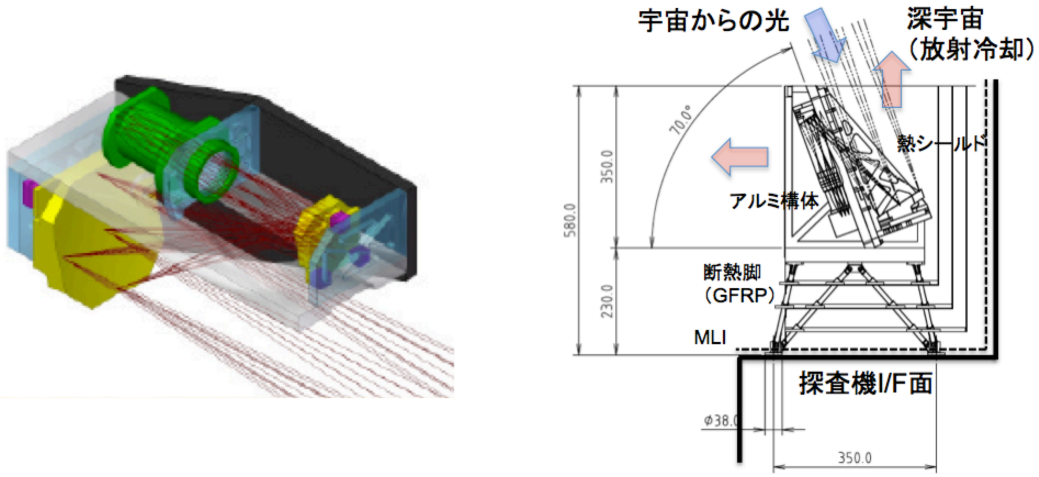


図 1: (左)EXZIT 望遠鏡の光学系の構成例。(右)EXZIT の探査機本体への取付け例。

O10-05

アーク加熱風洞を用いた流星アブレーションの研究

○沼田 宗一郎[1], 亀川 将司[1], 荒木 健吾[1], 岩崎 太陽[1], 小山 晋[1], 阿部 新助[1],
前田 幸治[2], 渡辺 正樹[3], 作山 幸樹[3], 佐原 宏典[3], 渡部 武夫[4], 下田 孝幸[5], 岡島 礼奈[6]
[1]日本大学, [2]宮崎大学 [3]首都大学東京, [4]帝京大学, [5]JAXA/ISAS, [6]株式会社 ALE

流星とは、メテオロイドが秒速 12[km]～72[km]の超高速で惑星大気に突入する際、大気との衝突励起によって構成物質と惑星大気に含まれる原子・分子の双方が輝く「アブレーション」に伴うプラズマ現象である。一般にメテオロイドは、直径μm～cm サイズのダストで、直径がおよそ 1[m]を超えると小惑星と呼んでいる。これらの地球外物質は、１日に約 100-300 トン地球に降り注いでいる。しかし、メテオロイドの大気突入に伴う流星・火球の発光スペクトルについては観測機会が少なく、更に大気突入速度・角度・質量・形状・密度などの不確定要素が多いため、発光物理環境（プラズマ温度・組成・構造の違いによるアブレーションの変化）については不明な点が多い。

本研究では、天然の流星の発光素過程を理解する目的で、組成比・形状・大きさ・密度を変化させて製作した流星模擬体と、地上に落下した各種隕石を JAXA/ISAS アーク加熱風洞を用いてアブレーションさせ、近紫外～近赤外領域（250-1000[nm]）でのプラズマの時間変化分光・撮像計測を行った。本実験は、高エンタルピー流を利用して 15-30[MW/m^2]の加熱率を達成し、対地速度が 12[km/s]を超える低速流星・火球の大気突入を模擬することが可能となった。本実験で用いた流星模擬体は、フラグメンテーションを生じながら急増光しており、天然の流星発光に近い光度変化を示している（図１）。また、実験に用いたチェリャビンスク隕石のアブレーション・プラズマの分光結果は、オリビンなどの金属ケイ酸塩の分光結果に酷似することが分かった（図２）。これらの人工流星実験を、低速流星・火球の観測スペクトルと比較した結果を報告する。

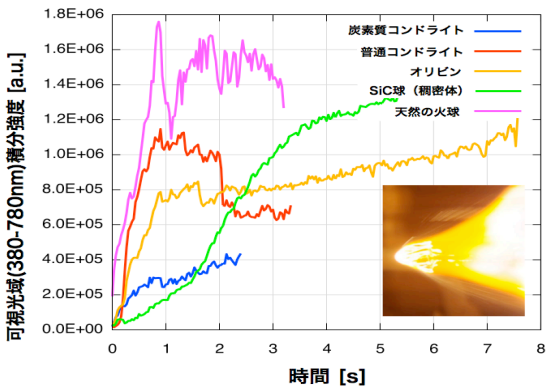


図１：可視光（380-780nm）ライトカーブ

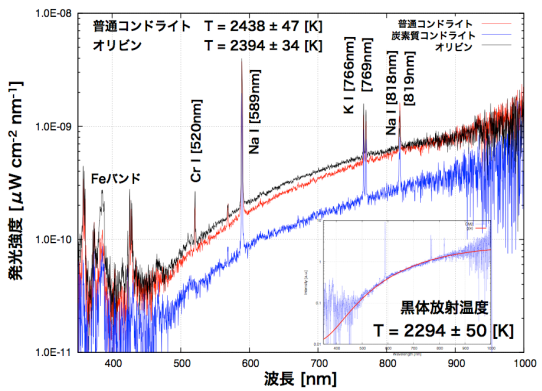


図２：各種隕石とオリビンのスペクトル

O10-06

伊豆大島における無人観測ロボット実証試験大会の活動報告

○佐伯和人[1]、市原美恵[2]、石上玄也[3]
[1]大阪大学・理学研究科、[2]東京大学・地震研究所、[3]慶應義塾大学・理工学部

発表者は2009年より伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムを始めた。シンポジウムの目的は、火山学や宇宙工学や防災など様々な分野で無人観測ロボットを開発している研究者を大島に集め、野外実証試験と情報交換の機会を提供し、ロボットの開発と観測体制の確立を加速させることである。これまでに多くの宇宙探査関係者にも参加していただき、ロボットの技術開発や若手の育成に貢献している。

火山観測ロボットは将来の宇宙探査ロボットに必要な技術を開発しつつも、今現在、実証や活躍の場があることが開発者にとっては大きなメリットである。火山噴火の際には、噴火直後から避難完了に至る短期間に刻々と変化する状況を観測し、短期の状況予測を避難誘導に活かす事が重要である。1986年の伊豆大島噴火では爆発的な噴火が発生し、カルデラ底やカルデラの外など思いもかけない地点での活動となった。そのため、 噴火地点には近寄ることができず、噴火現象の科学的理解や災害軽減のための貴重なデータを調査観測する機会を逸した。また、全島避難の際には、住民に噴火の状況が伝わらず、溶岩流によって岡田-元町間の道路が断たれているといった誤った情報が流れた。伊豆大島では、先の噴火から20年以上が経過し、次の噴火の準備をする必要のある時期となっている。このような状況を次の噴火時に改善するために、噴火時に即応できる新しい観測ロボットの開発と観測体制の確立が必要である。このような考えのもと、これまでの6年間に、多数の参加者が集まり、実証試験を行った。2009年度は9つの研究グループからUGV8台、UAV２機が、2010年度は５つのグループからUGV５台、UAV２機が、2011年度は9つのグループからUGV13台、UAV3機が、そして2012年度は10のグループからUGV13台、UAV6機が参加した。2013年度には大会直前に伊豆大島が台風27号で被災し、一般公開イベントは中止となったが、6グループからUGV5台、UAV1機が実証試験を行った。そして、2014年度は5グループからUGV6台、UAV1機が実証試験を行った。2015年度は11月に開催が予定されているが、6グループからUGV8台、UAV3機が試験を予定している他、大島の高校生との交流イベントも企画されている。発表では、実証試験活動紹介と、現時点のロボットでどのようなことができるのかを提示したい。なお、今年度のシンポジウムの詳細は以下のURLを参照していただきたい。
(http://www.volcano-robot.org/index.html)

本活動は2013年度より東京大学地震研究所特定共同研究Bの援助を受けており、ここに謝意を表します。

O10-07

その場 K-Ar 年代計測装置実現のための LIBS を使った Ar 輝線検出実験

○芝崎和夫[1], 堀内美沙[1], 長勇一郎[1], 吉岡和夫[1] 亀田真吾[1], 三部賢治[2], 三浦弥生[2], 杉田精司[2]

[1]立教大学, [2]東京大学

背景：惑星表面の形成年代を知ることは惑星科学において重要である。近年では地球に岩石試料を持ち帰らずにその場で絶対年代を計測する方法が模索されている。これまでに地球外で行われたその場年代計測は NASA のローバ Curiosity が火星で行った 1 例のみである。Curiosity は K を α 粒子 X 線分光計、Ar を四重極質量分析計で測定し、岩石の K-Ar 年代を 42.1 ± 3.5億年と推定した(K. A. Farley *et al.*, 2014)。Curiosity が計測に用いた装置は大型であり、運用には大型のローバが不可欠である。本研究では小型で軽量のその場年代計測装置を実現するために LIBS(レーザー誘起絶縁破壊分光装置)を用いて K と Ar を計測し、その場で K-Ar 年代測定を行う方法を検討している。既に LIBS は宇宙での使用実績があり、岩石中の K 検出も可能である。しかしながら、岩石中の Ar を検出した実績はない。

目的：そこで本研究では、LIBS を用いて岩石中の Ar を検出することを目指す。

Ar 輝線強度と予備実験結果：大気圧下で生成されるレーザー生成プラズマの典型的な温度と電子密度はそれぞれ 1 eV(11600 K)、10^{17} cm^{-3}である(Cremers *et al.*, 2006)。これらの値を使い Saha の式を用いて輝線強度を計算したところ、真空紫外領域中の 104.8 nm と 106.7 nm の中性原子輝線の発光強度が最も高くなることが分かった。真空紫外分光装置を製作し、試料に Si(純度 99.9999 %)を用いて予備実験を行ったところ、106.7 nm に当初想定していなかったSi^{3+}輝線を検出した。高い励起エネルギーを必要とする輝線を検出したことから、プラズマの温度が予想よりも高温であったと考えられる。Si^{3+}輝線は Ar 輝線と波長が近いため、このままでは Ar 輝線を検出することはできないことがわかった。

装置改良：先行研究から、真空中でプラズマが高温であるのはプラズマ生成初期の数十 ns 程度であり、検出器にゲートをかけてプラズマ生成から 50 ns 程度経ってから検出を始めることで、多価イオン輝線を除去して中性原子の輝線を検出できる可能性が高いことが知られている(*Freeman et al.*, 2013)。そこで本研究では、レーザーが照射 60 ns 前に出す Q スイッチの信号をディレイジェネレータを介して遅延をかけた上で、MCP 用の高速電源にトリガー信号として入力することで、MCP にゲートをかけた。カリ長石($KAlSi_3O_8$)を試料とした予備実験では、ゲートをかけた場合、Si^{3+}輝線強度の減衰を確認した。今後天然試料の数百倍の Ar を加えた玄武岩試料を使った検出実験を行い、Ar 検出可能性を検討する。

深宇宙探査技術実証機 DESTINY

DESTINY: A Technology Demonstrator for Deep Space Exploration

川勝康弘[1]、○荒井朋子[2]、豊田裕之[1]、西山和孝[1]、船木一幸[1]、岩田隆浩[1]
[1]宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所、[2]千葉工業大学　惑星探査研究センター

2013 年秋、宇宙科学・探査ロードマップが策定された。ここでは、宇宙科学プロジェクトの推進方策の一つとして、高頻度な成果創出を目指し、イプシロンで打ち上げる小型計画を 2 年に 1 回の頻度で実施していく方針が示された。そして、この推進方策と歩調を合わせる形で、小型計画による深宇宙ミッションを実現するという目標が立てられた 。

小型計画による低コスト、高頻度、高付加価値な深宇宙ミッションを如何にして実現するか。我々は、この問いに答えるミッション・コンセプトを追究し、一つの結論を得た。それが、小型高性能電気推進式輸送機による深宇宙ミッション構想である(図 1)。

しかし、現在、我々が有する技術だけで本構想を実現することはできない。そこで、本構想を実現するために必要な新規重要技術を開発し、その運用方法も含めて実証する実証機 DESTINY を我々は H25 年度イプシロン搭載宇宙科学ミッションとして提案した。

深宇宙探査技術実証機 DESTINY (図 2)は、ISAS、JAXA が強みとする最先端技術を結集した、小型高性能電気推進式輸送機であり、最大約 5km/s の増速能力、最大 200kg のミッションペイロード搭載能力を有する。本計画の中で、大型イオンエンジン μ20、薄膜軽量太陽電池パドルなど、先端技術の研究開発を仕上げ、小型高性能電気推進式輸送機 DESTINY として結実させる。これにより先の構想を実現する宇宙機システム、および、それを用いた深宇宙ミッションのコンセプトを実証することが計画の主目的である。

残念ながら DESTINY は H25 年度イプシロン搭載宇宙科学ミッションには選定されなかったが、次回の公募機会への応募を目指し、検討活動を継続している。

本発表では、この DESTINY の概要を紹介する。

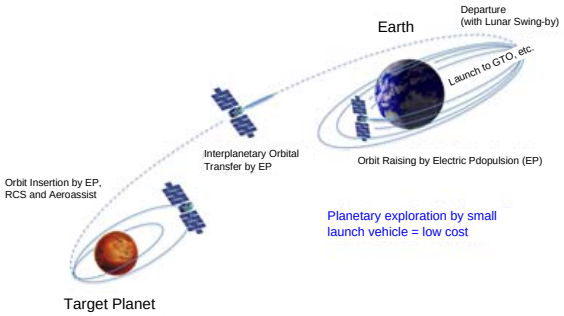


図 1　小型高性能電気推進式宇宙機による深宇宙ミッション構想

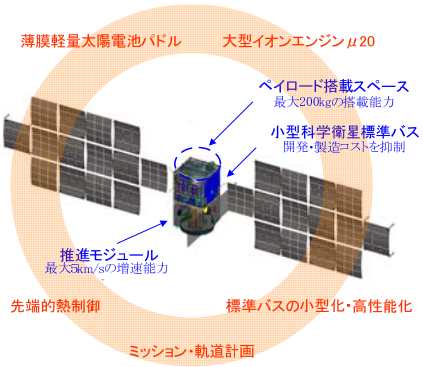


図 2 DESTINY ミッション・コンセプト

P01

「非平衡な化学進化および電子遷移を含む 1 次元流体計算による集積中の巨大ガス惑星からの短波長放射の推定」

○青山雄彦 [1];谷川享行 [2];生駒大洋 [1]

[1] 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻;[2] 産業医科大学医学部

形成初期の恒星は原始惑星系円盤と呼ばれる円盤を伴っており、惑星はこの原始惑星系円盤の中で形成されると考えられている。実際、原始惑星系円盤を伴った若い恒星はすでにいくつか発見されている。また、アルマ望遠鏡による観測では円盤中に空隙が見つかっており、形成中の惑星と円盤ガスの相互作用によって形成された可能性が示唆されている。円盤内で形成中の惑星を直接観測することは、形成論の観点からも重要である。本研究では、形成中の巨大ガス惑星の直接観測が可能であるかを検討する。

巨大ガス惑星形成に関するコア集積モデルでは、臨界質量を超えた固体コアが周囲のガスを暴走的に獲得することで巨大ガス惑星が形成される。このガス獲得過程で惑星は広範囲のガスを集積するため、惑星に対して角運動量を持ったガスは周惑星円盤を形成する。この周惑星円盤は原始惑星系円盤の赤道面に存在し、ヒル半径程度の大きさを持つ。Tanigawa et al. (2012) の数値計算によると、原始惑星系円盤のガスが周惑星系円盤に取り込まれる際、赤道面から二次元的に流入するのではなく、上空から円盤に落下するように流入する。このとき、ガスはほぼ自由落下速度で周惑星円盤に衝突し、周惑星系円盤の惑星近傍での温度は衝撃波加熱により最大数万ケルビンに達する。

したがって、このような高温ガスの放射光を観測することができれば、原始惑星系円盤内で形成中の巨大ガス惑星の存在を確かめることができる。そこで本研究では、衝撃波後面の流体計算を行い、放射平衡状態を仮定して水素の各輝線の強度を求める。このとき流体の冷却のタイムスケールは化学進化や電子遷移のタイムスケールよりも短くなるため、これらの非平衡な進化を含めて計算する。この数値計算の結果に解析的な見積もりを併せて、形成中の巨大ガス惑星の直接観測の可能性を議論する。

金星雲層を想定した鉛直対流の 3 次元数値計算

○ 杉山 耕一朗[1], 小高 正嗣[2] 中島 健介[3], 今村 剛[1], 林 祥介[4]

[1] JAXA 宇宙研, [2] 北大理 · 宇宙理学, [3] 九大理 · 地惑, [4] 神戸大理 · 惑星

1. はじめに

金星は厚い濃硫酸の雲層に覆われているが, いくつかの観測的証拠から雲層下部の高度 47–55 km では対流運動が生じていると考えられている. 探査機のプローブによる観測からは雲層下部は中立成層していることが知られており, ベガ気球観測では 1–3 m/s 程度の鉛直流が捉えられている. しかしながら雲層の観測は断片的であり, 金星雲層内の対流構造はよく理解されていない. 雲層内の対流構造を調べることを目的とした数値的研究が数例行われているが, 彼らは系を水平鉛直 2 次元に限定していた (Baker et al., 1998, 2000, Imamura et al., 2014).

我々はこれまで開発してきた雲解像モデル (Sugiyama et al., 2009) を拡張することで, 金星雲層内の対流構造を調べることを目的とした数値実験を行ってきた. 本発表では Imamura et al. (2014) と類似の設定を用いた 3 次元の数値実験を行い, 統計的平衡状態における対流構造を調べる.

2. 計算設定

用いる雲解像モデルの基礎方程式は準圧縮方程式系 (Klemp and Wilhelmson, 1978) であり, 乱流混合過程は Klemp and Wilhelmson (1978) のパラメタリゼーションを用いて表現する. 本実験では凝結や化学反応は考慮しない. 放射伝達は陽に計算しない. 放射冷却と太陽放射加熱の鉛直プロファイルはそれぞれ鉛直一次元の放射対流平衡計算結果 (Ikeda, 2011) と観測結果 (Tomasko et al., 1980) に基づいて与える. 但し, 本実験では太陽放射加熱の日変化を考慮しない. 全球平均かつ時間平均した太陽放射加熱プロファイルを用いることとした.

計算領域は水平方向に 128 km とする. 鉛直領域は雲層下部の高度 35 km から高度 65 km とする. 上部境界から 5 km および下部境界から 5 km をスポンジ層としている. 水平方向と鉛直方向の解像度をそれぞれ 200 m, 125 m とする. 初期に与える温位の鉛直分布は高度 47–55 km に中立層をもつような分布であり, 対流運動を駆動するための種として中立層下部に最大振幅 0.1 K の温位擾乱を与える.

3. 結果

対流運動がほぼ定常的となった計算開始後 5 日目の鉛直速度の分布を図 1 に示す. 図 1 より初期に中立層とした高度 47–55 km 付近で対流運動が生じることがわかる. 鉛直流の大きさは最大で 2–3 m/s 程度であり, ベガ気球による観測結果と概ね整合的である. 発表では, 熱収支の解析なども含めて, 数値実験で得られた対流の 3 次元的構造を詳述する予定である.

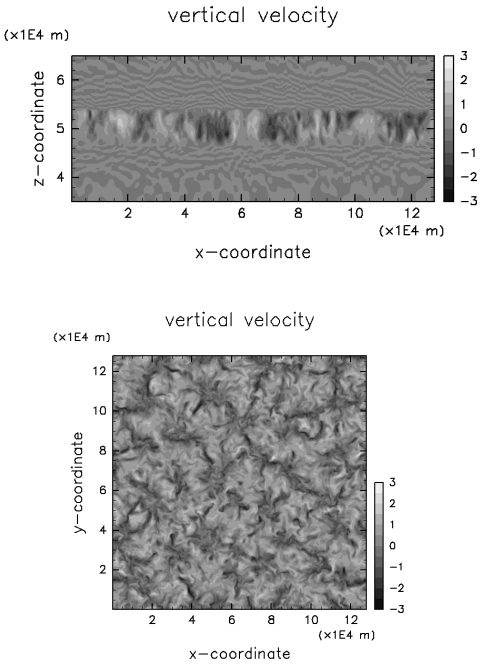


図 1: 鉛直速度の鉛直断面図 (上) と高度 52 km における鉛直速度の水平断面 (下).

P03

模擬タイタン大気中での複雑有機物生成とその原始地球での化学進化への示唆

○阿部仁美[1]、伊勢絢一[1]、依田功[2]、福田一志[2]、近藤康太郎[2]、
小栗慶之[2]、癸生川陽子[1]、小林憲正[1]
（[1]横浜国大院工、[22]東工大）

土星最大の衛星タイタンは，窒素を主とし，メタンを副成分とする濃厚な弱還元型大気を有する。原始地球大気はその組成は不明であるが，二酸化炭素・窒素を主とし，メタン・一酸化炭素等を副成分として含む弱還元型であった可能性が高いとされている。このため，タイタン大気中での化学進化は，原始地球上での有機物生成を知る上で重要な示唆を与えると考えられる。従来，タイタン高層大気をモデルとし，プラズマ放電（土星磁気圏電子を模擬）や紫外線を用いた模擬実験が多く行われてきた。われわれは，タイタン低層大気中での主要なエネルギーとされる宇宙線を模し，模擬タイタン大気への陽子線照射などを行った。また，模擬原始大気として，種々の混合比の二酸化炭素・メタン・窒素・水混合気体に陽子線照射および火花放電を行った。

タイタン大気を模したメタン(35 Torr)・窒素(665 Torr)混合気体，および模擬原始大気として二酸化炭素+メタン(計 350 Torr)，窒素(350 Torr)，水の混合気体にタンデム加速器（東工大）からの陽子線を照射した。また，同様の模擬原始大気中で，テスラコイルを用いた火花放電を行った。生成物は酸加水分解後，HPLC によりアミノ酸分析を行った。また加水分解前の生成物は FT-IR, ESI-MS などによりキャラクタリゼーションを行った。

高分子量有機物からなる靄が生成した。これを加水分解すると種々のアミノ酸が生成した。これはタイタン下層大気で宇宙線の作用によりアミノ酸前駆体が生成する可能性を示唆する。模擬タイタン高層大気中のプラズマ放電などでのアミノ酸前駆体生成と比較すると，宇宙線による生成の方がはるかに多いことが示唆された。

模擬原始地球大気中での火花放電の場合，メタンのモル分率が 30%以下の弱還元型の場合，アミノ酸は生成しなかった。一方，陽子線照射の場合は，メタンのモル分率が 1%であっても，アミノ酸（前駆体）の生成が認められた。このことは，原始地球大気中にメタンがあったとしても，その割合がわずかだった場合，有機物の生成は主として宇宙線によると推定される。原始地球上でのアミノ酸の生成機構は，従来ストレッカー反応が提案されていたが，宇宙線が主要なエネルギーとすると，アミノ酸前駆体を含む高分子有機物（原始地球 *tholins*）が気相中で直接生成すると考えられる。そのような複雑有機物の構造解析や水圏での化学進化をさらに調べる予定である。

[1] T. Taniuchi *et al., Anal. Sci.*, **29**, 777-785 (2013).

タイタン大気におけるアセトニトリル(CH_3CN)の回転励起状態

○仲本悟[1], 中山勇麻[2], 平原靖大[1], 飯野孝浩[3]

[1]名古屋大学大学院環境学研究科,[2]名古屋大学理学部地球惑星科学科,[3]東京農工大学科学博物館

土星最大の衛星タイタンは、地表大気圧が地球の約 1.5 倍にもおよぶ豊富な大気を持つ。大気の主成分は窒素とメタンであるが、それ以外の様々な有機分子の存在も明らかになっており、紫外線や宇宙線による解離や再結合による生成機構が提唱されている。

アセトニトリル(CH_3CN)は 1993 年にタイタンで初めて検出された(Bėzard et al. 1993)。偏長対称コマ分子である CH_3CN の回転エネルギー準位は全角運動量 J と分子軸への射影成分 K で表わされるが、異なる K 間の放射遷移は禁制である。また、3 つの等価な水素原子の核スピン統計により A 対称種(K=3n)と E 対称種(K≠3n)とに区別され、分子間の衝突による、両対称種相互の変換レートはきわめて低い。このような特性を有する CH_3CN の純回転スペクトルは K の異なる状態間の遷移が近接して複数観測されるため(図 1)、大気の物理化学状態のプローブとして有用である。

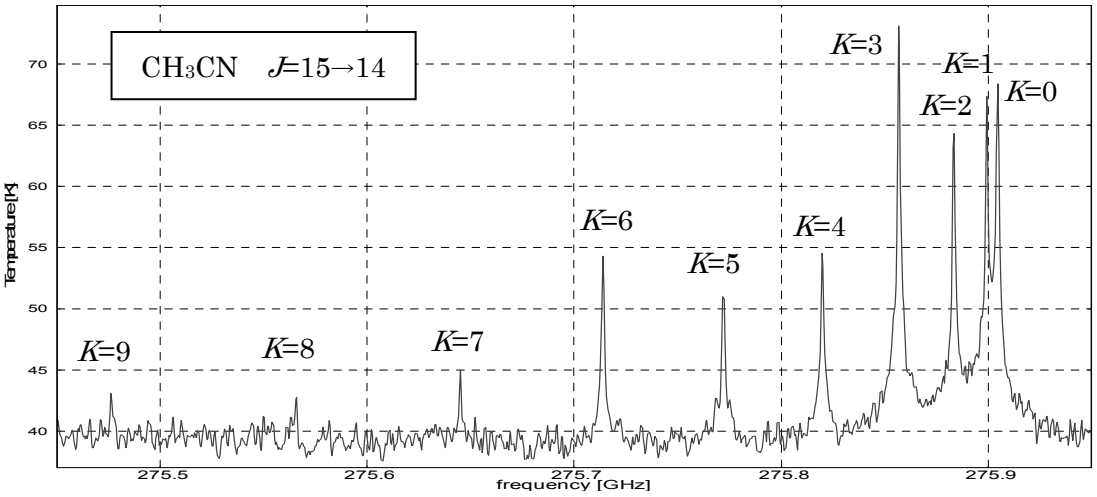


図 1 CH_3CN ($J_K = 15_K \rightarrow 14_K$, $K = 0$~9)の観測スペクトル。高周波側から低周波側へと K が減少していく。

本研究では CH_3CN の 3 つの異なる回転遷移 J = 18→17、16→15、15→14 を用いて、局所熱平衡を仮定した場合の励起温度の導出を行った。用いたデータは ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)望遠鏡で観測されたタイタンのアーカイブデータである。観測スペクトルに対しローレンツ関数で最小 2 乗フィッティングを行い、各輝線の積分強度から J = 15→14 での E 対称種の Population diagram を得た。そこから算出したタイタン大気温度は 204±33K であり、放射伝達により得られた先行研究の値と調和的である(Gurwell et al. 2004)。本発表ではさらに詳細な解析結果についても議論を行う。

P05

雲解像モデルを用いた木星大気のマイクロ波熱放射

○山﨑健吾[1]、竹内覚[1]、杉山耕一郎[2]
[1]福岡大・理、[2]ISAS / JAXA

1. はじめに

従来、木星大気の鉛直構造は Weidenschilling and Lewis(1973)らの鉛直 1 次元平衡雲凝結モデル(ECCM)とマイクロ波による観測値を用いて推定が行われてきた。de Pater et al, (2001)によれば、ECCM によるディスク平均マイクロ波スペクトルと観測値を一致させるには、ECCM の高度$0.5 < P < 1.5\ (bar)$のアンモニア気体混合比を減らさないといけないのであるが、その時のアンモニア気体鉛直分布はガリレオプローブ探査の結果とは異なるものだった。これは ECCM の混合比鉛直分布に問題があり、ECCM 自体に流体力学、雲微物理過程が考慮されていないことが原因の 1 つとして考えられた。そこで今回は、Sugiyama et al. (2014)の 2 次元雲解像モデルデータを用いたディスク平均マイクロ波スペクトルが、観測値と ECCM による同スペクトルに対しどのような分布をとるかを調べた。

2. 放射モデル

Sugiyama et al. (2014)で計算されている CTRL、C100 中の諸データを圧力、温度、体積混合比、雲密度に変換し、それぞれを時間、水平方向で平均をとって計算を行った。放射計算には圧力誘起吸収とH_2O、NH_3による気体吸収、及び$NH_3(ice)$、$NH_4SH(s)$、$H_2O(ice)$の 3 層の雲による吸収を考慮した。

3. 結果

C100 の平均的雲密度は全体的に CTRL より大きいのだが(図 1 左)、雲の吸収の効果が小さいため両者の輝度温度分布はほとんど同じような分布をとり、観測値ともあまりあっていないという結果だった(図 2)。雲解像モデルでは流体力学、雲微物理過程が考慮されているため、水の凝結高度から圏界面にかけてのNH_3気体の混合比が ECCM に対して小さくなってしまい、高い輝度温度分布となってしまうと考えられる。今後は混合比の鉛直分布を変化させた場合どのような輝度温度分布になるかについて調べる。

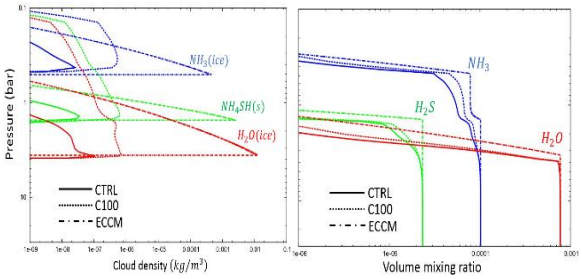


図 1. (左) ; CTRL、C100、ECCM における雲密度鉛直分布。(右) ; CTRL、C100、ECCM における凝結成分気体鉛直分布。深い所の混合比は全て 1 倍太陽組成である。両方とも CTRL を実線、C100 を点線、ECCM を鎖線で示す。

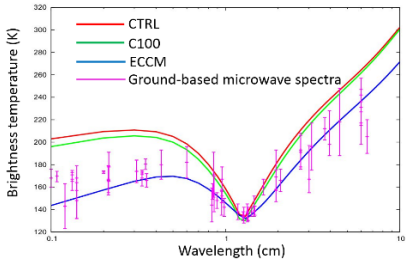


図 2 ; CTRL、C100、ECCM を用いて計算したディスク平均輝度温度分布と地上ベースマイクロ波観測値。

参考文献

Weidenschilling, S.J., and Lewis, J.S. (1973), Icarus, 20, 465-476.

de Pater, I., et al. (2001), Icarus, 149, 66-78.

Sugiyama, K., et al. (2014), Icarus, 229, 71-91.

P06

JUICE-PEP/JNA 高速中性粒子計測装置

○浅村和史[1]、齋藤義文[1]、下山学[2]、二穴喜文[2]、三好由純[3]、坂野井健[4]
JUICE-PEP/JNA チーム

[1]宇宙航空研究開発機構
[2]Swedish Institute of Space Physics
[3]名古屋大
[4]東北大

欧州宇宙機関（ESA）は木星探査機 JUICE の開発を進めている。JUICE 衛星に搭載される予定の科学観測器の一つに非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA（Plasma Environment Package / Jovian Neutrals Analyzer）がある。木星磁気圏において非熱的中性粒子の成因の一つは，Ganymede などの天体表面へのプラズマ粒子の降り込みによって起こる後方散乱及びスパッタリング現象である。生成した非熱的中性粒子は電磁場の影響を受けずに弾道飛行する。このため、希薄な大気しかもたず、氷衛星表面と木星磁気圏プラズマ粒子が直接衝突する環境における非熱的中性粒子観測は、氷衛星表面に投影したプラズマ構造の空間変化の情報をもたらす。これに対しプラズマ直接観測では、詳細なプラズマパラメータが得られるものの、原理的に時間・空間変化の分離が困難である。非熱的中性粒子観測はプラズマ観測に対して相補的な役割を持つものであり、両観測を通して木星/氷衛星磁気圏の理解を進めてゆきたい。本発表では PEP/JNA の科学目的、開発状況について報告する。

P07

JUICE レーザ高度計（GALA）の受信系の開発

○小林正規[1]、塩谷圭吾[2]、並木則行[3]、荒木博志[3]、石橋高[1]、宇都宮真[2]、押上祥子[3]、
鹿島伸悟[3]、木村淳[4]、小林進悟[5]、野田寛大[3]
[1]千葉工業大学惑星探査研究センター，[2]宇宙航空開発機構宇宙科学研究所，[3]国立天文台
RISE 月惑星探査検討室，[4]東京工業大学地球生命研究所，[5]放射線医学総合研究所

2022 年打ち上げ予定の ESA 木星探査計画(JUICE; JUpiter ICy moons Exploler) でレーザ高度計(GALA, Ganymede Laser Altimeter) の搭載が予定されている。GALA はドイツ、日本、スイス、スペインの 4 国で共同開発しており、日本チームはレーザ反射光受信望遠鏡（TEL）、バックエンド光学系(BEO)、APD センサモジュールが収められる焦点面アセンブリ(FPA)およびアナログの電子モジュール(AEM)の開発を担当している。現在 JAXA のプリプロジェクトとして開発を進めている。本講演では、開発の状況について報告する。

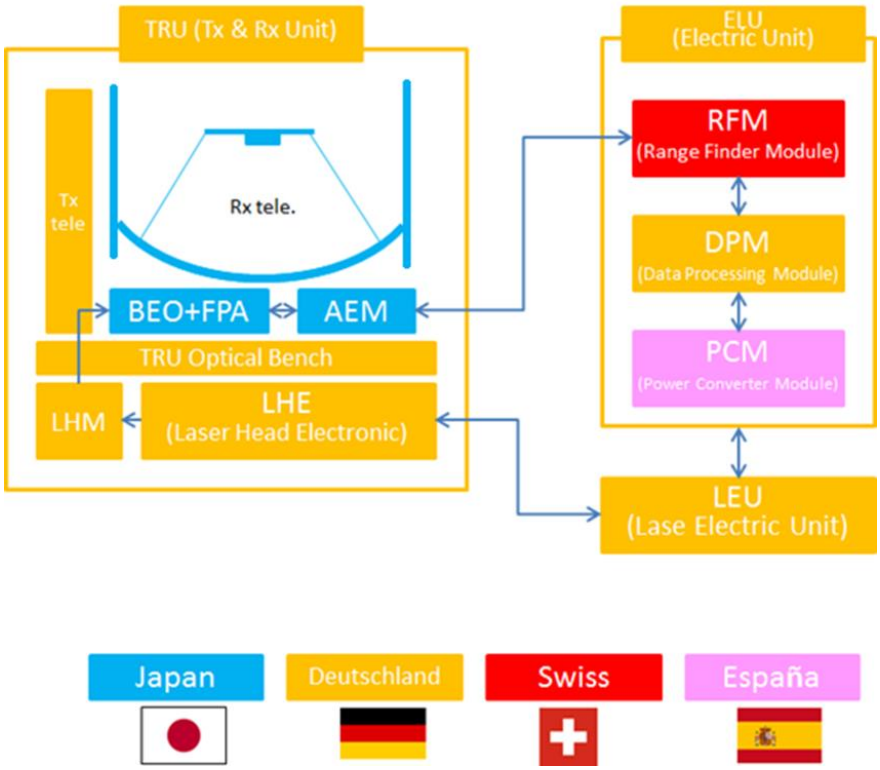


図 1　GALA 開発体制の構成チームによる担当ユニット

JUICE木星系探査が目指す科学

Science Objectives of JUICE (JUpiter ICy Moon Explorer) Mission

○佐々木晶[1], 斎藤義文[2],木村淳[3], 関根康人[4], JUICE-JAPAN[2]

[1]大阪大学, [2]ISAS/JAXA, [3]東京工業大学ELSI

JUICEは、ESA（ヨーロッパ宇宙機構）のCOSMIC VISION Lクラスの第１号のミッション計画であり、ESAが主体となり日米が参加する木星系探査計画である。2022年打ち上げ，2030年木星系到着，木星系（磁気圏，木星大気，エウロパ・カリストのフライバイ観測）の観測の後、2032年ガニメデ周回軌道に投入され、太陽系最大の氷衛星を精査する。木星との潮汐相互作用によるダイナミックで多様な衛星系、とくに地下海は生命居住環境としても注目されている。

日本は、BepiColombo水星探査計画の日欧協力の枠組みを生かす形で、立案時から計画に参加してきた。現在、機器開発、サイエンス参加を含めて、JANUS（カメラ）、GALA（レーザ高度計）、SWI（サブミリ波動）、JMAG（磁力計）、PEP（プラズマ粒子計測）、RPWI（プラズマ波動）に共同研究者として参加する。JUICE観測機器開発への参加は、GALA、PEP、RPWI、はJAXAを通して、SWIはNICTを通して行われる。2015年4月に、システム要求審査を通り、ISAS/JAXAの小規模プロジェクトとして、日本の木星探査への参加はゴーサインを得た。観測機器が取得したデータを解析する上で、機器開発チームに加わっていないと得られない情報がしばしば本質的に不可欠である。また、開発に参加することで、観測計画に自分たちのサイエンスを反映させることも可能である。

JUICEの科学目的の中で、潮汐相互作用をエネルギー源とする氷天体地下海の状態の解明と、最強の加速器である木星磁気圏中での高エネルギー粒子の挙動の解明は、大きな課題で、日本が関わる機器は、重要な役割を果たす。さらに、氷衛星の組成や内部構造等に関する情報から、木星系の形成過程や形成位置（太陽からの距離）に関してどのような制限を加えることができるのかを考察し、惑星理論研究者と連携して、太陽系形成時での外惑星領域の描像を新たにしたい。

JUICEが木星系の観測を行うのは2030年代であるが、その時点でJUICEが生み出す科学成果は、現在に増して価値の高いものになる。

(i) JWST宇宙望遠鏡や30m級地上望遠鏡の観測により、周惑星円盤（サブ円盤）の検出や、系外惑星を周回する衛星が2030年までには発見されている可能性は高い。(Kepler望遠鏡のデータからも、衛星の存在可能性を示すシグナルは得られているが、確定はしていない。）今後発見される、系外衛星や衛星を育む周惑星円盤を理解するための対象天体として、木星系の精査は重要である。

(ii) 計算機の計算速度と取り扱えるデータ量はこれからも伸長していく。現在の計算機能力では、規模がはるかに大きい木星磁気圏のマルチスケールのフルシミュレーションも2030年には可能で、JUICEの観測データが高エネルギー宇宙プラズマの理解に大きく役立つことが期待できる。

P09

JUICE 搭載多バンド分光カメラ「JANUS」ミッション II

○春山 純一（宇宙航空研究開発機構）、高橋 幸弘、佐藤 光輝（北海道大学）

本講演では、JUICE に搭載される Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator（JANUS）について、その目指すサイエンス、開発準備状況を紹介する。

JANUS は、350-1050nm に感度を持つ多バンド分光カメラであり、
①惑星形成と生命出現の条件は何か
②太陽系環境が変動する仕組みはどのようなものか
を理解するための、分光画像データを取得することを目的としている。

光学系は、口径 120mm で対角 1.4 秒角、狭帯域フィルターにより（バンド幅 10 または 20 nm）の 590 nm, 656 nm, 727 nm, 760 nm, 889, nm, 940 nm分光データ、ならびに広帯域フィルター（60-150 nm）により 410nm, 450 nm, 530 nm, 656 nm, 910 nm, 1000 nm、の分光データ、更にクリアフィルターを用いて、データを取得する。

GALILEO による木星、木星衛星のデータは、太陽系/惑星科学の理解に大きな飛躍をもたらした。 JUICE は、更にそれを進めるものであり、JANUS は、例えば、その解像度と被覆率の GALILEO からの性能向上によって、木星の大気情報や、ガリレオ衛星（中でもガニメデ）の地形・地質情報を取得することで、JUICE の目的である
①惑星形成と生命出現の条件は何か
②太陽系環境が変動する仕組みはどのようなものか
の達成に貢献しようとしている。

JUICE/JANUS への日本の研究者の参加は、日本の固体惑星科学コミュニティが、そうした外惑星探査に関わる機会を得ることになることにつながり、大変意義があろう。はやぶさ、SELENE で国内の固体惑星（地形・構造、地質・鉱物）分野の人材が育ち、また世界的にもその研究レベルの高さが認められるようになってきているが、JUICE/JANUS により、引き続き、国内の固体惑星科学研究者が、その開発段階から、これまでの機器開発、科学データ研究の経験とともに本ミッションに参加し、本ミッション情報を国内において展開し、将来研究への基礎を築くということで、日本の固体惑星科学コミュニティの発展へとつなげていく。

一方、積乱雲及び雷放電観測分野に関して、JUICE/JANUS への参加は、重要な意味を持つ。というのも、日本が中心になって組織した国際研究チーム以外に、当該分野の専門家はおらず、Yellow Book にも記載された積乱雲観測の実施は、日本の参加なしに十分な成果を挙げることは困難であるからである。日本チームは、地球大気で発生している雷放電及びスプライトなどの高高度高放電発光を、衛星及び航空機を使って計測する研究で世界を大きくリードしており、JUICE における成果を、大きくすることに貢献しよう。

P010

土星Fリング-羊飼い衛星系の起源：
土星メインリング拡散による衛星-リング系の形成

○兵頭龍樹[1,2], 大槻圭史[1]

[1]神戸大学理学研究科、[2]Institut de Physique du Globe de Paris

土星のメインリングのすぐ外側かつ土星のロッシュ半径のすぐ外側には、羊飼い衛星と呼ばれる小さな衛星を両側に従えた動径方向に非常に細いFリングが存在する(土星中心からの距離が約140,000km、リングの幅が約100km)。このFリングと羊飼い衛星の起源は1979年に探査機Pioneer 11に発見されてから未解決である。

一方、ロッシュ半径の外側に存在する土星の衛星系は、土星から遠ざかるほど大きくなる傾向にある複数衛星系である。これらの衛星の中には、内部加熱によって内部海を持つ衛星も存在し、ハビタビリティーを考える上でも近年重要となっている。

本研究では、近年明らかになった土星メインリングの拡散進化によって、このような複数衛星系が形成され(Crida & Charnoz 2012,Science, Hyodo et al. 2015,ApJ)、その進化の最終段階で形成されうるラブルパイル衛星同士の衝突破壊によってFリングと羊飼い衛星も形成されうる過程(Hyodo & Ohtsuki 2014,ApJ, Hyodo & Ohtsuki 2015,Nature Geo, accepted)を統一的に議論する。

P011

周惑星円盤への固体物質流入と衛星形成
Inflow of Solid Materials into Circumplanetary Disks and Satellite Formation

○芝池諭人[1] 奥住聡[1] 佐々木貴教[2]
1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
2. 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室

木星や土星の規則衛星は、中心惑星の周りを順行しているため周惑星円盤内で形成されたと考えられる。一方で、周惑星円盤には衛星の形成以前あるいは形成途中にも原始惑星円盤から質量が流入していると考えられる。そのため、衛星形成を理解するためには、1)原始惑星円盤内の固体物質(ダスト)の成長と移動、2)原始惑星円盤から周惑星円盤への固体物質の流入、3)周惑星円盤内でのダストの成長と移動、の 3 点を定量的に理解する必要がある。

本研究では、以上の 3 点を踏まえた新たな衛星形成モデルの構築を目指す。周惑星円盤および原始惑星系円盤内でのダストの成長と移動(上記 1),3))を、ある時間と位置でのダストの重みつきサイズ分布を代表値で表すことで簡略化して計算する。また、原始惑星系円盤から周惑星円盤への固体物質の流入(上記 2))は、近年の大規模ガス流体シミュレーション(Tanigawa et al., 2012)によるガスの流れを背景としてモデル化する。さらに、近年惑星形成論において注目されている pebble accretion 過程(Lambrechts and Johansen, 2012)を衛星形成にも適用する。これは、1000km 以上の微惑星が、円盤外縁で形成しガスの抵抗により中心星に向かって落下してきた大量の小石サイズのダスト(pebble)を集積し、惑星が急成長する過程である。この小石サイズのダストは周惑星円盤にも多く進入すると想像され、これらの微衛星への集積量を計算することで周惑星円盤内での衛星形成過程を再現する。

これまでに、我々は原始惑星系円盤から周惑星円盤に流入する固体物質の質量フラックスを、円盤面と円盤上空の二つの進入経路に分けて解析的に推定した。これは、ガスは原始惑星系円盤から周惑星円盤に円盤上空から進入し、円盤面では逆に周惑星円盤から原始惑星系円盤に流出すると、数値流体シミュレーションにて推定されているためである。このとき、中心星から 5.2AU にある、質量が木星の 1/3 程度のギャップがあまり開いていないガス惑星周りの周惑星円盤を仮定した。結果、1)固体物質の進入は円盤面からが支配的であり、2)原始惑星系円盤外縁から落下してきたダスト(cm サイズが主)はすべて周惑星円盤に進入する、とわかった。進入する固体物質の質量フラックスは、年間約 10^{-3} 地球質量であった。

本発表では、上記の結果を踏まえ、周惑星円盤および原始惑星系円盤内でのダストの成長と移動を議論する予定である。

P012

捕獲された固体物質の周惑星円盤内での分布

○末次竜[1,2]、大槻圭史[2]

[1]神戸大学自然科学系先端融合研究環、[2]神戸大学大学院理学研究科

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

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

P013

輝度温度から探るフォボス内部の氷の有無

○菊池冬彦[1]
[1]国立天文台

火星の衛星フォボスの内部に氷が存在するか否かは、その起源を論じる上で鍵となると考えられている。始源的小惑星の捕獲説の場合、内部に氷が存在している可能性が指摘されている一方で、周火星円盤からの集積説の場合、揮発性物質は蒸発してしまうため、氷は存在しないと考えられている。Rosenblatt(2011)では、フォボスの平均密度（1.85 g/cm^3）から氷の有無について論じている。例えば、フォボスを構成する物質として炭素質コンドライト（密度 2.25 g/cm^3）を考えた場合、フォボスの平均密度はこれよりも小さいことから、いくつかの内部構造が考えられる。内部に氷が存在しない場合、空隙率を 18 %とすると平均密度を説明できる（モデル 1）。氷が存在する場合は、氷の密度を 0.97 g/cm^3 とすると、氷の質量比率が 16 wt%の場合に平均密度を説明できる（モデル 2）。このように平均密度のみから氷の有無を判断することはできないが、これらの異なる内部構造から予想される誘電率を用いて、氷の有無を調べることができる可能性がある。岩石中に空隙がある場合や異なる物質が混入している場合、バルクの誘電率は混合誘電体の実効誘電率として与えられる。実効誘電率は混入の仕方に依存し、例えば球状の混入物がランダムに存在する場合、実効誘電率εは次式で与えられる（黒岩, 1951）。

$$\frac{\varepsilon-\varepsilon_2}{\varepsilon-2\varepsilon_2}=p\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{\varepsilon_1-2\varepsilon_2}$$

ε_1は背景物質である岩石の誘電率、ε_2は混入物である真空あるいは氷の誘電率、p は背景物質の質量比である。炭素質コンドライトの比誘電率（実部、以下略）を 4.7（Garvin et al.,1988）、氷の比誘電率を 3.15（Montopoli et al., 2011）とすると、モデル 1 の実効比誘電率は 3.48、モデル 2 の実効比誘電率は 4.18 となる。このような誘電率の違いはマイクロ波ラジオメータによる輝度温度計測によって調べることができる。輝度温度は物質の温度や誘電率などに依存し、表層の温度を一定（233 K）とした場合、輝度温度はモデル 1 では 222 K、モデル 2 では 216 K となり、実効誘電率の差が輝度温度に反映される。輝度温度は表面の起伏、傾斜、誘電率と温度の深さ分布によっても変化するため、実際にはより複雑なモデルで考えなければならない。また、フォボスの構成物質や内部構造（表面のレゴリス層の厚さ、空隙率や氷の質量比率の深さ分布）にも依存する。本講演では、これらの影響を考慮した場合、氷の有無を判断することが可能かどうかについて検討結果を報告する。[1] P. Rosenblatt, Astron Astrophys Rev, 19:44, 2011 [2] 黒岩大助, 低温科学, 8, 1-57,1951, [3] M.Montopoli et al., Radio science, 46, RS1012,2011.

P014

月表面におけるボルダーの細粒化とそのタイムスケール

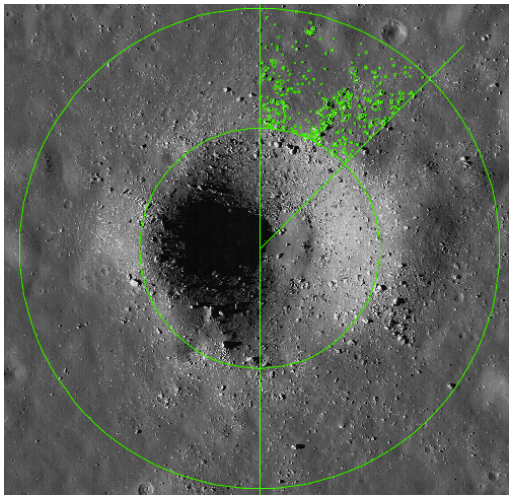
○[1]安藤滉祐, [1]諸田智克

[1]名古屋大学大学院環境学研究科

天体の表面状態はその天体の地質進化過程を強く反映していると考えられ、実際に天体間でその表面状態は大きく異なっている。たとえば月の表面はほとんどが細粒子からなるレゴリス層に覆われ、小惑星イトカワにはボルダーに覆われた領域とレゴリスに覆われた領域が存在する。

この多様性は岩盤への天体衝突によるボルダーの形成と微小天体の衝突などによるボルダーの細粒化のタイムスケールが天体間で異なることで生まれていると考えられる。しかしこれらのプロセスのタイムスケールは観測から抑えられていない。そこで本研究では、月の直径数十 km のクレーターフロアに存在する直径数百 m の小クレーターに伴ったボルダーのサイズ分布を調査する。また小クレーター周辺のクレーターのサイズ頻度分布からクレーター年代学を用いて小クレーターの形成年代を決定することでボルダーのサイズ分布の時間進化を求める。用いたデータは LRO によって得られた高解像度画像である。

結果として、微小クレーターによって内部及び周囲に存在するボルダーの数密度は大きく異なっていた。これは微小クレーターの形成年代を反映していると考えられ、新鮮な微小クレーターはクレーター形成時につくられた多くのボルダーを保存しているのに対し、時間がたつにつれボルダーが破壊され、細粒化していることを反映している。本発表ではこのボルダーの破壊のタイムスケールについて議論する。



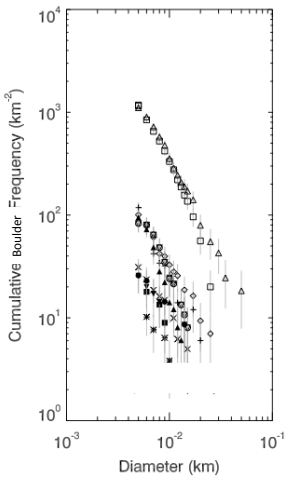


図　左：クレーター周辺のボルダーのカウンティング例

右：Copernicus クレーター底に存在する小クレーターに伴ったボルダーのサイズ頻度分布

P015

サブミクロン局所同位体分析に向けたレーザーポストイオン化SNMSの開発

○ 河井洋輔[1], 寺田健太郎[1], 上岡萌[1], 諏訪太一[1], 松田貴博[1],
豊田岐聡[1], 石原盛男[1], 青木順[1] , 中村亮一[2]

[1] 大阪大学大学院理学研究科、[2] 大阪大学産学連携本部

ウランから鉛への放射壊変を利用し、隕石試料中に含まれるウランと鉛の同体比からその年代を求める U-Pb 年代分析は、太陽系の進化過程を明らかにする上で強力な分析手法である。特に、イオンマイクロプローブ (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry) を用いた局所 U-Pb 年代分析は、天体間の衝突などにより数 μm にまで破砕・角礫化した鉱物組織や、サンプルリターンミッションによって持ち帰られる微量かつ微小な試料にも応用することができ、これまで太陽系史に対し様々な制約を加えてきた (例えば、Terada, K., et al., Nature (2007))。

SIMS は直径数百 nm から数十 μm の 1 次イオンビームを試料に照射し、スパッタされる 2 次イオン (U+や Pb+) を質量差によって分離する計測技術であるが、スパッタされた試料の内、わずか数%しかイオン化せず、ほとんどが中性粒子として失われるため、試料のロスに対し感度が低いというのが最大の弱点であった。スパッタされる中性粒子を何らかの方法で 100%イオン化し、検出感度を大幅に向上させることができれば、これまで分析が困難であったサブミクロンスケールの極微小試料の年代分析を高い精度で行うことが可能となる。

このような目的から、我々の研究グループでは、集束イオンビームによりスパッタされた中性粒子を高出力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 Spectrometry) の開発を行っている (Ishihara, M., et al., Surface Interface Anal. (2010))。本装置は、高い集束性をもつ液体ガリウムイオン源を 1 次イオン源として用い、数十 nm の高い空間分解能で局所分析を行う。ガリウムイオン源は、2 次イオン化効率が低いことが知られているが、スパッタされた中性粒子に対し高出力フェムト秒レーザー (パルス長 50fs、エネルギー 3.5mJ) を照射することで、ポストイオン化による高感度化を実現する。生成されたイオンは、質量分解能 10 万以上を有する多重周回飛行時間型質量分析計 (MULTUM) に導入し、質量に依存する飛行時間の差で質量分離を行う。

これまでに行った実験では、集束イオンビームを用いることで、0.1μm の空間分解能で分析が可能であることを確認し、MULTUM によりイオンを同一軌道上多重周回させ飛行距離を稼ぐことで、質量分解能 2 万以上を達成している。さらに、レーザーの照射位置や集光径、照射タイミングなどを調整することで、1 次イオンビームのみの場合と比較して、1 万倍以上イオン信号強度が向上することを確認している (河井洋輔他、第 63 回質量分析学会総合討論会)。しかしながら、ウランを数 wt.%含む天然鉱物試料を用いた実験から、1μm 以下の空間分解能で局所 U-Pb 年代分析を実現するためには、さらに 2 桁以上検出感度を向上させる必要があることも分かった。

発表では、サブミクロン局所同位体分析に向けた現状の課題と今後の展望に加え、プレソーラー粒子の同位体分析に向けた予備実験の結果についても報告を行う。

P016

空間量子赤方偏移仮説[1]とビックバン仮説との比較検討

Comparison with the Quantum redshift hypothesis and the Big bang hypothesis

種子彰　TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2015-10.

天文学では，天動説から地動説へ，地平面から地球へ等の認識の大転換が起きている．

常識的な定常宇宙に対し，ハッブルが観測した赤方偏移の解釈として，光のドップラー効果として種々の膨張宇宙論(仮説)が提案された．その中でもビックバン仮説は膨張宇宙論の代表と云える．しかも，ハッブルは宇宙が膨張しているとは云わず，膨張している様に見えると云っている．それは地球を中心とし，どの方向へも均等に遠方程赤方偏移が大きく観測されている．その解釈では銀河や恒星が遠方の程後退速度が速くなる必要があり，更にドップラー効果が起きる為には遠方程光速に近い速度が必要である．一番問題なのは地球が中心として観測される事実を説明する為に宇宙空間が膨張しているという解釈と，そのアイデアを出した人が不明(私の調査力が不足？）な点です．

更に，ハッブルの赤方偏移は最初の観測された値では500km/s/Mpcであるが，現在の最新の値は72±4 km/s/Mpcとされいるが，宇宙の膨張速度が減少したわけでは有ない．

<ビック・バン仮説と問題点>　周波数ドリフトを全てドップラー効果だけで説明している．

(1).*空間の膨張が地球で観測できずに、何故遠方からの光で観測可能*という不合理..

(2).何故,*宇宙が* 160 億年前に*一点に凝集して膨張し始めたのか*,理由が説明できない.

(3).*宇宙全質量が一点に凝集し、ブラックホールに成らずに膨張し続ける事が,可能か？*

(4).*背景輻射の温度は.ガモフの計算で 6 ° K,デックの測定値では 3.5 ° K であった.*

<空間量子赤方偏移仮説[1]>　　アブダクション　=定常宇宙と宇宙半径=52*Rs

(1)、宇宙が閉じて且つエネルギー保存則が成り立つと仮定すると，ランバートの法則による光(拡散進行波)*エネルギーが希釈されエネルギー保存則*と~~*周波数保存*~~は両立し無い.

(2). この時,エネルギー保存則を*優先 すれば、波長が赤方(低エネルギー)にズレて観測される.*地球中心の赤方偏移等方性は、*観測地点が地球である事と宇宙が閉じていれば説明可能である．この様に,ハッブルの法則と背景輻射はビッグ・バン仮説以外でも解釈できた.*

(3). 宇宙が閉じているならば,宇宙の彼方に進んだ光が逆方向から地球に向かって来ると考えて,太陽(平均的な恒星)光エネルギー密度が閉じた宇宙半径だけ希釈された時,*地球(観測地点)中心の赤方偏移が観測される．＝地球中心の赤方偏移の理由の説明.*

(4). エネルギー保存法則と **E=h・v** を考慮すると、希釈されて波長がズレ始める距離 **Rs** の **α** 倍の位置では、波長は **α^2** 倍にずれる．　宇宙が閉じていれば,*慣性質量は宇宙全ての(引力)の合力であり,*宇宙が潰れない理由でもある.宇宙半径 **52*Rs** も計算された.

,宇宙が膨張していなくても，ハッブルの赤方偏移を説明できる*新定常宇宙論*が完成した.

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

マルチインパクト仮説　原始惑星ＣＥＲＲＡは何故潮汐断裂したか？

Multi-impact hypothesis,　Why primitive planet CERRA was tide torn?

種子彰　TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2015-10.

月の起源・地球の深海洋底（表面積の 70%）の起源・プレートテクトニクス境界の起源・環太平洋弧状列島の形成メカニズム・プレートが重なるメカニズム・プレートテクトニクスの駆動力・小惑星帯と分化隕石の起源・木星大赤斑の起源・水星コアリッチの起源・冥王星のマントル片起源・生物種大絶滅の原因など・・・全てアブダクションによる成果……

マルチインパクト仮説は、太陽系の謎と地球物理現象の謎の解明に，アブダクションの種方で挑戦した．<これはマルチインパクト仮説のアブダクションによる解説である．>

何故セラの潮汐断裂は何時どの様にして起き，何故地球に衝突したのか？

どの様にそのメカニズムは説明できるのか？　…… 以下にそれを説明します．

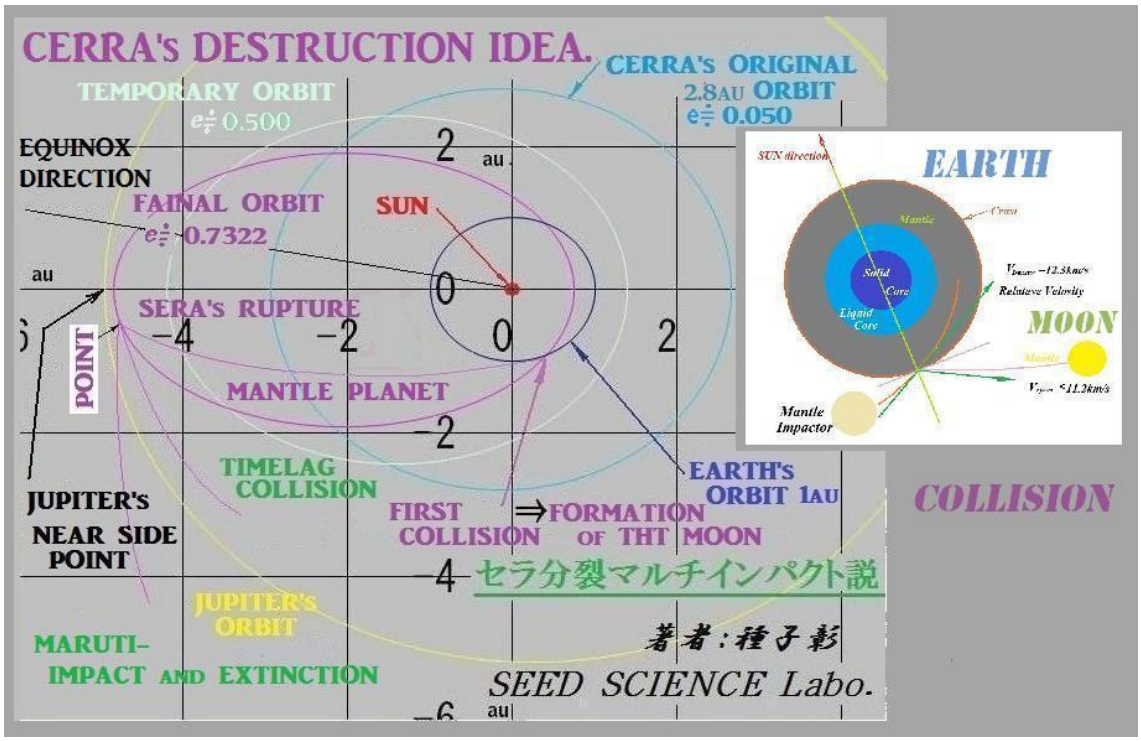


図 1. CERRA 潮汐断裂のメカニズムと衝突時の拡大断面図(衝突体はセラ断裂マントル片)

① 原始惑星 CERRA はチチウスボーデの法則での小惑星帯位置に形成された.(仮説 A)

② 直近外周の木星(巨大質量惑星)の摂動により木星近点側に，軌道離心率が増大する．

③ 衝突直前に，分化した CERRA は木星と太陽の引力により断裂した．(仮説 B)

④ CERRA 断裂マントル片が，地球交差する軌道位置で衝突した．(仮説 C)

⑤ 衝突速度 12.4km/s 角度 36.5 度，地球マントル片が衝撃で射出され月となる．(仮説 D)

⑥ 最初の衝突位置は太平洋，他に南極付近で南極海とテチス海ができ地軸傾斜．(仮説 E)

⑦ CERRA 断裂片のコア&マントル一部は水星となった．(仮説 F) cf.コアリッチな理由．

P018

チチウス・ﾎﾞｰﾃﾞの法則を再検討

Re-examine the Titius-Bode's law

種子彰　TANEKO AKIRA, SEED SCIENCE Lab. 2015-10.

チチウス・ﾎﾞｰﾃﾞの法則は，教科書にも載っていない証明できていない経験法則である．太陽系惑星の軌道半径を示す法則は，各惑星の質量を示す法則（経験則も無い）と合わせて，最大の謎である．諸説と私のアイデアとを同様に比較し評価する．

<旧仮説①>ワイゼッカー(独)1945　は，流体の乱流理論を原始星雲に適用し，星雲が大小の渦に分離し，渦のノードの位置に星が形成される事で，チチウス・ﾎﾞｰﾃﾞの法則を証明できたとする．第ｎ番目の間隙にできる惑星の軌道半径 $Rn=A+B\cdot 2^n$ の説明をしている．

<旧仮説②>シュミット(露)1944～による，「隕石理論」と呼ばれる太陽系の起源論がある．「宇宙進化論」では，太陽は周りに無数の隕石状粒子を捕獲し，軌道が平均化して偏平と成り，各惑星位置に分化した低温起源説である．ある初期条件の下では，太陽を含む三体問題で，補足が起こった後も軌道が安定である条件が有り，その結果を考慮すると $\sqrt{Rn=C;}$ ＋D・n　が成り立っている．シリケイト星とハイドライト星の各二個の係数を合わせれば，チチウス・ﾎﾞｰﾃﾞの法則より，太陽系の軌道を表現できている．

<旧仮説③>吉田茂(日)1980 の HETERODOGMA では，ポテンシャルで証明している．

<新仮説④>種子彰(日)2015　本仮説　微惑星合体の禁則帯仮説では，太陽のロッシュの限界以内では，太陽重力により捕獲されて，太陽のフィーデングゾーンと成る．太陽の周りの微惑星は互いに公転面に合体し周太陽回転円盤(各微惑星は太陽を焦点とする楕円軌道)が形成される．各微惑星は合体条件を満たす近点同志と遠点同志の位置で合体を繰り返し離心率を減少させながら円軌道に収束する．周期の小さい内側軌道より惑星は順次形成される．万有引力で合体するためには，略同一速度で衝突が起きる必要がある．

フィーデングゾーンは，禁制帯(軌道半径 0.4au)を考慮し，塑性反発係数の衝突(熱エネルギーに変換し運動エネルギー減少)と角運動量の平均化=離心率減少し円軌道に近づく．

すなわち，金星の位置(0.7au 円軌道)に惑星が集積するエネルギー範囲は，フィーデングゾーンは長半径で 0.7au～1.0au の楕円軌道の微惑星となる．同様に地球(1.0au 円軌道）に惑星が集積するエネルギー範囲は，フィーデングゾーンは長半径で 1.0au～1.6au の楕円軌道の微惑星となる．順次惑星は形成されて小惑星帯位置にも SERRA が形成される．

×問題は水星位置では惑星は0.1au位置まで落下し太陽に飲み込まれて,水星ができない．

マルチインパクト仮説では，SERRA の断裂したコア+マントル断裂片が，傾いた軌道でも禁制帯の直前で踏みとどまった事で，水星のコアリッチが説明可能となった．

◎この発表で関心の有る研究者が後の議論に多数の参加を願って提起した問題である．

英知を集めて討議と探求の機会を提案する．科学の真理を探求する困難と解決した時の楽しさを貴方と共有したい．実験や再現ができない起源の探求なので，ウェゲナーの様にアブダクションで，さあ謎に挑戦しよう．　　貴方も新仮説で宇宙の謎に挑戦だ！

P019

人工衝突クレーター周辺の誘電率・密度・クラック分布の測定

○石山謙[1], 熊本篤志[1], 高木靖彦[2], 中村教博[1], 長谷川直[3]
[1]東北大学, [2]愛知東邦大学, [3]ISAS/JAXA

月面上には隕石衝突によるクレーター地形が数多く形成されている。日本の月探査衛星かぐやに搭載された月レーダーサウンダーは、月全球の地下構造探査を実施することに成功した[Ono et al., 2009]。Ishiyama et al., [2013] や 石山 他 [2014] は、その観測データの解析から、月の海（玄武岩）領域における地下数百 m までのバルク誘電率を推定した。さらに、月面の湿りの海において、地下玄武岩のバルク誘電率は 2.8〜5.5 と推定され、アポロ・リターンサンプルから得られているバルク誘電率とバルク密度の経験的な関係式[Carrier et al., 1991]から、その表層には約 20 %以上の空隙が含まれていることも見出した。これは、月表層に隕石衝突由来のクラックが多く含まれているためと考えられる。通常、そのようなクラックは媒質中に不均一に分布するため、月面のクレーターを模擬する高速衝突実験を実施して、人工衝突クレーター周辺のクラック量・バルク密度・バルク誘電率を測定した。加えて、その測定結果に基づいて、計算機シミュレーションを実施し、かぐやのレーダー観測で決定されたバルク誘電率と地下の空隙分布の関係を詳しく調査した。

衝突実験は、2014 年 12 月に宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス（水素）銃を使って行われた。標的には 20 cm×20 cm×10 cm の玄武岩を 8 個使用し、直径 0.32 cm のステンレス球（質量 0.133 g）の弾丸を各標的に 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 km/s の速度で 2 回ずつ衝突させた。各標的中に形成されたクレーターの内側で、その深さ方向に直径 2.5 cm のコアサンプルを切り抜き、約 3〜4mm の厚片を約 20 枚作成した。この厚片のバルク誘電率、バルク密度、クラック量を測定することで、それらの深さ分布を調べた。バルク誘電率は、東陽テクニカ社の誘電体測定システム（12962A 型誘電率測定インターフェイスと 1260 型インピーダンスアナライザ）を用いて 5 MHz の周波数で測定した。バルク密度は、厚片の質量と体積から計算した。クラック量は、厚片表面の画像にクラック領域を強調する画像処理を行い、クラックの面積比を測定した。

ここでは、4.541 km/s の弾丸速度でクレーターを形成した標的の結果を報告する。クラック量は、表面から深さ 4cm にかけて約 6%から 0.5%まで徐々に減少し、深さ約 4cm から 6cm では約 0.5%で一定となり、深さ約 6cm から 9cm にかけては約 0.5%から 2%まで徐々に増加した。約 6cm より深部でクラック量が増加したのは、標的の背面（クレーターの反対側の自由表面）で発生した反射波によって引張り応力が生じ、破壊が生じたためで、クレーター近傍のクラックとは区別して考える必要がある。バルク誘電率とバルク密度は、クラック量と逆相関をもち、バルク誘電率は 12.55〜16.21、バルク密度は 2.916〜2.972g/cm^3 の間で変化した。測定したバルク誘電率は、測定したクラック量から有効媒質理論[e.g., 石山 他, 2014]に基づいて推定されるバルク誘電率とおおよそ一致していることを確認した。

我々は、計算機シミュレーション（1 次元 Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法 [Yee, 1966]）を使って、測定した誘電率の分布をシミュレーション空間内に再現し、電磁波の伝搬を計算した。計算された電波の遅延時間から、Ishiyama et al. [2013]と同じ手法でバルク誘電率を推定した結果、電磁波が通過した媒質での誘電率の平均値に一致した。したがって、月レーダーサウンダーが観測したバルク誘電率は、レーダー波が通過した地下数 100m の範囲内の誘電率の平均値に対応していることが示唆される。

P020

高空隙率標的への斜め衝突クレーター形成実験

○岡本 尚也[1], 中村 昭子[2], 長谷川 直[3]
[1]千葉工業大学惑星探査研究センター, [2]神戸大学大学院理学研究科,
[3]宇宙科学研究所

どのような大きさのクレーターができるかは，その標的の空隙率ϕや密度ρ_t，強度Y_tや衝突体の直径d_p，密度ρ_p，強度Y_p，衝突速度v_0によって変わることが知られている(e.g. Housen and Holsapple 2003, Okamoto et al., 2014)．これまで高空隙天体を模擬した空隙率 30%を超える標的（石膏、ガラスビーズ焼結体、雪）への衝突実験が行われており，クレーターの深さdや直径Dと上記のパラメーターとの関係が調べられている．これらの実験は弾丸進行方向と標的表面を垂直に配置して行われ，単純な幾何学条件での物理過程を調べている．しかし，多くの天然の衝突クレーターは衝突角度θが垂直以外の斜め衝突でできたと考えられている(Shoemaker 1962)．また，Deep Impact 計画では人工の衝突物を空隙率 76%の 9P/Tempel 1 彗星へ斜め方向から衝突させている．

斜め衝突の実験的な研究は数少ない．Gault and Wedekind (1978)や大村他(平成 26 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム)で調べられているがいずれも密な岩石が用いられており，クレーターの体積は$\sin(\theta)$の1.80 ± 0.16 乗に比例する結果が得られている(Gault and Wedekind 1978)．彗星などの空隙の非常に高い小天体が標的の場合は，弾丸が表面下に大きく潜り込むことがあるため，密な岩石の場合のクレーターの大きさの衝突角度依存性と差異が出る可能性が考えられる．そこで我々は空隙率~75%を持つ軽石標的を用いた斜め衝突実験を行った．

実験には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用した．弾丸には直径 3.2mm のナイロン球を用いた．衝突速度は~7 km/s と一定のもと，衝突角度（標的表面から測った角度）を 15 度，30 度，45 度，60 度，75 度，90 度と変化させた．衝突後の標的を回収し，クレーターの形状や大きさを調べた．

標的表面の一部が剥がれることで形成されたと思われるスポール領域が見られた．弾丸の進行方向のクレーター直径と垂直方向のクレーター直径との比に衝突角度の依存性は見られなかった．これはスポール破片が標的から剥がれて飛び出すか飛び出さないかということに原因があると考えられる．一方，スポール領域を除いたキャビティの直径(ピット直径)を測定した．弾丸進行方向のピット直径と垂直方向のピット直径の比は衝突角度が浅いほど大きくなる傾向がわずかに見られ，衝突角度が 15 度のとき~1.2 の値をとった．また，ピット直径とクレーター深さは衝突角度が浅くなるに連れて減少する傾向が見られた．衝突速度の鉛直成分がこのことに寄与していると考えられる．クレーターの体積は$\sin(\theta)$の 0.74 ± 0.05 乗に比例する結果が得られ，密な岩石標的の結果と顕著な差が表れた．

P021

鉄質天体へのクレーター形成の温度・速度依存性に関する実験的研究

Experimental study of the temperature and velocity dependences of impact cratering on iron bodies

○小川諒[1]、中村昭子[1]、長谷川直[2]、鈴木絢子[2]

[1]神戸大学理学研究科、[2]宇宙科学研究所/JAXA

惑星空間では天体同士の衝突が普遍的に起こっており、クレーターの形成が起こっている。火星や水星、月といった岩石質の天体についてはそのクレーターの観測が比較的詳細に行われており、また実験的な研究やシミュレーションも広く行われている。一方、鉄隕石の存在からその母天体として、鉄質の天体が存在すると考えられている。そのような天体にもクレーターが普遍的に形成されていると考えられる。鉄の破壊は温度依存性や歪速度依存性を持つということが知られている。そこで本研究では 298 K と 120 K 以下での鉄物質へのクレーター形成実験を、衝突速度を変えて行った。

衝突実験は宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃と、神戸大学の一段式縦型火薬銃を用いて行った。衝突体は岩石質天体と鉄質天体の場合を想定し、弾丸には玄武岩の円盤弾丸(直径 3.2 mm, 高さ 2.0 mm)と SUS の球弾丸(直径 3.2 mm)及び円柱弾丸(直径 15 mm, 高さ 15 mm)を用いた。衝突速度はそれぞれ 4.8-5.2 km/s、6.0-6.5 km/s、0.7-1.2 km/s とした。標的には低温脆性の振る舞いがギベオン鉄隕石と似た、SS400 の立方体(一辺 70 mm)を用いた。そしてクレーター形状やサイズの温度依存性を調べるため、標的温度を 298 K と 120 K 以下にして衝突実験を行った。標的は、液体窒素を用いて冷却し、衝突までの温度上昇を避けるため、チャンバー内に設置後すぐに減圧し温度を 120 K 以下に保った。

実験の結果、低温と室温でクレーター直径に変化は見られなかった。クレーター体積と深さについては、高速度域(4.8 km/s~)では変化は見られなかったが、低速度域(0.7-1.2 km/s)では低温の方が小さくなる結果となった。クレーターが小さくなった原因としては、低速度域での低温標的では側面に大きな亀裂が入っており、そこにエネルギーの一部が割かれたことが考えられる。高速度域では弾丸と標的の質量差が大きく、側面にまで亀裂の形成がされなかったと考えているが、高速度域の場合でも内部に亀裂が入っている可能性はあるので、今後調査を行う。そしてこれらの結果をπスケーリングを用いて、金属におけるクレータリングの先行研究(Holsapple and Schmidt, 1982; Burchell and Mackay, 1998)と比較すると、低速度域における低温での結果は、規格化体積の場合、先行研究から予想される値の 3 分の 1、規格化深さは 2 分の 1 と小さくなった。鉄の破壊には、歪速度が大きいほど、温度が高いほど大きな歪が必要だとされている(Johnson and Cook, 1985)。このような鉄の破壊の特徴と、今回の結果の関係についてはまだ解釈ができていない。

今後は実験結果と iSALE の計算結果とを比較し、Johnson-Cook の強度モデルで用いるパラメータについて検討していく予定である。

P022

砂標的に対する衝突クレーターサイズの真空度依存性の検討

○木内真人[1]，中村昭子[1]

[1]神戸大学大学院理学研究科

衝突クレーターに関する実験的研究は数多く行われており、実験結果に基づいたスケーリング則が得られている（Holsapple, 1993）。しかし過去に行われた衝突実験は 10^5〜1 Pa 程度の範囲の条件下でしか行われておらず、大気をもたない天体表面（超高真空下）に適用できるかどうかは未知である。クレーターサイズの真空度依存性について調べられた研究として、Shultz (1992)は、大気圧 10^3〜10^5 Pa の範囲で粉体標的に対して衝突速度 1〜6 kms^{-1} で衝突実験を行った結果、大気圧が小さくなるにつれクレーター体積は大きくなる傾向が得られ、また粒径が小さい標的ほど大気の影響が大きいことがわかった。Suzuki et al.(2013)では、500〜10^5 Pa の範囲で衝突実験が行った結果（衝突速度 4.5〜240 ms^{-1}）、大気圧とクレーターサイズに関して Shultz (1992)と同様の傾向が見られている。しかし、クレーター形成過程でどのように大気が影響を及ぼすかについてはこれまで明らかにされていない。

本研究では、まず超高真空下でのクレーター直径の見積もりを行った。超高真空下では標的粒子の内部摩擦角が変化することが実験的・理論的に知られている（Perko et al., 2001）。我々は内部摩擦角とクレーター直径の詳しい関係について調べるため、内部摩擦角の異なる標的粒子を 4 種類用意し、各標的に対してクレーター形成実験を行った。直径 8 mm のステンレス球弾丸を、衝突速度 1〜5 ms^{-1} の範囲で衝突させた。実験結果より、クレーター直径 D と内部摩擦角 θ の関係として、$D \propto (\tan\theta)^{-0.60\pm0.08}$ が得られた。この関係と、真空度と内部摩擦角の関係（Perko et al., 2001）から、超高真空下におけるクレーター直径は、粒径 100 μm の砂の場合、1 気圧下でのクレーター直径よりも 20 %程度減少することがわかった。

また我々は、大気圧を 10^5〜1 Pa の範囲で変化させ、シリカサンド標的（粒径〜140 μm）に対してクレーター形成実験を行った。直径 8 mm のステンレス球弾丸を高さ 35 cm から落下させることで、衝突速度 2.7 ms^{-1} で衝突させた。結果、大気圧が小さくなるとクレーター直径は大きくなる傾向が得られた。本研究と先行研究の結果を比較したところ、数 10 ms^{-1}〜数 kms^{-1} の範囲では、10^3 Pa 下でのクレーター直径は 10^5 Pa の直径よりも 1.2 倍大きくなることがわかったが、一部あてはまらないデータも存在する。また、標的粒子にはたらく抵抗を見積もったところ、慣性抵抗はほとんど効かない。粘性抵抗は効き得るが、大気圧には依存しないため、クレーター直径の変化は説明できない。しかし、50 Pa 下で直径 2 mm の発泡スチロール球を落下させ速度を測定したところ、慣性抵抗より大きく粘性抵抗より小さい抵抗が効いていることがわかった。この条件下では粘性流ではなくなり、エプスタイン則に基づく抵抗が効いている可能性が考えられる。今後この効果について検討し、報告する。

P023

水氷の高速衝突蒸発実験

○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]大阪大 理学研究科, [3]ダヌンツィオ大 国際惑星科学研究大学院

太陽系の固体表面を持つ惑星及び衛星の表面を支配する地形は衝突クレータである．このことは天体衝突が天体表層進化を駆動していたことを示唆する．本研究では氷天体衝突によって誘起された化学反応に焦点をあてている．地球型惑星への彗星衝突は揮発性成分の供給[e.g., Dauphas, 2003; Gomes et al., 2005], 衝突蒸気雲内での生命前駆物質の合成 [Martins et al., 2013]などその重要性が指摘されてきた．それに加え近年の惑星探査の進展は氷衛星の表面の詳細な画像，分光データをもたらすことを可能とした．宇宙生物学研究において，氷衛星が火星と並ぶ第一線の重要性を持つことは言うまでもないだろう．ガリレオ衛星群上の衝突クレータの周辺には周辺と異なる反射スペクトルを持つ領域が存在するが[McCord et al., 1997, 1998], これは高速衝突で生成した化合物の沈着によってもたらされたと考えられている[e.g., Mvondo et al., 2008; Ishimaru et al., 2010]. ESAが主導するJUICE探査機は２０３０年代の初頭からの探査によってガリレオ衛星群表面の詳細なデータをもたらすと期待されている．事前に氷天体衝突で引き起こされる物理化学過程についての詳細な理解を得ておくことが必要であろう．

近年，水氷の状態方程式の大幅な修正が行われ，衝突で発生する水蒸気，液体水，生成されるクレータのサイズなどを予測することは可能になりつつあり，氷天体衝突で駆動される物理過程の理解はかなり進んできたといえる[Stewart et al., 2008]．ところが，衝突化学過程に関してはほとんど進んでいない．最大の問題点は氷衛星上の天体衝突では必然的に発生する超臨界水の役割を無視していることである．よく知られているように，超臨界水は通常の水とは全く異なる物理化学特性を示し，有機物や珪酸塩をも溶かす[Furukawa et al., 2007]．重要な点は有機物や珪酸塩が衝撃によって蒸発する条件を満たさなくても，超臨界水への溶け込みによって実効的に蒸発し気相化学反応に寄与しうる点である．これまでの研究では通常の水との化学反応として扱い，衝突で生成される物質を予想してきた[e.g., Ishimaru et al., 2010]．しかし，水の圧倒的な存在度と，超臨界水の特異な物性を考えると従来の理解は塗り替えられる可能性が高い．

このような状況を踏まえて，我々は千葉工業大学惑星探査研究センターに設置された二段式水素ガス銃を用いて氷標的を衝突蒸発させ，発生した気体を開放系で計測する実験系の構築を行っている．まずは試験的に重水氷を用いた衝突実験を開始している．発生した水蒸気を四重極分析計で検出し，蒸発量を定量化する．将来的にはより彗星模擬物質に対する蒸発実験を行い，生成する化学種を分類，生成量を計測することで衝突誘起超臨界水が果たす役割を明らかにすることを目指している．発表では実験の現状について報告する．

P024

海洋への天体衝突: 水蒸気発生量

○黒澤耕介[1], 芝池諭人[2]

[1]千葉工大 惑星探査研, [2]東工大 地球惑星科学

2000 年以降, ジルコン粒子を用いた地球化学的な分析によって, 地球の海洋は43-44億年前にはすでに存在していたことが明らかにされてきた. この時期は地球形成後に惑星間空間に残された天体の衝突(いわゆる Accretion tail)や, 巨大惑星の移動に起因するとされる後期重爆撃期と重なっている. 従って原始地球では海洋への天体衝突が頻繁に起きていたことが推定される. 海水への超高速衝突が起こった場合, 衝突点近傍の水は超臨界流体状態になると推定される. 超臨界水の発生が起こると, 衝突天体が臨界水に効率よく”溶けこみ”激しい気相化学反応を駆動される可能性がある[e.g., Furukawa et al., 2007, Wu et al., 2009]. 衝突天体中の還元成分と水が反応することで, 衝突蒸気雲内の水素分圧が増加しメタンやアンモニアなどを生成しやすくなる可能性が指摘されている[Nakazawa et al. 2005, Sugita and Schultz, 2005].しかし, 天体衝突時に発生する超臨界水の量についての定量的な見積もりは行われておらず, 上記のような反応がどの程度効率良く進むのかはよくわかっていない.

我々は衝突条件に対して超臨界水発生量をテーブル化することを目指している. 最初にエントロピー圧力平面図上での水の相図[e.g., Stewart et al., 2008]を用いて, 水の衝撃応答を検討した. 衝撃圧が 2.8 GPa を超えると, 圧縮条水が超臨界流体化し, 31GPa を超えた場合には衝突後の断熱膨張中に一度は完全に蒸発することがわかった. 従って 31 GPa を超える衝撃圧力を受けた場合は効率よく気相反応が駆動されると期待できる. 続いて iSALE shock physics code[e.g., Wünnemann et al., 2006]を用いて原始海洋を模した厚み 3 km の水層への数値衝突計算を実施した. 直径 1 km の玄武岩が, 20 km/s で垂直衝突した場合に 31 GPa を超える海水質量は衝突天体質量の 6.8 倍に達することがわかった.今後はパラメータ(衝突天体サイズ, 衝突速度)を系統的に変化させていく予定である.

謝辞: iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します.

P025

氷・砂レゴリス層へのクレーター形成実験

○高野翔太[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

はじめに：小惑星ケレスの表層は、岩石レゴリスに氷が混合している可能性があり、その氷を含むレゴリス層は、衝突掘削・堆積や氷の昇華により、空隙率が連続的に変化していると思われる。現在、進行している小惑星探査機 Dawn によるケレス表層調査は，表層の構造や氷含有率に関する情報をもたらすことが期待される。また、この様な表層構造は衝突クレーターの形成や形状にも影響を及ぼすと考えられ、クレーターの調査から表層構造に関する情報が取得できる可能性がある。従って、このケレス上のクレーター研究のためには、室内実験によって氷を含むレゴリス上に形成されるクレーターの特徴を明らかにする必要がある。これまで平岡ら[1]により氷・岩石混合標的を用いたクレーター形成実験が行われたが、標的の含水率は70-100vol.%と大きな範囲であり、含水率が低いレゴリス層の実験例はこれまでにない。そこで、この氷を含むレゴリス層のように空隙やレゴリス間を埋める氷がクレーター形成過程に与える影響を明らかにするため、含水率を 40vol.%以下の範囲で系統的に変化させたレゴリス層に対するクレーター形成実験を行った。

実験方法：衝突実験は神戸大と宇宙研に設置された二段式水素ガス銃を用いて行った。ケレスの氷を含むレゴリス層を模擬するため、湿った石英砂を凍結させて試料を作成した。この凍結砂試料は、粒径 100μm、もしくは、500μm の石英砂と水を混ぜて円筒金属容器に入れて−20℃の冷凍庫で凍らせて作成した。含水量は、砂粒子間をすべて水で満たしている 40vol.%（空隙率 0%）から 6vol.%（空隙率 42%）まで変化させた。弾丸には、直径 2mm と 1mm のアルミ球弾丸を用い、速度 2.0km/s で発射した。また、衝突前は、真空断熱により、標的試料を約−15℃で維持した。衝突時のイジェクタ放出の様子は、高速ビデオカメラで撮影した。さらに、回収した標的上に作られたクレーター形状はノギスとレーザー変位計で形状を計測した。

結果：形成されたクレーターは、含水率 40vol.%（空隙率 0%）の標的では衝突点付近に Pit と呼ばれる円錐型の衝突痕領域を持ち、その周りに Spall と呼ばれる表面がはがれた様な領域を持っていた。一方、 含水率 36vol.%以下（空隙率 12%以上）の標的では Spall 領域を持たなかった。Pit 直径は水分量 40vol.%から 6vol.%（空隙率 42%）の間で直線的な増加傾向が見られた（図 1）。Pit 深さ H と Pit 直径 d の比 (H/d) は、40vol.%から 6vol.%へと水分量が減少すると伴に小さくなった（空隙率は増加）。この比は、Burchell et al. [2] の純氷に対する実験結果や平岡たち[1]の水分量 100 から 70vol.%までの氷・岩石混合物（空隙率 0%）に対する実験結果と比較すると明らかに小さな値となり、含水量の減少と伴に H/d も単純減少する傾向にあることがわかった。[1] Hiraoka et al., [2] Burchell et al.,

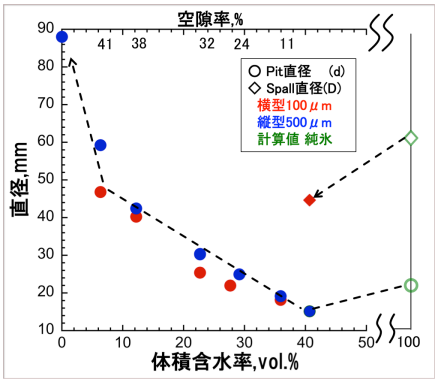


図 1

P026

「粉粒体斜面に対する低速度衝突クレータリング実験」

○林康介[1]、隅田育郎[1]

[1]金沢大学大学院　自然科学研究科

衝突クレータリングは惑星表層における重要な素過程の一つである。粉粒体ターゲットに対する低速度の衝突クレータリング実験（例：Walsh et al., 2003、Takita and Sumita, 2013）は数多く行われており、クレーターのサイズのスケーリング則などが詳しく調べられてきた。しかしこれらの実験のターゲットは水平であり、傾斜している場合については殆ど調べられていない。例えば小惑星はその大きさに比べて起伏が大きいため、斜面に対して衝突クレータリングが起きることが考えられる。実際、小惑星 Vesta では斜面に形成された非対称な形状のクレーターが多く観測されている(Krohn et al., 2014)。そこで、本研究では斜面の傾斜角がクレーター形成に与える影響を調べるために、安息角が異なる 2 種類の乾いた粉粒体(砂及びガラスビーズ)の斜面に対して、衝突のエネルギー「E」と斜面の傾斜角「θ」を変えた低速度の衝突クレータリング実験を行った。本実験は重力が強度よりも大きい重力支配の条件下に該当する。

クレーター形成過程を高速度カメラで撮影し、その画像から、θ の増加に伴い衝突後の崩壊の範囲とその継続時間が増加すること、そしてクレーターの形態が浅く広い形状に変わることが分かった。さらにクレーターの 3 次元形状をレーザー変位計で測定し、クレーターの斜面方向の長さを「Crater length」、走向方向の幅を「Crater width」(図 1)、クレーターの下向きの最大変位を「Crater depth」、クレーターの縁の傾斜方向の角度を山側と谷側についてそれぞれ「α_{us}」、「α_{ds}」と定義した(図 2)。これらの特徴的な長さスケールの θ 依存性を調べた結果、以下が分かった。

(1) クレーターの特徴的な長さスケールは安息角が異なるターゲットに対して、$\tan\theta / \tan\theta_r$ で良くスケーリングできる。

(2) θ の増加に伴い、クレーター形態を(Ⅰ)Full rim crater、(Ⅱ)Broken rim crater、(Ⅲ)Depression の 3 種類に分類することができる。クレーター形態が(Ⅱ)から(Ⅲ)に遷移するときの $\tan\theta/\tan\theta_r$ の値は約 0.75 である。この値はターゲットが水平(θ=0°)の場合の α_{us} 及び α_{ds} を $\tan\theta_r$ で割った値(≈0.8)に近い。

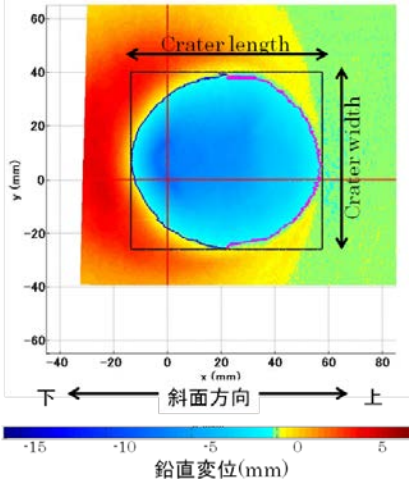


図 1.　クレーターの鉛直変位

赤線の交点は鉛直変位が下向きに最大の点である。

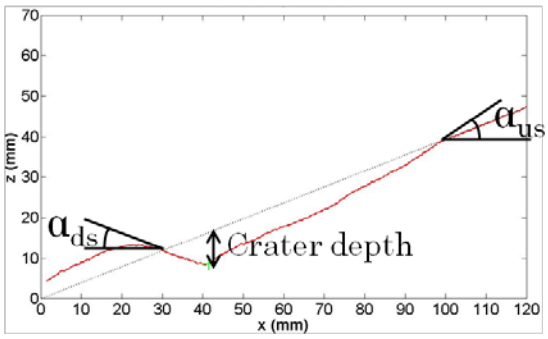


図 2.　クレーターの傾斜方向の断面図

赤の実線は衝突後の粉粒体ターゲットの形状、黒の点線は衝突前の粉粒体ターゲットの形状を示す。

P027

Dark ray craters on Ganymede observed from Galileo and Voyager images

○ Xu Luyuan[1], Hideaki Miyamoto[1], Naoyuki Hirata[2]
[1]The University Museum of the University of Tokyo, [2] Kobe University

Ray craters are impact craters surrounded by radial rays or ejecta patterns (both bright and dark) and prominent on Ganymede, the biggest satellite of Jupiter. Dark ray craters are few percentage when considering the total percentage of ray craters on Ganymede, with unique distributions implying the formation process of the rays and the structure of subsurface.

Using the image data of Voyager, more than 20 dark ray craters were identified, and the origin possibilities of subsurface characteristics or impactor contamination were presented [1-4]. However, since the Voyager images has limited coverage surrounding the apex and antapex regions [5], the analysis of Galileo images might fill in this gap, yielding a more comprehensive understanding of the distribution and formation process of dark ray craters.

We compiled an updated list of dark ray craters by checking the raw images of Galileo and rechecking the raw images of Voyager. Also, we analyzed the distribution of dark ray craters with latitude, longitude, and different terrain type, finding that the dark rays are highly concentrated between latitude 25°, and located on the leading hemisphere also on dark terrain. On the basis of our results, we reconsider the formation process of dark rays. We think that the dark rays are more likely to result from excavation of subsurface materials, rather than impactor contamination; sublimation process is likely to be the main reason for the latitude dependence of dark rays, and there is no obvious evidence that the proposed sputtering (a magmetospheric role) process has had an important role on the formation of dark rays; higher cratering rate (heliocentric objects), leading to a higher gardening rates on the trailing hemisphere, is the most possible reason for the concentration of dark ray craters on the leading hemisphere, while the rarity of dark ray craters on the leading hemisphere may also be a possible explanation.

References [1] Hartmann, W. K. (1980). Icarus, 44. [2] Poscolieri, M. (1982). The comparative study of the planets. [3]Conca, J. (1982). In LPSC. [4]Schenk, P. M., McKinnon, W. B. (1991). Icarus, 89. [5]Patterson, G. W., Collins, G. C., Head, J. W. et al. (2010). Icarus, 207.

P028

原始太陽系星雲における同位体比均質化プロセスの推定

○ 竹石陽[1], 中本泰史[1]

[1]東京工業大学 理工学研究科 地球惑星科学専攻

恒星・惑星系は低温の水素分子を主成分とする分子雲コアの重力崩壊を経て形成される。分子雲コアの物質の起源は多数の赤色巨星や超新星爆発にあるため、分子雲コア中に存在する固体物質の同位体比は互いに異なると考えられる。一方、地球・月・火星・隕石等の固体物質の同位体比は、第一近似で互いに均質であることが知られている。これらを考慮すると、分子雲コアの重力崩壊から現在の太陽系が形成される過程で、すべての固体物質が蒸発するほどの高温状態が存在し、その後再凝縮したことが示唆される。なぜなら、同位体比の均質化が生じるには原子レベル、つまりガスの状態で混合されることが必要だからである。しかし、このような高温プロセスが太陽系形成の過程で生じうるのか、そしてそれは、どの時期に生じたのかということに対するモデル計算は今まで行われていなかった。そこで本研究では、分子雲コアの重力崩壊から原始太陽系星雲の形成と進化に至る過程で原始太陽系星雲のほとんどすべての固体物質が蒸発・再凝縮を経験するようなプロセスが存在するのかを調べた。

モデルとしては、まず 1 太陽質量の分子雲コア剛体回転している状態を初期状態とする。分子雲コアの重力崩壊から原始太陽系星雲の形成・進化にいたる過程は、Cassen & Moosman (1981)に基づいてモデル化する。すなわち、分子雲コアの重力崩壊による中心星・円盤への質量降着率は時間に対し一定で、落下場所は各時刻の崩壊開始時の初期角運動量に応じた遠心力半径で決まるとする。原始太陽系星雲内の固体物質の動きについては、乱流拡散モデル(Wehrstedt & Gail 2002)を用いる。原始太陽系星雲の温度は粘性加熱と表面からの輻射冷却の釣り合いから求める。輻射に対するダストの吸収係数は、1500K 以上からダストの一部が蒸発し始めることを考慮して設定する。分子雲コアの温度と角速度をパラメータとし、固体物質が一度ガスに(2000K 以上を経験)なったものは同位体比の均質化が起こったとする。ダストの成長は考えず、分子雲コア崩壊から 3Myr の間の原始太陽系星雲の進化を追う。

形成された原始太陽系星雲の温度分布は太陽に近いほど高温となる。分子雲コアの初期温度が高い場合、もしくは初期角速度が小さい時に半径が小さいコンパクトな円盤が形成されるため、蒸発・再凝縮を経験する固体物質の割合が高くなる。さらに分子雲コアの角速度を下げると、すべての領域で固体物質の同位体比は均質となった。これは、固体物質が蒸発・再凝縮を経験するようなプロセスは分子雲コアの重力崩壊による原始太陽系星雲の形成と進化で生じうることを示唆する。

P029

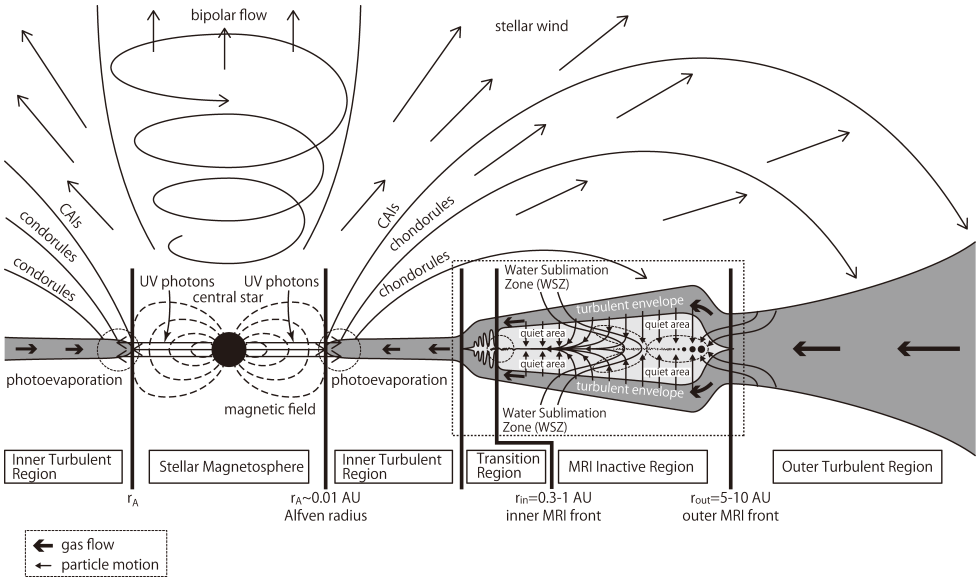
Irradiation Disk におけるタンデム惑星形成

○ 今枝佑輔[1]、　戎崎俊一[1]

[1] 理化学研究所

我々は中心星の輻射と、ガス円盤の粘性加熱によって決まる原始惑星系円盤の定常解を求め、その定常ガス円盤モデル中での固体微粒子の合体成長過程について調べている。定常原始惑星系円盤は、内部乱流領域、MRI 抑制領域、外部乱流領域に分かれる。このうち内部乱流領域は、K や Na などのアルカリ金属原子の熱電離が無視できなくなると現れる。内部乱流領域と MRI 抑制領域の境界にはガス圧勾配が正となる遷移領域が存在する。また、MRI 抑制領域の円盤中央面付近には乱流がない静穏域が現れる。この原始惑星系円盤モデル中での固体粒子の合体成長過程について調べたところ、MRI 抑制領域の内側と外側の二か所の境界で、それぞれ氷が主成分の惑星と、岩石が主成分の惑星が形成されることを見出した。我々はこれを「タンデム惑星形成」と名付けた。本講演では、その概要を説明する。

水昇華域の外側では、固体微粒子が 0.1μm から出発して、Balistic Cluster-Cluster Aggregation (BCCA) として暴走的に成長しつつ、中心星に向かってドリフトし、外部乱流域と静穏域の境界に集積して重力崩壊し、氷でできた微惑星を形成する。ここでは、 Okuzumi et al. 2012 と Kataoka et al. 2013 に従い、粒子の平均内部密度が低下する効果、衝突圧縮、ガス動圧圧縮、高速衝突による破壊を考慮した。一方、水昇華領域の内側の静穏域では、固体粒子は、0.2m ぐらいまで成長すると衝突による破壊で一旦成長を停止し、中心星に向かって落下する。このような固体粒子 (小石) は、静穏域と内部乱流領域の境界 (遷移領域:ガス圧が最大になる) に集積し、重力崩壊して、岩石が主成分の微惑星を形成する。この場所の温度は 1000K 以上と高いので、ここでできる微惑星は揮発性成分をほとんど失っている考えられる。さらに、どちらの微惑星も” 小石降着” により急速に成長し、10^6 年以内に、地球質量程度に達する可能性が高いことが分かった。



P030

原始惑星系円盤からの赤外線分子輝線の高分散分光観測

○野津翔太[1], 野村英子[2], 本田充彦[3], 石本大貴[1,2]

[1] 京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 [2] 東京工業大学 理工学研究科 地球惑星科学専攻
[3] 神奈川大学 理学部 情報科学科

原始惑星系円盤 (以下、'円盤') は、比較的単純な分子種 (e.g., H_2O, CO, CO_2, CH_4, HCN) から複雑な有機物 (COMs) まで様々な分子種を含む。最近では、Spitzer 宇宙望遠鏡や、地上の大型望遠鏡 (e.g., VLT, Keck) による赤外線分光観測などで、比較的単純な分子種の様々な輝線が検出され始めている (e.g., Pontoppidan et al. 2010a, Mandell et al. 2012)。

円盤はほぼケプラー回転をしているため、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。実際我々は、円盤内の化学反応計算と放射輸送計算の手法を用いて、H_2O 輝線のプロファイルの観測から円盤内の H_2O 分布、特に H_2O スノーラインの同定可能性について調べてきた (e.g., 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会 O5-03)。

ここで、凝結温度の違いにより、分子種ごとのスノーラインの位置は異なると考えられる (e.g., Oberg et al. 2011, Pontoppidan et al. 2014)。そのため、円盤ガス・ダスト中の C/O 比は、中心星からの距離に応じて変化すると考えられる (図 1)。例えば H_2O スノーラインのすぐ外側では、多くの酸素原子が H_2O の形でダスト表面に凍結する一方、炭素原子の多くは CO などの形で円盤ガス中に留まるので、ガス中で C/O 比が大きくなる。また、近年系外惑星大気の C/O 比が測定され始めているが、円盤と惑星大気の C/O 比を比較する事で、惑星形成理論に制限を加えられる事が示唆されている (e.g., Madhusudhan et al. 2014)。

そこで我々は、円盤の化学反応計算の結果を応用し、円盤ガス・ダスト中の C/O 比や、様々な分子種の組成分布を調べている。そして、様々な分子種の輝線 (CO, HCN など) の放射輸送計算も進め、円盤の C/O 比など各構造を同定するのに適した輝線の調査を進めている。その結果、同じ分子種のアインシュタインの A 係数や励起温度が異なる輝線を使う事で、円盤内の異なる領域の C/O 比に制限を加えられる事が分かってきた。例えば HCN の場合、我々の計算によると、3μm の輝線では円盤外側、14μm の輝線では円盤内側の構造に迫る事が可能である。これは、14μm の輝線の方が 3μm の輝線と比べ、ダストの吸収係数が小さく励起温度が低いため、円盤内縁の HCN ガスが豊富な領域を追う事が出来るからである。

本発表ではこの解析結果、また将来の近 ~ 中間赤外線の高分散分光観測 (e.g., TMT/MICHI, SPICA/HRS) との関係についても議論する。

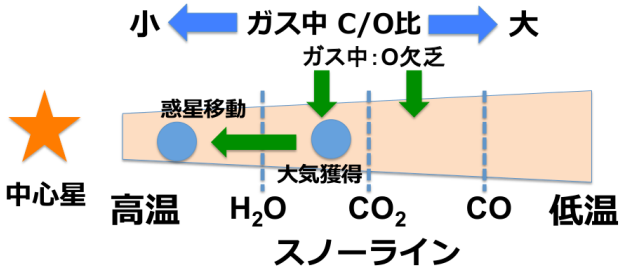


図 1: 原始惑星系円盤内の様々な分子種のスノーラインと、C/O 比の半径分布 (概念図)

P031

デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成：縁辺の位置に対する依存性

○ 城野信一[1]，片山将文[2]

[1] 名古屋大学大学院環境学研究科，[2] 新日鉄住金ソリューションズ

原始惑星系円盤には,「デッドゾーン」と呼ばれる乱流が弱い領域があると考えられている．デッドゾーンの外部と内部で乱流による粘性が大きく変化することになる．この粘性の大きな変化が渦を発生させ，ダストアグリゲイトが渦に捕獲されることにより効率的に原始惑星を形成するメカニズムが Lyla et al. (2009, A&A 497, 869) によって提案されている．このシナリオにそって原始惑星が特定の領域で形成されたらその後の進化はどうなるか？という問題意識の下，Sandor et al. (2011, ApJ 728, L9) によって N 体シミュレーションが行われた．このシミュレーションにおいては，デッドゾーンの外側縁辺において原始惑星が形成されるとしている．また，デッドゾーンの内側外側縁辺それぞれにガス面密度分布のピークが存在し，その二カ所が惑星移動の平衡半径となっている．つまり，ガス円盤からのトルクによって原始惑星はこの二カ所のどちらかに移動する．シミュレーションの結果，数十万年という短いタイムスケールで 10 地球質量程度の天体がデッドゾーンの外側縁辺に形成されることが示された．

このモデルではガス面密度分布の二つのピークにおいてコアが形成されることになるが，面密度分布は別のシミュレーションから得られた分布を用いられている．また，ガス面密度分布は時間進化しない．そこで本研究では 1 次元モデルによりガス面密度分布を時間進化させ，どこでどの程度の質量のコアが形成されるのかを調べた．デッドゾーンの内側と外側境界にそれぞれおいて平衡半径が形成されるが，外側の平衡半径は 10 万年程度で消失してしまう．これは，10 万年程度でガス面密度分布が凸型の準定常状態になり，外側境界では面密度分布が単調減少することによる．結果として，天体は内側に落下することになり，コアは内側境界で形成されることになる．内側，外側境界の位置を変化させたところ，外側境界の位置が中心星から遠い場合では衝突頻度が減るためにコアは形成されないことが分かった．また，内側境界の位置を中心星に近くすると，中心星へ落下するか系外に散乱されてしまい，コアが形成されづらいことが分かった．ここから，このシナリオで木星型惑星のコアが形成されるためには，境界の位置が適切な場所にあることが必要であることが明らかとなった．

P032

新たなギャップ密度分布式を用いたガス惑星の最終質量

○谷川 享行[1]、田中 秀和[2]

[1] 産業医科大学医学部、[2] 北海道大学低温科学研究所

原始惑星系円盤中で原始固体惑星が大きく成長すると、その強い重力により周囲の円盤ガスを動的に捕獲し始め一気に大きく成長して巨大ガス惑星になる。巨大ガス惑星がある程度の大きさになると、その強い重力により惑星軌道上のガスを掃き飛ばし、ギャップと呼ばれるドーナツ状の面密度の低い領域を形成し、自ら成長を止めると考えられている。

Tanigawa & Ikoma 2007 では、ギャップ領域の面密度分布を流体力学的考察により解析的に求め、それを用いてガス惑星成長に関する数値モデルを構築し、ガス惑星がガス捕獲を開始してから円盤が散逸して成長が完了するまでの進化が調べられた。その結果、ガス惑星の成長がなかなか止まらず、標準的な原始惑星系円盤モデルではガス惑星が木星よりも遙かに大きくなると予想された。

しかし、近年の数値流体計算により、ギャップ領域の面密度がこれまで考えられていたものよりも大きく（ギャップが浅く）なることが指摘された。そこで本研究では、この結果をガス惑星成長進化モデルに取り込み、ガス惑星の長期的進化について調べた。その結果、ガス惑星の最終質量はさらに大きくなることが明らかになり、標準的と考えられている原始惑星系円盤では木星サイズで成長を止めることが難しいことが明らかになった。この結果を元に、我々の太陽系を再現しうる原始太陽系円盤の初期進化に対する制約についても議論する。

P033

短周期系外惑星の存在限界と潮汐進化

○長谷川典史[1],生駒大洋[1]
[1]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1995年に初めて系外惑星が発見されて以来、現在までに1600個に及ぶ系外惑星の存在が確認されている。観測数の急激な増加に伴い、軌道長半径や惑星質量、中心星質量といった系外惑星系の個々の特徴について統計的な議論が可能になった。FGKM型星を周回する系外惑星について言えば、ある軌道長半径より内側では、惑星発生率は軌道長半径が小さくなるほど減少し、惑星発生率の減少が起こり始める軌道長半径は中心星質量が大きくなるほど増大する[Mulders, Pascucci & Apai(2014)]。また、惑星の存在限界も中心星質量に依存し、中心星質量が大きくなるにしたがって中心星から遠ざかる傾向が見られる。短周期系外惑星は潮汐によって中心星へ落下していると考えられるが、短周期系外惑星の存在限界と中心星質量の関係について潮汐進化の観点からの理論的考察はこれまでされていない。

そこで本研究では、AFGKM型星を中心星とする惑星系の潮汐進化を、中心星質量をパラメータとして数値計算した。それを元に系外惑星の存在限界を見積り、観測データと比較した。短周期系外惑星であることから軌道の離心率と軌道傾斜角は0とし、中心星に励起される潮汐のみを考えた。潮汐に関わる中心星のパラメータは、一次元恒星進化コードMESAを用いて、ゼロ主系列星年齢から主系列星寿命までの値を中心星質量の関数として決めた。潮汐によるエネルギー散逸は、準静的潮汐の恒星対流層内の渦粘性による散逸[Zahn(1966b), Goldreich & Nicholson(1977)]に加えて、対流層が減少する1.6太陽質量以上の領域については、潮汐に起因する放射層内の内部重力波（動的潮汐）の放射減衰[Zahn(1977)]を考慮した。主系列星寿命または観測的に得られている系外惑星系の年齢で惑星がロッシュ限界まで落下するような初期軌道長半径を潮汐による存在限界の指標（臨界値）とし、軌道進化を逆算することで導出した。そして、臨界値の質量依存性について、潮汐進化の時定数を用いて定量的に議論した。

結果として、観測量の充実している中心星質量が1.5太陽質量以下の系外惑星系について、観測から示唆される存在限界と、潮汐進化による存在限界が整合的であることが示された。観測量の乏しい中心星質量が1.5太陽質量以上の領域については、観測との比較は困難であるが、短周期系外惑星の存在限界について制約を与えることができた。

P034

惑星成長の微惑星初期サイズ依存性

○森島龍司 [1]

[1] カリフォルニア大学

惑星は微惑星同士が衝突合体を繰り返すことにより形成したと考えられる。初期の微惑星のサイズについて近年様々な議論がされている。微惑星形成の研究からは、ストリーミング不安定により 100 km よりも大きな微惑星ができる可能性(Johansen et al. 2007)とダストの直接合体により 10 km 程度の低密度微惑星ができる可能性(Okuzumi et al. 2012, Kataoka et al. 2013)がそれぞれ示されている。一方、惑星集積の研究からは、小惑星のサイズ分布曲線の 100 km 付近の折れ曲がりが 100 km と 100 m のどちらの初期微惑星サイズでも再現されることが示されている(Morbidelli et al. 2009, Weidenschilling 2011)。また、カイパーベルトのサイズ分布は初期微惑星サイズが 1 km 程度より小さいと良く再現できるとこが知られている(Kenyon and Bromley 2012, Schlichting et al. 2013)。以上のように、微惑星の初期サイズには大きな不定性がある。

本研究では著者が最近開発したハイブリットコード(Morishima 2015)を用いて惑星集積のシミュレーションを行った。初期微惑星サイズは、100 m から 100 km まで変化させた。現在のコードでは衝突破壊は考慮されていないが、高速衝突では微惑星同士は合体せずに跳ね返ると仮定した(Genda et al. 2012)。微惑星のサイズ分布進化に着目した初期微惑星円盤の幅が狭い計算と、微惑星散乱による惑星移動に着目した広域計算の二通りを行った。

初期微惑星サイズが小さい場合、暴走成長が二段階に分けられることが分かった。初期暴走成長では、微惑星の速度分布はエネルギー等分配的であり、質量分布関数の冪数 q は 2.5(dn = k m^(-q) dm; n は累積分布個数)程度になる（理論値 q=2.4-2.7）。暴走成長天体が大きくなると、ランダム速度がある大きさより小さい微惑星の脱出速度を上回る。この結果、暴走成長天体への微惑星衝突速度のサイズ依存性がなくなり、暴走成長天体の q は 2 程度になる（理論値 q = 2.0-2.1）。暴走天体の質量が孤立質量に近づくと、それらは連続的な質量分布関数から分離する。従来の N 体計算(kokubo and Ida 1996)のように、初期微惑星サイズが 100 km 程度よりも大きい場合、後者の暴走成長が見られる前に寡占的成長に移行する。

広域計算では、初期微惑星のサイズによらず、まず円盤内側でいくつかの原始惑星が形成する。初期微惑星サイズが 1 km 程度より大きい場合、原始惑星の外側への移動が見られた。この惑星移動により円盤全体のランダム速度が増加し、新たな惑星の成長が妨げられることが分かった。微惑星サイズが 100 m だと、ガス抵抗により中心星方向へ移動する微惑星に惑星が引きずられる傾向が見られた。

P035

「はやぶさ」帰還試料のコンソーシアム研究：Ca-Mg-Na 相及び Fa-S-Ni 相が含まれる粒子

◯中藤亜衣子[1]、矢田達[1]、上椙真之[1]、唐牛譲[1]、橋口未奈子[1]、
松本徹[1]、熊谷和也[1]、岡田達明[1]、安部正真[1]
[1]宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所

小惑星探査機「はやぶさ」は 2010 年に地球に帰還し、S 型小惑星イトカワの試料を我々にもたらしてくれた。これまで地球外物質研究グループでは、400 個以上のイトカワ粒子の拾い出し及び初期記載を行い、カタログ作成を行っている。その内の一部の粒子について、初期分析チームや国際 AO などへ配分作業などを行ってきた[1]。しかし、希少な特徴をもつ粒子については、国際 AO などへの配分はされず、コンソーシアム研究として研究が進められている。例えば、最大粒子[2]や塩を含むもの[3]、鉄・硫化物を含む粒子[4]である。今回、我々は新たに、Ca-Mg-Na 相を含む２粒子および Fe-S-Ni 相を含む１粒子をコンソーシアム研究として提案する。このような相を含む粒子は他に発見されておらず、イトカワ表層物質の新たなバリエーションを示すことができる希少で貴重な試料である。本発表では、これらの粒子の概要と研究案を示し、広くプロポーザルを募集する。

Ca-Mg-Na相を含む粒子: RA-QD02-0210(37μm)とRA-QD02-0228(32μm)は共に細粒(<3μm)のCa-Mg-Naからなる相をもつ粒子である。Ca-Mg-Naを含む相としては、以下の3つの可能性が考えられる。(1)炭酸塩鉱物。水との相互作用で生成する。(2)有機物。炭素を主体的に含むものとして44粒子報告されている。先行研究では、これらの有機物は地球上の汚染物質の可能性が指摘されている[5]。(3)斜長石。初期記載SEM/EDS分析の際に、斜長石と周囲のカルシウム輝石の組成をオーバーラップして取得した可能性が考えられる。XCTによる内部構造、TEMによる宇宙風化層の観察、SIMSによる炭素同位体組成分析、母相カンラン石の酸素同位体組成分析から地球外物質かどうかを判別し、上記３つの可能性について検討する。

Fe-S-Ni相を含む粒子: RB-QD04-0040は細粒(<3μm)のFe-S-Niからなる相をもつ、カンラン石母相の粒子(74μm)である。まず、XCTによる粒子の内部構造の観察の後、XRDを用いて鉱物種の同定を行う。詳細観察・分析には、TEM/EDSおよびSTEMが有用である。この相が単結晶のペントランダイトであった場合は、イトカワ粒子からの初めての水質変成鉱物の発見となる。ピロータイト中の離溶組織としてペントランダイトが確認される場合、その組織観察からイトカワ天体の熱進化過程について知見を得ることができる[6]。

これらの相がpentlandite, carbonateであった場合は、「はやぶさ」帰還試料で初めての炭素質コンドライト物質の発見となる。これは、S型小惑星への炭素質コンドライト物質のインプランテーションを示唆すると考えられる。

References：[1] Yada et al. 2015. *78th MetSoc,#5215*. [2] Uesugi et al., 2014. *77th MetSoc, #5226*. [3] Yada et al., 2013. *76th MetSoc, #5150.* [4] Karouji et al., 2014. *77th MetSoc, #5240*. [5] Uesugi et al., 2014. *Earth, Planets. Space*. *66:102.* [6] Schrader et al., 2015. *46th LPSC, #1604*.

P036

「はやぶさ」帰還試料のコンソーシアム研究: シリカを含む粒子

○ 橋口未奈子[1]，上椙真之[1]，唐牛譲[1]，矢田達[1]，中藤亜衣子[1]，松本徹[1]，熊谷和也[1]，
岡田達明[1]，安部正真[1]
[1]国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所

探査機「はやぶさ」によって持ち帰られたイトカワ粒子は，宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球外物質研究グループキュレーションセンター (Extraterrestrial Sample Curation Center: ESCuC)において，拾い出し，初期記載，保管および配分が行われており，現在まで400 個以上の粒子が分類されている [1]．初期分析チームによって，小惑星イトカワは LL4-6 コンドライトに相当することが明らかになり [2-7]，また，国際 AO 研究により，イトカワの衝撃・熱史などの進化過程が議論されている [e.g. 8]．分類された粒子には，岩石学的・化学的に希少な特徴をもつものが同定されており，これらは，国際 AO には配分されず，コンソーシアム研究として研究が行われている [9-11]．今回，我々は新たに，シリカを含む粒子 (RB-QD04-0069)のコンソーシアム研究を提案する．本発表では，粒子の初期記載概要と研究計画案を示す．

粒子 RB-QD04-0069: 走査型電子顕微鏡 (SEM/EDS) 分析を用いた初期記載により，本粒子から，シリカ (SiO_2)と，カンラン石，輝石，斜長石が同定されている． これまでに初期記載が行われた 400 個以上のイトカワ粒子において，シリカを含む粒子は RB-QD04-0069 のみである．シリカは，さまざまな多形を持ち，温度・圧力条件によって相転移を生じるため，粒子 RB-QD04-0069 の分析により，シリカの結晶相から，粒子が経験した衝撃・加熱作用と，その温度・圧力条件に定量的な制約を与えられると期待される．本粒子はイトカワのより詳細な進化過程を明らかにするための貴重かつ希少な粒子であると言える．

分析計画案: 本粒子の衝撃・熱史，さらに，シリカおよび粒子の起源を明らかにするため，現在，以下の分析を計画している: (1)岩石学的組織観察 (FE-SEM/EDS による高倍率観察/分析，放射光 X 線 CT), (2)シリカおよびカンラン石，輝石，斜長石の結晶構造同定 (放射光 XRD), (3) 鉱物化学組成分析 (FE-EPMA), (4)酸素同位体組成分析 (SIMS) (5)微細構造組織観察 (TEM 観察).

これらは，暫定案であり，分析手法・計画については，広くプロポーザルを募集する．

Reference: [1] Yada et al. (2015) *78th MetSoc #5215* [2] Nakamura et al. (2011) *Science* 333: 1113. [3] Yurimoto et al. (2011) *Science* 333: 1116 [4] Ebihara et al. (2011) *Science* 333: 1119. [5] Noguchi et al. (2011) *Science* 333: 1121. [6] Tsuchiyama et al. (2011) *Science* 333: 1125. [7] Nagao et al. (2011) *Science* 333: 1128. [8] Zolensky et al. (2012) *LPS XLIII* #1477. [9] Yada et al. (2014) *LPS XLIV* #1759. [10] Uesugi et al. (2014) *77th Ann. Meteoritical Society Meeting* #5226. [11] Karouji et al. (2014) *77th Ann. Meeting of the Meteoritical Society*, #5240

P037

「はやぶさ」帰還試料のコンソーシアム研究：アグルーチネイト粒子

◯松本徹[1]、上椙真之[1]、唐牛譲[1]、矢田達[1]、中藤亜衣子[1]、橋口未奈子[1]、熊谷和也[1]、岡田達明[1]、安部正真[1]
[1]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

探査機「はやぶさ」は、S 型小惑星イトカワの表層からレゴリス粒子を回収した。これまで、初期分析、国際公募研究によってイトカワ粒子の研究が行われてきた。一方で、JAXA キュレーション施設で行われている粒子の初期記載において、希少性の高い特徴を持つ粒子が見つかった場合、これらの粒子に対してはコンソーシアム研究として研究が進められてきた[e.g.,1]。本発表では、新たに見つかった粒子(RB-CV-0128)について、粒子の概要を紹介し、コンソーシアム研究としての研究提案を行う。

RB-CV-0128 粒子：走査型電子顕微鏡と元素組成分析による初期記載から、RB-CV-0128 は約 50μm の大きさであり、大部分は溶融組織の形状をしている。また、粒子表面には、空隙や 1μm 以下のサイズの Fe・FeS 粒子が広く分布している。加えて、破断面を示すカンラン石、輝石、斜長石粒子も存在する。このような特徴は、月面から回収されたレゴリス粒子のうち 30-60%を占めるアグルーチネイトに酷似している。月のアグルーチネイトはレゴリスへの微隕石衝突により形成される溶融物であると考えられている[2]。今回はじめてイトカワ粒子中にアグルーチネイト粒子が見つかった。

S 型小惑星に対応する隕石は普通コンドライトと呼ばれ、普通コンドライトのレゴリス角礫岩にはアグルーチネイトは見つかってこなかった[3]。一方で、イトカワから回収された少量のサンプルにアグルーチネイト粒子が観察された。これらの結果は、レゴリス角礫岩と小惑星表層のレゴリスとの違いを示している可能性がある。角礫岩に見つからず、イトカワ粒子にアグルーチネイトが存在する原因を議論するため、見つかったアグルーチネイト粒子の起源・形成過程を推定することが重要である。アグルーチネイト粒子の形成場として、イトカワ表層、イトカワ母天体表層が考えられる。あるいは異なる天体上で形成され、イトカワに飛来した可能性もある。

研究提案：本発表では、粒子の起源・形成過程を明らかにするため、以下のような研究計画を提案する：(1)X 線 CT,XRD, SEM, TEM/STEM を用いた粒子の形態・鉱物学的特徴の記載、(2)SIMS を用いた酸素同位体分析により、粒子の酸素同位体比を他のイトカワ粒子と比較して、粒子がイトカワの物質であるかどうかを判定、(3)TEM/STEM を用いた太陽フレアトラック密度の推定により、天体表面での粒子の滞在期間を推定する。この期間がイトカワの形成年代よりも長い場合、イトカワ母天体に由来する可能性が高い。上記の研究提案は暫定的であり、この粒子から最大限の情報を取得するため、広く研究提案を募集する。

[1] Yada et al. (2013) *LPS XLIV,* #1948. [2] Heiken. et al. (1991) Lunar Source Book. [3] Noble. et al. 2011. *Meteoritics & Planetary Science* 32:A74.

P038

「はやぶさ」帰還試料コンソーシアム研究の進捗：硫化鉄粒子及びリン酸塩鉱物を含む粒子

○唐牛譲[1], 上椙真之[1], 矢田達[1], 中藤亜衣子[1], 橋口未奈子[1], 松本徹[1], 熊谷和也[1], 海老原充[2], 白井直樹[2], 関本俊[3], 山口亮[4], 寺田健太郎[5], 土`山明[3], 中村智樹[6], 野口高明[7], 岡田達明[1], 安部正真[1]

1JAXA，2 首都大，3 京大，4 極地研，5 阪大，6 東北大，7 九大

JAXA 地球外物質研究グループは、サンプルリターンミッションにより持ち帰られた試料の初期記載・試料配分・保管・カタログ作成などのキュレーション作業を行うとともに、リターンサンプルの科学的価値を高めるための試料研究も精力的に行っている。これまで「はやぶさ」帰還試料に対する初期記載によって、約 500 個の粒子に対してカタログ化を進めており、その一部を国際公募研究などへ試料配布を行ってきた。しかしながらカタログに載っている試料の内、科学的に重要な特徴を持ちながら、その特徴を持つ粒子が希少であるために国際公募研究へ提供することができない試料が存在する。このような試料に対しては、科学成果を最大にするために複数の分析を系統的に行うコンソーシアム研究を立ち上げ、共同で研究計画を立案し、分析作業を開始した[e.g. 1]。本稿では、コンソーシアム研究のうちで、主に硫化鉄鉱物から成る粒子、およびリン酸塩鉱物を含む粒子に対する共同研究の進捗状況について報告する。

主に硫化鉄鉱物からなる試料（RA-QD02-0245; ～40 μm）に対して放射光 X 線 CT による三次元組織観察を行った。この結果、この粒子の表面にはカンラン石および輝石が付着しているが、内部にはケイ酸塩鉱物が存在しないことがわかった。三次元組織観察の後、FE-SEM/EDS により表面の詳細観察を行い、この粒子からは宇宙風化組織が見つからなかったが、衝撃組織が観察された。今後、衝撃組織の詳細観察のために FIB により超薄切片を切り出し、TEM/EDS による観察を行う予定である。さらに超薄切片を切り出した残りの部分の元素組成分析を行い、普通コンドライトの金属相の形成過程について制約を与える。分析手法としては、放射化分析もしくは LA-ICP-MS を適用する予定である。現在、LA-ICP-MS で粒子状の試料に対する親鉄元素分析手法の検討を行っている。

リン酸塩鉱物を含むことが初期記載により確認された粒子（RB-CV-0025; 91 μm）に対しては、放射光 X 線 CT により三次元組織観察を行い、3 つのカルシウムリン酸塩が含まれていることが分かった。CT 像を参照しながら試料を樹脂に包埋し、2 つのリン酸塩鉱物が露出するように研磨した。露出したリン酸塩鉱物に対して NanoSIMS による Pb-U 年代法により、イトカワ母天体の形成および大規模衝突年代の推定を行う。

References：[1] Karouji et al. (2014) *77th MetSoc, #5240*.

P039

JAXAにおけるはやぶさ2帰還試料受け入れ設備の仕様検討

○上椙真之[1]、唐牛譲[1]、中藤亜衣子[1]、橋口未奈子[1]、松本徹[1]、熊谷和也[1]、矢田達[1]、岡田達明[1]、安部正真[1]、はやぶさ２帰還試料受け入れ設備仕様検討委員会

[1]宇宙航空研究開発機構

人類初の小惑星からのサンプルリターンを成功させた探査衛星「はやぶさ」の後継機、「はやぶさ２」が、C型小惑星1999JU3からのサンプルリターンを目指し、2014年12月に打ち上げられた。初号機の「はやぶさ」は、S型小惑星イトカワからの微小なレゴリス粒子の採取に成功し、これまでの分析から、地上に飛来する隕石との関連、太陽系における固体物質進化、小惑星等の微小天体の進化に対し、多くの知見を与えてきた[1-20]。

「はやぶさ２」の目標天体である1999JU3は炭素質コンドライトの母天体であると考えられており、「はやぶさ」で得られた試料と比べ、有機物質、揮発性元素に富み、より始原的な物質を回収できることが予想されている。JAXA地球外物質研究グループでは、JAXAキュレーションセンター(Extraterrestrial Sample Curation Center, ESCuC)における「はやぶさ２」帰還試料の受け入れに向けて、設備の仕様検討を開始した。この仕様検討には、国内の惑星物質科学の専門家だけでなく、実験施設からのメンバーや海外からのメンバーも参加しており、「はやぶさ」の時よりも、より多くの視点からの検討を行っている。

本発表では、「はやぶさ」における設備のまとめと、「はやぶさ２」帰還試料受け入れ設備の仕様検討の進行状況、及び、今後のスケジュールなどについて報告する。

References : [1] Nakamura et al. 2011. *Science* 333:1113-1116. [2] Yurimoto et al. 2011. *Science* 333:1116-1119. [3] Ebihara et al. 2011. *Science* 333:1119-1221. [4] Noguchi et al. 2011. *Science* 333:1221-1225. [5] Tsuchiyama et al. 2011. *Science* 333:1225-1228. [6] Nagao et al. 2011. *Science* 333:1228-1231. [7] Nakamura et al. 2012. PNAS 109:624-629. [8] Nakashima et al. 2013. *EPSL* 379:127-136. [9] Noguchi et al. 2014. MAPS. 49:1305-1314. [10] Tsuchiyama et al. 2014. MAPS. 49:172-187. [11] Mikouchi et al. 2014. EPS. 66:82 [12] Noguchi et al. 2014. EPS. 66:124 [13] Nakamura et al. 2014. MAPS. 49:215-217.[14] Noguchi et al. 2014. MAPS. 49:188-214. [15] Tanaka et al. 2014. MAPS. 49:237-244.[16] Harries et al. 2014. EPS. 66:163. [17] Keller et al. 2014. EPS. 66:75 [18] Langenhorst et al. 2014. EPS.66:118. [19] Wakita et al. 2014. MAPS. 49:228-236.[20] Ebihara et al. 2015 MAPS. 50:243-254.

P040

炭素質隕石の反射スペクトル位相角依存性測定

○高松知広[1]、亀田真吾[1]、杉田精司[2]
[1]立教大学、[2]東京大学

2014 年、C 型小惑星「1999JU$_3$」を目標天体とした小惑星探査機「はやぶさ２」が打ち上げられた。はやぶさ２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（含水鉱物）を地球へと持ち帰ることであり、1999JU$_3$ 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 700nm 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おこなう。そしてその撮像結果から 700nm 吸収帯の存在する地点を特定し、着陸地点を決定する。したがってマルチバンド分光観測から 700nm 吸収帯の検出が可能であることを事前に確認しておくことが重要である。我々はこれまでに、ONC-T のフライトモデルを用いて、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おこない、太陽-1999JU$_3$-はやぶさ２の位相角が 30°のときに 700nm 吸収帯が検出可能であることを確認した[kameda et al, in press]。しかし、はやぶさ２が 1999JU$_3$ へと到着し、出発するまでの 2018 年 6 月から 2019 年 12 月の期間において位相角は 0°から 40°の範囲で変化する。したがって、位相角 30°以外においてもマルチバンド分光観測から 700nm 吸収帯を検出可能であることを検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では、ONC-T を模擬したカメラを用いて位相角 0°から 40°の範囲を想定した実験系において炭素質コンドライトに対する反射分光実験をおこない、各位相角での 700nm 吸収帯の深さの変化を測定することを目指す。

本研究では、位相角が 0°から 40°の範囲での反射スペクトルを得るために、出射角を 0°に固定し、入射角が 0°から 40°の範囲で可変な実験系をハーフミラーと回転ステージを用いることにより作製した。そしてその実験系で得られる炭素質コンドライトの反射光を ONC-T で使われている CCD チップと同じものを組み込んだ模擬カメラと透過中心波長が 550nm、700nm、860nm のバンドパスフィルタを用いて検出し、700nm 吸収帯の深さを各入射角において求める。本発表では、その結果について報告する。

P041

重力データから観測された同一地溝上の火山の火成活動の関連性について

○山本圭香[1]・春山純一[1]・大竹真紀子[1]・岩田隆浩[1]・石原吉明[1]
[1]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

月の表側の嵐の大洋の西側部分には、月最大の火山地帯であるMarius丘群をはじめ、Aristarchus、Rumker、Flamsteadなど、火山性の地形が観測される場所が複数存在している。月の過去の火成活動についての理解を深める上で、これらの地域の研究は重要である。

LRO衛星およびGRAIL衛星によって得られた高精度、高解像度の月の地形データ、重力場データは、詳細な地形、内部構造の調査に有用であり、これらの各々の火山地帯に対して、近傍の地形、内部構造からその火成活動のメカニズムを考察する研究がおこなわれてきた（例えばHuang et al., 2013）。

一方で、Andrews-Hanna et al. (2014)は、GRAILのデータを用いてグローバルな重力勾配のマップを作成した。彼らは嵐の大洋の辺縁部が多角形の大規模な割れ目構造（地溝）をしていることを示し、この地溝がかつて内部から表層へのマグマの供給系であり、ここから噴出した溶岩が月の海を覆った可能性について論じた。

Andrews-Hanna et al. (2014)による重力勾配マップを詳細に観察すると、上記の多角形構造だけでなく、その内側にもいくつかの大規模な地溝が存在していることが分かる。そのうちの一つの地溝は、上述のAristarchus、Marius、およびFlamstead近傍の重力異常地域を繋ぐ形で存在している。一つの関心事は、これらの同じ地溝上にある火山地帯の火成活動が、それぞれ独立したメカニズムに起因するのか、あるいは、共通の要因によって起こったのか、ということである。このことを明らかにするため、本研究ではまず、ブーゲー重力異常および重力勾配図を元に、マグマ塊の深さと質量の見積もり、地溝の走向の調査をおこなった。この結果を、年代測定データ、および月のKREEP物質の分布図などと併せて総合的に評価し、マグマの輸送メカニズム、火山の噴出メカニズム、火成活動の関連性についての考察をした。

参考文献

Andrews-Hanna et al. Nature 514, 68-71, (2014).
Huang et al., Planetary and Space Science 89, 188-193, (2013).

P042

月の熱の入江領域の地下密度構造の推定

○内田眞子[1]・石原吉明[2]・平松良浩[1]
1…金沢大学大学院自然科学研究科　2…宇宙航空研究開発機構

重力場はその天体の地下密度変化を反映しているため、地表面から予測できない地下の情報を得る方法として重力場の解析は重要である。現在、GRAIL の全ミッションフェーズの観測データの解析により、月の重力場は球面調和関数 900 次まで展開されており(Lemoine et al., 2014 ; Konopliv et al., 2014)、月内部のより詳細な情報を取得することが可能になっている。また、Yamamoto et al. (2013) は、月周回衛星かぐや搭載のスペクトルプロファイラデータの解析を行い、熱の入江領域にて鉄およびクロムに富むスピネルを含む火山砕屑物を発見し、その成因を地下 10km 以深でマグマと下部地殻が反応したためだと推測している。つまり、熱の入江領域では地殻深部におけるマグマの一時滞在が期待される。そこで我々は、GRAIL による最新の測月データに基づき、熱の入江領域の内部密度構造の推定を行った。本研究では、地形データは球面調和関数 1080 次のモデル(モデル名：LRO_LTM01_PA_1080 [Neumann, 2013])を用い、ブーゲー異常は球面調和関数 900 次の重力ポテンシャル係数データ(モデル名：gggrx_0900C_sha.tab [Lemoine et al., 2014])と地形データから計算する（補正密度 2560 kg/m^3)。ブーゲー異常からモホ面の深さを Wieczorek and Phillips (1998)の重力インバージョンで算出し、モホ面の起伏によるブーゲー異常を差し引いたブーゲー異常を、地殻内の密度異常によるブーゲー異常(以降、残差ブーゲー異常)とする。モホ面の深さを求める際には、先行研究によるアポロ 12/14 号サイトの地殻厚・地殻の平均厚さと調和的な厚さになるように地殻密度(2750 kg/m^3)とマントル密度(3360 kg/m^3)を設定した。下方接続フィルタ 50 次の場合と 100 次の場合のモホ面の起伏と残差ブーゲー異常を比較したところ、どちらにおいても熱の入江領域北部にて、2 箇所の顕著な密度境界の起伏が観察された。これらの起伏は最も浅い地点で地下 12km 程度であり、Yamamoto et al. (2013)で示唆されたマグマの一時滞在領域の深度とも調和的である。これらのことから、我々はこの密度境界の起伏が熱の入江領域で発見された特徴的な火山砕屑物を形成した領域と関連していると推測している。

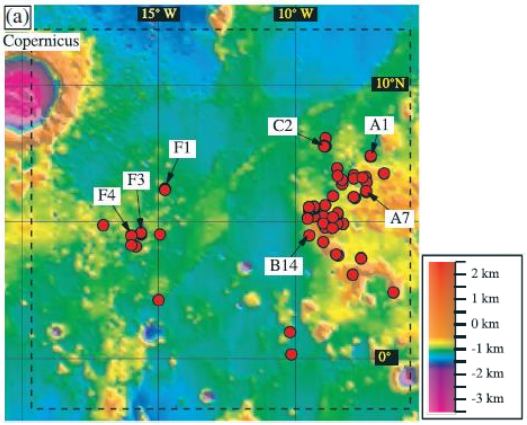


Fig 1.

Fig 1. 熱の入江領域で発見された、鉄やクロムに富む火山砕屑物の分布(赤い丸で示される)。[Yamamoto et al. (2013)より]

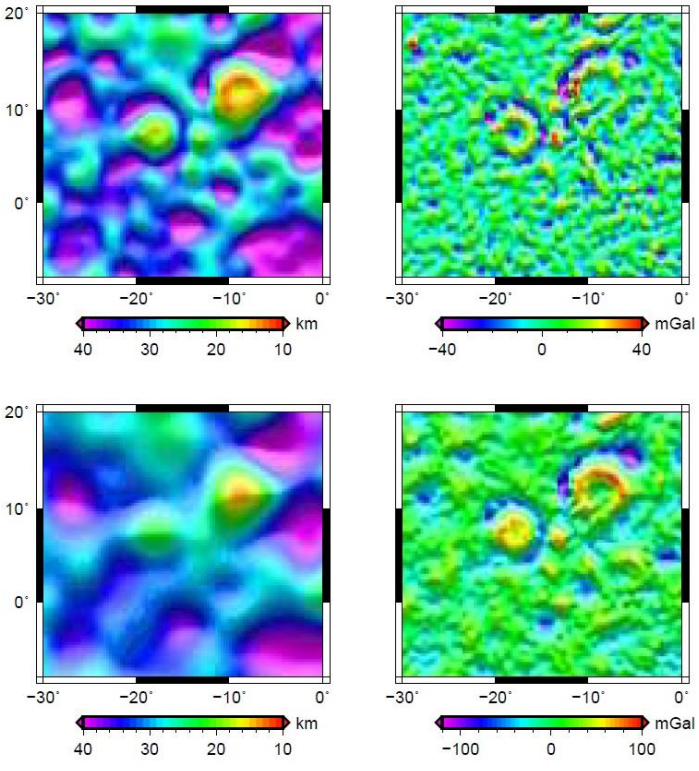


Fig 2.

Fig 2. 熱の入江領域を含む地域における、(左列)地殻厚(右列)残差ブーゲー異常。上段は下方接続フィルタ 100 次、下段は 50 次の場合を示す。

P043

月レゴリス層の熱伝導率モデルと LRO/Diviner データを用いた検証

○坂谷 尚哉[1]、小川 和律[2]、荒川 政彦[2]、田中 智[1]
[1]宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、[2]神戸大学

月表層レゴリスの熱伝導率は、地殻熱流量や表面温度のような月の熱的な環境を理解するための重要なパラメータである。アポロ 15, 17 号で実施された熱流量観測実験では、月レゴリスの深さ 1 m 程度で約 0.01 W/mK の熱伝導率が見積もられている[1]。しかし、アポロ熱流量観測での測定手法にはいくつかの問題が指摘されており、必ずしも信頼できる結果ではない。一方、同時に観測された最表面の昼夜の温度変化から、最表層は地下よりも一桁低い熱伝導率を持つと考えられている[2]。ただし、これは仮定した密度構造に依存し、ユニークなものではない。しかしながら、月レゴリスの熱伝導率は深さによって異なることは確からしく、密度、および自重の深さ方向の分布が月レゴリスの熱伝導率分布を決定づける重要な要因であると考えられているが[3]、特に自重が熱伝導率に与える影響は実験的に調査されておらず、確立した熱伝導率モデルが無かったため、月レゴリスの熱伝導率分布に関する定量的な議論は不十分である。

我々はこれまでに粉体物質の熱伝導率のパラメータ依存性を系統的に調査する実験を行い、それらの結果を統合して真空下での粉体の熱伝導率モデルを構築してきた。このモデルを用いることによって月レゴリス層の熱伝導率分布を推定することが可能である。特に、我々は月レゴリス模擬物質を用いて熱伝導率と荷重の関係を実験的に調査しており、この実験結果に対して適切な補正を行った熱伝導率モデルを用い、更にアポロ 15–17 号地点におけるコアサンプルから推定される深さ方向の密度分布モデル [4] を用いることにより、月レゴリス層の熱伝導率分布を推定した。その結果、深さが深いほど熱伝導率は高くなり、最表層で $2.4 – 4.8 \times 10^{-3}$ W/mK (温度 100 – 400 K)、深さ 1 m で 8.3×10^{-3} W/mK (温度 250 K) の熱伝導率を持つと推定される。

このような熱伝導率分布の妥当性を検証するために、アポロ 15 号、17 号地点の月面温度を 1 次元の熱伝達問題として数値的に計算し、Lunar Reconnaissance Orbiter 搭載の熱放射計 Diviner が取得した両地点における温度データとの比較を行った。その結果、本モデルの結果は Diviner の観測温度と 10 K 以内で一致し、本研究で推定した熱伝導率分布モデルは概ね妥当であることが示された。本発表では、この 10 K 程度の差が生じる原因についても考察し、レゴリスの熱物性モデルの修正についても報告する。

[1] Langseth et al. (1976), *Proc. 7th Lunar Sci. Conf.*, pp.3143. [2] Keihm et al. (1973), *Proc. 4th Lunar Sci. Conf.*, 3, pp. 2503. [3] Horai (1981), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 27, pp.60. [4] Carrier et al. (1991), in *Lunar Sourcebook*.

P044

月の南極ーエイトケン盆地における海の火成活動

○田口雅子[1]，諸田智克[1]，加藤伸祐[1]
[1]名古屋大学環境学研究科

月の裏側の南半球には，直径約 2500 km [Spudis et al., 1994] の，太陽系最大級の衝突クレーターである South Pole–Aitken（SPA）盆地が存在する．クレーターのスケーリング則によると，SPA 盆地形成時（4.4-4.1 Ga）に深さ～700 km まで溶融し，内部構造が大きく変えられた可能性が示唆されている[Lucey et al., 1998]．このような大規模な溶融と構造変化は，その後に起こった海の火成活動（4.0-2.0 Ga）に影響を与えた可能性がある．本研究では，SPA 盆地を形成した巨大衝突の影響を評価するために，SPA 盆地内，および周辺の海でマグマ噴出量を推定し，SPA 盆地外の海での噴出量との比較を行った．

マグマ噴出量を推定するためには，海の表面積と厚み（深さ）を推定する必要がある．本研究では，海と高地での主要鉱物の吸収位置の違いを利用した吸収深さマップ（図 1B）を用いて海領域を同定し，表面積を決定した．また，海の厚みに関しては，（1）マグマによって埋められたクレーター（図 1C），（2）溶岩流の下層を掘り抜いた最小クレーター（図 1D），（3）溶岩流の下層を掘り抜いていない最大クレーター（図 1E）のサイズを調べることで制約した．

今回は SPA 盆地内にある衝突クレーターApollo，Leibnitz，Ingenii, Von Karman と，SPA 盆地外のクレーターである Tsiolkovskiy を埋める海で，溶岩流の体積を推定した．この結果を月の裏側の FHT，および表側に存在する海でのマグマ噴出量と比較を行い，SPA 盆地を形成した衝突の，海の火成活動への寄与について議論する．

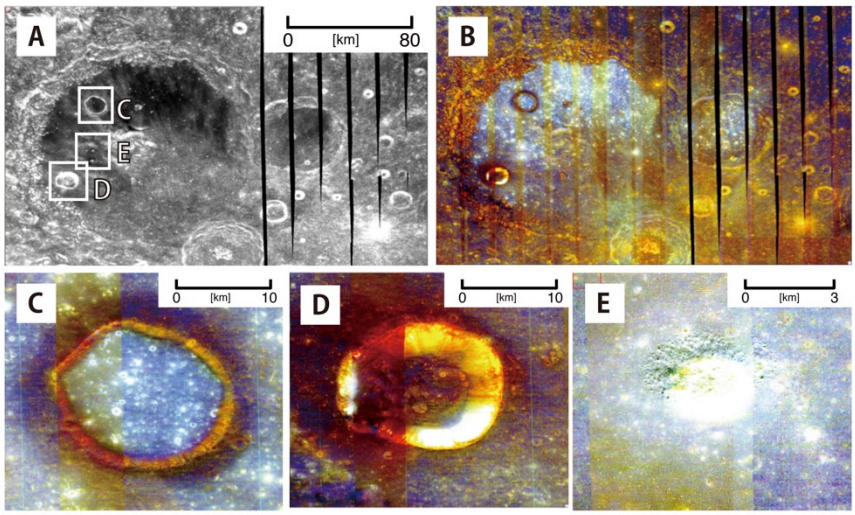


図 1．Leibnitz での解析例．(A) TC マップ (B) 吸収深さマップ（R : d950, G : d1050, B : d1250） (C) 溶岩流によって埋められたクレーター (D) 下層を掘り抜いたクレーター (E) 下層を掘り抜けなかったクレーター

P045

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

○早川 基[1]；前島 弘則[1]；BepiColombo MMO プロジェクトチーム[2]
[1]独立行政法人 宇宙航空研究開発機宇宙科学研究所
[2]国内外大学・研究所・宇宙航空研究開発機構

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であった。米国マリナー10 号による３回のフライバイ観測(1974-5)は、この小さな惑星にはあり得ないと考えられていた磁場と磁気圏活動の予想外の発見をもたらしたが、その究明は長らく夢に留まってきた。近年の技術革新により、ようやく周回観測が可能となってきており、2011 年 3 月からは米国 MESSENGER が周回軌道からの観測を行っていたが、本年 4 月 30 日に観測を終了した。「BepiColombo」は、欧州宇宙機関（以下、ESA）との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」 の知見に大きな飛躍をもたらすし、内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。また、MESSENGER によってなされた数多くの発見は BepiColombo によって解き明かされる事が期待されている。

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

日本側は本年 3 月に FM の総合試験を終了し、4 月に MMO を ESA/ESTEC へ輸送、6 月に ESA 側へ Handover した。現在は本来末より開始される予定のスタックレベル(MCS:Mercury Cruise System)の総合試験の開始を待っている状況である。ESA 側は Mission CDR を 3 月に終了。各モジュール(MPO,MTM)の単体総合試験を実施中である。BepiColombo の各モジュールは MCS 試験の終了後射場へと輸送され 2017 年 1 月に予定されている打ち上げに備える事になる。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する「BepiColombo 科学ワーキングチーム」(年１回程度開催)で立案・実施される。本講演では、これら科学観測に関連した状況、日本側が製作を担当する MMO の状況並びに ESA 側進捗状況について最新状況を報告する。

P046

ソーラー電力セイルによるクルージングフェーズサイエンス

Cruising phase sciences using Solar Power Sail

○岩田隆浩[1], 松浦周二[2], 津村耕司[3], 矢野 創[1], **平井隆之**[1],
米徳大輔[4],松岡彩子[1], 野村麗子[1], 森 治[1]
[1]宇宙航空研究開発機構, [2]関西学院大学, [3]東北大学,[4]金沢大学

ソーラー電力セイル探査機は、ソーラー電力セイルによる外惑星領域探査を実証することを目的としており、その主要なサイエンスターゲットは木星トロヤ群小惑星の表面および内部の科学探査である。しかしながら、打上げから木星スイングバイまでのクルージングフェーズは、その空間的（約 6AU）・時間的（約 6 年）拡がりによって、魅力的な科学研究の場を与える。我々は、このフェーズに実現を目指す科学観測をクルージングフェーズサイエンスと規定して、以下に掲げるサイエンスの実現を目指している。

赤外線観測装置 EXZIT(Exo-Zodiacal Infrared Telescope)は、口径約 10cm の可視・赤外線望遠鏡である。地球近傍から木星軌道までの長期間の観測により、黄道光の数密度、組成、アルベド等の立体構造を明らかにする。また小惑星帯以遠では、黄道光の影響が地球近傍より著しく低下することから、赤方偏移 z が 10 を超える宇宙初期の再電離などによる宇宙赤外背景輻射を捉えることにより、宇宙の初期状態の解明が期待される。

ダスト観測装置 ALADDIN2 は、ソーラー電力セイル小型実証機 IKAROS に搭載された ALADDIN（大面積惑星間塵検出アレイ： Arrayed Large-Area Dust Detectors in INterplanetary space）からの改良型装置である。ALADDIN による地球～金星近傍のダスト観測に加えて、地球～木星軌道間のダストを分析するとともに、EXZIT との比較により太陽系のダストを 3 次元構造とその場観測との両面から解明する。

ガンマ線バースト（GRB）観測装置は、地球－探査機間の基線長が最大で約 6AU に及ぶことを活用して、ガンマ線バースト天体の位置を高精度で決定するガンマ線望遠鏡である。GRB の観測から高エネルギー粒子の加速機構の解明を行うとともに、EXZIT との協同により宇宙初期状態に関する新たな知見が得られることも期待される。

磁力計は、探査機本体とトロヤ群小惑星にランデブーする子機への搭載が検討されており、このうち探査機本体側の装置は、クルージングフェーズ中での観測により、地球近傍～木星軌道においてプラズマの太陽系動径方向の構造を明らかにすることを目指す。ソーラー電力セイルの両端に搭載することにより、10m オーダーの高解像度が得られ、これは電子スケールでの分解に適している。これにより太陽風の加熱機構が明らかになることが期待される。

P047

金星探査機あかつきの軌道投入計画と観測計画

○今村剛[1], 中村正人[1], あかつきプロジェクトチーム
[1]JAXA 宇宙科学研究所

「あかつき」は 2010 年 5 月に打ち上げられ、2010 年 12 月に金星周回軌道への投入に失敗したのち、太陽を周回する人工惑星となった。その後の検討の結果、主エンジンは破損しているものの姿勢制御用の小型エンジンを用いて金星に到達することができる見通しとなり、2015 年 12 月に改めて金星周回軌道への投入を試みることになった。新たな軌道計画では周期およそ 8-9 日、遠金点は約 30 万 km であり、当初案より大きな軌道となる。全般的な解像度の低下は避けられないが、気象研究に特化した多波長での連続観測という戦略は依然としてユニークなものであり、当初の計画に迫る成果を得ることは可能と考えている。

金星大気の様々な謎の中でも、金星全体をとりまく暴風、スーパーローテーションは太陽系の気象学の最大の謎であり、最重要の研究課題である。金星の自転速度が赤道で時速 6 km であるのに対して、濃硫酸の雲が位置する高度 60 km 付近では時速 400 km の風が東から西へと吹いている。地球気象学の常識では惑星規模の風には自転が関わっており、自転速度を大きく超える風が広範囲で吹くことは考えにくい。スーパーローテーションのメカニズムについては多くの研究があるが、未だ相矛盾する見解があり、決定打はないと言って良い。

濃硫酸の雲がどう維持されているのかも不明な点が多い。硫酸は大気中の硫黄化合物から光化学反応で作られると考えられる。雲粒は重力沈降や大気循環により下層大気に運ばれて分解されるので、雲を維持するためには上層大気まで雲の原材料を常に運び上げていなければならないが、そのメカニズムはわかっていない。また雷放電から放射されたことをうかがわせる電波雑音が金星の近くでとらえられているが、暖かく乾燥した金星大気で地球の雷雲のメカニズムが働くことは考えにくい。金星の雷は雲の物性の重要な手がかりを提供する可能性がある。硫黄化合物は火山ガスとして供給されている可能性があるが、金星の現在の火成活動はほとんどわかっていない。

「あかつき」は金星周回軌道上から地球気象衛星に似たリモートセンシングによって厚い大気層の内部の運動を映像化し、スーパーローテーションや硫酸雲形成のメカニズムといった謎に挑む。観測装置としては、雲の分布や地表の火山活動などを見る近赤外カメラ、雲の温度を見る中間赤外カメラ、雲の生成に関わる化学物質を見る紫外カメラ、雷の発光をとらえる高速測光器を搭載する。これらを使って複数の高度の雲や微量ガスの分布を連続的に撮影することにより、大気の 3 次元の運動をとらえる。また探査機と地上局を結ぶ電波で金星大気の鉛直構造を調べる電波掩蔽観測を行う。観測データは気象学研究に適した形式でアーカイブされ（FITS, NetCDR）、世界に向けて公開される。

P048

月・惑星探査用飛行時間型質量分析装置の開発

○大石峻裕[1,2], 齋藤義文[2], 齋藤直昭[3], 藤原幸雄[3], 長勇一郎[4], 須藤雄志[1,2]
[1]東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, [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]立教大学理学部

月・惑星探査において、その場の質量分析から天体の起源と進化に関する情報を得ることができる。近年の探査において、NASA の火星探査機「Curiosity」による年代計測[Farley et al., 2014] や、ESA の彗星探査機「Rosetta」によるチュリモフ・ゲラシメンコ彗星の D/H 比計測[Altwegg et al., 2014]やN_2/CO 比計測[Rubin et al., 2014]が質量分析装置により行われた。また、ISAS ではこれまで天体周辺空間のイオンを質量分析により計測する TOF(Time-Of-Flight)型質量分析器が開発され、「かぐや」では月周辺プラズマのイオン質量分析を行った[Saito et al., 2010]。しかしながら、ISAS では月・惑星の表面物質計測を目的とした質量分析装置は未開発であり、その開発が望まれている。そこで我々は月・惑星の探査を想定した TOF-MS(Time-Of-Flight Mass Spectrometer:飛行時間型質量分析器)の開発を進めている。またその応用法の 1 つとして、質量分析装置を使用したその場 K-Ar 年代測定を検討している。

我々が検討している年代計測システムでは LIBS(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy:レーザ誘起絶縁破壊分光法)による K 濃度測定と TOF-MS による Ar 同位体測定から K-Ar 年代を求めるものである。その場 K-Ar 年代測定が可能となれば、火星の気候変動や、月の進化の過程について制約を課すことができる可能性がある[長ほか,2013]。そこで我々は、着陸機に搭載可能な直径 10[cm]、全長 20[cm]程度の TOF-MS を開発している。これまでにイオン源と TOF-MS で構成される K-Ar 年代計測のための試験モデルの製作を行った。

さらに、我々は月・惑星でのその場での表面物質計測のために、この試験モデルを用いた岩石を構成する主要元素測定の試験も検討しており、そのための光学系と機構の設計を進めている。年代測定システムでは Ar 同位体計測の精度を高めるため、レーザイオン化法により生じたガスをゲッターに通した後、TOF-MS へ導入する。そのためそのままでは、岩石試料の主要元素測定には使用できない。そこで、この試験ではゲッターを使用せず、レーザーアブレーションにより抽出したガスを試験モデルへ導入することで、岩石中の物質を計測することを予定している。本発表では(1)K-Ar 年代測定のための試験モデルの初期性能結果、(2)岩石を構成する主要元素測定について報告する。

P050

Feasibility of the exploration of the subsurface ocean of Jupiter's icy moon by Jovian hectometric radiation spectra

○A. Kumamoto[1], Y. Kasaba[1], H. Misawa[1], and F. Tsuchiya[1]
(1) Tohoku Univ.

Subsurface liquid ocean of the Jupiter's icy moons, which is suggested by several studies, is one of the most important targets in the Jovian exploration missions. We propose a new method for determination of the depth of the boundary between the icy crust and liquid ocean below the icy crust by using interference patterns found in the spectrogram of the Jovian hectometric radio emissions (HOM). If we can operate an wave receiver onboard the icy moon orbiter, we can obtain spectrograms of the HOM propagating from Jupiter. Because the emissions directly from Jupiter can be interfered with the emissions reflected at the icy moon's surface and subsurface boundaries, we will find interference patterns in the measured spectrograms. In case of the Moon, the lunar orbiter SELENE detected the interference patters in the spectrograms of auroral kilometric radiation (AKR) [Ono et al., 2010]. Because the interference occurs between AKR directly from the earth and AKR reflected at the lunar surface, the amplitude of the interference patterns are almost constant. In case of Jupiter's icy moons, HOM directly from Jupiter, HOM reflected at the icy crust surface, and HOM reflected at the boundary between icy crust and liquid ocean are interfered with each other. Due to slight phase difference between HOM emissions reflected at the surface and subsurface boundaries, the amplitude of the interference patterns will be modulated. The depth of the liquid ocean can be determined the frequency width of the modulation. Assuming that the frequency of HOM is ˜3 MHz, the permittivity of the icy crust is 3, permittivity of the liquid ocean is 87, loss rate in the icy crust is 7 dB/km, the depth of the ocean is 5 or 10 km, and spacecraft height is 500 km, the receiver's specifications needed for measurement of the interference patterns in the spectrogram are as follows: (1) Frequency range: 2.9 - 3.1MHz, (2) Frequency resolution: 100 Hz, and (2) The interval of spectrum measurements: 30 sec. In addition, the following two issues have to be considered in actual application: (a) HOM itself has band structures in the spectrogram due to anisotropy of the emission at the source. (b) The roughness of the surface and subsurface boundaries has to be within the half wavelength (˜50 m). (c) The delay by inhomogeneity of TEC of the moon's ionosphere has to be less than the half of the period of the HOM (~0.17μsec), which corresponds to the dTEC ~ 2.8×10^{12} m^{-2}.