
日本惑星科学会誌 遊・星・人

第23巻 第1号

目次

巻頭言 百瀬 宗武	3
-----------	---

特集「月の火成活動からみた熱進化」

かぐや衛星観測データに基づく月上部の玄武岩質溶岩ユニットのバルク誘電率と空隙率推定	4
---	---

石山 謙, 熊本 篤志, 小野 高幸, 山口 靖, 春山 純一, 大竹 真紀子, 加藤 雄人, その他2名

月探査衛星「かぐや」の分光観測に基づく月のマントル・地殻進化の新たな描像	15
--------------------------------------	----

中村 良介, 山本 聡, 松永 恒雄, 小川 佳子, 横田 康宏, 石原 吉明, 廣井 孝弘

アップヒールドーム(U.S.A, ユタ州)はいかにできたか? -地下の岩塩層によって修正されたインパクトクレーター-	25
--	----

坂本 正夫, 小川 勇二郎

エポックメイキングな隕石たち その2 ~Chelyabinsk隕石~	35
------------------------------------	----

杉浦 直治

系外惑星「遠い世界の物語」その2 ~灼熱天王星GJ3470bの大気を初めて観測~	38
--	----

福井 暁彦, 成田 憲保

火の鳥「はやぶさ」未来編 その5 ~はやぶさ2統合サイエンスの理念~	43
------------------------------------	----

小林 直樹

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その22 ~米国航空宇宙局深宇宙ネットワークの活躍と貢献~	48
--	----

戸田 知朗, あかつきプロジェクトチーム

「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線 ~地球惑星科学における装置開発の重要性~」 講演会の報告~	53
--	----

寺田 健太郎, 豊田 岐聡

「天体衝突物理の解明(IX) ~火星の進化~」参加報告	57
-----------------------------	----

羽村 太雅

研究会報告:「イプシロンロケットによる小型惑星探査」に関するシンポジウム	61
--------------------------------------	----

荒川 政彦, 高橋 芳幸, 早川 雅彦

研究会開催報告:計算惑星科学シンポジウム	64
----------------------	----

林 祥介, 梅田 隆行, 梅村 雅之, 小河 正基, 亀山 真典, 玄田 英典, 小久保 英一郎, 他5名

2013年度 秋季講演会報告	70
----------------	----

渡部 潤一

JSPS Information	72
------------------	----

Contents

Preface	M. Momose	3
<hr/>		
Special issue : Lunar volcanism and thermal evolution		
Estimation of the bulk permittivity and porosity of lunar uppermost basaltic units based on the observation data of SELENE	K. Ishiyama, A. Kumamoto, T. Ono, Y. Yamaguchi, J. Haruyama, and 4 authors	4
New views of the Moon as revealed by Spectral Profiler onboard Kaguya	R. Nakamura, S. Yamamoto, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Yokota, and 2 authors	15
<hr/>		
How did Upheaval Dome (Utah, U.S.A.) form? —The impact crater modified by salt layer under the ground—	M. Sakamoto and Y. Ogawa	25
<hr/>		
Epoc-making meteorites (2) —Chelyabinsk meteorite—	N. Sugiura	35
Tales of distant exoplanet worlds (2) —First observation of the atmosphere of the hot Uranus GJ3470b—	A. Fukui and N. Narita	38
Phoenix “Hayabusa” : A tale of the future (5) —A philosophy of the Hayabusa-2 Interdisciplinary Science—	N. Kobayashi	43
Road to the first star : Venus orbiter from Japan (22) —Activity and contribution to Akatsuki of NASA Deeps Space Network—	T. Toda and AKATSUKI Project Team	48
Report on “New frontier of Earth and Space Science developed by mass spectrometry” workshop	K. Terada and M. Toyoda	53
Report : Meeting “Physics of Impact Process of Solar System Bodies IX”	T. Hamura	57
Workshop report : Symposium for a small scale planetary exploration using the epsilon rocket	M. Arakawa, Y. Takahashi, and M. Hayakawa	61
Symposium on Computational Planetary Science	Y. Hayashi, T. Umeda, M. Umemura, M. Ogawa, M. Kameyama, and 7 authors	64
Report of 2013 Fall Meeting	J. Watanabe	70
JSPS Information		72

巻頭言

ALMAによる惑星形成研究のスタート

南米チリで建設されていた大型電波望遠鏡・ALMAが稼働を始めた。まだ予定されている最終性能には到達していないものの、目を見張る成果も出始めている。原始惑星系円盤に関しても、もはや単純に「円盤」とは呼べないくらい非対称な構造を示すものや、ガス化学種の空間分布の違いから一酸化炭素分子の凍結境界(水に対する雪線に相当)が検出されるなど、天体物理学的にも物質科学的にも、探究心をそそられる結果が得られてきている。その詳細はいずれ、本誌でも紹介される機会があるだろう。

ところで「原始惑星系円盤」の存在が観測的に確立されたのは、そう遠い過去のことではない。何を隠そう、私が大学院での研究テーマを探していた約20年前は、ちょうどこの新たな研究対象がはっきりと意識され、これからどんどん研究を進めていこうという熱気と興奮が満ちていた時期であった。個人的にも、野辺山へ初めて足を運んで45m電波望遠鏡の観測を見学させてもらったときに、牡牛座DM星からの円盤ガス放射の初検出を目撃する幸運に恵まれ、興奮したことを覚えている。

それ以降、観測で得られてきた知見は確かに多彩で、少し油断するとあっという間に知らないことが増えてしまう状況にある。ただ一方でこのような進展が積み重なれば重なるほどより強く感じるのは、現在、観測的課題とされている概念の多くが、実は林忠四郎先生を中心に1980年代に構築された「太陽系起源論」の中に、明快に提示されていたという点である。技術が進歩して本質に迫っているという観点からは至極当然の展開かもしれないが、研究をリアルタイムで体験している者としては、やはり畏敬の念を禁じ得ない。

ALMAに話を戻すと、その実現にはもう一つの伝統、つまり「野辺山からすばる、そしてALMAへ」という観測天文学の開拓の流れがあった。理論・観測両面での先人の努力をしっかりと受け継ぎ、未来に向けて、多くの皆様とともに惑星形成過程の解明を進めていきたい。

百瀬 宗武(茨城大学理学部)

特集「月の火成活動からみた熱進化」

かぐや衛星観測データに基づく月上部の玄武岩質溶岩ユニットのバルク誘電率と空隙率推定

石山 謙¹, 熊本 篤志¹, 小野 高幸¹, 山口 靖², 春山 純一³,
大竹 真紀子³, 加藤 雄人¹, 寺田 直樹¹, 押上 祥子⁴

2013年9月10日受領, 2013年11月25日受理.

(要旨) 数百mの厚みを持った月上部の玄武岩質溶岩ユニットにおいて, SELENE(かぐや)の観測データを用いた新手法を使い, そのバルク誘電率及び空隙率が推定された. 本研究は, 晴れの海の2カ所の溶岩ユニットと嵐の大洋の1カ所の溶岩ユニットで解析し, それらのバルク誘電率は, 晴れの海では1.9~7.0と1.6~14.0, 嵐の大洋では1.3~5.1と推定された. これらのバルク誘電率は, 上部溶岩ユニット中の空隙率が, 晴れの海の溶岩ユニットで9%~71%と0%~78%, 嵐の大洋の溶岩ユニットでは21%~86%に含まれていることを示している. これらの空隙率は主に, 火山灰の空隙成分, 溶岩固有の空隙成分, 隕石衝突由来の空隙成分で説明できる.

1. バルク誘電率の重要性

2007年に打ち上げられた日本の月周回衛星「かぐや」には14の観測装置の1つとして月レーダーサウンダー(LRS)が搭載された. この観測装置の目的の1つは, 様々な月の地下構造を同定することである[1]. LRSは, 4~6MHzで周波数変調した電磁波を放射し, 月面と地下で反射した電磁波(表面エコーと地下エコー)の遅延時間差 Δt を観測した. この遅延時間は, 電磁波が地下を往復伝搬した時間に相当する. この遅延時間から, 地下層の厚さ d は,

$$d = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{bulk}}} \right) \quad (1)$$

で求めることができる. c は真空中の光の速度, ϵ_{bulk} は空隙を含んだ地下層の誘電率である. この研究では, ϵ_{bulk} をバルク誘電率と呼ぶ. LRSは, 緯度方向に沿って約80 mの間隔で遅延時間を観測し, 月全球で地下

構造探査を実施することに成功し, さらに, 月の海(玄武岩)領域で地下構造を同定した[2]. 月地下層の厚さの情報は, 月の火山活動史を議論する上で非常に重要なパラメータとなる[e.g., 3]. しかしながら, 地下層の厚さを計算するには, 式(1)からわかるように地下層の誘電率値が必要になる.

今までの月レーダー観測[e.g., 4, 5]において, 地下層の誘電率値として, 月岩石サンプルの平均的なバルク誘電率から8程度の値が使われた. しかし, 月岩石のバルク誘電率の値は4~11[6]のように大きく分散しており, その値に強い根拠がない. したがって, 本研究では, 先行研究[7]で開発された月地下層のバルク誘電率推定方法を使用し, そのバルク誘電率を推定する. 先行研究[7]では, 晴れの海および湿りの海の2カ所の溶岩ユニットのバルク誘電率が推定された. 湿りの海での上部溶岩ユニットのバルク誘電率は, 8程度のバルク誘電率値よりも低い値が得られたが, 2カ所のみ解析のため, 他の領域でのバルク誘電率がどの程度なのかはよくわからない. 本研究では, 解析地点を増やして, 先行研究[7]の結果と合わせることで, 月表層のバルク誘電率値の議論を深める. さらに, 推

1. 東北大学大学院理学研究科

2. 名古屋大学大学院環境学研究科

3. 宇宙科学研究所・宇宙航空研究開発機構

4. 国立天文台

ishiyama@stpp.gp.tohoku.ac.jp

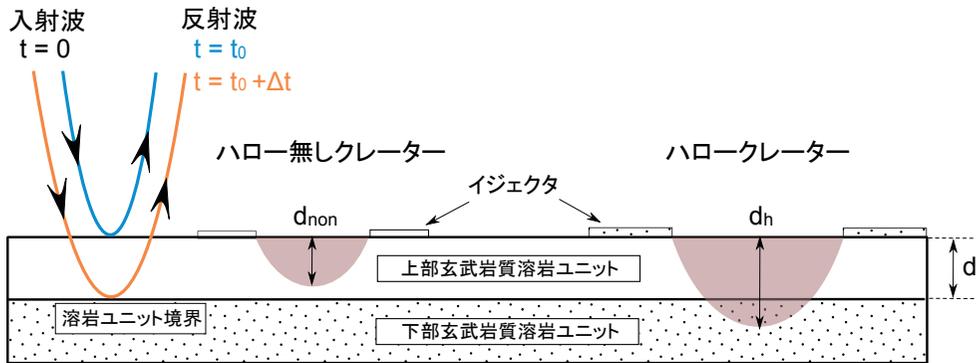


図1：本研究で採用した上部玄武岩質溶岩ユニットのバルク誘電率推定のための月地質構造モデル[7]。上部溶岩ユニットの厚み d は、二種類のクレーター（ハロークレーターとハロー無しクレーター）の掘削深度より $d_{non} < d < d_h$ のように制約される。上部溶岩ユニット中を電磁波が伝搬する時間 Δt を同定することで、上部溶岩ユニットのレーダーでの見かけの深さが調べられた。

定したバルク誘電率から、月表層に含まれる空隙率も推定する。この空隙率の情報は、月表層の岩相の脆さ[7]や月の熱史の議論[8]においても重要であるため、空隙率についても、先行研究[7]の結果と合わせて議論する。

2. 解析方法

2.1 バルク誘電率の推定方法

月の地下層のバルク誘電率は、式(1)から次のように計算できる。

$$\epsilon_{bulk} = \left(\frac{c \cdot \Delta t}{2} \cdot \frac{1}{d} \right)^2 = \left(\frac{d_{radar}}{d} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 d_{radar} (LRSで観測される見かけの深さ)は、式(1)で地下層を真空(つまり、バルク誘電率を1)と仮定した深さに相当するため、地下層の厚さ d とは異なることに注意しなければならない。

我々は、先行研究[7]に基づいた地下構造モデル(図1)を仮定し、 d_{radar} と d の同定から、バルク誘電率を計算した。このモデルでは、月表層は、上部玄武岩質溶岩ユニット(以下、上部溶岩ユニット)と、下部玄武岩質溶岩ユニット(以下、下部溶岩ユニット)から構成されている。これらのユニットには、空隙が含まれており、それぞれ異なる TiO_2 と FeO の含有量を持つと考える。上部溶岩ユニットは、レゴリス・火山灰を含む複数枚の溶岩流から構成され、数百mの厚みを持つ。上部・下部溶岩ユニットの上端には、均一なレゴリス

層がある。レゴリス層は空隙を多く含むため、レゴリス層のバルク誘電率は、溶岩のバルク誘電率よりも低い。また、この層の厚みはLRSの分解能(真空中で75 m [1])以下であるため、レゴリス層の上端及び下端で反射されたエコーは分解されず重なって観測される。

はじめに、上部溶岩ユニットの厚さ d は二種類のクレーターの掘削する深さより制約された。クレーターは、ハローを伴うクレーターと、ハローを伴わないクレーターの2種類に大別できる(図1)。ハローは、隕石衝突で地層を掘り返した際に組成の異なる飛散物(イジェクタ)が、クレーターまわりに堆積することによって生じる。本研究では、表面の溶岩ユニット組成とは異なるイジェクタをもつクレーター(以下、ハロークレーター)と、表面の溶岩ユニット組成と異なるイジェクタをもたないクレーター(以下、ハロー無しクレーター)を TiO_2 や FeO マップを使って識別した。したがって、ハロークレーターは、下部溶岩ユニットまで掘削してできたクレーターであり、一方で、ハロー無しクレーターは、下部溶岩ユニットまで掘削されてないクレーターである。上部溶岩ユニットの厚さは、ハロークレーターとハロー無しクレーターの掘削深度($d_{exc,h}$ と $d_{exc,non}$)から $d_{exc,non} < d < d_{exc,h}$ と制約した。クレーターの掘削深度(d_{exc})は、クレーター直径 D から、経験式 $d_{exc} = 0.84 \times 0.1 \times D$ を用いて推定できる[9]。クレーター直径は、かぐや衛星に搭載された地形カメラ(TC)の観測データから測定した。

本研究では、 TiO_2 と FeO マップは、かぐや衛星に搭載されたマルチバンドイメージャ(MI)の観測デー

タと, Lucey et al. のアルゴリズム [10] に基づいて制作されたもの [11] を使用した. MI は, 太陽光の月面での反射を観測し, 415 nm, 750 nm, 900 nm, 950 nm, 1000 nm, 1050 nm, 1250 nm, 1550 nm の各波長の反射率を測定した [12]. 鉱物はある特有の波長を吸収するため, それを利用することで鉱物分布を調べることができる. しかし, 宇宙線や太陽風, 微小天体衝突により, 鉱物の吸収量が変化することが知られている [e.g., 10]. この影響は宇宙風化と呼ばれており, これは鉱物の含有量の推定に大きな誤差を与える. Lucey らは, 750 nm の反射率を横軸, 950 nm と 750 nm の反射率の比を縦軸とするプロット上で, FeO の含有量の異なる鉱物が, 異なる傾きで並び, 宇宙風化度が大きくなるほどある 1 点に近づくことを見出した. このプロファイルの傾きを求めることによって, 宇宙風化に影響されることなく FeO の含有量を推定することが可能となる. また, Lucey らは, 750 nm の反射率を横軸, 415 nm と 750 nm の反射率の比を縦軸とするプロット上で, TiO₂ の含有量の異なる鉱物が, 異なる傾きで並ぶことも見出し, TiO₂ の含有量に関しても同様の推定手法を提案した [10].

上部溶岩ユニットの見かけの深さ (d_{radar}) は, クレーター付近で, LRS で測定された電磁波の遅延時間から同定された. 上部玄武岩層のバルク誘電率の上限値は, 式 (2) に $d_{\text{exc, non}}$ を代入して求め, その下限値は, 式 (2) に $d_{\text{exc, h}}$ を代入して求めた. LRS の生の観測データには, 様々なクラック成分が含まれているため, それらを低減するための合成開口処理 [13] を行ったデータ (SAR 処理データ) を使用した.

この研究の解析の注意点として, 電磁波の地下反射面が, 上部・下部溶岩ユニット境界に対応しているかを検証する必要がある. それを検証するため, 本研究では, まず LRS データを使用して, 下部溶岩ユニットが月面上のどの溶岩ユニットに該当しているか同定を行った. 次に, その溶岩ユニットの表面組成が, 解析した上部溶岩ユニット上のハロークレーターのイジェクタ組成 (TiO₂ と FeO) に対応していることを確認した. 検証の詳細は, 3 節で改めて述べることとする.

また, 実際の上部溶岩ユニットの厚みは, 図 1 とは異なって不均一であると考えられるため, クレーターとレーダーの測定点間距離はなるべく短いことが望ましい. そこで, 本研究ではその距離が約 10 km 以内の

データのみを使用し, 解析が行われた. この制約は, 上記と同様の理由により, ハロークレーターとハロー無しくレーター間距離にも適用される. しかし, クレーター近傍は, 隕石衝突により層が急激に隆起していることがある [9]. LRS の観測によって, 晴れの海において, 直径が 15 km のクレーター (Bessel クレーター) 近傍で, そのような特徴的な地下構造変形が見つかった [14]. 本研究で解析したクレーターの周辺にも, そのような地下構造変形が見られる領域があるが, 地下エコーと表面エコーが平行になる領域を選ぶことで, 地下構造変形のない領域でクレーター近傍の見かけの深さを推定した.

2.2 空隙率の推定方法

アポロサンプルのバルク誘電率は, そのバルク密度 (ρ_{bulk} [g cm⁻³]) や空隙率 (ϕ) に依存することが経験的・理論的に調べられている [6, 15]. したがって, それらの関係を使うことで空隙率を推定することができる. はじめに, 経験的な関係式について述べる. バルク誘電率とバルク密度は,

$$\epsilon_{\text{bulk}} = 1.919\rho_{\text{bulk}} \quad (3)$$

の関係をもつ [6]. また, バルク密度と空隙率の間には

$$\rho_{\text{bulk}} = (1 - \phi) \cdot \rho_{\text{true}} \quad (4)$$

の関係がある. ρ_{true} [g cm⁻³] は, 空隙を除いた媒質の密度であり, 真密度と呼ばれている. ρ_{true} は,

$$\rho_{\text{true}} = 0.0273 \cdot \text{FeO} + 0.0110 \cdot \text{TiO}_2 + 2.773 \quad (5)$$

で与えられる [16]. ただし, この研究では, FeO [wt.%] と TiO₂ [wt.%] は, ハロー無しくレーターのイジェクタ組成を使用し, 上部溶岩ユニットの真密度が推定される. したがって, 式 (4) より, バルク密度と真密度から空隙率を計算することができる.

ここで, Maxwell-Garnett の関係式 [17] を用いて, バルク誘電率とバルク密度の関係を理論的に導出してみよう. この関係式は, 有効媒質近似 (effective media approximation) の 1 つであり, 不均一な誘電率媒質を均一な誘電率媒質に近似する理論である. Maxwell-Garnett の関係式は, 球形の空隙が不均一に分布した媒質の等価誘電率を求める理論であり,

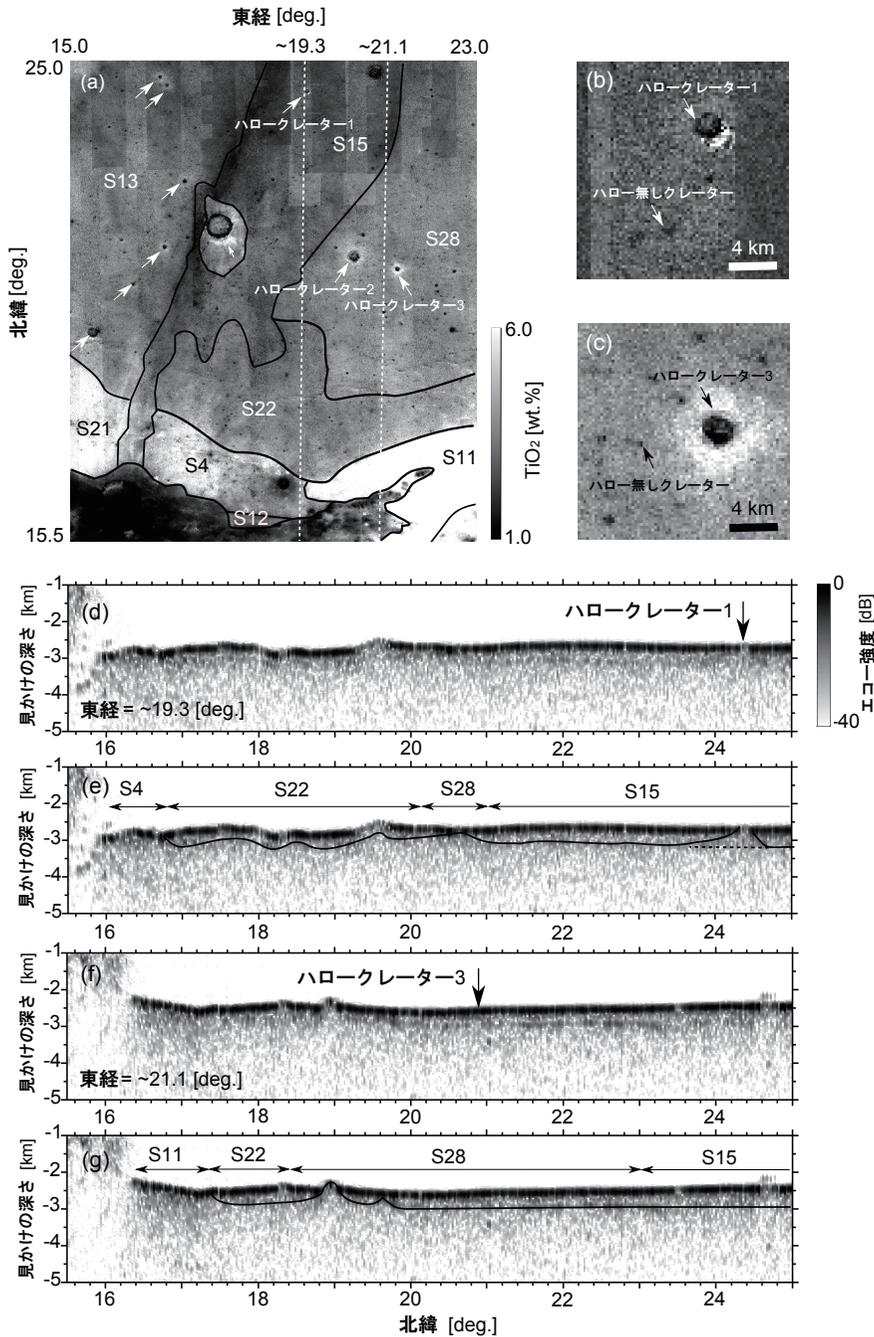


図2：晴れの海における解析結果。(a)晴れの海の南部のTiO₂マップ。溶岩ユニット境界は、黒の曲線で示され、それぞれの溶岩ユニットには、先行研究[18]に従って番号が振られた。また、白の矢印は、ハロークレターの位置を示し、S15とS28の溶岩ユニットのハロークレターには番号が振られた。白色の点線は、使用したLRSデータの軌道を示す。(b)ハロークレター1付近のTiO₂マップの拡大図。(c)ハロークレター3付近のTiO₂マップの拡大図。(d)~19.3° Eに沿ったLRSデータ。黒の矢印は、LRSデータ付近のハロークレターの位置を示す。(e) ~19.3° Eに沿ったLRSデータにより同定された地下エコー。黒の曲線は地下エコーのトレース、矢印は月面上の溶岩ユニットの範囲を示す。ハロークレター周辺では、地下エコーは表面エコーと水平ではない。これは、[14]で指摘されたクレター近傍の地下構造変形と一致する。黒の点線は、本研究で推定した変形を受ける前の地下境界を示す。(f) ~21.1° Eに沿ったLRSデータ。黒の矢印は、LRSデータ付近のハロークレターの位置を示す。(g) ~21.1° Eに沿ったLRSデータにより同定された地下エコー。黒の曲線は地下エコーのトレース、矢印は月面上の溶岩ユニットの範囲を示す。

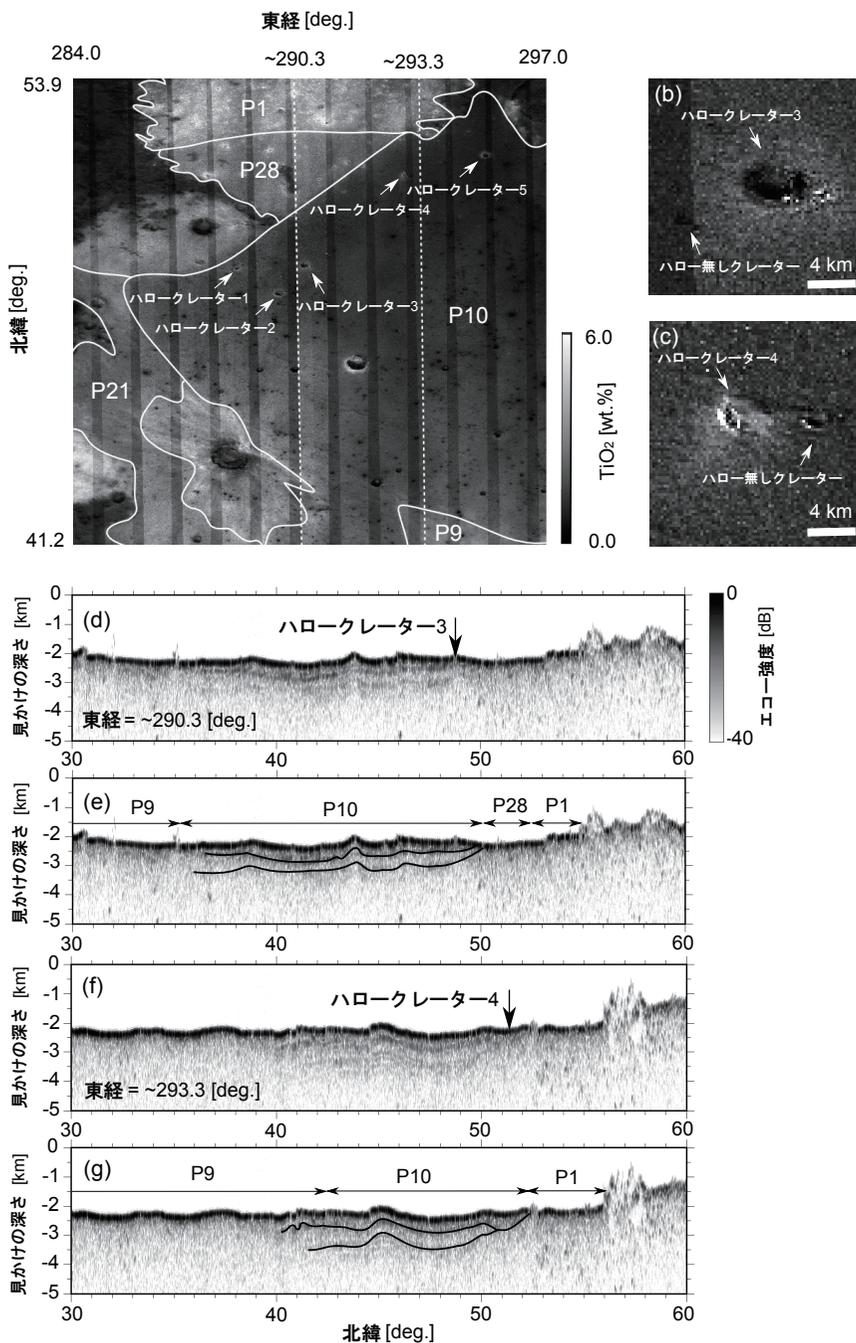


図3：嵐の大洋における解析結果。(a)嵐の大洋の北部の TiO_2 マップ。溶岩ユニット境界は、白の曲線で示され、それぞれの溶岩ユニットには、先行研究[19]に従って番号が振られた。また、白の矢印は、ハロークレーター的位置を示し、ハロークレーターには番号が振られた。白色の点線は、使用したLRSデータの軌道を示す。(b)ハロークレーター3付近の TiO_2 マップの拡大図。(c)ハロークレーター4付近の TiO_2 マップの拡大図。(d)~290.3°Eに沿ったLRSデータ。黒の矢印は、LRSデータ付近のハロークレーター的位置を示す。(e)~290.3°Eに沿ったLRSデータにより同定された地下エコー。黒の曲線は地下エコーのトレース、矢印は月面上の溶岩ユニットの範囲を示す。(f)~293.3°Eに沿ったLRSデータ。黒の矢印は、LRSデータ付近のハロークレーター的位置を示す。(g)~293.3°Eに沿ったLRSデータにより同定された地下エコー。黒の曲線は地下エコーのトレース、矢印は月面上の溶岩ユニットの範囲を示す。

$$\frac{1}{\rho_{bulk}} \cdot \frac{\epsilon_{bulk} - 1}{\epsilon_{bulk} + 2} = \frac{1}{\rho_{true}} \cdot \frac{\epsilon_{basalt} - 1}{\epsilon_{basalt} + 2} \quad (6)$$

の関係がある[15]。ここで、 ϵ_{basalt} は空隙を全く含まない玄武岩の誘電率である。また、球形の空隙の誘電率は1とする。アポソイルサンプルでは、 $\rho_{bulk} = 1.7 \text{ g cm}^{-3}$ の時、 $\epsilon_{bulk} = 2.75$ であるため[15]、これらの値を(6)に代入すると、

$$0.217 = \frac{1}{\rho_{true}} \cdot \frac{\epsilon_{basalt} - 1}{\epsilon_{basalt} + 2} \quad (7)$$

となる。式(7)を式(6)に代入することで、バルク誘電率とバルク密度の理論的な関係は、

$$\epsilon_{bulk} = \frac{1 + 0.43 \cdot \rho_{bulk}}{1 - 0.22 \cdot \rho_{bulk}} \quad (8)$$

と求まる。この理論的な関係式(8)は、経験的な関係式(3)とほぼ一致する[7]。本研究では、経験的な関係式(3)と(4)を用いて、空隙率を推定した。空隙率の上限値と下限値は、バルク誘電率の上限値と下限値から求めた。

3. 解析結果

本研究では、先行研究[18, 19]で区分された上部溶岩ユニット上で解析を行った。それらの溶岩ユニットには個別の名称が与えられている。MIデータで作成したチタンマップを使って、晴れの海でS15とS28と名付けられた溶岩ユニット[18]、および嵐の大洋でP10と名付けられた溶岩ユニット[19]において、ハロークレーターを発見することができた(図2(a)と図3(a))。それらの溶岩ユニットのバルク誘電率の推定結果を順に示す。全ての結果は、表1にまとめられている。

3.1 晴れの海の溶岩ユニットS15

晴れの海のS15の溶岩ユニットにおいて、ハロークレーターを1つ見つけることができた。この研究ではこのクレーターをハロークレーター1と呼ぶ(図2(a))。まず、LRSで見られる下部溶岩ユニットと対応する月面上の溶岩ユニットを同定し、その組成とハロークレーターのイジェクタ組成を比較する。ハロークレーター1のイジェクタ組成(TiO_2 と FeO)は、明確にS15の溶岩ユニット組成(TiO_2 と FeO)と異なっており(図4(a))、大まかに晴れの海のS4の溶岩ユニット組成と一致する。これは、図2(d)と図2(e)で示したように、S4の上にS15の溶岩ユニットが横たわっているためだと考えられる。ハロー無しくレーターは、ハロークレーターの中心から約10 km以内のものを解析に用いた。そのイジェクタ組成はS15の溶岩ユニット組成とも一致している(図4(a))。そこで、式(2)を用いて、この溶岩ユニットの厚みとその見かけの深さの比からバルク誘電率を計算した。

はじめに、晴れの海の溶岩ユニットS15の厚みをハロークレーターとハロー無しくレーターの掘削深度から制約する。このクレーターの掘削深度は、クレーター直径から推定された。TCの観測によれば、ハロークレーターの直径は3.32 kmであり、ハロー無しくレーターの直径は1.71 kmであったため(図2(b))、掘削深度は、それぞれ、279 mと144 mと求められた。よって、晴れの海のS15の溶岩ユニットの厚みは144～279 mの範囲内に含まれると推定された。一方で、それらのクレーター近傍では、LRSによって、約 19.3°E 、 23.6°N から約 19.3°E 、 24.6°N の範囲で、隕石衝突で形成された典型的な地下構造変形が同定された(図2

表1：月溶岩ユニットで推定されたバルク誘電率および空隙率。

溶岩ユニット	表面年代	バルク誘電率	空隙率 [%]	バルク密度 [g cm^{-3}]	真密度 [g cm^{-3}]
湿りの海					
85*	3.25	2.8～5.5	19～51	1.6～2.6	3.2
晴れの海					
S13*	3.49	4.2～18.0	0～33	2.2～4.4	3.3
S15	3.44	1.9～7.0	9～71	1.0～3.0	3.3
S28	2.84	1.6～14.0	0～78	0.7～4.0	3.3
嵐の大洋					
P10	3.44	1.3～5.1	21～86	0.4～2.5	3.2

※溶岩ユニット85とS13の結果は先行研究[7]、本研究で解析した溶岩の表面年代は先行研究[18, 19]に基づく。

(e). その範囲の外の地下エコーの見かけの深さは380 mであったため、もしその深さが隕石衝突する前のクレーター近傍の見かけの深さと一致するならば、晴れの海のS15の溶岩ユニットのバルク誘電率は、1.9~7.0の範囲内であると推定された。式(3)より、このバルク誘電率は、 $1.0\sim 3.0\text{ g cm}^{-3}$ のバルク密度に相当した。

また、このバルク密度に基づき、その溶岩ユニットの空隙率を推定した。MIの観測によれば、ハロー無しクレーターのイジェクタ組成は、 TiO_2 が2.73 wt.%, FeOが16.90 wt.%であった。よって、溶岩ユニットS15の真密度は、式(5)より 3.3 g cm^{-3} であった。この真密度とバルク密度の相違は、溶岩ユニットS15の中に含まれる空隙で説明することができる。式(4)を用いて、空隙率の範囲を推定すると、9%~71%となった。

3.2 晴れの海の溶岩ユニットS28

晴れの海の溶岩ユニットS28では、2つのハロークレーターが見いだされた。この研究では、それらをハロークレーター-2と3と呼ぶ(図2(a))。ハロークレーター-2は、Deseilligny Craterという名称でも知られている。まず、LRSで見られる下部溶岩ユニットと対応する月面上の溶岩ユニットを同定し、その組成とハロークレーターのイジェクタ組成を比較する。このクレーターのイジェクタ組成(TiO_2 とFeO)は、明確にS28の溶岩ユニット組成(TiO_2 とFeO)と異なった(図4(b))。これは、図2(f)と図2(g)で示したように、S11の上にS28の溶岩ユニットが横たわっているためだと考えられる。ハロークレーター-2と3のイジェクタ組成は、S11の溶岩ユニット組成と一致しなかったが、S11とS28の溶岩ユニット組成の中間の値を示した。これは、イジェクタ組成が、それらの溶岩ユニットの混合物であるためだと考えられる。また、本研究では、ハロー無しクレーターは、ハロークレーターの中心から約10 km以内のものを用いたが、ハロークレーター-2は直径が8.24 kmと大きく、このクレーター付近では、そのハローで表面が覆われているため、S28と同じ組成のハロー無しクレーターは見いだされなかった。一方で、ハロークレーター-3の直径は、3.56 kmであったため、その近傍でS28と同じ組成の1.21 kmの直径をもったハロー無しクレーターが見出された(図4

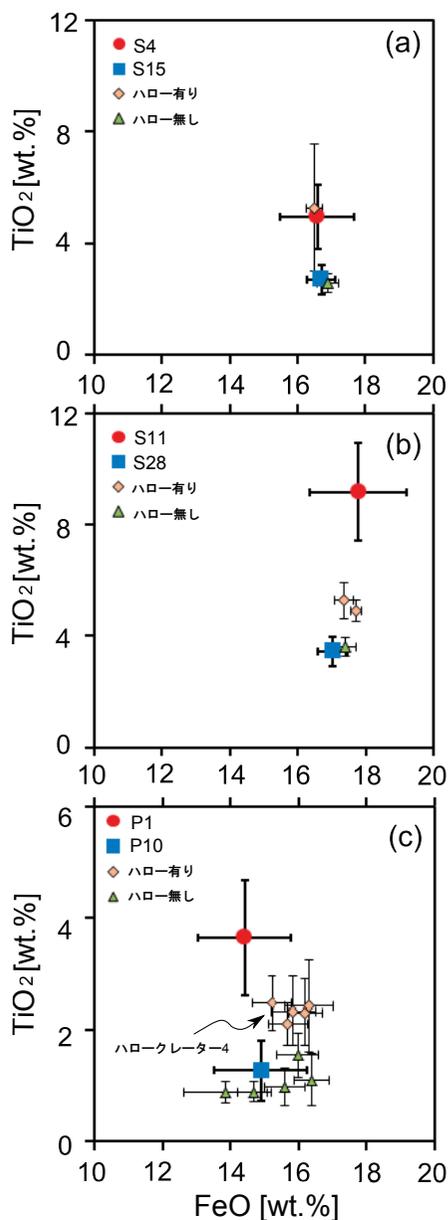


図4: ハロークレーターとハロー無しクレーターのイジェクタ、および溶岩ユニットの表面の TiO_2 とFeOの含有量。四角はハロークレーターを含む溶岩ユニットの組成、丸はハロークレーターが削掘していると推定される溶岩ユニットの組成、ひし形はハロークレーターのイジェクタ組成、三角はハロー無しクレーターのイジェクタ組成を示す。(a)晴れの海のS15とS4の溶岩ユニットにおける組成の比較。(b)晴れの海のS28とS11の溶岩ユニットにおける組成の比較。(c)嵐の大洋のP1とP10の溶岩ユニットにおける組成の比較。黒の矢印は、ハロークレーター-4のイジェクタ組成を示す。

(b)).

次に、式(2)より、この溶岩ユニットのバルク誘電率を求めた。はじめに、晴れの海の溶岩ユニットS28の厚みをハロークレーター3とその近傍のハロー無しクレーターの直径から掘削深度を求め、晴れの海の溶岩ユニットS28の厚みの範囲を推定した結果、102~299 mであった。一方、それらのクレーター近傍では、地下エコーが同定され(図2(f)と2(g))、その見かけの深さは380 mであった。したがって、晴れの海の溶岩ユニットS28のバルク誘電率は、1.6~14.0の範囲に含まれると推定された。式(3)より、このバルク誘電率は、0.7~4.0 g cm⁻³のバルク密度に相当した。

また、このバルク密度に基づき、その溶岩ユニットの空隙率の推定を行った。ハロー無しクレーターのイジェクタ組成は、TiO₂が3.62 wt.%、FeOが17.39 wt.%であった。よって、式(5)を用いて、S28の溶岩ユニットの真密度を求めると3.3 g cm⁻³となった。S15の溶岩ユニット中に含まれる空隙率は、式(4)より、-23%~78%と推定された。空隙率の推定範囲の下限がマイナスになった原因は、比較的小さく浅いハロー無しクレーターしかない場合、真密度を上回る過大なバルク密度が推定され、その結果として、空隙率がマイナスとなった。しかし、現実にはバルク密度が真密度を上回ることはないため、本研究では空隙率の推定範囲下限値を0%とした。したがって、晴れの海の溶岩ユニットS28の空隙率は、0%~78%の範囲に含まれると推定された。

3.3 嵐の大洋の溶岩ユニットP10

嵐の大洋のP10の溶岩ユニットにおいて、ハロークレーターが5つ見出された(図3(a))。この研究では、それらをハロークレーター1から5と名付ける(図3(a))。まず、LRSで見られる下部溶岩ユニットに対応する月面上の溶岩ユニットを同定し、その組成とハロークレーターのイジェクタ組成を比較する。これらのクレーターのイジェクタ組成(TiO₂とFeO)は、明確にP10の溶岩ユニット組成(TiO₂とFeO)と異なる(図4(c))。これはP10の溶岩ユニットが、組成の異なるある溶岩ユニットの上に横たわっているためだと考えられる。一方、これらのハロークレーターの付近では、図3(d)、3(e)、3(f)、3(g)に示すように2枚の地下反射面が同定された。浅い方を地下エコー1、深い方を

地下エコー2と呼ぶ。

はじめに、本研究で同定した2つの地下エコーがどの溶岩ユニット境界からのものなのかを調べた。層序学的に考えて、3.44 Ga前に噴出したP10の溶岩ユニットの下に横たわっている溶岩ユニットは、それよりも古いものである。つまり、P9からP1の溶岩ユニット、または、それらよりも古い溶岩ユニットがその候補になる。P9の溶岩ユニットは、3.47 Ga前にできたもので、P10の南部に位置しており(図3(a))、P10の下にP9の溶岩ユニットが堆積している可能性がある。しかし、P10の溶岩ユニットの下で同定された2つの地下エコーは、どちらもP10とP9の溶岩ユニット境界と一致しなかった(図3(e)、3(g))。したがって、LRSで同定した2つの地下エコーは、P9の溶岩ユニットからのものではない。P1の溶岩ユニットは、3.59 Ga前に噴出したもので、P10の北に位置しており、その溶岩ユニット境界で、地下エコー1および2の端と一致していた(図3(g))。したがって、P1の溶岩ユニットが、P10の下に横たわっていると推定される。図3(e)からは、月面上のP10とP28の溶岩ユニット境界が地下エコー1および2の端と一致しているが、P28はP10の溶岩ユニットよりも若い溶岩であるため、P28の溶岩ユニットがP10の下に堆積していることは層序学的にありえない。P28がP10の北に露出していたP1の溶岩ユニットを部分的に覆っていると考えれば、P10の下にP1の溶岩ユニットが横たわっていると考えることができる。P1とP28の溶岩ユニット間で、地下エコーが同定されていない理由は、LRSの分解能よりもP28の溶岩ユニットの厚さが非常に薄いためだと考えられる。したがって、2つの地下エコーのうち、どちらかが、P1の溶岩ユニットの表面である。もし、地下エコー1がP1表面であれば、地下エコー2は、P1とそれよりも古い溶岩ユニットの境界である。また、もし地下エコー2がP1表面であれば、地下エコー1は、P8からP2のどれか、もしくは月面上に露出していない3.59 Ga前から3.44 Ga前に噴出した溶岩ユニットとP10の境界である可能性がある。

本研究で発見した5つのハロークレーターのイジェクタ組成(TiO₂とFeO)に着目すると、P10とP1の溶岩ユニットの表面組成(TiO₂とFeO)の中間の値を示している(図4(c))。ハロークレーターのイジェクタ組成は、上層と下層の溶岩ユニットの組成の混合にな

るため、今回見出されたハロークレーターは、P1上面まで掘削していると推定された。そこで、ハロークレーター4付近の地下エコーに着目した。その付近では、P1に対応する地下エコーは1つしかない(図3(f), 3(g))。そのため、我々は、ハロークレーター4とその近傍のハロー無しクレーターのみから、その付近のP10の溶岩ユニットの厚みを制約し、そのバルク誘電率を推定した。バルク誘電率は、式(2)を用いて、P10の溶岩ユニットの厚みと見かけの深さの比より計算された。

ハロークレーター4とハロー無しクレーターの直径は、それぞれ、5.41 kmと2.75 kmであったため、P10の溶岩ユニットの厚みは231~454 mと推定された。それらのクレーター近傍で地下エコーの見かけの深さは523 mであったため、P10のバルク誘電率は1.3~5.1と推定できた。式(3)より、このバルク誘電率は、 $0.4\sim 2.5 \text{ g cm}^{-3}$ のバルク密度に相当した。ハロー無しクレーターのイジェクタ組成は、 TiO_2 が0.89 wt.%, FeOが13.85 wt.%であるから(図4(c))、P10の溶岩ユニットの真密度は、式(5)より 3.2 g cm^{-3} であった。この真密度とバルク密度の相違は、P10の溶岩ユニット中の空隙率を反映し、式(4)を用いて、21%~86%の空隙率と推定された。

4. 考察

本研究では、3つの異なる上部玄武岩質溶岩ユニット上でバルク誘電率と空隙率の推定を試みた。それらの結果は、先行研究[7]の結果と合わせて表1にまとめた。本研究では、特に晴れの海のS15と嵐の大洋のP10の溶岩ユニットにおいて比較的狭い範囲のバルク誘電率を推定することができた。それらは、先行研究[7]の結果ともよい整合性を示す。もし、上部溶岩ユニットが海全体で同じバルク誘電率をもつならば、表1より、そのバルク誘電率は4.2~5.1に制約される。このバルク誘電率は、従来の月レーダー観測[e.g., 4, 5]で想定したバルク誘電率(約8)と比べると低く、従来の研究では比較的高い誘電率の値を想定していたことがわかった。また、制約されたバルク誘電率から推定された空隙率は、21%~33%である。この空隙率は、アポロ玄武岩サンプルの空隙率[20]よりも高い。この高い空隙率の原因は、先行研究[7]で議論したように、

アポロ玄武岩サンプルには含まれてない空隙が、月の上部溶岩ユニット中に含まれていると考えられるためだと考えられる。4.1節では、先行研究[7]での上部溶岩ユニット中の空隙の考察を紹介し、4.2節では推定した空隙率の月の熱的進化過程への影響を考える。

4.1 上部溶岩ユニット中の空隙

この節では、推定した上部溶岩ユニットの空隙率について、どのような要因によるもので構成されているのかを考察する。

上部溶岩ユニットの空隙は3種類の要因、すなわち火山灰[21]や、溶岩固有の空隙[22]、隕石衝突由来の空隙[20, 23]で構成される。溶岩固有の空隙とは、溶岩中に含まれる揮発性ガス成分の脱ガスより生まれる気孔と、溶岩の急冷に伴う岩石中のマイクロな亀裂やマクロな亀裂がある。隕石衝突由来の空隙とは、隕石が岩石に衝突することで生まれる亀裂であり、マイクロな亀裂[20]とマクロな亀裂[23]がある。

上部溶岩ユニットは複数の溶岩流によって構成されているため、その溶岩流の間に、不均一に火山灰が堆積している可能性はある。また、月の大気は非常に薄いため、隕石衝突による寄与がある。アポロ玄武岩サンプルには、溶岩固有の空隙と、溶岩急冷由来および隕石衝突由来のマイクロな亀裂が含まれており、その空隙率は約7%である[20]。月サンプルカタログ(<http://curator.jsc.nasa.gov/lunar/compendium.cfm>)に基づく、アポロ玄武岩サンプルの多くは約10cm以下であるため、隕石衝突由来のマクロな亀裂は含まれていない。この研究で制約された空隙率(21%~33%)の内、約7%は溶岩固有の空隙と、溶岩急冷由来や隕石衝突由来のマイクロな亀裂で構成され、残りの14%以上は、溶岩流の間に不均一に堆積した火山灰や、溶岩急冷由来および隕石衝突由来のマクロな亀裂で説明できるかもしれない。

月サンプルカタログより、アポロ玄武岩サンプルの中には約50%程度の空隙率をもったもの(Apollo sample 15016)がある。しかし、そのようなサンプルは非常に少なく、月の海領域に普遍的に存在しているとは考えにくい。一方で、最近、月の高地領域における重力場調査から、深さ数kmまでに約20%の空隙率が含まれている領域があることが明らかにされた[24]。本研究で解析した上部溶岩ユニットも、高地ほどでは

ないが、約30億年間は衝突の経験をしていることから、上部溶岩ユニットには、マクロな亀裂が入り、非常に脆くなっている可能性がある。

もし、上部溶岩ユニットが主に隕石衝突に由来する亀裂で説明できるならば、本研究と先行研究[7]で推定した空隙率やバルク誘電率は、表面年代に依存する可能性がある。しかし、表1から空隙率と表面年代には関係性は見いだせなかった。この理由は、本研究と先行研究[7]で解析した領域の表面年代(2.84~3.49 Ga)では、すでに隕石衝突による玄武岩中の空隙の生成が飽和してしまい、空隙率に明確な差がでないのかもしれない。空隙率と表面年代の関係を調べるためには、他の手法やデータ(重力場など)と組み合わせて、調べる必要があるだろう。

4.2 推定した空隙率の月の熱的進化過程への影響

空隙率は熱伝導率に関わり、これは、月が形成された時から今日に至るまで、どのように冷却していったかを調べるために非常に重要なパラメータである。本研究では、その重要性を示すために、月表層の熱伝導率を考慮した熱的進化モデルの研究[8]を紹介する。

その研究では、3Dマントル対流モデルと表層付近の熱伝導率を考えて、部分溶融が存在している期間を調べ、月の火山活動時代を説明できるかを考えている。モデルでは、月の表面から地殻・マントル境界までの層を浅い方から順に(a)細粒層(厚さ2~5 cm)、(b)レゴリス層(厚さ15 m)、(c)メガレゴリス層(厚さ25 km)、(d)地殻(厚さ35~70 km)に分割し、それぞれの熱伝導率を $10^{-3} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、 $0.01\sim 0.03 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、 $0.2\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、 $3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と仮定している。

このモデルを用いた数値計算の結果、部分溶融の時代は、4.4 Ga前(月の分化が完了した時)から約2 Ga前まで続くことが示され、月の火山活動時代にも一致することが示された。また、部分溶融が約2 Ga前まで続く要因として、地殻の厚さや月表層に堆積する多孔質な層(特に、メガレゴリス層)などが指摘された。月はマグマオーシャンから冷えて月全球が地殻(斜長岩)で覆われることになるが、マントルの熱は地殻を通して逃げるため、地殻の厚さが月の冷却に影響する。また、月表層の多孔質な層は、地殻の平均的な熱伝導率よりも低い熱伝導率であるために、地殻内の熱を逃

げにくくする断熱層として働き、マントル内で長期に高温が保たれ、部分溶融する期間(マントル温度がソリダスを超える期間)が長くなる。その結果として、月の火山活動が長期間持続した可能性が示唆された。しかしながら、彼らの研究では様々な仮定が入っているため、今後、本研究で求められた月上旬溶岩ユニットの空隙率(21%~33%)や重力場解析の結果をこうした熱的進化モデルに反映していくことで、月の熱的進化過程の解明に貢献していくことが可能であると考えられる。

5. 結論

我々は、地形・分光カメラ観測と地下レーダー観測を組み合わせた手法[7]を用いて、玄武岩質の上部溶岩ユニットのバルク誘電率を推定した。そのバルク誘電率は、その地形カメラで観測される上部溶岩ユニットの厚みと、レーダーで観測される見かけの深さの比から計算された。上部溶岩ユニットの厚みは、分光カメラによってイジェクタの組成(TiO_2 と FeO)の違いから識別された2種類のクレーター(ハロークレーターとハロー無しクレーター)の掘削深度から制約された。この掘削深度は、地形カメラによって同定された。バルク誘電率は、海領域の3カ所の上部溶岩ユニットで解析が行われ、晴れの海のS15とS28の溶岩ユニットでは、それぞれ1.9~7.0、1.6~14.0と推定され、嵐の大洋のP10の溶岩ユニットでは、1.3~5.1と推定された。これらの結果と先行研究[7]の結果を踏まえると、従来の月レーダー観測[e.g., 4, 5]で想定されてきた8程度のバルク誘電率は、比較的高い値であることがわかった。

推定したバルク誘電率からバルク密度を求めると、晴れの海のS15の溶岩ユニットで $1.0\sim 3.0 \text{ g cm}^{-3}$ 、S28の溶岩ユニットで $0.7\sim 4.0 \text{ g cm}^{-3}$ 、嵐の大洋のP10の溶岩ユニットで $0.4\sim 2.5 \text{ g cm}^{-3}$ と推定された。また、上部溶岩ユニットの真密度は、上部溶岩ユニットの組成(TiO_2 と FeO)より、S15の溶岩ユニットで 3.3 g cm^{-3} 、S28の溶岩ユニットで 3.3 g cm^{-3} 、P10の溶岩ユニットで 3.2 g cm^{-3} と推定された。したがって、真密度とバルク密度の比から空隙率を推定すると、S15の溶岩ユニットで9%~71%、S28の溶岩ユニットで0%~78%、P10の溶岩ユニットで21%~86%であ

った。これらの空隙率は、先行研究の結果[7]とも整合的で、溶岩固有の空隙や隕石衝突由来のミクロな亀裂だけで説明することは難しい。したがって、上部溶岩ユニット中に、火山灰や、溶岩急冷由来および隕石衝突由来のマクロな亀裂が含まれるだろう。また、そのような溶岩ユニットにマクロな亀裂が多く入れれば、低い熱伝導率をもち、マントルからの熱を断熱する層として振る舞う。本研究の成果は、月の海領域における熱的進化過程を議論する上でも重要な情報になるかもしれない。

謝 辞

査読において、多くの有益で建設的なコメント頂いた京都大学の山路敦先生に感謝いたします。また、お亡くなりになった小野高幸先生には、今まで多くのご指導・支援をして頂きました。この場をかりて、ご冥福をお祈り致します。本研究は、かぐや衛星によって取得された観測データを使用しました。かぐやプロジェクトチームの全ての方々に厚く御礼申し上げます。なお、本研究は、東北大学国際高等研究教育機構の助成を受けています。

参考文献

- [1] Ono, T. and Oya, H., 2000, *Earth Planets Space* 52, 629.
- [2] Ono, T. et al., 2009, *Science* 323(5916), 909.
- [3] Weider, S. Z. et al., 2010, *Icarus* 209(2), 323.
- [4] Peeples, W. J. et al., 1978, *J. Geophys. Res.* 83(10), 3459.
- [5] Oshigami, S. et al., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L18202.
- [6] Carrier, W. D. et al., 1991, *Lunar source book: A user's guide to the Moon* (New York).
- [7] Ishiyama, K. et al., 2013, *J. Geophys. Res. Planets* 118(7), 1453.
- [8] Ziethe, R. et al., 2009, *Planetary and Space Science* 57, 784.
- [9] Melosh, J., 1989, *Impact Cratering: A Geologic Process* (New York).
- [10] Lucey, P. G. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 105(E8), 297.
- [11] Otake, H. et al., 2012, 43rd Lunar Planet. Sci. Conf., Abstract 1905.
- [12] Ohtake, M. et al., 2008, *Earth Planets Space* 60, 257.
- [13] Kobayashi, T. et al., 2012, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50(6), 2161.
- [14] Oshigami, S. et al., 2012, *Icarus* 218(1), 506.
- [15] Fa, W. and Wieczorek, M. A., 2012, *Icarus* 218, 771.
- [16] Huang, Q. and Wieczorek, M. A., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, CiteID E05003.
- [17] Dolgaleva, K., 2012, *Photonics Nanostruct. – Fundam. Appl.* 10(4), 369.
- [18] Hiesinger, H. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 105(E12), 29, 239.
- [19] Hiesinger, H. et al., 2003, *J. Geophys. Res.* 108(E7), CiteID 5065.
- [20] Kiefer, W. S. et al., 2012, *Geophys. Res. Lett.* 39, L07201.
- [21] Taylor, G. J. et al., 1991, *Lunar source book: A user's guide to the Moon* (New York).
- [22] Robertoson, E. C. and Peck, D. L., 1974, *J. Geophys. Res.* 79(32), 4875.
- [23] Cooper, M. R. et al., 1974, *Rev. Geophys. Space Phys.* 12(3), 291.
- [24] Wieczorek, M. A. et al., 2012, *Science* 339(6120), 671.

特集「月の火成活動からみた熱進化」

月探査衛星「かぐや」の分光観測に基づく月のマントル・地殻進化の新たな描像

中村 良介¹，山本 聡²，松永 恒雄²，小川 佳子³，横田 康宏²，石原 吉明¹，廣井 孝弘⁴

2013年10月1日受領，2013年11月12日受理。

(要旨) 我々は月探査機「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ (SP) データの全量解析を行い，月表面に露出しているカンラン石・低カルシウム輝石に富む岩相の全球分布を調べた。その結果，(1)カンラン石はモスクワの海・危難の海といった地殻が薄く比較的小さい衝突盆地周辺に(2)低カルシウム輝石は月の三大衝突盆地，すなわち南極=エイトケン盆地・雨の海・プロセルラム盆地の周囲に，それぞれ局在することが明らかとなった。表層の斜長岩地殻が完全に吹き飛ばされた衝突盆地の内部では，その下にあるマントルが大規模に溶融して「マグマの海」が形成される。原始地球への巨大衝突によって形成された月は，当初数百 km 以上の厚さのマグマオーシャン (マグマの大洋) によって覆われていた。「マグマの海」は，このマグマオーシャンのミニチュアであり，SP が捉えたカンラン石・低カルシウム輝石の分布は，その分別結晶化過程を反映していると考えられる。今後「かぐや」分光データの詳細な解析をすすめ，「マグマの海」の組成およびその分化過程を読み解いていけば，同じ手法を用いてマグマオーシャンの分化過程や月の内部構造・バルク組成にも強い制約を加えることができるだろう。同様に月の「マグマの海」の研究は，ほぼ同規模の小惑星ベスタ上のマグマオーシャンや，月よりもさらに規模の大きい地球のマグマオーシャンの分化過程についても，新たな知見をもたらすことが期待される。

1. はじめに

夜空に浮かぶ月を見上げてみると，そこにはウサギの形をした暗い「海」と，明るい「高地」が見える。17世紀初頭に月に望遠鏡を向けたガリレオは，平らな海に比べて高地は起伏に富んでいることを発見した。20世紀になってアポロ計画で持ち帰られた月サンプルの分析から，高地は月の形成直後にマグマオーシャン (～マグマの大洋) から浮かび上がった斜長岩から，海は高地形成後の火成活動によって表面に噴出した玄武岩から成ることが明らかとなった。望遠鏡で月をのぞいてみても，あるいはアポロ宇宙飛行士が撮った月面の写真を見ても，そこは基本的に白黒の世界であり，「色」

はほとんどついていない。しかし肉眼では捉えられない近赤外線で見ると，とたんに月はカラフルな世界に変貌する。これは斜長岩や玄武岩を構成する，斜長石・カンラン石・輝石といった鉱物が800～2500 nmの波長域で特徴的な吸収帯を持つからである (図1)。

1994年に米国が打ち上げたクレメンタイン探査機には，この月の「色」(以後はより科学的に反射スペクトルと呼ぼう) から表面の組成を調べるために，UVVISとNIRというふたつのカメラが搭載されていた。紫外・可視領域を5つの波長帯で観測するUVVISは良好なデータを取得したものの，赤外領域をカバーするNIRには不具合が生じ，十分な精度のデータが得られなかった。図1に示されるとおり，月を構成する主要鉱物の特徴的な吸収は赤外域に存在する。このためNIRの不具合は，クレメンタインの観測データの解釈に大きな不定性をもたらすこととなった。一方，可視近赤外領域における月の連続分光は，マウナケア

1. 産業技術総合研究所

2. 国立環境研究所

3. 会津大学

4. ブラウン大学

r.nakamura@aist.go.jp

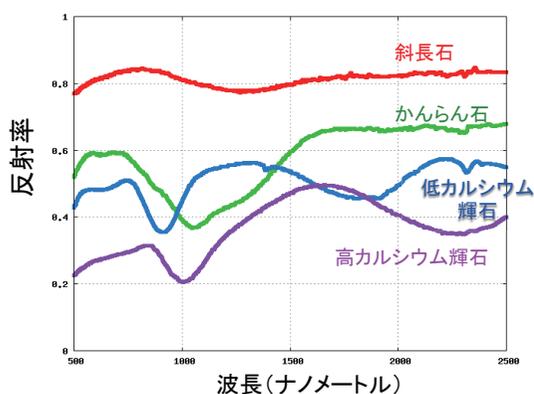


図1：米国地質調査所で測定された月地殻を構成する典型的な鉱物の反射スペクトル。斜長石は $1.25\mu\text{m}$ に、カンラン石は $1.05\mu\text{m}$ に、輝石は $1\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ に特徴的な吸収を持つ。SP全球サーベイは、こうした各鉱物の中心波長の違いを、膨大な量のスペクトルデータから自動的に選びだすアルゴリズムによって可能となった。輝石の結晶構造(単斜/斜方)とカルシウムの含有量は、基本的には単斜=カルシウム多、斜方=カルシウム少という形で対応している。しかしビジョン輝石のような例外(単斜の低カルシウム輝石)もあるため、本稿ではスペクトルから明確に区別できる高カルシウム輝石、低カルシウム輝石という用語を用いる。

山頂にあるハワイ大学の望遠鏡によって精力的にすすめられた[1]。しかし、地上望遠鏡では月の裏側を観測することはできないし、大気中の水蒸気などの吸収が大きい波長域ではデータが取得できない。また表側においても、観測できる領域の数や空間分解能には大きな制約があった。

2007年9月14日に種子島宇宙センターから打ち上げられた月探査機「かぐや」には、こうした過去の地上および探査機からの観測の問題点を克服するため、2つの反射スペクトル測定装置が搭載された。ひとつは、紫外から近赤外線にわたる9つの波長帯で月表面の撮像を行うマルチバンドイメージャー(MI)、もうひとつは衛星直下の500m四方の領域を500~2500nmの範囲で連続的に分光するスペクトルプロファイラ(SP)である。MI/SPは、一年半におよぶかぐやのミッション期間中に月面をほぼ完全に網羅し、次章に述べられるような発見を次々と我々にもたらした。本稿では、主にSPの全球サーベイの成果についてまとめる。

2. 「かぐや」による新たな発見

2.1 純粋な斜長岩Purest Anorthositeの発見

ルナプロスペクターや「かぐや」のガンマ線観測から、月表面は(1)トリウム濃度の高い表側のProcellarum Krep Terrain(PKT)、(2)裏側南半球で中間程度のトリウム濃度を持つSouth Pole-Aitken Terrain (SPAT)、(3)それ以外の高地領域を占めるトリウム濃度の低いFeldspathic Highland Terrain(FHT)の3つの領域に分類できることがわかった。FHTはジャイアントインパクトによる月の形成後、数千万年程度のタイムスケールでマグマオーシャン(マグマの大洋)から固化・浮上した斜長石によって形成されたと考えられている。図1に示されるとおり、月高地地殻の主成分である斜長石は反射率が高く、1200~1300nmに吸収帯を持つ。そこで月面でもとくに反射率が高い領域を狙って、地上望遠鏡を用いた斜長石の探索が行われたが、この吸収を同定することはできなかった[1]。これは宇宙風化や衝撃変成により、吸収帯が消失してしまったためではないかと解釈されたが、望遠鏡の空間分解能(~数km)が十分でない可能性も否定しきれなかった。「かぐや」SPはその高い波長・空間分解能を生かし、斜長石に特徴的な吸収を持つスペクトルが月面上に存在することを世界で初めて明らかにした[2]。斜長石の吸収は非常に弱いため、わずかな重量パーセントの有色鉱物が含まれるだけで、有色鉱物の $1\mu\text{m}$ 吸収帯に隠されて判別が困難になってしまう。一方、アポロが持ち帰った鉄に富む斜長岩族(Ferroan Anorthosite Suite=FAS)には、60025のようなほぼ純粋な斜長石から成るものだけでなく、輝石やカンラン石を10%以上の割合で含むも岩石も数多く含まれている。つまり、「かぐや」による斜長石吸収帯の発見は、月地殻がFASよりも斜長石の割合が高い(>~98%)ほぼ純粋な斜長岩(Purest Anorthosite, 以下PAN)で構成されていることを示したのである。

マグマオーシャン仮説では、深さ数百kmの全球を覆うマグマの大洋から、最初にカンラン石が次いで斜方輝石が晶出し、マグマの底に沈積する。こうしてマグマ全体の7割以上が固化した後、マグマよりも密度



図2：マグマオーシャンの分別結晶作用によって固結した鉱物の鉛直分布。最後に晶出するチタンを含む層は下の層よりも密度が高いため、矢印で示されるような上下の逆転(オーバーターン)が起る。

の低い斜長石が晶出し表面に浮上することで、高地地殻が形成されたと考えられている(図2)[3]。最近のSPサーベイによって、PAN層がFHTに遍在していること、さらにはPAN層の厚さと重力場データで捉えられている低密度層の厚さがほぼ一致することが明らかとなった[4, 5]。これほど純粋な斜長石を晶出・浮上させるメカニズムの詳細はいまだに明らかになってはいないものの、こうした「かぐや」の観測結果はマグマオーシャン仮説の直接的な証拠として広く認められている。

2.2 衝突盆地に付随したカンラン石に富む岩体の発見

前節で述べたように、マグマオーシャンの固結過程では、高地地殻の下にカンラン石および斜方輝石からなるマントルが形成される(図2)。およそ500 km以上の衝突盆地であれば、斜長岩で構成される平均50 km程度の地殻を完全に掘削し、その下にあるマントル物質を盆地の内部や周囲の放出物上に露出させるはずである。なかでも2000 km以上の直径を持ち、月の裏側南半球を覆う南極=エイトケン盆地(South Pole-Aitken Basin, 以下SPA)は、マントル物質搜索のための最有力ターゲットである。SPAは月のみならず太陽系全体においても最大級の衝突盆地であり、通常の衝突スケールリング則を適用すれば、その掘削深度は地殻厚よりもずっと深くなる。このため、SPA内部にはマグマオーシャンから晶出したマントルが露出している可能性が高いと考えられてきた[6, 7]。地震波の解析や捕獲岩の分析から、地球マントルの主成分はカンラン岩であると考えられている。月がジャイアントインパクトによって地球から放出されたマントル物質から形成されたのであれば、そのバルクあるいはマ

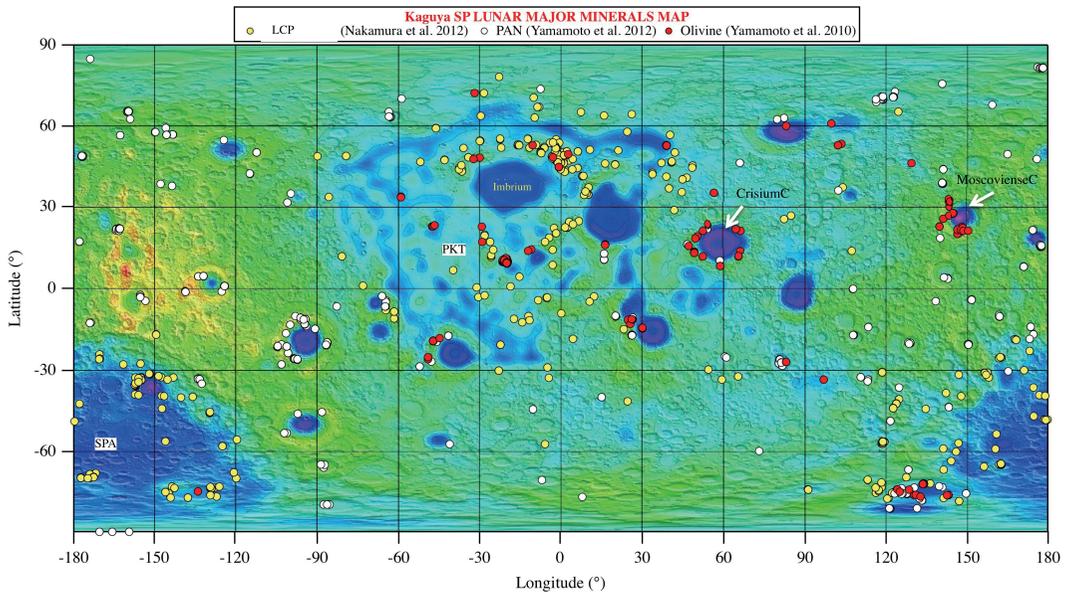


図3：SPのグローバルサーベイで明らかとなった、PAN・カンラン石・低カルシウム輝石の全球分布。背景は、「かぐや」の重力測定および高度マップから得られた地殻厚さ分布。地殻厚が薄いモスクワの海(Mare Moscoviense)および危難の海(Mare Crisium)周辺などにカンラン石が集中している。一方、低カルシウム輝石は南極=エイトケン盆地(SPA)、雨の海盆地(Imbrium basin)、プロセルラム盆地(Procellarum basin)周辺に局在している。PANは地殻厚が大きなFHT領域に多くSPATやPKTの内部には、ほとんど存在しない。

ントル組成もカンラン石に富んでいるはずである。月の出発物質にはインパクト起源物質が多く含まれている可能性もあるが、地球・月の酸素同位体比が同じであることを説明するには、地球起源であったほうが都合がよい。また最近の数値シミュレーションは、月が地球から放出された破片の再集積でも形成されうることを示している。

こうした予測に基づいて、Pietersらはクレメンタイン探査機に搭載された紫外・可視カメラUUVISで、SPA内部および周辺のカンラン石サーベイを行った。彼女らはSPAの中央部にカンラン石に富む領域(Olivine hill)を発見し、これがマンテル物質である可能性を示唆した[8]。しかしながら、その後の「かぐや」の観測では、Olivine hillにはカンラン石に富む物質は検知できなかった。またUUVISでカンラン石に富むとされてきたツィオルコフスキークレーターの中央丘も、実際はカンラン石ではなく輝石・斜長石の混合物であることが判明した[2]。図1に示されるとおり、輝石の吸収帯の最深波長は $1\mu\text{m}$ よりも短く、カンラン石・斜長石では $1\mu\text{m}$ よりも長い。クレメンタインUUVISの観測は $0.415/0.750/0.90/0.95/1.0\mu\text{m}$ の5バンドに限定されていたため、カンラン石や斜長石の吸収帯を完全に捉えることができず、PANやカンラン石の同定がうまくできなかったのだろう。これに対して全ての吸収帯を連続的にカバーするSPでは、7000万点に及ぶ全スペクトルデータの自動解析によって、様々な鉱物種の全球分布を調べることが可能となった。

図3に山本ら[9]によるカンラン石全球サーベイの結果を示す。結局、過去の観測でカンラン石が存在するとされてきた地点のうち、SPで確認されたのは表側の望遠鏡観測で同定されたコペルニクスとアリストアルコスというふたつのクレーターだけだった[2]。この2つのクレーターが、雨の海周辺に存在することは偶然ではない。SPの全球サーベイにより、雨の海、危難の海、モスクワの海といった衝突盆地を囲む形で、カンラン石に富む数kmスケールの岩体が露出していることが明らかになったのだ[9]。モスクワの海、危難の海は月の地殻が最もうすくなっている地域であり、盆地内をうめっている海のすぐ下にマンテルがせまっていることに注目したい[5]。コペルニクスとアリストアルコスも、表層の岩石を掘削することで、雨の海周辺に存在するカンラン石を露出させたと考えられる。ま

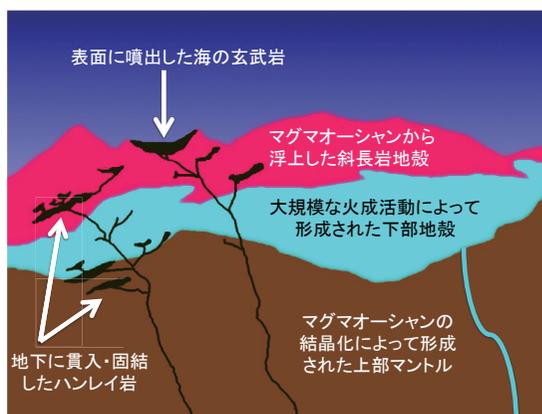


図4：伝統的な月地殻および上部マンテルの概念図。マグマオーシャンから浮上した斜長石地殻の下には、後の火成活動による貫入岩から成る下部地殻が存在すると考えられている。2.2節で述べたように、この下部地殻は低カルシウム輝石に富んだノライトだとされてきたが[8]、衝突盆地の内部を満たしている海は高カルシウム輝石に富む玄武岩でできている。同じ組成のマグマが、密度の低い斜長岩地殻中を浮上することができず、途中で固結してしまった場合には、やはり高カルシウム輝石に富むハンレイ岩となるはずである。実際SPデータを用いて、高地に存在する新鮮かつ比較的小さいクレーターの内部および放出物の組成を調べたところ、どこも高カルシウム輝石に富んでいることが明らかとなった[24]。

たSPA周辺にあるシュレーディングークレーターのリング周辺でも、カンラン石が発見されている[10]。SPの観測したカンラン石分布は、明らかに衝突盆地の周辺に集中しており、衝突によって盆地周辺に堆積した放出物であることを示唆している。雨の海やSPAに衝突スケージング則を適用すれば、極端な斜め衝突あるいは低速衝突など特殊な条件を仮定しない限り、確実にマンテルまで到達する。上述したとおりクレメンタインデータから存在が推測されていたOlivine hillは幻に終わったが、我々はいかに「大規模な衝突によって表面に露出したマンテル由来のカンラン岩」を発見したのだろうか？

SPで観測されたカンラン石の分布は、マンテルではなく下部地殻と関連している可能性もある。

たとえばコペルニクスの過去の観測では、たまたまその地下にカンラン石に富む貫入岩が存在し、そこがクレーター中央丘として掘り起こされたと解釈されていた。アポロの高地サンプルの中には、鉄に富んだ斜長岩族(FAS)よりもマグネシウムに富んだ有色鉱物を多く含み、ずっと若い形成年代(40~44億年)を示す岩石(いわゆる Mg-suite)が存在する。Mg-suiteは、

マグマオーシャンが完全に固結した後に、斜長岩地殻の下に貫入した別のマグマ(～下部地殻)から形成されたと考えられている(図4) [11]. Mg-suiteのなかでもカンラン石と斜長石から成るトロクトライトは、SPのスペクトルデータを説明することが可能である[9]. 大規模な衝突によって火成活動が活発になり、完全に地殻が掘削されなかった周辺部の地下に大規模な貫入が起って下部地殻が形成されたのかもしれない。

マグマオーシャンが結晶化する際、対流が強くなければ、最初にカンラン石が晶出して底に沈み、その上に低カルシウム輝石が固化するという順序で分別結晶化がすすむ。この場合、カンラン石よりも浅いところに低カルシウム輝石が存在するため(図2)、放出物の中に両者が共存している可能性がある。一方、Mg-suiteにはカンラン石に富むトロクトライトだけでなく、低カルシウム輝石に富むノライトもあり、アポロの線データや、クレメンタインの分光データは、むしろノライトが下部地殻の主な構成成分であることを示唆している[7,8]。つまりカンラン石が発見されていない小さな盆地の周辺では、低カルシウム輝石が存在している可能性がある。また盆地の大きさや掘削深さが比例しているとすれば、深さ方向の組成変化が放出物の空間分布として見えている可能性がある。そこで我々は、低カルシウム輝石についても全球サーベイを行い、カンラン石の分布との関連を調べることにした。

2.3 巨大衝突盆地に付随した低カルシウム輝石に富む岩体の発見

カンラン石と同様な手法で、低カルシウム輝石に富んだ岩体のSP全球サーベイを行った結果を図3に示す[12]。カンラン石と同様に衝突盆地周辺に集中しているが、両者の分布は必ずしも一致しない。低カルシウム輝石は危難の海やモスクワの海のような比較的小さい衝突盆地周辺では検知されず、月で最大の衝突盆地であるSPA、2番めに大きな雨の海盆地、そして表の海のほとんどをその中に含むプロセルラム盆地の周囲に局在している。ここで低カルシウム輝石/カンラン石ともに後の貫入岩(～下部地殻)ではなく、マグマオーシャンから直接固結した物質だとして、マグマオーシャン固結の初期段階から分別結晶化が起っていたとすれば、まず最初にカンラン石が晶出して底に沈み、その次に固化した輝石がカンラン石層の上ののる

(図2)。この場合、SPの観測結果とは反対に、より深くまで掘削する大規模な衝突盆地周辺にカンラン石が存在し、地殻の直下までしか掘れていない小規模な衝突盆地周辺では低カルシウム輝石が分布するはずである。

マグマオーシャンが固化する際、最初に晶出する物質はマグネシウムに富み、結晶化がすすむほど鉄の割合が増える。また最後に固結する非調和元素にはチタンなどの重い元素が多いため、マグマオーシャンが完全固化した直後は、上層ほど密度が高くなっているはずである。この状態は重力的に非常に不安定であるため、比較的短いタイムスケール(～数十万年)で上下層の逆転現象(マントルオーバーターン)が起きると予測されている。このオーバーターンの結果、低カルシウム輝石に富む層がカンラン石に富む層の下に潜り込んでいるとすると、SPの観測結果をうまく説明できる。

ここまでの議論をまとめよう。伝統的な月の形成史を考えると、衝突盆地に付随しているカンラン石および低カルシウム輝石は、

- (1) 衝突盆地の形成がトリガーとなって減圧溶融などによる火成活動が起り、その結果PAN地殻下部に貫入したマグマから形成された下部地殻(図4)
- (2) PANよりも先にマグマオーシャンから直接晶出し、のちにオーバーターンしたカンラン石/輝石(図2)

のどちらか、あるいは両者の組み合わせであると考えられる。

3. 新しい月地殻の描像

この章では、衝突スケーリング則を再検討することで、2章とは違うSPデータの新たな解釈を提示する。

3.1 衝突溶融による「マグマの海」の形成とその再分化

衝突の規模が大きくなると、掘削される領域に対して溶融領域の割合が相対的に増える(図5)。ティコのような若い数十kmのサイズのクレーターでも、その内部は衝突溶融物によって埋められているが、雨の海やSPAのスケールになると、衝突盆地の内部は数十kmの厚さの完全溶融した岩石によって満たされ、ほぼ同量が外部に放出されると考えられている[6]。本

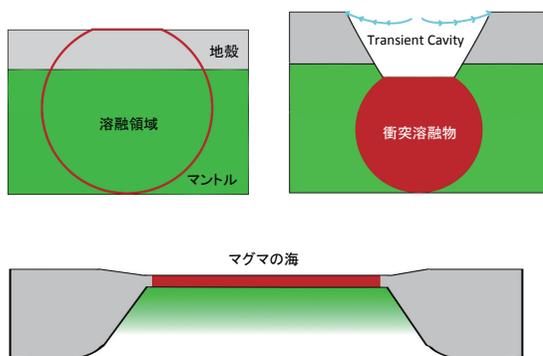


図5：マグマの海概念図。数百km規模の衝突盆地を形成するような衝突は、地殻だけでなくマントル領域も熔融させる(左上)。衝突直後には直下点付近の深いところまで広がっていた溶融物は(右上)、地形が緩和するに従って盆地の内部を満たす「マグマの海」となる(下)。この深さ数十kmの「マグマの海」は、図2のマグマオーシャンと同様に分化しながら再結晶する。その鉛直組成分布は、マグマの初期組成(地殻/マントル比)や対流の強さに大きく依存する[13]。

稿では、図5に示されるような巨大衝突盆地の内部を満たす衝突溶融物を「マグマの海」と呼んで、ジャイアントインパクト直後に形成された月全球を覆うマグマオーシャン(マグマの大洋)と区別することにしよう。月面の全ての衝突盆地で形成された衝突溶融物量を合わせると、「マグマの海」から再固結した物質の体積は地殻全体の5%を占めると見積もられている[13]。後述するように、もしプロセラルム盆地が衝突で形成されたとする、この割合はさらに大きくなる。

小規模な衝突溶融物はターゲットの平均組成を持つガラスとなるが、より大きな衝突溶融物は冷却時間が長くなるために分化する。実際サドベリーやマニコーガンといった直径が100 kmを超える地球のクレーターでも、衝突溶融物の分化が起っていることが明らかになっている。つまり「マグマの海」が冷えて再固結する際も、マグマオーシャンと同様の分化プロセスを経ると予測される。この分化プロセスを決める大きなファクターは

- ・衝突で熔融した領域のうち、マントル/地殻の占める割合
- ・マントル中に残されていたAl/Ca量
- ・巨大衝突溶融物の組成の一様性および深さ(～冷却タイムスケール)
- ・分別結晶化/平衡結晶化のどちらが卓越するかを決める対流の強さ

などである。衝突溶融物中で地殻成分が占める割合が大きい場合、あるいは元々のマントルに含まれていたAl/Caが多い場合には、「マグマの海」から斜長石が再度晶出する可能性もある[13]。衝突スケーリング則によれば、SPAや雨の海盆地をつくった衝突は、マグマオーシャンから固化・浮上した斜長岩地殻を完全に剥ぎとったと推測される。しかし「かぐや」の重力場観測は、PKT/SPATの地下にも薄い斜長岩地殻が存在することを示しているし[5]、かぐや搭載MIは、PKTの中心に位置するアリストルコスクレーターの中央丘にPANが露出していることを発見している[4]。またアポロ16号が取得したFASサンプルのひとつ(60025)は、43.6億年という非常に若い年代を示すため、マグマオーシャンから直接晶出した物質ではないと考えられている[14]。こうした斜長石は、マグマオーシャンではなく「マグマの海」から晶出した2次地殻であるのかもしれない。マグマオーシャンの場合と同様、「マグマの海」から斜長石が晶出する前には、カンラン石や輝石をより多く含む岩石が形成されているはずである。Mg-suiteは月内部の再溶融によって浮上し地下で固結した貫入岩ではなく、「マグマの海」から再固結した物質である可能性も指摘されている[15]。

アポロ14号の着陸地点は、フラマウロ丘陵と呼ばれる雨の海からの放出物上にある。宇宙飛行士によって地球に持ち帰られた14310という岩石は、雨の海盆地が形成された時に放出された溶融物が固結したものだと考えられている。14310に含まれる最も多い鉱物は斜長石と低カルシウム輝石であり、実験室で測定されたそのスペクトルと14号着陸地点の最寄り地点で測定されたSPのスペクトルは、非常によく一致している(図6, 7)。これは、SPAやプロセラルム盆地周辺でSPが検知した低カルシウム輝石に富む物質も、溶融放出物から再結晶したものである可能性を強く示唆している[12]。

3.2 プロセラルム盆地の起源と月の二分性：

2.3節で述べたように、低カルシウム輝石はSPA、雨の海そしてプロセラルム盆地周辺に局在する。SPAと雨の海がそれぞれ月の最大/2番目に大きな衝突盆地であることを考えると、プロセラルム盆地も衝突によって形成されたと考えるのは自然であろう。プロセラルム盆地が巨大衝突によって形成されたというアイ

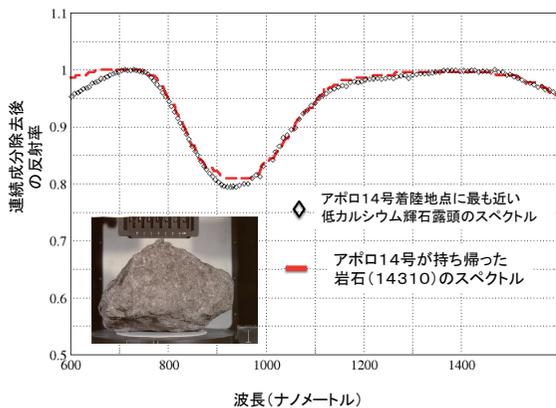


図6：アポロ14号が持ち帰った岩石14310と、最寄りのSP観測地点の反射スペクトルの対比図。風化の影響をとりのぞくために、吸収帯の両端を結ぶ接線で割り算している。図1との対応から、両者はともに低カルシウム輝石に富んでいることがわかる。

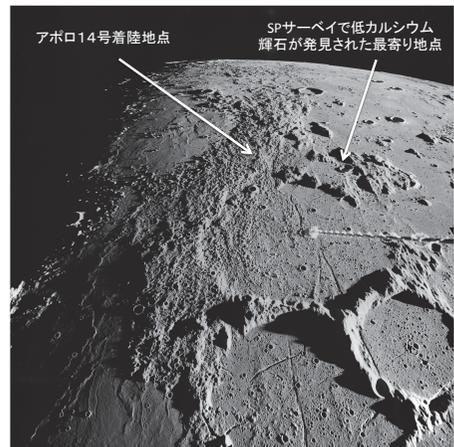


図7：アポロ14号着陸地点と、最寄りのSP観測地点の位置関係。画像中央上部、月平線上に雨の海が見えている。着陸地点から上下にのびている起伏に富んだ領域が、雨の海からの放出物からできているフラマウロ丘陵である。

デアは古くから提案されているが、地形的特徴は地形緩和やその後の衝突の影響で識別できなくなっているため、その痕跡は組成から調べるしかない。図3に示されている低カルシウム輝石の全球分布は、プロセラルム盆地衝突起源説の新たな強力な傍証であると言えるだろう [19]。SPAが衝突地形として認識できることを考えると、プロセラルム衝突はそれより以前に起ったと考えられる。

月の表裏は、目に見える海の分布だけでなく、地殻厚や放射性元素の分布もまったく異なる [5]。この性質を月の二分性と呼ぶ。月の形成のごく初期、マグマオーシャンが完全に固結する前に、プロセラルム規模の巨大衝突があったとすると、以下のようなプロセスで二分性が自然に生じると予測される。

- ・ 衝突した面の斜長岩地殻は、ほぼ完全に吹き飛ばされるため、地殻厚に非対称が生じる
- ・ 斜長岩地殻の下にあった非調和性元素／放射線核種に富んだ残液 urKREEP が表面に放出される。
- ・ 薄い地殻厚、減圧溶融などの影響で、反対側の半球よりも多くの海が形成される
- ・ やがて地球からの潮汐の影響で、表／裏の位置に固定される [16]

Luceyらによれば、SPAを形成したインパクトのサイズはおおよそ250 km程度であると見積もられている [7]。また地球＝月系が形成された直後の内惑星系

の微惑星サイズ分布のモデルから、形成直後の月に親鉄性元素や水をもたらしたインパクトのサイズも、やはり300 km程度であると推測されている [17]。このサイズの天体が、SPA形成以前に、マグマオーシャンから固結した直後の(あるいはまだ固結しきっていない)熱い一次地殻上に衝突すれば、プロセラルム規模の盆地が形成されることは十分にあり得る。2.1節で述べたように、全球にわたってPANを晶出させるためにはマグマオーシャンの存在が必要だが、それはのちに「マグマの海」が形成されたことを否定するわけではない。

3.3 巨大衝突と3つのTerrainの起源

前節では、マグマオーシャン固結直後に起きたプロセラルム衝突が、PKTの成因であったという可能性について議論した。続いて本節では、さらにそのあとに起った巨大衝突によってSPATが形成されたというシナリオについて考察する。

Warren [18]は、ルナプロスペクターガンマ線分光データからトリウム濃度の地殻内鉛直分布を調べ、地殻内の平均トリウム濃度は表面濃度の6割程度であることを明らかにした。この平均濃度に平均地殻厚さをかけることで地殻に含まれるトリウム量を見積もることができる。月と地球の総トリウム量が同程度だと仮定すると、トリウムのほとんどが地殻内に存在するこ

とになる。非調和元素であるトリウムはもともとマグマオーシャンの残液(urKREEP)に濃集していたはずである。チタンを含むurKREEP層は、下のマントルに比べると圧倒的に密度が高く、放射性元素を多量に含む。そのためその一部はマントルオーバーターンによって、マントル深部に持ち込まれ、その後の火成活動の熱源となったと考えられる。しかし上述したように、深部に持ち込まれたトリウムの量は地殻に残されたものよりもずっと少ない。つまり、現在観測されているPKT内のトリウム量を説明するには、urKREEPを月深部よりも地殻に多く残す必要がある。かりにurKREEPがオーバーターンで深部に沈む前に、プロセラルム衝突が起こったとしよう。urKREEP中に含まれるトリウムは表面に放出され、あとは続く衝突のたびに(あるいは火成活動で)生じる溶融物に取り込まれることで地殻の一部となっていくはずである。PKT周辺のトリウム分布は、こうした複雑な衝突史／火成活動の歴史を反映しているのではないだろうか。

表側の衝突盆地には強い正のフリーエア重力異常(マスコン)が存在する。これは、これらの盆地が形成された40億年ほど前には、すでに地殻がかなり固くなっておりアイソスタシーが回復しなかったことを意味している。プロセラルム衝突が、熱源であるKREEPを早い時期に表面に放出したとすれば、月は早く冷却しマスコンの形成条件も満たされやすくなる。

最近Morbidelliらは、原始惑星形成後に残された微惑星の軌道／サイズ分布シミュレーションを行い、SPA内の20 km以上のクレーター密度と比較することで、SPAの形成は43.3～43.6億年前だったと予測している[19]。彼らのモデルによれば45億年前の衝突フラックスは、このSPA形成時に比べて10倍以上高くなっている。つまり、マグマオーシャンから斜長石地殻が浮上した直後、urKREEPがオーバーターンで深部に落ちてしまう前に、SPAよりも大規模な衝突が起こったというシナリオは十分に成立する。その後、SPA衝突が起こった時にはurKREEPはすでにオーバーターンにより深部へ持ち込まれていた、あるいはプロセラルム衝突の影響で表側へ移動していたと考えれば[20]、SPATのトリウム量がPKTより低くなっていることも自然に説明できる。

4. 今後の探査に向けて

ここで、2章および3章の解釈を簡単にまとめてみる。

(a) 伝統的シナリオ：

マグマオーシャンが固結した後、オーバーターンによってカンラン石層が低カルシウム輝石相の上に来た。このため、より小さい盆地で上のカンラン石マントルが放出され、深部まで到達した三大盆地だけが低カルシウム輝石を露出させた。1000 km以上の衝突盆地では、衝突時に多量のメルトが形成されたことは間違いないが、分化せずに固結した場合は元のマントル組成をそのまま反映する可能性がある[21]。

(b) 新シナリオ：

巨大衝突によって生じた大規模なメルトによって「マグマの海」が形成され、その固化の際の分別結晶化によって、カンラン石や低カルシウム輝石に富む岩石が形成された。ただし小規模な衝突盆地周辺で観測されるカンラン石は、溶融放出物から分化した物質ではなく直接マントルから放出された可能性もある。

今後この2つの説を、観測的に区別／検証するにはどうしたらよいだろうか？(b)の場合、分化が起こったのが大洋よりも小さな海のレベルであるため、(a)に比べると、斜長岩に富む岩体と、低カルシウム輝石／カンラン石に富む岩体が比較的小さいスケールで隣接していると予測される。図3に示されているとおり、SPによる全球サーベイからPAN、低カルシウム輝石、カンラン石といった複数の鉱物種が隣接する領域はすでに同定できている。現在我々は、MIのマルチスペクトル画像やLROCの高解像度画像を用いて、こうした領域の詳細な地質調査をすすめていく。

2つのシナリオを区別する上で重要なもうひとつのポイントは、岩石中の斜長石の割合である。(a)の場合、SPが同定した低カルシウム輝石およびカンラン石に富む岩体はいずれもマントルに起源を持つため、斜長石をほとんど含んでいないはずである。一方(b)の場合、SPによって同定された低カルシウム輝石およびカンラン石に富む岩体は、14310のように斜長石を多く含む可能性が高い[19]。2.1節で述べたとおり、反射率の高い斜長岩の吸収帯は、より暗いカンラン石／輝石の吸収帯で容易に隠されてしまう。宇宙風化の影響を適切に補正し、絶対反射率を出すことができれば、

放射輸送モデルとの比較によって斜長石の割合を見積もることもできるが、確実な結論を出すのは難しい[14]。その他のリモートセンシング観測手法としては(1)X線分光による元素分布観測(2)SiO₂の割合を制約できる熱赤外分光観測がある。周回軌道上からのX線分光によって、表面物質のAl/Si比率が決定できれば斜長石の割合を推定できる。しかしSPで観測された露頭のサイズは10kmに満たないものがほとんどであり、強烈な太陽フレアが起きた時でなければ十分な精度での観測は困難であろう。一方Lunar Reconnaissance Orbiterに搭載されたDIVINERのような中間赤外分光器は、放射率スペクトルからSiO₂の量比を導出できるため、(a)(b)2つのシナリオを区別できる可能性がある。しかし、いままでの解析では宇宙風化や地形の影響を完全には除去できておらず、十分な精度の高いSiO₂量導出には成功していないようである。決定的な答えを得るためには、やはりランダー／ローバーによるその場測定や、地球に持ち帰ったサンプルの分析が必要となるだろう。米国ではSPAからのサンプルリターンミッションMoonRiseが、NASAのニューフロンティアプログラムに提案されている。SPAから衝突溶融物のサンプルを持ち帰り、年代決定を行うことで、後期重爆撃の期間に制約をつけることが最大のミッション目的である。この衝突溶融物が斜長石をどの程度含むかで、シナリオ(a)(b)を区別できる可能性がある。

さらに、プロセラルム衝突に由来する衝突溶融物を持ち帰って年代を決定し、SPAの衝突年代と比較することができれば、3章で提案した大規模衝突によるPKT/SPATの形成シナリオも検証できる。なお、MoonRiseについては、月の裏側にある地球=月系のL2ラグランジュ点にオリオン宇宙船を送り、宇宙飛行士がここからランダー・ローバーを操作することでサンプルを採取するという有人探査との組み合わせミッションも検討されている(<http://www.lpi.usra.edu/meetings/leag2012/presentations/Alkalai.pdf>)。

5. 海からふたたび大洋へ

直径約500 kmの小惑星ベスタは、ホワルダイト・ユークライト・ダイオジェナイトという3種の隕石の母天体である。月と同様にベスタにもかつてマグマオ

ーシャンが存在し、主に低カルシウム輝石から成る上部マントル(～ダイオジェナイト)と、輝石/斜長石から成る地殻(～ユークライト)を形成したと考えられている[22]。Dawn探査機に搭載されたイメージング分光器は、低緯度域がユークライトに、南極付近に存在する巨大衝突盆地ではダイオジェナイトに相当する岩石が露出していることを明らかにした[23]。これは南極付近での巨大衝突によって地殻が剥ぎ取られ、マントルが露出したためだと解釈されている。ベスタ全球を覆っていたマグマオーシャンの深さは明らかではないが、その広がりには雨の海やSPA衝突後に形成された月の「マグマの海」とほぼ同規模である。両者が共に低カルシウム輝石に富んだ岩相を示している偶然なのだろうか？それとも共通の規模・組成をもっていたゆえの必然なのだろうか？

かりに月の「マグマの海」とベスタのマグマオーシャンの組成や広がりと同じだったとしても、深さ(～冷却タイムスケール)や重力の違いによって、分化プロセスには違いが生じるはずである。近い将来「かぐや」やDawnの観測データ解析がさらにすすめば、月の「マグマの海」やベスタのマグマオーシャンの固結過程の詳細なモデルを構築できるようになるだろう。大規模な衝突溶融物の固化過程を異なる天体で調べ、天体ごとの独自性と共通性を明らかにすることは、今後の比較惑星学における重要なトピックとなる。月の「マグマの海」を調べることは、月のマグマオーシャンはもとより、地球の「マグマの海」・地球のマグマオーシャンの理解にもつながると期待される。

参考文献

- [1] Hawke, B. R. et al., 2003, *J. Geophys. Res.* 108, E6, 4-1.
- [2] Matsunaga, T. et al., 2008, *Geophys. Res. Lett.* 35, L23201.
- [3] Elkins-Tanton, L. T. et al., 2011, *Earth Planet. Sci. Lett.* 304, 326-336.
- [4] Yamamoto, S. et al., 2012, *Geophys. Res. Lett.* 39, 13201.
- [5] Ishihara, Y. et al., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L19202.
- [6] Cintala, M. J. and Grieve, R. A. F., 1998. *Meteorit.*

- Planet. Sci. 33, 889.
- [7] Lucey, P. G. et al., 1998, *J. Geophys. Res.* 103, 3701.
- [8] Pieters, C. M. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 106, 28001.
- [9] Yamamoto, S. et al., 2010, *Nature Geosci.* 3, 533.
- [10] Yamamoto, S. et al., 2012, *Icarus* 218, 331.
- [11] Shearer, C. K. and Papike, J. J., 2005, *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 3445.
- [12] Nakamura, R., et al., 2012, *Nature Geosci.* 5, 775.
- [13] Vaughan, W. M. et al., 2013, *Icarus* 223, 749.
- [14] Borg, L. E. et al., 2011, *Nature* 477, 70.
- [15] Hess, P. C., 1994, *J. Geophys. Res.* 99, 19083.
- [16] Wieczorek, M. A. and Le Feuvre, M., 2009, *Icarus* 200, 358.
- [17] Bottke, W. F. et al. 2010, *Science* 330, 1527.
- [18] Warren, P. H. 2001, *Geophys. Res. Lett.* 28, 2565.
- [19] Morbidelli, A. et al. 2012, *Earth Planet. Sci. Lett.* 355-356, 144.
- [20] Hagerty, J. J. et al., 2011, *J. Geophys. Res.* 116, 6001.
- [21] Nakamura, R. et al., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 362, L22202.
- [22] Ruzicka, A. et al. 1997, *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 825.
- [23] De Sanctis et al., 2012, *Science* 336, 11.
- [24] Ogawa, Y. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 38, 17202.

アップヒーバルドーム(U.S.A, ユタ州)はいかにできたか?

— 地下の岩塩層によって修正されたインパクトクレーター —

坂本正夫¹, 小川勇二郎²

2013年9月20日受領, 2013年11月4日受理.

(要旨) アメリカ合衆国ユタ州にあるアップヒーバルドームは, インパクトクレーターとして国際登録されている. この地形は, 長い間地下深くに存在する岩塩層の上昇によって形成されたと言われてきたが, その後隕石の衝突によって形成されたとの説が広まってきた. 文献研究で両説の言い分を踏まえた上で現地調査を行い, 関連する諸現象との比較も行った結果, この地形はインパクトによって形成されたものの, 地下に岩塩層が存在することによってクレーター地形が修正されたとの結論に至った.

1. はじめに

ユタ州ソルトレイクシティの南方からアリゾナ州およびコロラド州の西部にかけて, コロラド高原が広がる. その中央にコロラド川が大きく蛇行しながら南西へ流れ下っている. ユタ州南部のコロラド川の中流で, 支流のグリーン川が合流する. 両河川に挟まれた三角地帯には, キヤニオンランズ国立公園が広がっていて, その中にアップヒーバルドームがある(図1). キヤニオンランズ国立公園一帯の地質は, 地表付近ではトリアス紀上部からジュラ紀に及ぶ地層が広がり, ジュラ紀よりも上位の地層はおそらく新生代以降の侵食で削剥されてしまっている.

ドームの中心にある中央丘には, ベルム紀最上部のホワイトリム砂岩層とトリアス紀のモエンコピ層が複雑な構造をなして分布し, その周りにトリアス紀のチンリ層が囲んでいる. これら3層は, 逆断層を主とする複雑な構造を呈している(図2). 内縁の壁はそそり立った断崖地形をなし, そこから外側へは最大80度に傾斜するジュラ紀のウイングイト砂岩層, さらに上位へジュラ紀のカエンタ層とナバホ層が重なっている. これらの地層は, ドームの円形リムから外側へリング状に地層が窪んでできた構造(向斜構造)をつくりなが

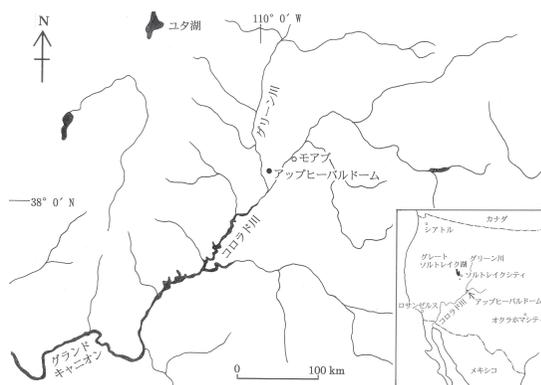


図1: アップヒーバルドームの位置図.

ら, より外側では地層が徐々に緩やかに波うって平坦となる. 内側のリムから3 km以上離れるとほとんど水平層となる[1](図3).

アップヒーバルドームの直径は約9 kmで乱された範囲は約5 kmの説と, 5.5 km以上の説と, 7~8 kmであるとする説があるが, インパクトクレーターの国際登録では直径5 kmで登録されている. 形成年代についてはさまざまな考え方があり, すなわち, ジュラ紀中期カーメル層とエントラダ層の間の堆積時の説, 白亜紀マンコス層の堆積時の説があり, 国際登録では6500万年前(白亜紀最末期)と登録されていて, 推定にはかなり幅がある. このドームの直径と形成年代との値のそれぞれには大きな幅があるのは, 様々な研究者によって地形や地質の解釈が異なっているためでも

1. 飯田市美術博物館
2. 元筑波大学
ic90877@city.iida.nagano.jp

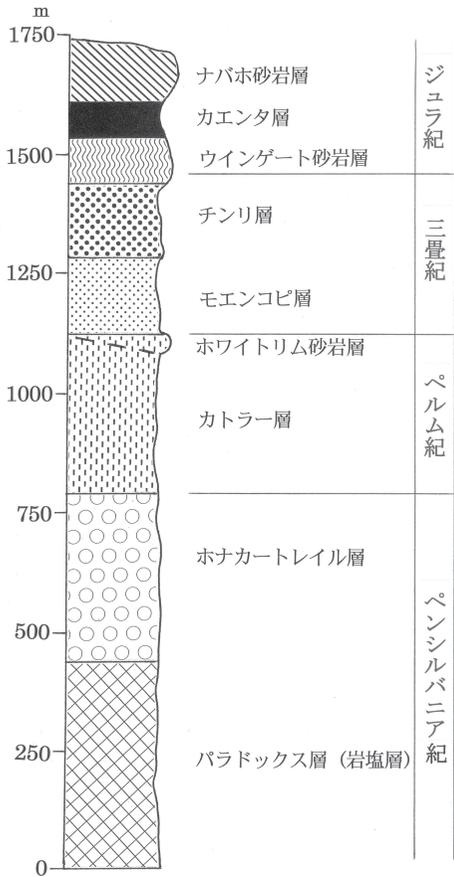


図2：アップヒーバルドームの地質柱状図。Kriens et al.(1997)を簡略化して編集した図。

ある。筆者らの調査によると、アップヒーバルドームは、直径約2 kmの内縁をもつとともにその外側にドームを取り巻く向斜構造があり、さらにその外側に同心円状に直径6~7 kmのリングが取り巻いた多重リング構造をもっていると言える。このドームの地形および地質を文献研究した上で現地調査し、インパクトクレーターの地形が修正されていく過程を議論して考察する。

2. 研究史

2.1 両説の登場

アップヒーバルドームは、1930年代に地下の岩塩層が地層を押し分けてドーム状に上昇してくることに

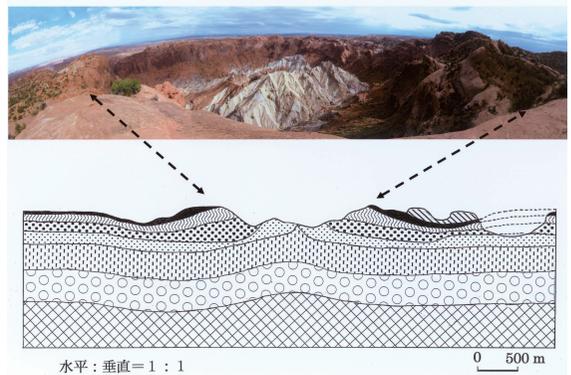


図3：アップヒーバルドームの内部、直径2kmの内縁までを連続撮影した合成写真(上図)と地質断面図(下図)。上図写真の内部は中央丘。写真はドーム南部の内縁の北から南に向けて全周を撮影。下図はKriens et al.(1997)を簡略化して編集したもので、中央丘を通してほぼ北東-南西で切った断面を示す。矢印で示す内縁の外側に複数の大小の窪地がリング状に取り巻く。中央丘の部分には入り組んだ小断層が密に形成されていて地層の変形も激しいが、その構造の詳細は省略する。地層の様子は図2と同じ。

よって形成されたという岩塩ドーム説がMcKnightによって提案された。以来、アップヒーバルドームの名称は、隆起を意味するupheavalという普通名詞がdomeになって上昇してきたというこの説を踏襲した名称のまま現在のインパクトクレーターに使われている。

岩塩ドーム説によると、石炭紀後期にはすでに岩塩層がドーム状に上昇を開始し、その後、トリアス紀、ジュラ紀にかけて堆積時にも継続的に上昇した。それらの時代には、まだ十分に固結していない地層を複雑に変形させるに足る岩塩の上昇が続き、ジュラ紀になってそれが地表へ抜け出した後にピンチオフし、最後に閉じる段階で生じた不安定地形により重力崩壊が生じ、側方に短縮する構造が形成されたというシナリオである。この説では、現在見られる構造を形成するには、石炭紀後期からジュラ紀まで、およそ1億年近くにわたる非常に長い時間がかかったことになる。

一方、こうしたゆっくりとした構造形成説に真っ向から対立する隕石による衝突説が提唱された[2]。それは、アップヒーバルドームとその周辺のすべての変形構造が、隕石ないし小惑星の衝突によって、ほとんど短時間に出来たとするものである。その後、詳細な地質調査にもとづいて数種類の大小の地質構造が、隕石衝突によってほぼ同時に形成されたとの構造形成モ

デルが提出された[1]. しかし, 岩塩ドーム説とインパクト説の両説とも, 直接的な証拠に欠けるきらいはあった.

2.2 岩塩ドーム説の限界

地震探査, ボーリングなどを含む地下物理探査では, 地下の岩塩層は現在約450 mもの深い位置にあって, 浅い部分には存在しないことが判明した[3][4]. また, 岩塩層が地上に突き抜けてピンチオフする例は, 現在の地球上では知られていないことなどからも, 岩塩ドーム説は説得力に欠ける非現実的なことであると考えられるようになった. 仮に浅所まで岩塩が上昇して来たとしても, 途中で地下水によって溶解して失われてしまう. つまり, 岩塩ドームの上昇だけでは, アップヒールドームに見られる構造は形成しにくいことが分かった[5].

2.3 インパクト説の証拠の発見

インパクト説の立場からはその後, ホワイトリム砂岩層内に, 衝撃で出来たと思われる碎屑岩脈がリムの内側で発見された. 碎屑岩脈は円磨された砂粒子からなる砂で構成されている事例がある中で, この岩脈内では角張っている砂粒子であることから, 衝撃によって短時間で岩脈が形成されたものであると考えられた. また, 重要なショックの指標としてのシャッターコーンや衝撃変成石英に形成されたplanar deformation features(PDFs)(以下「面状変形組織」と記述)が, 中央丘や内側のリムの地層から報告された[1]. さらに, 地層の変形が著しい中央丘では, 衝突時に水圧破砕が生じ帯水層の基底部に衝撃波が走って生じた構造が示された[6]. リムでのウインゲート砂岩層内での岩脈構造や破砕して流動する構造, 岩石の流動構造などのマクロからマイクロな構造観察とそれに伴う実験的なデータから, それらのすべてはインパクトで形成されたと解釈できるとされた[7]. しかし, 石英の高圧相の多くが侵食によって失われてしまっていること及び, その面状変形組織を結晶構造レベルでは未確認であることがインパクト説の説得力を高められない原因になっていた.

近年, 面状変形組織がTEMで明瞭に確認され隕石衝突説が決定的となった[7]. 見出された石英中の圧縮変形バンドは, 平均圧力が0.7 GPaと4.6 GPaとの

間で形成されたと推定され, インパクトによるものであって, 岩塩による静的なドーム状の構造で形成させるには不十分であること[8]などインパクト説を支持する報告が相次いだ. 以上のように, 衝突による高圧で形成される組織が発見されたことによって, アップヒールドームがインパクトによって形成されたことは確実となった.

3. 両説の問題点

当初の岩塩ドーム説は, その後のインパクト説に沿ったさまざまな証拠が見出された結果, 苦境に立つに至った. インパクト説による形成過程は, 岩塩ドーム説の形成過程に比べて圧倒的に短時間である. しかし, アップヒールドーム全体のありさまを広く考察してみると, すべての大小の地質構造がインパクトの衝撃だけでできたものであるかの論証は, 未だに不十分であるように思われる. その最大の問題は, インパクトによって形成されたクレーターであることは確実であったとしても, 地下にある厚い岩塩層がインパクトに関わって何も影響を与えなかったのかということである. そこで, 以下に問題点を整理して, インパクトクレーター地形の修正過程を提案する.

3.1 地形分類から見た隕石クレーター

地球上の隕石クレーターは, 地形的に大きく3種類に分類される[9]. クレーターの形成条件によってもサイズが異なるが, 概ね直径4 km未満までのクレーターは単純型クレーターで, お椀状の地形である. それより大きな直径で概ね100 kmまでのクレーターは複合型クレーターで, 円形クレーターの内部に中央丘が形成されたものである. これより大きな直径のクレーターは多重リング型クレーターで, 円形構造の周囲にリング状の地形が複数取り巻く[10]. それぞれの直径に対する分類は, 地球上の大まかな傾向を示したもので, クレーターの形成される地質の違いや衝突する隕石の種類, 速度, 角度などによって異なる.

アップヒールドームの場合, 直径約2 kmの内縁をもち, その外側に直径約5 kmのリング状の地形をもち, さらにその外側にも直径6~7 kmに同様な地形が形成されている. また, 円形地形の中心には中央丘が形成されている. アップヒールドームは地球上の

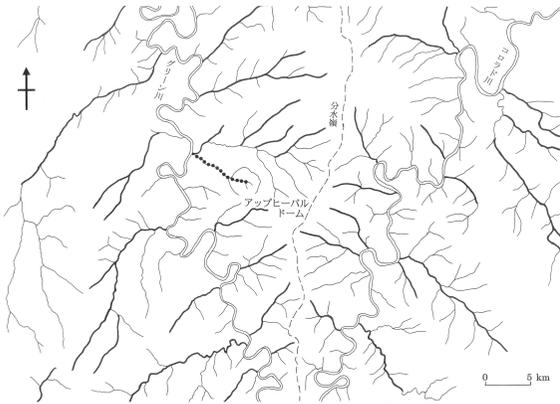


図4：水系図。二本線はコロラド川とグリーン川、黒太線は主な支流を示す。アップヒーバルドームから北西に流れる流系を黒丸点で、また分水嶺を破線で示す。



図6：ドーム内縁の南縁における割れ目の写真。細長いクリノメーターの方向に発達した割れ目で、左の方向がドームの中心。写真の垂直方向はナバホ砂岩層の地層面。



図5：アップヒーバルドームの直線的な排水地形。奥正面に切れた部分が唯一の排水路。写真はドーム内縁の南東から北西に向けて撮影。

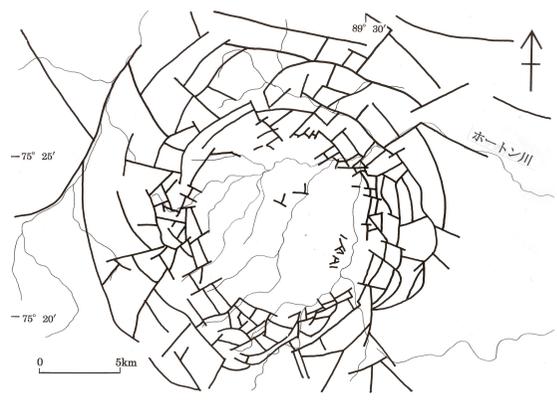


図7：カナダホートンクレーター（直径23km）の構造図。黒い線は、放射状と同心円状の断層。Osinski et al. (2005)の図を簡略化し、断層線のみを表す。

クレーターサイズで見ると単純型クレーターに近いが、中央丘をもつために複合型クレーターになっていて、しかもより外側のリングを含めると多重リング型に分類される形態をもっている。

この形態は、衝突した大地の地質と地質構造が関係しているものと思われる。すなわち、地下に厚い岩塩層が存在し、インパクトによって岩塩層に刺激を与えた可能性がある。

3.2 水系から見たアップヒーバルドームの意義

アップヒーバルドームを中心として、その東西両側に広がるコロラド川水系とグリーン川水系との河谷の

侵食地形の違いを、現地の地形観察と62500分の1地形図とを合わせて考察した。コロラド川は大きく蛇行しているが、全体的な流れの向きは北東から南西である。その主な支流は概ね北西—南東方向の渓谷をなしている。これに対して、グリーン川も大きく蛇行してはいるが、全体的な流れの方向は北西から南東に向いている。その主な支流は概ね北東—南西方向の渓谷をなしている。つまり、それぞれの本流と支流はほぼ直交する河谷の侵食を行っている(図4)。コロラド川水系とグリーン川水系との境にある分水嶺は、広大な平原の中であって視覚的には分水嶺と認識できにくい。地形図では確実に分水嶺が存在し、アップヒーバルド



図8: アップヒーバルドームの褶曲, 内縁の壁に見られる砂岩層の褶曲, 内縁の南部から撮影。



図9: アップヒーバルドームの内縁の外斜面, 外斜面の下部(写真下部)から内縁(写真上部)を見上げた写真. 図9に見られる100~150mの波長の褶曲は, 小刻みに波打った形状に換わっている。

ームはグリーン川水系に位置していることが分かる(図4)。分水嶺からアップヒーバルドームを含んでグリーン川までを直線距離で結ぶルートの高高低差を測った結果、傾斜角は約2度である。視覚的に捉えることのできないほどの緩やかな傾斜で、グリーン川方向へ傾いているといえる。これと同様の現象は、分水嶺からコロラド川の斜面にも同じように生じ、分水嶺からコロラド川に緩やかな傾斜で傾いている。以上のように、アップヒーバルドームから発する排水路としての河谷は1本であって、北西から南東に向かって形成されている(図5)。

このことは、1方向に天水が集中する作用によって形成されてきたものと考えられる。地下から岩塩層が上昇してきて円形構造を形成する場合は、円形構造の中心から全方向へ対象的な排水地形が作られるはずである。天水が1方向へ集中して1方向だけの河谷を形成することからも、アップヒーバルドームの形成の仕方は、まずインパクトによって導かれた可能性が高い。

3.3 岩石の割れ目と断層, 褶曲の形成

アップヒーバルドームの最も内側の直径約2 kmの内縁には岩石の割れ目, 断層, 褶曲が発達している。内縁では、三疊紀のカエンタ層に数cm間隔で割れた砂岩層が露出している。緩やかに傾斜した砂岩層の走向方向に対してそれに直交するような高角度で割れ目が密に形成され、割れ目に沿って剥げやすくなっているために剥げた部分の凹凸が明瞭に見える(図6)。ド

ームの中心に向かって形成されている割れ目が顕著であるが、砂岩の走向方向にできたドームの中心から同心円状に形成された割れ目も不明瞭ながら観察できる。こうした割れ目は内縁の一部に明瞭に発達していて、インパクトによって形成される現象であることを示す。放射状と同心円状の2成分の割れ目は、規模の小さい御池山隕石クレーターでも報告されている[11]。

アップヒーバルドームの断層は、大きく2領域に分けられて形成されている。一つは、ドームの中心にある中央丘にのみ逆断層が密に発達している。そのため同一地層が高角度に傾斜して繰り返す構造が形成されている。この断層群は中央丘の部分にのみ形成され、ドームの周囲にはつながっていない[1]。

これに対して、内縁の周囲には放射状と同心円状の逆断層がともに形成されている。放射状と同心円状の断層は、規模の大きな隕石クレーターに形成されることが多く、ホートンクレーター(Haughton crater, 直径39 km, カナダ)に典型的に現れている(図7)。また、規模の小さなタブン・カハラ・オボクレーター(Tabun-Khara-Obo crater, 直径1.3 km, モンゴル)にも両方向の断層が報告されている。規模が大きいくレーターに形成される典型的な放射状と同心円状の断層はクレーターの全域に形成される傾向がある。一方、アップヒーバルドームの場合、これら2方向の断層は内縁の付近に留まっている。特に放射状の断層は内縁に短く形成されているのみである。この現象はこれらの断層がドーム全体に及ぶ形成機構によって形成され

たものではないことを示唆している。

さらに、褶曲構造に注目すると、アップヒールドームでの地層の褶曲は、ドームの内縁の付近に際だつていて、内縁のほぼ全周で内縁に沿って褶曲を観察することができる。この褶曲はドームの中心から放射状の褶曲軸をもち、1波長が100 m～150 m程度でくり返す(図8)。フリルのついたスカートのように内縁の部分で放射状の褶曲になっているだけであり、縁から離れると急激に褶曲が弱くなっていく。そのため内縁の外斜面では褶曲が弱まり緩やかな波打った地形に変わっている(図9)。つまりこの褶曲の形態は、アップヒールドーム全体に及ぶ作用で形成されるものではないことを示唆している。また、この内縁の褶曲された部分では放射状の短い断層が粗い間隔で形成されていることから、これらの断層と褶曲は一連の形成機構で形成されたことを示唆している。

クレーターに形成された褶曲の事例として、クロックドクリーククレーター(Crooked Creek impact crater, 直径7 km, U.S.A.)ではクレーター形成時にクレーター壁が重力による崩壊によって中心へ押し出す時にセンチメートル以下の褶曲がクレーター内に広く形成されることが知られている[12]。アラグアイナインパクト構造(Araguainha impact structure, 直径40 km, ブラジル)ではクレーター縁から中央丘に向かって最上部の地層が横倒しになって広く褶曲している[13]。いずれもこれらはクレーターの形成時に内部の地層が広く褶曲を受けたものでクレーターの内縁に沿って限定して形成されているものではない。

以上のことから、アップヒールドームの断層と褶曲は、内縁に沿った局地的に限定的な作用で形成されたものであり、インパクトクレーターの特徴としては異例なものと言える。

3.4 衝撃角礫岩の存在

インパクトによって隕石クレーターが形成される時、地表面が衝撃圧縮を受けその圧縮力の規模に応じて地表から地下にかけての岩石類が角礫化して空中に吹き飛ばされる。その角礫化した岩石類のあった空間がクレーターとなる。次の瞬間からはクレーターの外にも fall out して角礫化した土石が少し積もるが、多くはそのクレーター内に fall back してクレーター内を埋積する[10]。この角礫化した土石には強い衝撃を受け

ている礫が含まれ、衝撃角礫岩と呼ばれる。一般的に、隕石クレーターには衝撃角礫岩が存在し、その中に含まれる衝撃変成石英や溶融ガラスなどによってインパクトで形成されたことが証拠だてられる。

ロックエルム隕石クレーター(Rock Elm meteorite impact structure, 直径6.5 km, U.S.A.)では、4億5000万年から4億年の間の形成年代が推定され深く侵食されているが、衝撃角礫岩層がおよそ100 mの厚さで残っている。その中の石英からは、鉱物顕微鏡によって面状変形組織が確認され、衝撃圧縮力は5～10 GPaと推定されている[14]。このように、アップヒールドームよりかなり古い年代で深く侵食されたクレーターであっても、衝撃角礫岩が存在し面状変形組織が確認できる場合もある。

アップヒールドームでは現在までに多くの研究が行われ報告されているが、衝撃角礫岩が発見されたとの報告はない。アップヒールドームがインパクトで形成された時には、当然大量の衝撃角礫岩が形成されたことは疑う余地のないことである。それにも関わらず衝撃角礫岩は現存しないようだ。その理由は、以下のように考えられる。

アップヒールドームが形成された年代は、かなり粗い形成年代の推定しかなされていないが、すでに述べたように、およそ1億7000万年～6500万年までの間とされている。この期間はジュラ紀中期から白亜紀末にかけての大きな幅のある年代であるが、アップヒールドームの周辺には現在それに相当する地層は、侵食によって失われ存在していない。現在は、ジュラ紀下部と推定されているナバホ砂岩層が最上部層である。したがって、推定されているインパクトの年代の地層は、現在は存在していないことになる。衝撃角礫岩がどこかに発見されるかは今後の課題となるが、地層の残存がないこと、および幅の大きなインパクトの推定年代との関係からは衝撃角礫岩を発見することは、現時点ではかなり難しい状況にあると言える。

3.5 衝撃を受けた基盤岩

地表の岩石が衝撃を受けてできた角礫岩とは別に、衝撃を受けた基盤岩の中に含まれる石英が面状変形組織を形成する事例もある。アリゾナ州のメテオールクレーター(Meteor crater, 直径1250 m)では、ココノ砂岩層に石英の面状変形組織や高压相としてのコー

サイトやステーションが報告されている。御池山隕石クレーター(直径900 m)では、チャートの基盤岩にある石英脈に最高2方向の面状変形組織が確認され、そこからの衝撃圧縮力は8~10 GPaと推定されている。フォルシュ構造(Foelsche structure, 直径6 km, オーストラリア)では、クレーター内部を構成するブカラ砂岩層の最下部層に含まれる石英粒の2~10%に面状変形組織が確認され、最高5方向の変形が報告されている。ヤーラブッパインパクト構造(Yarrabubba impact structure, 直径30 km, オーストラリア)では、後期始生代のヤーラブッパ花崗岩の中に少なくとも3方向の面状変形組織が確認され、強い衝撃を示す(1013)の結晶面に集中していると報告されている。フレダフォートドーム(Vredefort dome, 直径300 km, 南アフリカ)では、基盤岩の始生代のペグマタイトからの石英に2方向の面状変形組織が確認され、その内(0001)の結晶面に集中していると報告されている。

アップヒールドームでは、カエンタ層の砂岩とホワイトリム砂岩層とに含まれる石英から面状変形組織が報告されている[3]。ホワイトリム砂岩層からの石英の約1%に面状変形組織が結晶面に対して平行から準平行に1方向で形成されている。アップヒールドームでの衝撃圧縮力は面状変形組織の形成状況から10 GPa以下との報告があるが[7]、この衝撃圧縮力は直径5 kmのアップヒールドームでの石英に及ぼした圧縮力としては弱いレベルである。また、後期始生代のヤーラブッパ花崗岩に形成されたヤーラブッパインパクト構造や始生代のペグマタイトに形成されたフレダフォートドームのように、20億年以上の長い地質時代を経ても面状変形組織が保存され消滅することはない。古く見積もっても1億年足らずのアップヒールドームに形成されている面状変形組織が、弱いレベルの衝撃圧縮力が保存されていると見てよい。したがって、アップヒールドームではインパクトによって形成されたものの大規模なリング構造を造るほどの衝撃圧縮力があつたわけでないかと推測される。

4. 議論

4.1 地形および大構造の形成について

キャニオンランズ国立公園一帯の水系から見た時、

アップヒールドームでは北西への一方向のみを直線的に深く彫り込んだ排水路が存在することは、地下の岩塩層が上昇してくることで説明ができていく。アップヒールドームの衝突現象の推定では、中央丘を構成する地層にできた多くのスラストの運動方向から、北西方向から南東方向への斜め衝突が議論されている[15]。斜め衝突によってクレーターが形成された場合、クレーターは円形に近い地形ができて放出された衝撃角礫岩の分布はかなり偏ることが知られている[16]。すなわち、斜め衝突をした場合、斜めに進入してきた隕石の衝突した向きに最も多くの厚い衝撃角礫岩が積もり、逆に進入してきた方角には最も少なく積もる。ほぼ平坦な面に形成されたクレーターでのその後の天水は、最も薄い衝撃角礫岩の分布域から排水することになり1方向の排水路が形成される。

ドライアイス球体を使った地層中の上昇実験ではドーム状の隆起が生じ、ドームの中心付近には多方向の開口割れ目が形成される[17]。地下からの上昇によってドームが形成された場合は、地表では円形かそれに近い形状で上昇・隆起すると見られることから、排水路は放射状に形成されるか少なくとも複数の排水路が形成されるであろう。しかし実際はアップヒールドームの中心から北西方向へ排水路が直線的に1本しか形成されていないので、地下の岩塩層の関与は副次的なものであると考えられる。なお、斜め衝突が北西から南西へ起きたことと排水路が北西方向にできていることとの関連は不明であるが、斜め衝突による衝突の方向と大きく異なる方向に排水路が1本だけ形成されている事例がある[18]。また、直径39 kmもあるホットクレーターでも、アップヒールドームとよく似た排水系をつくり最終的に1本の河川によってクレーターから排水している。斜め衝突によるインパクトが主原因で1本だけの排水路が形成された可能性が高い。

4.2 放射状の褶曲と断層の形成について

ドームの内縁に限ってドームの中心から放射状の小規模な褶曲と、その間に同じく放射状の断層が内縁に沿った領域にのみ形成されている。この褶曲と断層もやはり通常のクレーターでは認めがたい現象である。放射状の褶曲が生じた原因を、半固結の地層が柔かい地層であったためにインパクトに伴う衝撃に際して流動して生じたとする報告もあるが[1][3]、クレータ

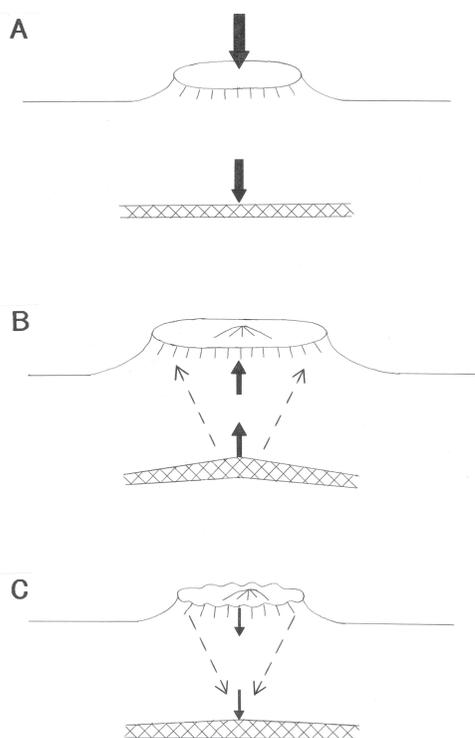


図10: アップヒーバルドームの形成モデル図。黒矢印: 圧力と大きさと向き。破線矢印: 地層の上昇下降の方向。網目模様: (岩塩層=パラドックス蒸発岩)。A: 宇宙からのインパクトによる衝撃圧縮力(下向きの最も太い黒矢印)によるクレーターの形成。次いでその圧縮力が地下の岩塩層へ伝播(下向きの黒矢印)し、密度の低い岩塩層を刺激する。B: 圧力を加えられた部分の岩塩層を中心に少し上昇する。岩塩層の上昇は、それより上部の地層を押し上げる。地表付近ではクレーター縁を拡大させて直径を広げるとともに中央丘を形成する。C: 密度が低く流体的に振る舞う岩塩層は、一定の高さまで上昇した後、重力によって下降に転じる。それに伴って地層も下降していくために、最大に拡大したクレーター縁は地層が下降する分だけ収縮する。そのためクレーター縁に沿った部分に褶曲が生じ、褶曲で賄うことができない量は断層ができる。

ーの内縁部分のみに形成されていることを説明することはできにくい。特にクレーターの内縁に沿って放射状の軸をもつ褶曲が取り巻くことは、インパクトだけでは説明し難い現象である。

一般に、単純型クレーターも複合型クレーターもクレーターが形成される時、衝突の中心から外側向かって衝撃圧縮力が広がっていくために、基盤岩はクレーターの外側に向かって押し上げられ、クレーターの外縁で傾斜がきつくなる [9]。基盤岩が地層の場合はクレーター縁に沿ってロート状に広がった形状になる。

直径1250 mのメテオールクレーターでは、ココノ砂岩層などの堆積岩層の中にクレーターが形成されているために典型的な形状が現れている [9]。

インパクトによってクレーターの内部から外部に放射状の断層が同心円状の成分と同時に形成されている事例は多く、ホートンクレーターに典型的に表れている。しかし、インパクトだけの作用でクレーターの縁に沿って褶曲が形成されている事例は無い。こうした点からも、インパクト現象以外に別の要因が構造形成に働いたことが考えられる。それは岩塩層の存在と挙動によるものと思われる。

4.3 インパクトクレーターが修正される過程

アップヒーバルドームは、一般的なインパクトクレーターの分類から見ると、小規模なクレーター地形にも関わらず大規模なクレーターに相当する多重リング構造を持っている。その形成過程は、衝突による跳ね返りで中央丘ができ、それに伴ったクレーター壁の中心への崩壊が引き起こされることによって、周辺に多重リングが形成されたとの説がある [19]。しかし、そうした考え方だけでは小規模なクレーター地形にどうして多重リングが形成されるのか、一般的な地球上のインパクトクレーターの特徴からは説明できない。アップヒーバルドームの形成は、インパクトの証拠が出されてインパクトクレーターによって形成されたものであるとしても、地下の岩塩層の挙動がクレーターの地形を修正していくことに関与していると考えられる。

まず、アップヒーバルドームがインパクトによって形成された時、最初の衝撃圧縮力によって形成されたクレーターは現在よりいくらか規模が小さかったであろう。その理由は、最初の衝突で地表面にクレーターを形成するだけではクレーター縁に褶曲は生じず、実際に褶曲している撓みの空間分だけ少ないクレーターの直径であったはずである。その衝突の圧縮力は減衰しながらも地下へ進んで行く。もし地下に岩塩層が無く、コロラド高原を構成する砂岩を中心にした地層だけでできていた場合は、地下に進んだ衝撃圧縮力はある所で反転して上昇に転じ、クレーターの中心の地層を引き上げて中央丘を形成するだけで終わったはずである。

しかし、アップヒーバルドームの地下約1300 m

(現在の地表に対する相対的な深さ)には厚さ 400 m にもなる岩塩層が存在している [3]. インパクトの衝撃圧縮力は地下の岩塩層まで達してそれを刺激したと思われる (図 10A). 岩塩の密度は約 2.2 と比較的軽い物質であり, わずかな差応力で流動を起こす [20]. この厚くて軽く柔らかい岩塩層の上昇はクレーター内縁の変形と併せ, それより外側でも同心円状に地層をゆがませる効果をもち, リング状のクレーターを形成させたものと思われる. サイズの小さな複合型クレーターにリング状の地形が形成されたためには, 地下に厚い岩塩層があって流体的に振る舞うことで生じるものと考えられる.

さらに, 岩塩層はコロラド高原を構成する砂岩層よりはるかに柔らかい物性をもっているために, アップヒールドームの中心で地層が引き上げられてくると同時に岩塩層も引き上げられる. 柔らかい岩塩層はその上を覆う地層より流体的に振る舞うために, 岩塩層は中央丘の付近を中心に岩塩が厚くなりながら上昇していく. 流動性のある岩塩層は上昇の勢いに乗って中央丘の隆起をわずかではあるが過剰に押し上げる. それによってクレーターの直径を最初よりわずかに大きくする (図 10B). 極端な例では, 個体と液体とを同時に動かした場合, 停止する時の慣性力の働きの差が出て液体の方が遅くまで流動することになる.

上昇の段階で中心に向かって流体的に振る舞って上昇した岩塩層は, その反動でわずかではあるが過剰に隆起した分だけ沈降する方向に押し下げようと動く. その結果, わずかに膨らみ過ぎた岩塩層が下がるのに伴ってその上の地層も少し下げられることになり, クレーターの直径はいくらか小さくなる. その動きによってクレーターを構成する地層も全体的にわずかに下降する. すると, 一端できた最初のクレーター縁は, 延ばしたゴムが縮むように弛みが生じて地層が褶曲する (図 10C). つまり内縁の付近にのみ生じた褶曲は, クレーターサイズが小さくなって撓んだ地層が造りだしたものである. そして褶曲だけではまかない切れな分の歪みは放射状の断層によって解消したのと考えられる.

この仮説は, 小規模な複合型クレーターの地形にできたリング状の地形を説明することができるばかりか, 斜め衝突による放出物の分布差から 1 本しか

ない排水路を説明することができ, 内縁の付近だけにできた褶曲や断層をも説明することができる. こうしたシナリオでは, インパクトの発生直後には内縁までのクレーター地形と中央丘が形成されたと見られるが, その後の岩塩層の伸縮やクレーターの直径拡大と縮小は徐々に時間をかけて進められていったと考える.

なお, 放出物としての衝撃角礫岩が現存しないこととインパクトが生じた時の地表面や地層が現存していないことで, 本当のクレーター地形の全体像が見えない. そのために, クレーター地形を含めた広い範囲でどのような形状ができあがったかを正確に把握してシナリオを組み立てることは困難である. 以上, 従来の研究と我々の調査にもとづいてアップヒールドームのインパクト説に岩塩上昇説を加味した新しい考察を行った.

今後, 周辺の可能な地層群の地質調査を行うことによって, 上記の困難を克服できるかも知れないが最も重要な点の一つは, いつの時代に天体衝突が起こりその後どのような構造が形成されていったかのその関係を明らかにすることである.

5. まとめ

- (1) 地球上の隕石クレーターの地形分類では, 概ね直径 4 km までが単純型, それ以上で直径 100 km までが複合型, それより大きなサイズでは多重リング型となる. アップヒールドームでは, 直径 5 km 程度にも関わらず多重リングの形状をもち, 通常のインパクト現象では説明できにくい.
- (2) コロラド川の水系と支流の水系の分布では, アップヒールドームとその周辺だけ支流の河谷の形成方向が異なっている. 1 方向だけの河谷の形成はインパクトによる形成の方が理解しやすい.
- (3) アップヒールドームの岩石の割れ目は, 放射状と同心円状に形成され, インパクトで形成される現象と同じである. しかし, クレーター内縁に限って断層と褶曲が形成されている現象は, インパクトによって岩塩層が刺激され, 比較的ゆっくと上昇したためと考えられる.
- (4) 衝撃角礫岩は, アップヒールドームとその周辺では, インパクトが発生した年代の地層が割剥

されて残存しない可能性が高い。ドーム内の基盤岩からは弱い面状変形組織は確認されている。これは、インパクト以外の原因でドームの大小の構造形成がなされたことを示唆する。

- (5) アップヒーバルドームは、最初にインパクトが発生したことが諸現象から説明できる。しかし、地下に厚い岩塩層が存在したために、衝撃圧縮力が岩塩層を刺激してそれを過剰に上昇させ、内縁のクレーターの直径を広げた。その後、流動する岩塩が下降に転じたために内縁の直径が縮み、内縁に沿って地層の弛みができ褶曲と断層が形成された。

謝 辞

隕石クレーターの形成に関する全体的な指導をして下さった岡山理科大学の西戸裕嗣教授、構造地質学の観点から指導して下さいました静岡大学の狩野謙一特認教授に感謝申し上げます。また、匿名の査読者には有益な指摘をしていただき内容が大きく改善でき感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Kriens, B.J. et al., 1999, *J. Geophys. Res.* 104, 18867.
- [2] Shoemaker, E. and Herkenhoff, K., 1984, *Lunar Planet. Sci.* 15, 778.
- [3] Kenkmann, T. et al., 2005, *Geological Society of America Special Paper* 384, 85.
- [4] Louie, J.N. et al., 1995, *EOS (Transactions, American Geophysical Union)* 76, 337p.
- [5] Fillmore, R., 2011, *The University of Utah Press.* 88.
- [6] Huntoon, P.W. and Shoemaker, E.M., 1995, *Earth Sciences* 33, 561.
- [7] Buchner, E. and Kenkmann, T., 2008, *Geology* 36, 227.
- [8] Okubo, C.H. and Schultz, R.A., 2007, *Earth Planet. Sci. Lett.* 256, 169.
- [9] French, B.M., 1998, *Lunar and Planetary Institute Contribution* 954, P.120.
- [10] Grieve, R.A.F., 1992, *Tectonophysics* 216. 1.
- [11] Sakamoto, M. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 32.
- [12] Kenkmann, T., 2002, *Geology* 30, 231.
- [13] Lana, C. et al., 2006, *Geology* 34, 9.
- [14] French, B.M. et al., 2004, *Geological Society of America Bulletin* 116, 200.
- [15] Scherler, D. et al., 2006, *Earth Planet. Sci. Lett.* 248, 43.
- [16] Poelchau, M.H. et al., 2009, *J. Geophys. Res.* 114, 39.
- [17] Komuro, H., 1987, *J. Volcanological. Geothermal. Res.* 31, 139.
- [18] Kenkmann, T. and Poelchau, M.H., 2009, *Geology* 37, 459.
- [19] Huntoon, P.W., 2000, *Utah Geological Association Publication*, 28, 1.
- [20] 狩野謙一・村田明広 2002, 朝倉書店.
- [21] Osinski, G.R. et al., 2005, *Meteorit. Planet. Sci.* 40, 1789.

エポックメイキングな隕石たち(その2) : Chelyabinsk隕石

杉浦 直治¹

1. はじめに

Chelyabinsk 隕石は近年もっとも注目を集めた隕石である。本記事の第2回目としてこれを取り上げる。Chelyabinsk火球は2013年2月15日に観測された、過去100年で最大の火球であり、たくさんの窓ガラスが割れて1500人余りが怪我をしたと報告されている。直径20 mに近い天体が事前に検出されることなく落下したことは衝撃的であり、将来おきるかもしれない小天体の地球への衝突による被害を評価する上でも、重要な役割を果たすことになった。Chelyabinsk 隕石はLL5コンドライトに分類され、過去に衝撃による溶融・破壊を受けた痕跡が多く見られることが特徴であるが、宇宙化学的にはごく普通の隕石である[1]。

火球現象は大気中に突入した小天体が細かく破壊されることによって起きるが、その破壊過程は良く解らないところがある。火球が詳細に観測され、それに伴って落下した隕石が回収された例はまだわずかしかない。ここでは回収されたChelyabinsk隕石について概観し、隕石破片の表面形態の特徴的なものを紹介し、流星(火球)現象との関係を解説する。この隕石の表面形態が他の隕石の形態と格段に違うわけではないが、火球現象との対応を考えるという観点からは、とても貴重な隕石といえる。

2. Chelyabinsk隕石破片の回収と質量分布および破壊強度

地上で回収されたChelyabinsk隕石破片は1000個以上ある。最大の破片は凍結したチェバルクル湖の厚さ70 cmの氷に直径6 mの穴をあけた。この時の衝撃に

もかかわらず、この破片はほとんど破損せず、重さ約600 kgの隕石として2013年10月に回収された。これはChelyabinsk隕石の強度に関する重要なデータである。この破片は現在Chelyabinsk地方歴史博物館に展示されている。ちなみに、大気圏突入時の大きさは10000トンと言われている。小さな破片の量は全部で3000~5000kg程度と考えられており、大気圏突入時の天体の99.9%以上が大気中で熔融・蒸発したことになる。破片の質量の分布はほぼlog-normal分布になっていて、modeの大きさはおよそ2gである[2]。このChelyabinsk隕石の質量分布は他の隕石シャワーの質量分布に比べて小さいものが多いのが特徴である。これはChelyabinsk隕石の強度が弱いと解釈するのが自然である。ただしChelyabinsk隕石破片の場合、積雪の上で落下して、落下の跡に小さな穴が開いているということが広く知られたため、小さな破片でも高い回収率で回収されたという解釈も成り立つかもしれない。

火球の明るさの変化、飛行速度の変化および衝撃波の到達時間から母岩の破壊した高度が解り、それに基づいて母岩の強度を推定できる[3]。それによると、最初の破壊は高度45 km程度で起き、その時の前面の圧力は0.7 MPaであった。([1]によればこれは0.2 MPaである。)多くの破壊は圧力5 MPa程度で起き、最後の破壊は圧力13 MPa程度で起きている。一方で、実験室での圧縮破壊強度は64 MPaと報告されている[4]。これは他の隕石に比べて小さめの値である。

3. Chelyabinsk隕石破片の表面形態

これらの破片の形態は、それが大きな母岩から分離した過程および大気中を高速で飛行した時の加熱による融解摩耗の程度を反映していると考えられる。たく

1. 東京大学理学系研究科
sugiura@eps.s.u-tokyo.ac.jp



Chelyabinsk 0,8656 g 1170/2
coll.: Mario Hoffmann (Berlin)



図1：小さな丸い隕石はChelyabinsk Peaと呼ばれる。凸凹した盛り上がった構造はロールオーバーリップと呼ばれ、飛行の前面で熔融したものが後面に回り込んで固化して形成する。Encyclopedia of MeteoritesのMario Hoffmann collectionより。



CHELYABINSK (Russia)
Chondrite LL5 15/02/2013
55 g
Collection Vincent Jacques
www.meteorite.be

図2：平らな、焦げた平面を持ち、わずかにロールオーバーリップを示す破片。全体として角張っていて、低い高度で母岩から分離したことを示唆する。Encyclopedia of MeteoritesのVincent Jacques collectionより。

さんの破片を見ると、それ等はいくつかのグループに分類できることが解り、それは破片が母岩から分離した高度に依存していると思われる。以下、特徴的な形態とその簡単な解釈を示す。

pea(豆、図1)と呼ばれる小さな spheroidalなものももっとも高い高度で分離したものである。この丸い形状は熔融摩耗が激しかったことを反映している。また図1に見られるロールオーバーリップと呼ばれる構造は、この破片の空気中の飛行の最終段階では定方位の飛行をしていたことを示唆する。これと似たもので半球状のものもあり、Chelyabinsk buttonと呼ばれる。これらの隕石は、サイズが小さく、回収された場所は隕石分布域の東側に偏っており、高い高度で母岩から分離したという解釈を支持する。

図2に示す隕石は3つの興味深い特徴がある。(1)後面が平らである。(2)後面は少し焦げているが熔融物でおおわれているわけではない。(3)後面のへりにわずかにロールオーバーリップが見える。ここで見えている面が後面であることは空気力学的にその方が安定であることと、熔融物でおおわれていないこと、ロールオーバーリップが見えることなどから判断できる。わずかなロールオーバーリップの存在は、この隕石がこの形になった直後に短時間、定方位飛行をしていたことを示唆する。後面が熔融物でおおわれていないのに、焦げていることは高い温度のコントレイル(火球の後ろにできる飛行機雲状のもの)の中にいたことによって説明される。また面が平らであることはChelyabinsk隕石中に、過去の衝撃によってできたすべり面がたくさん存在することを考えると、既存のすべり面に沿って破壊したと解釈される。全体として角張った形をしていることと、ロールオーバーリップがわずかなことから、これは火球の主爆発の後期に母岩から分離したと推定される。

過去の衝撃によってできたすべり面はChelyabinsk隕石にはかなりの密度で存在し、しばしば、それらは互いに平行になっていることが、隕石の切断面の観察からわかっている。図3の様な平板状の隕石の存在は、既存のすべり面は破壊しやすく、小天体の急速な破壊に寄与していることを示唆している。2つの面の形状は非対称であり、飛行が定方位だったことを示唆する。

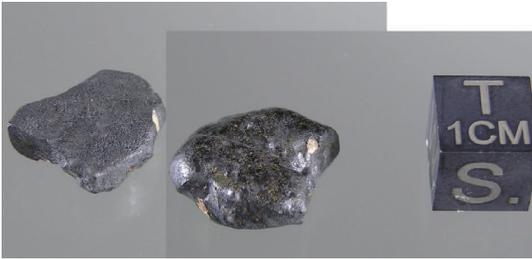


図3：平板上の破片。右の図に見えている面は角が丸く、この面を前方にして飛行したことが示唆される。

方々に感謝します。

参考文献

- [1] Popova, O.P. et al., 2013, Science Express.
DOI:10.1126/science.1242642
- [2] Badyukov, D.D. and Dudorov A.E. 2013, Geochemical International 51, 643.
- [3] Borovička, J. et al., 2013, Nature doi:10.1038/12671.
- [4] Grokhovsky, V.I. et al., 2013, 76th Meteoritical Soc. Meeting, 5233.pdf.

3. まとめ

以上の様に、Chelyabinsk隕石破片の大きさ分布・形態は火球現象中での母岩の破碎過程および大気中を高速で飛行した時の加熱による融解摩耗に対応していると考えられる。ここで紹介した形態の解釈は定性的なものであり、将来的には、流体力学や岩石力学を用いたより定量的な吟味が必要となる。特に定方位飛行は多くのChelyabinsk隕石破片にその痕跡が見られ、破片の形成過程の解釈に重要な役割を果たしている。Chelyabinsk隕石の場合、大気圏への進入角度が小さかったことが知られている。進入角度が小さいと、大気中の飛行距離が長くなり、定方位飛行に有利であることは容易に推測できる。一方で、小天体が大気圏に突入したときの初期回転速度も定方位飛行にかかわる重要な要素であるが、個々の小天体の地球外での回転についてはほとんどわかっていない。従って、Chelyabinsk隕石から得られる結論をすぐに一般化することはできない。今後、たくさんの火球の観察を行い、それに伴って回収される隕石の形態を調べることにより、小天体が大気中で細かく破碎される過程をより良く理解する必要がある。特に、火球現象が、天体の大きさにどのように依存するかを知ることは重要な課題である。

謝辞

木村眞氏、野口高明氏からこの原稿執筆の機会を与えて頂き、原稿を読んでいただきました。この場を借りて感謝いたします。また、Encyclopedia of Meteoritesから写真を転載させて頂きました。原本を掲載された

系外惑星「遠い世界の物語」その2

～灼熱天王星GJ3470bの大気を初めて観測～

福井 暁彦¹, 成田 憲保²

(要旨) トランジット系外惑星を多波長で観測し、減光率の波長依存性を調べる事で惑星の大気成分を調べる事が出来る。透過分光法と呼ばれるこの方法は、近年地球質量の数～20倍程度の低質量の惑星にも適用されるようになってきた。これまでにGJ1214bとGJ436bという2つの低質量惑星について詳細な観測が行われており、どちらも厚い雲で覆われている可能性が高いという結果が得られている。一方、2012年に新たに発見された低質量トランジット惑星GJ3470bは、低質量惑星大気の比較研究を行う上で重要なサンプルとして注目されている。筆者らは岡山天体物理観測所の2台の望遠鏡を用いていち早くこの惑星の多波長トランジット観測を行い、この惑星が晴れた大気をもっている可能性を示唆する結果を得た。

1. はじめに

昨今の系外惑星研究の発展はめざましい。系外惑星が初めて発見された1995年から最初の5年間に発見された系外惑星の数は22個であるが、その後惑星の発見数は加速度的に増えて行き、過去5年間には600個を超える系外惑星と、約3,600個もの系外惑星候補の発見が報告された。今後もこの激しい惑星探索競争はしばらく続く事が予想され、我々はいままさに系外惑星の「大量発見時代」の真っただ中にあると言える。

これらの多数の惑星発見によって、惑星系は銀河系において普遍かつ多様であることが明らかとなった。また、地球のようなハビタブル惑星もそれなりに存在しそうということも分かってきた。しかし、これらの惑星系は地球から遠く離れた位置に在るため、個々の惑星に関して我々が得られる情報は非常に限られたものになる。惑星の引力による主星のふらつきを捉える視線速度法や、惑星のシルエットを捉えるトランジット法の観測で得られる情報は、通常はせいぜい惑星の質量や半径、軌道要素のみである。では、これらの惑星は実際にはどのような姿をしているのであろうか？

太陽系内の惑星とは大きく異なるタイプの惑星たちは、いったいどのような表層環境、大気環境を持っているのであろうか？

系外惑星の大気を調べる方法の一つは、高空間分解能・高コントラストの観測を多波長で行い、惑星の放射光を直接分光する方法である。しかし、この方法で観測出来る惑星は現在の観測技術では主星から数十～数百AU離れた巨大惑星に限られる。一方、トランジットを起こす惑星では、惑星の縁の大気を透過してくる主星の光を分光することで惑星の大気を調べることが出来る。「透過分光法」と呼ばれるこの方法は、近年スーパーアースや海王星クラスの低質量惑星でも適用出来るようになってきた。本稿では、この透過分光法による惑星大気研究の現状を紹介し、筆者らが低質量惑星GJ3470bに対して行った多波長トランジット観測の結果について報告する。

2. 透過分光法

透過分光法の原理を以下に紹介する。まず、惑星がトランジットをする際、主星からの光の一部が惑星により隠されることで惑星の大きさに応じた主星の減光が起こる。このとき、惑星が大気を保持していると、主星からの光の一部が惑星の大気を透過して地球に届

1. 国立天文台・岡山天体物理観測所

2. 国立天文台・太陽系外惑星探索プロジェクト室
akihiko.fukui@nao.ac.jp

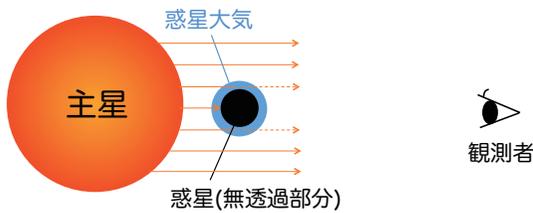


図1：透過分光法の概念図。

く(図1)。大気の透過率はその組成に応じて波長依存性を持つため、波長ごとに実効的な惑星の大きさが異なることになる。つまり、主星の減光率が波長ごとにわずかに変化するため、主星の減光率の波長依存性(トランジットスペクトル)を測定して理論スペクトルと比較することで、惑星の大気組成を調べることができる。

ただし、波長ごとの減光率の違いを比較するためには非常に高い観測精度が要求される。そのため、この手法はこれまで主に観測しやすい巨大惑星(ホットジュピター)に対して適用されてきた。例えば、HD209458bとHD189733bと呼ばれる2つのホットジュピターの大気がこれまでに詳細に観測されており、HD209458bに対しては可視の高分散分光観測からNaなどのアルカリ金属、近赤外の低分散分光観測からH₂OやCOなどの分子が検出されている[1, 2, 3]。一方、HD189733bでは原子や分子の吸収による特徴はあまりみられず、近赤外から可視の短波長側にかけてスペクトルがなめらかに上がっていく特徴が観測された[4]。これは、大気中にレイリー散乱を起こすようなモヤ(ヘイズ)が漂っているためであると解釈されている。このように、同じようなホットジュピターでもその大気環境には多様性があることが分かってきた。

3. 低質量惑星の大気

一方、最近では低質量惑星の大気にも注目が集まるようになってきた。惑星探索技術の向上によって地球サイズの小さな惑星まで見つかるようになり、地球～海王星質量程度の低質量惑星が主星近傍(<0.1 AU)に豊富に存在することが分かってきた[5]。ホット・スーパーアースやホット・ネプチューンと呼ばれるこれらの惑星は我々太陽系には存在しないタイプの惑星であ

り、これらの惑星がどの程度の厚さの大気を保持するのか、また大気をもつ場合にはそれらがどのように形成され、どのような組成を持つのかは大きな謎である。しかし、低質量惑星はサイズが小さいため、その大気を観測する事は容易ではない。ところが、もし主星のサイズが太陽型星に比べて小さければ、惑星のサイズが相対的に大きくなるため、より大きなトランジットの減光を見せるようになり、低質量惑星でも大気の観測が可能になる。ただしM型星と呼ばれる太陽型星よりも小さな恒星は、低温度で暗いため、出来るだけ太陽系から近くて主星が明るい惑星系でない高精度な観測を行う事が出来ない。そのような、太陽系近傍(<30 pc)のM型星を主星にもつ低質量のトランジット惑星は発見数がまだ少なく、現時点(2014年1月)ではGJ436b, GJ1214b, そしてGJ3470bの3つのみである。

これらのなかで、2009年に発見されたGJ1214bは質量が6.6倍地球質量と3つのなかで一番軽く、なおかつ主星の半径が太陽の約20%と非常に小さいため、透過分光観測が容易に出来るスーパーアースとしてこれまでに多くの注目を集めてきた。これまでに、筆者らの研究グループを含めて世界の多数の観測グループがこの惑星の大気を調べる観測を行っており、その結果、この惑星は可視から赤外領域にかけてほぼフラットなトランジットスペクトルを示すことが分かってきた[6]。スペクトルに現れる様々な分子の特徴は大気のスケールハイトが大きいほど大きくなることから、この惑星の大気は逆にスケールハイトが非常に小さい、つまり水蒸気などの分子量の大きな分子で満たされているか、あるいは厚い雲に覆われていて実効的な大気の層が薄くなっているかのどちらかであると考えられてきた。どちらの説が正しいかは長らく議論的であったが、今年の1月にハッブル宇宙望遠鏡でGJ1214bを集中的に観測した決定的な結果がNatureに掲載され、この惑星は高層の雲(あるいはヘイズ)に覆われている可能性が最も高い事が示された[7]。

一方、約23倍地球質量をもつGJ436bでは、これまでGJ1214bほど精力的な観測は行われてこなかったが、最近GJ1214bと同様にハッブル宇宙望遠鏡を用いて高精度な観測が行われ、その結果がNatureの同じ号に掲載された[8]。それによると、やはりこの惑星もフラットなスペクトルを示すことから、雲(ヘイズ)に覆われているか、もしくは平均分子量が非常に大きな大

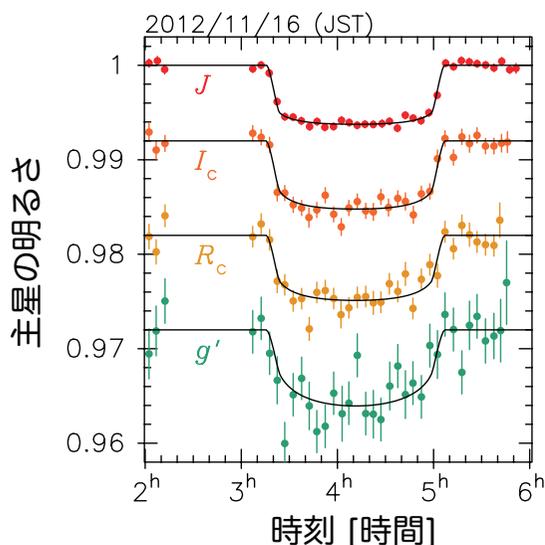


図2：188cm望遠鏡/ISLEとMITSuME望遠鏡で同時に観測したGJ3470bの光度曲線。上から順にISLE/Jバンド、MITSuME/ I_c 、 R_c 、 g' バンドのデータ。縦軸は主星の相対的な明るさを示し、バンドごとのデータを任意にずらして表示してある。トランジットの直前のデータが欠損しているのは、薄雲が通過して良質なデータが得られなかったため。(クレジット：国立天文台)

気をもつ可能性が高いようである。もしGJ436bも雲に覆われた大気をもっているとする、低質量惑星の空は一般的に曇天なのかもしれない。もしそうだとすると、そのような惑星の外観を想像することは楽しいかもしれないが、晴れた大気を持つ場合に得られるはずの大気成分の情報が全く得られなくなってしまう。では、果たして本当に曇った低質量惑星は一般的なのだろうか？

4. 灼熱天王星GJ3470b

2012年6月に、太陽系近傍のM型星をまわる低質量トランジット惑星として3番目となるGJ3470bの発見が報告された[9]。この惑星は単に透過分光観測が可能な新たな低質量惑星というだけでなく、質量が約14倍地球質量と、ちょうどGJ1214bとGJ436bの中間にあたるため、低質量惑星大気と比較研究を行う上でも貴重なサンプルとして注目されている。ちなみに、この惑星は質量が天王星に近く公転周期が約3.3日と短いことから、「灼熱天王星(hot Uranus)」という異

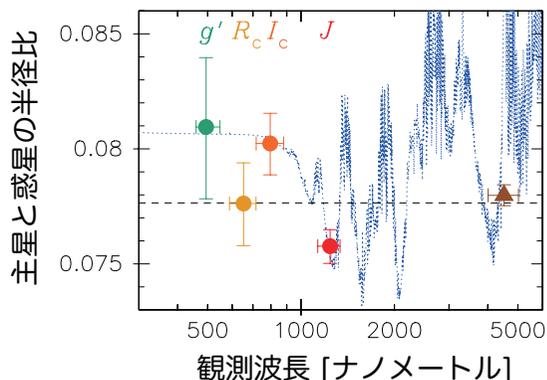


図3：波長ごとの主星－惑星半径比(=減光率の2乗根)の比較。丸のプロットは今回の観測で得られたデータを示し、左から順にISLE/Jバンド、MITSuME/ I_c 、 R_c 、 g' バンドのデータを示す。三角のプロットはSpitzer宇宙望遠鏡で観測された4.5 μ m帯のデータを示す。Jバンドの値が他のバンドに比べて僅かに小さくなっている。点線は太陽組成の0.3倍の金属量をもつ水素主体の晴れた大気に0.1 μ mサイズのヘイズを含む大気モデルスペクトル、破線は厚い雲に覆われた場合を仮定したフラットなスペクトルを示す。(クレジット：国立天文台)

名をもつ。発見当初はまだ多波長観測による透過分光はおろか、単色での高精度なトランジット観測も行われていなかった。発見者たちはトランジットの観測を可視光で行っていたが、M型星である主星は温度が低く可視光では暗いため、精度の低いデータしか得られなかったためである。そのため、惑星の半径や密度の決定精度にまだ改善の余地があった。

そこで筆者らは、岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡とISLE(アイル)という近赤外観測装置を用いて、GJ3470bの高精度トランジット観測を試みた。M型星は近赤外領域に光度ピークがくるため、可視光に比べて近赤外での観測が有利となる。さらに、ISLEはこれまでも近赤外で0.1%レベルの精度で測光観測が行える事が実証されている、世界でも有数の装置である。さらに筆者らは、同観測所にある口径50 cmのMITSuME(ミツメ)望遠鏡という、可視光3色を同時に撮像出来る望遠鏡も使用して、近赤外1色と可視光3色での4色同時観測を試みた。

この惑星系はかに座の方向にあり、秋から冬にかけてが観測の好機である。しかしこの年の188 cm望遠鏡の装置スケジュールは既に決まっていた、トランジットが起こるときにちょうどISLEが望遠鏡に取り付

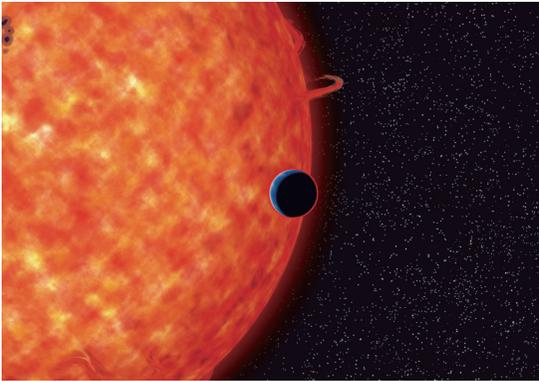


図4：晴れた大気を持つGJ3470bの想像図。(クレジット：国立天文台)

けられる予定の夜は合計4夜だけであった。そこで筆者らはToO(Targets of Opportunity)観測を申請し、この4夜に割込でGJ3470bの観測をさせてもらえることになった。

幸運にも、4夜すべて快晴に恵まれた。ところが、発見論文で報告された公転周期の誤差が大きかったため、その周期を元に予測したトランジット時刻よりも実際のトランジットが20分ほど早く起こってしまい、最初の3夜は継続時間が1時間半強のトランジットを開始から終了まで全てカバーする事が出来なかった。トランジット全体をカバー出来なければ惑星半径などの測定精度が大きく落ちるため、観測は徒労に終わってしまう。しかし4回目の夜に、ついにトランジット全体をカバーする観測に成功した。

図2に、得られたトランジットの光度曲線を載せる。これらのデータの解析から、2つの面白い事が分かった[10]。1つ目は、得られた惑星の半径と質量から惑星の平均密度を求めたところ、約 0.80 g cm^{-3} という小さな値となったことである。系外惑星の内部構造を研究している大学院生の黒崎健二君(東京大学)にGJ3470bの構造計算を行ってもらったところ、質量比で約5-20%程度の比較的多量の水素・ヘリウム大気を保持していなければならぬ事が分かった。同様の結果はSpitzer宇宙望遠鏡を用いて高精度な赤外線観測を行ったDemoryらの論文でも報告されており[11]、今回我々はそれを裏付ける結果を得た事になる。もう1つは、Demoryらの赤外 $4.5 \mu\text{m}$ 帯の観測結果を含めてトランジットの減光率(=主星-惑星半径比の2乗)を比較したところ、ISLEで得られたJバンドでの

減光率が他の波長帯での減光率に比べて僅かに小さくなったことである(図3)。この結果は、惑星が晴れた水素主体の大気を持ち、大気中に $0.1 \mu\text{m}$ サイズのヘイズが漂うような場合にうまく説明が出来る。一方で、もし惑星が厚い雲で覆われていたとすると、GJ1214bやGJ436bのようにフラットなトランジット・スペクトルとなるはずである。つまり今回の結果は、GJ3470bが少なくとも晴れた大気をもっている可能性を示唆するものである(図4)。この結果は、今後より詳細な観測を行う事で、大気に含まれる様々な成分を検出できる可能性を示している。

5. 今後の展望

今回の観測から、筆者らは低質量惑星GJ3470bの大気に「晴れの兆候」を捉えた。しかしその有意性はまだ十分とは言えないため、今後の裏付け観測が必要である。筆者らが結果を報告したあと、別のいくつかの観測グループが別の波長帯で観測を行いその結果を報告しているが、まだ決定的と言える結果は得られていない[12, 13]。筆者らのグループも現在岡山天体物理観測所の望遠鏡やハワイのすばる望遠鏡を用いてさらに詳細な観測を進めており、近いうちに決定的な証拠を得たいと考えている。また同時に、大気中に水やメタン等の揮発性物質が存在するかどうかを検証していく予定である。もしこれらの物質が大気中に検出されれば、この惑星の大気(の少なくとも一部)は水成分が豊富な雪線以遠の領域が起源である証拠となるため、惑星の形成過程を探る上で重要な手がかりが得られる事になる。なお、観測で得られたスペクトルを理論スペクトルと比較して惑星の大気組成を決定したり、得られた大気組成から惑星の形成過程を推定するためには、筆者らのような観測屋だけでなく、理論研究者の協力が必要不可欠である。筆者らは数年前から惑星大気や内部構造の理論研究者である生駒大洋氏(東京大学)や同氏の研究室の大学院生、惑星形成の理論研究者である堀安範氏(国立天文台)らと共同研究を開始しており、今後も上記の方々と協力しながらこの分野の研究を押し進めて行きたいと考えている。

筆者らの研究グループは今後、さらに別の低質量惑星の大気についても調査していく予定である。現在は透過分光が可能な低質量惑星はまだ3つしか発見さ

れていないが、今後数年間でそういった惑星の探索が大きく進むと期待されている。筆者らはその時代に備え、可視から近赤外にかけて多色で同時に撮像可能な新しいカメラ「MuSCAT (Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting Planets)」の開発を現在進めており、2015年度に岡山天体物理観測所の188 cm望遠鏡に搭載予定である。このカメラが完成すれば、筆者らが今回行ったようなISLEとMITSuME望遠鏡を同時に使用した観測よりも、精度と効率が格段に向上することが見込まれる。今後MuSCATを使用して多数の低質量惑星の大気を調査することで、低質量惑星の大気に共通な性質を見だし、その形成過程の謎に迫りたいと考えている。さらに将来的には、2020年代に完成予定の口径30 mのTMT (Thirty Meter Telescope) などを用いて、より小さな地球型系外惑星の大気成分についても調査したいと考えている。そのような大型装置を用いれば、ハビタブル惑星の大気に生命の兆候を探る観測も夢ではないであろう。

謝 辞

我々の観測をサポートして頂いている国立天文台・岡山天体物理観測所およびハワイ観測所の方々に深く感謝致します。また本研究をはじめとしたトランジット惑星に対する観測的・理論的研究を筆者らと一緒に進めている、PEaCHグループの皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Charbonneau, D. et al., 2002, ApJ 568, 377.
 [2] Barman, T., 2007, ApJL 661, L191.
 [3] Snellen, I. A. G. et al., 2010, Nature 465, 1049.
 [4] Pont, F. et al., 2008, MNRAS 373, 231.
 [5] Fressin, F. et al., 2013, ApJ 766, 81.
 [6] Narita, N. et al., 2013, PASJ 65, 27.
 [7] Kreidberg, L. et al., 2014, Nature 505, 69.
 [8] Knutson, H. A. et al., 2014, Nature 505, 66.
 [9] Bonfils, X. et al., 2012, A&A 546, A27.
 [10] Fukui, A. et al., 2013, ApJ 770, 95.
 [11] Demory, B.-O. et al., 2013, ApJ 768, 154.
 [12] Nascimbeni, V. et al., 2013, A&A 559, A32.
 [13] Crossfield, Ian J. M. et al., 2013, A&A 559, A33.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その5 ～はやぶさ2統合サイエンスの理念～

小林 直樹¹

(要旨) はやぶさ2ミッションのようなビッグサイエンスでは事業者はその正当性を人々に示し続ける義務がある。本稿では、「統合サイエンス」を、各機器のデータを統合解析して科学成果を引き出すという本来の字義に加えて、はやぶさ2ミッションを惑星科学コミュニティにつなげる活動までを含めて定義する。そして「統合サイエンス」が公共性、奉仕性、および高い遂行能力という正当性を構成する3要素の向上にいかに関与するかを論考する。

1. はじめに

はやぶさ2も総合試験が始まり、いよいよ打ち上げに向けて大詰めを迎えている。そんな中、連載を始めて5回目を迎える火の鳥「はやぶさ」未来編の執筆が回ってきた。そこで本稿では「はやぶさ2」を通じて行なわれている統合サイエンス活動を紹介する。100億円規模のサイエンスミッションの義を尽くす活動として「統合サイエンス」の意義がある。しかし十分な執筆時間が取れた訳でもないため統合サイエンスのA to Zを紹介するのではなく、この連載シリーズが永きに続くことを信じて、先ずはその理念について紹介する。

2. 100億円のサイエンスの義

宇宙政策委員会宇宙科学・探査部会の第7回部会会議資料として提出された「宇宙科学・探査ロードマップについて」には今後の宇宙科学ミッションの規模について記載がある。それによれば100 - 150億円規模のものを小型計画、300億円程度までのものを中型計画、それ以上のものを政策的な大型計画として分類している。その分類によれば「はやぶさ2」は中型計画にあたる。いずれにしろ100億円規模という巨額な費用を投じての事業である。人というものは個人の財布に

入らない額になると経済感覚が途端に無くなるものだが、100億円という規模を改めて実感してみよう。

国税局の統計によるサラリーマンの平均年収は409万円であるが概算のため500万円としよう。勤労年数を40年とすると生涯収入は2億円になる。単純計算では100億円というお金は50人分の人生と同じである。あるいは個人の労働に置き換えると、平均収入で働き続けるとすればそれは2000年間働き続けなければ得られない金額である。再生医療技術が進んでもそんなに働き続けるのはうんざりであろう。もう少し研究者の実感が得られる研究費で比較してみよう。個人研究者にとってもっとも馴染みのある外部資金は日本学術振興会の助成金である科研費の基盤研究(C)であろう。その一課題あたりの支給上限額は500万円である。100億円を500万円で割るとその額は基盤研究(C)の2000課題に相当する。1課題あたりの研究期間が平均2年だとすると4000年分に相当し、如何に研究が好きでも競争下に置かれた状況でそんなに研究するのはうんざりなことと思う。また少なくとも1課題あたり1本の欧米誌への査読論文が生産されると仮定するとこれは2000本の論文数にあたる。果たして宇宙科学ミッションにそれだけの価値があるのかを問われれば必ずしも自明なことでは無いであろう。筆者の考えでは100億円規模の科学事業は論理的には公平な正当性は論じ得ず、そこには何らかの政治的な判断が必ず必要になる。間接民主制の賜物である。しかし、

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
kobayashi.naoki@jaxa.jp

それに甘んじて事業を受ける訳にはいかない。事業者には正当性を示し続ける必要が生じる。

ではここで正当性とは何であろうか。一つは公共性であろう。「はやぶさ2」というミッションを持つ科学意義を、一般国民に理解してもらうよう努力することはもとより、直接利害関係にある広い科学コミュニティで事業を共有することでであろう。少なくともこの「遊・星・人」を手を持つ人が「はやぶさ2」は自分に関わるミッションという意識を持つことは最低限期待される。

もう一つは奉仕性であろう。行動の判断基準として個人の利益ではなく他者の利益を最大化することが求められる。いわゆる賢政に求められる姿勢と同じである。中・大型計画規模の「はやぶさ2」はそれ自体政治的な判断が必要な政策であり、その実施にあたっては当然賢政の姿勢が求められる。三つ目は高い遂行能力である。どんなに高い志があっても実施者が事業を遂行する能力に欠けていれば、国民は安心して政策を付託できない。他にも大型事業に求められる道義は多々であろうが本稿では特にこの三つの点を取り上げる。

3. 統合サイエンスの意義

それでは「はやぶさ2」の事業化にあたってはこの3つの正当性に基づいてそれが決定されたのだろうか。もちろん、プロジェクトの関係者の多大な努力の上に事業化が目前に来ていたのであるが、最後の一振りは初号機「はやぶさ」の満身創痍の帰還による劇場型の盛り上がりによると思われる。筆者は対立候補でもあった月着陸探査計画SELENE-2に関与していたが、「はやぶさ」帰還まではSELENE-2に軍配があるものと思っていた。そういう思いは筆者だけではないであろう。少なからぬ惑星科学者が「はやぶさ2」を降って来たミッションという感覚で捉えていたのではないだろうか。(もちろんSELENE-2は資金規模が更に大きいのでそう簡単ではないことも理解していたが。)そのため、プロジェクト化が決まったがミッションを心配する声は惑星科学コミュニティからも生じ、現プロジェクトサイエンティストの渡邊誠一郎、SCI/DCAMチームのサイエンスPIである荒川政彦を中心に「はやぶさ2から考えるサイエンス研究会」という研究会がプロジェクトから独立した形で「はやぶさ2」や惑星

探査の意義をより高めて行く目的のもと行なわれたのをご記憶されていることと思う。また宇宙科学研究所理学委員会においても「はやぶさ2タスクフォースチーム」が設置され「はやぶさ2」の科学意義の整理・再構築が行なわれた。事業化の後で生じたこれらの活動は筆者の感想が独りよがりのものではないことを支持していよう。

しかし、持続的に正当性を向上し続けるのも並大抵の努力では行ない得ないのも事実だと思う。現実的な制約の中、開発には不具合が付きものの上、対象天体の軌道の問題で打上期間に制限のある惑星探査ではプロジェクトに直接関わる惑星科学者だけで三つの正当性を向上し続けることは不可能である。三つ目の正当性である遂行能力にも関わる点であるが、プロジェクトに直接タッチしない惑星科学コミュニティのメンバーが「はやぶさ2」への関心をいかに高め、サポートする体制を作り得るかが重要であろう。特に惑星科学コミュニティにとっては「はやぶさ2」というプロジェクトを通して惑星探査を遂行する能力を高めることが後継ミッションを実現して行く上でも大切である。目前の問題を処理しなければならないプロジェクトチームだけでは長期的な視点での成長戦略には限りがある。逆にコミュニティにそうした動きが作れないのであれば惑星探査になんか手を出すべきではない。とは言え、既に事業化されたという現実の中、理想的な状況に歩を進める方策は必要である。その方策の一つとして筆者が考えるのが「統合サイエンス」という活動である。機器間のデータを統合解析し衛星データのもたらす科学成果を引き出す活動としては月周回衛星「かぐや」でも「統合サイエンス」というものが意識されていた。ここで言う「統合サイエンス」は更に言葉を拡大解釈し、本来の意味に加え特定の惑星探査ミッションを惑星科学コミュニティの活動として統合して行くものとして再定義されている。100億円規模のサイエンスミッションを遂行するコミュニティにおいて、「はやぶさ2」の「統合サイエンス」はそのミッションを上に掲げた三つの正当性の獲得に近づける役割を担うものである。これらの点について順次はやぶさ2の統合サイエンスが正当性向上に果たす役割について論考してみよう。

3.1 公共性

科学コミュニティにおける公共性を獲得するために

はミッションの持つ科学意義をより高い次元で、より広い分野において構築する必要が先ずあるであろう。そのため「はやぶさ2」では「小惑星の科学」よりも「小惑星からの惑星科学」という視点を重視している。この点は第一回「統合サイエンスチーム」会議で提示されたチームの目的の一つにも掲げられている。そこでは「サイエンスの裾野を広げる：『小惑星からの惑星科学』を考え尽くす」と謳われている。これは他の目的である「はやぶさ2のサイエンスの全体像の構築」、「科学的制約／科学的評価を明確にする」などを考える上での基盤とも言える理念的な目的である。その目的のため「統合サイエンスチーム」メンバーは各サイエンス機器チームのメンバーのみならず、理学委員会タスクフォースチームで活躍したメンバーも加え、少し「はやぶさ2」から離れた視点でもの言うように構成されている。先に紹介した「はやぶさ2から考えるサイエンス研究会」の主要メンバーが今では「はやぶさ2」のサイエンス面での主要メンバーとなっており、その活動での理念がプロジェクトサイエンスにおいても定着してきていると言えよう。

はやぶさ2立ち上げ当初から謳われていた水や生命の起源へのアプローチと言う視点でのC型小惑星における水・有機物・岩石の相互作用の理解のみならず、インパクトの衝突実験から微惑星のアナログ物質としての小惑星の衝撃応答の理解、対象天体である1999JU3の履歴を読み解き地球近傍への物質供給のメカニズムへの制約など、惑星形成論にも波及する視点で「はやぶさ2」のサイエンスはより多くの惑星科学者を巻き込む形に展開されつつある。また「統合サイエンスチーム」ではそうした研究テーマに結びつく科学成果を現実的なミッション制約の下にどう実現して行くかを議論している。個々のテーマは「はやぶさ2」の複数の機器、システム運用の上に実現されるものであり、機器チームを超えた段取りがそれぞれに要求される。個々の利害を超えより広く価値の高い科学的な成果を創出すること、そのために必要な段取りを組むことが「はやぶさ2」の統合サイエンスの大きな目的である。

3.2 奉仕性

二つ目の正当性である奉仕性についてはどうか。この奉仕性についてもいくつかの段階がある。

プロジェクトの中心的メンバーのプロジェクトメンバーへの奉仕、特定の機器チームの他機器へのあるいはプロジェクトに対する奉仕、「はやぶさ2」プロジェクトチームの惑星科学コミュニティへの奉仕、プロジェクトチームを含む惑星科学コミュニティの一般国民への奉仕などである。ここで重要になるのは立脚している足場のもう一段階上の視点での利益を考えて行動することである。各サイエンス機器チームは各々の機器の開発に多大な時間を費やしている。特にチームをまとめる立場の者は所属チームのメンバーの個々の努力が目に見えており、それに報いるためにも自機への利益誘導への誘惑が常にある。しかし、科学的な公共性を上げるために、より広く高い科学成果の実現を目指すには各機器チームがチームを超えた視点でサイエンスや運用を調整し、「小惑星からの惑星科学」の実現のためにはどうすれば良いかを考えて判断していく必要がある。「統合サイエンスチーム」は個々の機器の利益を超えて機器間の連携や調整のもと「はやぶさ2」の惑星科学を最大化する場でもある。

奉仕性という点で二番目に言及したい点はプロジェクトチームの科学コミュニティへの奉仕でもあるデータ公開・利用に向けた取り組みである。始めに述べた通り単純計算では一つのミッションは2000本以上の科学論文の成果にあたる。惑星探査の場合は複合探査である場合がしばしばで搭載機器は複数に渡る。仮に10機器あったとしても機器あたり200本以上の論文にあたる。普通に考えたら機器チームメンバーのみでは生産はおぼつかない。機器チーム外、プロジェクト外の科学者のデータ利用や成果創出は機器開発の時点、科学データの取得の時点、データ公開の時点のそれぞれに於いて折り込み済みでなければならない。即ち、個人は自分の論文だけではなくチームの論文、チームはプロジェクトの論文、プロジェクトは科学コミュニティの論文数が増えることを意識して、より使い易いようにデータ利用のあり方を考え、整えて行く必要がある。データ利用のユーザビリティを上げることも統合サイエンスの重要な課題である。

もう一つ取り上げておきたい奉仕は将来への奉仕とも言えるドキュメント化である。機器開発などの現場での諸問題は飽きること無く生じて来る。それに対応するため、どうしてもその場その場の対応になりがちである。個別の報告書は多数生産されるが、それらを

俯瞰して教訓や系統的な経験を文章として蓄積していく余裕はない。しかし、小型衛星ミッションが軌道に乗ったとしても宇宙科学への参入分野は年々増えており、100億円規模のミッションの獲得機会は今後もそう多くは無いであろう。惑星科学コミュニティにおける探査の遂行能力の維持発展のためにも、個人の経験を共有する方策を考えて行く必要がある。これを実現して行く方策を考えるのも統合サイエンスの大きなテーマである。

3.3 遂行能力

三つ目の正当性であるミッションの遂行能力の獲得について論じてみよう。しかしここで取り上げる遂行能力は現在のプロジェクトの持つ能力ではなく、惑星科学コミュニティが将来のミッションに備えて遂行能力をいかに増強して行くかと言う点である。その目的のために「はやぶさ2」をどのように利用して行くのかという視点である。遂行能力の成長戦略の問題である。将来的にもミッション機会は多くは無い状況の下では、場当たりの対応では政策に振り回されてしまうであろう。そうならないためにも将来に備えて人材・科学・機器の整備が必要である。

自立した惑星探査の実現という目的のために惑星科学会では2010年に「月惑星探査の来る10年」という将来構想に乗り出した。これは惑星探査による惑星科学の実現のために、ミッション経験の少ない惑星科学コミュニティのために探査参入の敷居を下げステップバイステップでミッションプランを作り上げる経験をさせること、一方で政策に振り回されない探査のためコミュニティで押すべき探査カードを揃えておくことが目的であった。現在、第三段階の終盤を迎えて3つのフラッグシップミッション候補(中・大型ミッション規模)に絞られ、これ迄に練り込まれたミッション提案に対してある種の成績評価をする段階にある。「来る10年」にはその進行具合や進め方について批判もあるが、既出の惑星探査ミッションと惑星科学コミュニティの乖離を埋めるべく一定の役割を果たして来た。このような活動は惑星探査の現状の分析から生まれて来たものであり、「はやぶさ2」においてもそれをプロジェクト外から評価し、そこから得られる教訓を今後の方策に活かす取り組みがコミュニティには求められよう。

惑星探査を進める人材の増進のためには「惑星探査による惑星科学」の発展が無ければならない。人が集まれば経済が起り、経済が活発になれば利潤を求め人が群がる。探査に於いてもそうした正の循環を生み出す必要がある。その第一歩が既存ミッションで得られたデータの利用促進であろう。だがこれ迄惑星探査のデータ利用の経験の無い研究者や学生の諸君には利用せよと言っても敷居が高いものである。この点についても惑星科学コミュニティでは「月惑星探査データ解析実習会」という初心者向けにデータ解析のイロハを教える取り組みを会津大学ARC-Spaceを始め各大学で探査データを解析・研究している研究者のご尽力により継続して行なっている。惑星探査データの利用者の促進は直接的な受益者の増進による探査への動機付けの強化に繋がるだけでなく、次のミッションに繋がる科学成果の創出を増進するものである。統合サイエンスチームには「はやぶさ2」とデータ解析実習会の実施の両方で活躍する研究者も複数含まれる。「はやぶさ2」のデータ公開・利用を進めて行く上で、「月惑星探査データ解析実習会」での経験は活かされるべきであろう。

第三の点は機器開発体制の整備である。「はやぶさ2」での機器開発は初号機ベースであるため、大きな自由度が無い。まずは打ち上げに開発を間に合わせる事が第一であり、将来を見越したサイエンス機器開発という視点から離れた開発になっている。こうした問題は「はやぶさ2」に限らない。ミッション機会が少なくなれば、持続的・発展的な機器開発やそれに伴う人材育成も進め難くなり、単発のミッションをこなすことで手が一杯となる。こうした問題に対処するため、特定の機器や技術を特定のミッションに落ち込むことなく育てて行く仕組みが必要となる。そうした狙いで打ち出されたのが「惑星科学コンソーシアム」提案である。これは惑星科学会会長名で日本学術会議が取りまとめている大型研究計画マスタープランに盛り込むべく提案されたもので、先の将来計画委員長であり現副学会長の倉本圭を中心に提案が取りまとめられた。その要は特定のミッションではなく、現行ミッションも含めた将来のミッション群における機器開発を持続的・発展的に行なう術を作り出すことである。このコンソーシアム案自体はそうした場を大型研究計画として獲得することにあるが、既存の研究機関のリソースと同様

な意図で持続的な機器開発環境を作り上げるための議論が将来惑星探査検討グループ長の並木則行を中心に始まっている。

4. 人そして人

このように「はやぶさ2」を取り巻く問題やそれに内在する問題を惑星科学コミュニティの問題として取り上げ、分析し、次の手を考え打つような活動が「はやぶさ2」プロジェクトの外部の惑星科学コミュニティに求められている。そうした活動を持続的に行なうには問題を掘り下げ議論する場が必要である。プロジェクト外の議論の場として「月曜放談会」という場がある。先に挙げた「惑星科学コンソーシアム」の提案内容はこの放談会で随分議論されたものである。また、昨年末に始まった「惑星探査と理論モデルに関する研究会」も放談会で企画され実現されたものである。その活動はミッションの持つ科学的な意義を高めるため、あるいは新規探査につながるだろう理論的な研究やアイデアの萌芽を期待したものである。不定性の大きな(行ってみないと分らない)惑星探査では事前に様々な理論的なアイデアを吟味しておくことがミッションを成功させる要である。これはまた現在は探査に関わっていない理論研究者を巻き込む仕組みでもあり、「小惑星からの惑星科学」を標榜する「はやぶさ2」の統合サイエンスを後方支援する活動でもある。「月曜放談会」の自由な議論の場は惑星探査の持続的な展開に必要であろう。「月曜放談会」に興味を持たれた方は是非ご参加いただきたい。筆者にご連絡いただければ「月曜放談会」の案内をお知らせする。

本稿では「はやぶさ2統合サイエンス」についての紹介記事を書いた。最初に述べたように打上から帰還まで長期に渡る「はやぶさ2」に於いてこの連載も長期に渡るであろう。そこで本稿では「統合サイエンス」が持つ理念の面についてのみ筆者の視点でまとめてみた。今後の連載で具体的な「統合サイエンスチーム」の活動成果についても順次報告することになる。以降の連載を期待されたし。

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その22 ～米国航空宇宙局深宇宙ネットワークの活躍と貢献～

戸田 知朗¹，あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 「あかつき」の長い旅路に寄り添ってきたのは、臼田宇宙空間観測所ばかりではない。米国航空宇宙局深宇宙ネットワーク (NASA Deep Space Network) という頼もしい仲間が、打上げから、金星軌道投入へ向けた軌道修正、そして軌道投入失敗の時も、その直後の「あかつき」探索も常に支えてきてくれた。「あかつき」に限らずNASA DSN支援は、我が国の深宇宙探査プログラムに深く結びついて、今では欠かせない要素である。「あかつき」の重要な運用局面に常にあったこのDSN支援を解説すると共に、翻って我が国の地上局のあり方とその将来についても議論することとしたい。そこには、DSNなしには成り立たない我が国の探査の限界も見えてくるはずである。

1. 深宇宙ネットワーク

我が国の深宇宙地上局は、言わずと知れた臼田宇宙空間観測所 (UDSC : Usuda Deep Space Center) である。「さきがけ」、「すいせい」を駆ったハレー彗星探査以来、四半世紀に渡って日本の探査を支えてきた。その口径64 mのアンテナと通信設備は、単局の性能として今も色褪せない。しかし、時代はネットワークである。すなわち、世界規模で深宇宙局を展開し、24時間、探査機の一挙手一投足を見張る深宇宙ネットワーク (DSN : Deep Space Network) でこそ極限の探査が可能になる。

米国航空宇宙局 (NASA : National Aeronautics and Space Administration) は早くからDSN整備に着手し、その成果は日本の探査機をも存分に支えてきた。現在も、その規模は口径34 mの地上局を中心に発展している。欧州宇宙機関 (ESA : European Space Agency) もまた、遅ればせなら2013年、自前のDSNの完成を見た。これら2機関は地上運用も含めて独自に深宇宙探査遂行を完結する力を有すると同時に、DSNの相互利用について積極的な関係を築き始めている。



図1：臼田宇宙空間観測所と米国航空宇宙局深宇宙ネットワーク3拠点の位置関係。

図1に、UDSCとNASA DSNの位置関係を示した。NASA DSNはGoldstone (北米)、Canberra (豪州)、Madrid (欧州)の3拠点からなり、それぞれはコンプレックスと呼ばれ、複数の深宇宙局をその内に擁して複雑な運用を展開している。同時に複数の探査機を追尾できるのは当然ながら、1つの探査機に対し複数局における受信信号を合成加算することも、コンプレックス間の基線を用いて探査機の位置決定を行うこともできる。ネットワークの威力は、単に地球をぐるりと可視時間を延長するだけではない。ESAもNASA DSNほどではないにしても、Cebreros (欧州)、New Norcia (豪州)、Malargue (南米)の3拠点に口径35 mの地

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
toda.tomoaki@jaxa.jp

上局を1局ずつ配備している。

UDSCしか自由にならない我が国の探査では、必然にNASA DSNの支援を仰ぐことになってきた。「はやぶさ」は我が国独自の探査に違いないが、その成功はDSN支援なしにはありえなかった。黎明期のようにフライバイをこなす程度のミッションであればUDSC単独で十分であったが、残念ながら単独局だけでその先の探査活動に挑むことは難しい。「はやぶさ」だけでなく、「あかつき」も囚らずもその難しさに直面してしまった[1]。金星軌道投入という運用を控えて、NASA DSNの支援を必須と考えていたわけだが、正しくその通りだった。軌道投入に必要な精緻な軌道決定には、Differential One Way Range(DDOR)と呼ばれる先述のコンプレックス間基線を利用した位置決定技術が欠かせない。また、軌道投入前後にUDSCから非可視となる時間が不可避で、投入準備、投入異常時の救済対応など、「あかつき」の不測の事態に備える唯一の手段だった。

2. 深宇宙ネットワーク支援の始まるまで

深宇宙ネットワークの使用を確実なものとするため、どのミッションにおいても探査機側の通信装置とNASA DSNの通信装置を接続する試験を、打上げ以前に(通常は、搭載通信装置フライトモデル開発に先

行して)完了させたい。また、NASA DSNの地上局と探査機地上運用装置間のデータ伝送の授受も、上記の接続試験に合わせて、さながら探査機がNASA DSNの先にあるかのように模擬した条件で実施したい。実際には、探査機側の開発速度に加え、機関間の調整に時間を要するのが原因で、この通り首尾よく運ぶことは少ない。「あかつき」もまた、打上げの約半年前にようやく、この適合性試験にこぎ着けた。

適合性試験の実施に必要な項目を表1にまとめた。全てのミッションにおいて、この内容を覆うように試験期間に応じて詳細項目の分量が絞られていく。「あかつき」の場合、2009年12月7日～12月11日の5日間の内に、NASA DSN専用の試験拠点で予定した計測を行った。「あかつき」からは新しいX帯搭載通信装置(X帯は電波の周波数帯を指す)が採用されたのだが、宇宙データシステム諮問委員会における宇宙通信方式の国際標準化のおかげでUDSC通信装置をほぼ標準装置と見なせ、事前に疎通確認を行っていたため、打上げ半年前の試験といえども大きな不安は無かったといえる。試験拠点と国内地上運用センター間の接続性も、先行ミッションであった「はやぶさ」で十分経験が積まれていたため、大きな混乱は無かった。この後、NASA DSN各局と国内地上運用センター間の実際的な回線接続試験(Ground Data System Testと呼ばれる)が順次実施されていく。最終的に、打上げ手順に

表1：適合性試験に必要な手続き。

項目	目的
試験装置輸出手続き	試験装置の米国への移送
試験内容調整	試験手順書の作成
代表的な試験項目	
疎通試験	探査機-地上局間の接続性の確認
コマンド特性	
到達率の計測	回線予測との合致
テレメトリ特性	
受信閾値の計測	回線予測との合致
測距特性	
遅延時間の計測	測距計測の条件確認
DDOR 信号特性の計測	DDOR 計測の条件確認
データ伝送	探査機-国内地上運用センター間の接続性確認

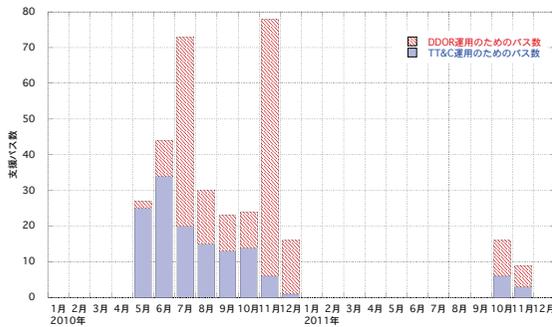


図2：可視(パス)数による「あかつき」への深宇宙ネットワーク支援の実績。

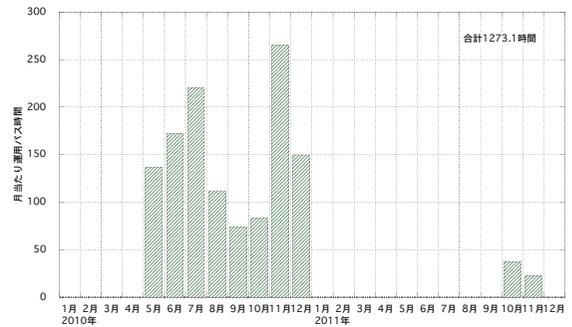


図3：運用時間による「あかつき」への深宇宙ネットワーク支援の実績。

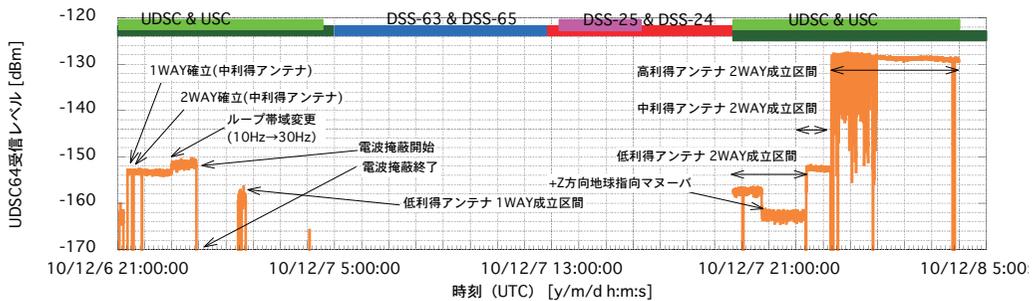


図4：金星軌道投入時の地上局支援と臼田宇宙空間観測所の受信レベル履歴。

沿った「あかつき」の全体試験手順の中において、NASA DSNとの間で打上げ時と変わらぬ条件でのリハーサル(End-to-End Test)を行い、NASA DSN側の審査(Mission Event Readiness Test Reviewという)を経て打上げに備えることとなる。

NASA DSN側との最終調整としては、天候や機体(ロケット、探査機)の状況によって打上げ時刻や期日が順延した場合の対応を考えねばならない。予め、天候を理由とする順延の場合のシナリオまで決めてあるが、それ以上の遅延を招く場合には、NASA DSN側の地上局確保の調整が喫緊となる。「あかつき」では、打上げ順延が1日生じたが、これは前もって想定したシナリオで吸収されて、新たな打上げ期日での対応は問題なくこなされた。

3. 深宇宙ネットワークの活躍

図2と図3に、これまでのNASA DSN使用実績をまとめた。図2は可視運用(パス)の数によって、図3は運用の目的を区別しない総運用時間(地上送信機

ONからOFFまでの時間)によってまとめたものである。横軸は協定世界時に合わせて計数した。

「あかつき」打上げは協定世界時で2010年5月20日であり、最初にNASA DSN Goldstone Complexであかつきの産声を(電波ゆえに耳ではなく)目にする手はずであった。図4は、太陽捕捉後のスピンによって規則的に変動する「あかつき」の受信信号を捕らえたNASA DSNからの報告である。図2と図3には、6月までTT&C(Telemetry, Tracking & Command)を中心とした探査機立ち上げのための支援を、NASA DSNから継続して受けた様子が現れている。7月以降は、DDOR運用のためのパスが増加し、2010年12月の金星軌道投入へ向けた軌道決定のための支援へシフトした様子が顕著である。7月以降は、探査機を姿勢(向き)も含めて静置して擾乱のなるべく少ない状態を作るなど、精密な軌道決定のための補正データ取得が重点的に行われた時期でもあり、DDOR運用頻度が急増している。また、軌道投入直前の11月は最終的な金星軌道への進入路を決めるために、やはり重点的にNASA DSN支援を活用していた。



図5：金星軌道再投入時における白田宇宙空間観測所のコマンド回線予測。



図6：金星軌道再投入時における白田宇宙空間観測所のテレメトリ回線予測。

「あかつき」にとって問題の金星軌道投入であるが、図4は投入前後でのUDSCにおける受信レベルの推移を表している。電波掩蔽による通信不可帯を抜けて再び信号を地上で捕捉する計画だったが、電波掩蔽終了後も信号が見えていない。これが軌道投入失敗である。その後、間もなく短時間、信号を発見できたが再び見失ってしまった。この後にDSS-63、DSS-65、DSS-25、DSS-24とあるのは、「あかつき」探索に投入されたNASA DSNの地上局である。DSS-63とDSS65は、Madrid Complex内の2局であり、DSS-24とDSS-25はGoldstone Complex内の2局である。DSS-63とDSS-65は、当初から異常時に備えて配備されていた局であるが、その後のGoldstone Complexとの継続性を考えて運用時間をぎりぎりまで延長して支援を受けた。このMadrid Complexでの探索によって「あかつき」の微弱な信号が見つかり、その後のGoldstone Complexでの追跡によって軌道決定までもが可能となり、翌日のUDSC可視における確実な「あかつき」捕捉に繋がった。明らかに、NASA DSN支援がなければ、翌UDSC可視で更に位置誤差の増した条件で、「あかつき」の電波探索から始めなければならなかった。例え、「あかつき」信号を見出せても、安定した運用を再開するための軌道決定には更に時間を要しただろう。その間に適切な姿勢を保持できず、観測機器などは致命的な故

障を被る可能性もある。「あかつき」の事故原因の究明が成ったのも、早々の復旧によって搭載保存データをいち早く地上に降ろせたことによる。探査機の位置喪失からの復旧は、人命救助同様、早期発見が鉄則であり、NASA DSN支援の貢献は絶大なものであった。NASA DSN支援がなければ、既に探査機を失っていたかもしれない。

「あかつき」は幸い、図2と図3が示すように、2011年10月と11月の軌道修正(これもまた、NASA DSNによる軌道決定支援を受けた)を経て、金星へ向かう軌道に無事乗っている。いよいよ金星再軌道投入である。

4. 深宇宙ネットワーク支援の今後

「あかつき」の金星再軌道投入の計画が明らかになりつつある[2]。この計画に基づいてUDSCから運用する場合の回線評価結果が図5と図6である。図5にコマンド回線(地上局から探査機)、図6にテレメトリ回線(探査機から地上局)をまとめてある。横軸は、2014年4月から始まる協定世界時である。

「あかつき」には様々なアンテナが目的をもって搭載されているが、目下、主力となっているのは中利得アンテナ(MGA: Medium Gain Antenna)である。こ

これは1軸ジンバルに乗った矩形ホーンアンテナであり、「あかつき」の太陽電池パドルを通る軸が軌道面あるいは太陽-金星-地球を含む面に垂直である限りは、ジンバル駆動によってアンテナを地球方向へ向けることで一定の回線を期待できる。中利得アンテナは2台あり、互いに逆方向を向いてパドルの周囲360°に対応できる。図5から、中利得アンテナを適切に選択すればコマンド回線は常時確保可能であると分かるが、図6のようにテレメトリ回線の確保は難しい。ほとんどの期間でデータレートは512bps(bit per second)以下となって、軌道投入運用の結果分析に必要なテレメトリデータは選別しなければ入手困難である。このような状況にも、NASA DSN支援を受けて可視時間を延長することが非常に効果的といえる。

軌道投入後半、2016年頭に多く現れるデータレートの断続(グラフ上は縦線に見える)は、金星掩蔽による通信の遮断を表している。これらは1日を越えることはなく1次的な遮断であるが、異常時対応には障害となる可能性が大きく、この場合も時間差によるNASA DSN支援での可視時間確保が有効である。2010年の軌道投入では、事前の軌道決定と異常後の救済作業にNASA DSNの貢献があったことを述べたが、このように次回投入時はデータ収集の点でもNASA DSNの支援への期待が大きい。

5. 我が国の深宇宙局のこれから

深宇宙局を始め地上局はインフラに分類されている。これは射点の打上げ設備などと同じ分類だが、開発側の意識は大分違っている。探査機の打上げから運用までの流れを追うと(これは、技術開発の順序そのものでもある)、ロケットとそれに付随する打上げ設備の整備がまず行われ、次いで探査機や衛星の開発へ広がっていく。最下流の地上局の開発は常に最も後発である。欧米の組織や人材の現状を知れば、この傾斜は技術の成熟と共に解消していくかに見えるが、国内では依然として強い根を張っている。残念ながら、海外機関との比較において、国内は地上局の能力の重要性に最も疎いかもしいない。既に建設から四半世紀を過ぎた現行のUDSCと対になり、またそれを後継していく深宇宙局の整備は探査活動の継続のために急務であるが、一向に動きが見えないままである。

海外機関での深宇宙ネットワーク展開の背景には、Ka帯採用の流れもある。Ka帯は現状のX帯より高い周波数の利用を目指すもので、地上局はこれによって64 mより小口径でありながら、64 mと同当の回線品質を潜在的に確保できる。潜在的に、というのは、運用技術、つまり使いこなす技術がまだまだ必要とされる発展途上の技術だからである。我が国も「はやぶさ2」の搭載側でKa帯を採用したが、先述のように白田後継の議論は空転していて、Ka帯に対応する地上局の見通しは立っていない。そのような状況では、やはり海外機関の地上局の支援を頼みにするしかない。Ka帯運用の機会 NASA DSNにおいてもまだ貴重で、貴重な運用データをただ海外機関向けに提供するようなものである。

我が国のあるべき深宇宙局としては、海外機関の衛星、探査機に比べて小さく、とかく搭載資源が限られて搭載通信能力も当然に抑制せねばならない、そんな国内探査機の劣勢な能力を十分補強できるものでありたい。UDSCは、これをよく見通して四半世紀に通用する設計であった。このような地上局の能力は当然ながら、海外機関に運用を100%依存したり、海外機関と同じ地上局一式をそのまま購入したりすることで獲得できはしない。もしこのような後継局を持ってない将来が来るとしたら、それはロケットにしる、探査機にしる、埋め合わせのために今ある以上に開発規模を拡大して、欧米並みに大型ミッションを推進していくことを期待しなければならないが、イブシロンロケットを中心に小型衛星による科学探査の前途を切り拓こうとする宇宙科学ロードマップ[3]の志向とは明らかに矛盾している。我が国の探査は、このような矛盾にどこまで耐えていけるのだろうか？

参考文献

- [1] 中村正人, 遊星人 20, 1, 68.
- [2] Chikako, H. et al., 2012, 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics.
- [3] 「宇宙科学・探査ロードマップについて」, 第7回宇宙科学探査部会資料.

「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線 ～地球惑星科学における装置開発の重要性～」講演会の報告

寺田 健太郎¹，豊田 岐聡²

1. はじめに

太陽系の物質は、驚く程に同位体比が均質である。逆に、この地球化学的な特徴(大前提)を利用して、0.01 – 0.1%程度の同位体比の違い(同位体異常)を検出することで、

〔1〕物質起源の同定

隕石母天体の推定、地球規模の大規模物質循環の指標(トレーサー)、生物起源・非生物起源の判定、食生解析など

〔2〕核反応や放射壊変の情報

元素合成の情報、放射元素を用いた年代情報、宇宙線による核破碎反応、太陽風照射履歴の情報など

〔3〕物理的・化学的・生物学的分別過程に関する情報

蒸発・凝縮、光合成などの情報、古環境における海水温情報の復元など

を紐解く事ができる。概して、このような同位体は化学的特性が似ているため化学分離による分析は難しく、質量の違いで分離する手法【質量分析】が一般的である。本講演会では、「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線」と題し、宇宙科学・惑星科学・地球科学の最前線で活躍する研究者に、これまで分かってきたこと、直面している問題点、それを克服するにはどのような装置開発が必要か、などについて分かり易く解説していただいた(表1)。



図1：豊田によるプレゼンの1コマ。「阪大質量分析グループの歴史」について。

2. 講演内容ほか

まず始めに、篠原厚・理学研究科長より開会の挨拶があり、その後、豊田による本講演会の趣旨説明、および大阪大学の質量分析学の歴史のレビューがあった(図1, 図2)。惑星科学分野においてはあまり知られていないが、阪大の質量分析グループは、1930年代後半に国内で最初に質量分析装置を開発して以来、長い装置開発の歴史があり、二重収束質量分析装置『CQH^[注1]』や、「8」の字型のマルチターン飛行時間型質量分析計『MULTUM^[注2]』のような独創的なイオン

注1. CQHとは、松田久らによって開発された二次二重収束質量分析計である。円筒電場(cylindrical electric sector)と四重極レンズ(quadratic-lens)と一様磁場(homogeneous magnetic sector)からなるシステムで、電場と磁場の間に四重極レンズを入れることで6個の2次収差係数を小さくしている。

注2. MULTUMとは、イオンを同一飛行空間で複数回周回(マルチターン)させることで飛行距離をかせぎ、小型でありながら高分解能が得られるマルチターン飛行時間型質量分析計である。飛行時間型としては世界最高の質量分解能35万を達成し、世界的に非常に高く評価されている。

1. 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

2. 大阪大学大学院理学研究科附属基礎理学プロジェクト研究センター terada@ess.sci.osaka-u.ac.jp

質量分析の歴史	
世界の動向	阪大質量分析グループの歴史
放物線型質量分析器 (J.J. Thomson, 1912) 方向収束質量分析器 (Dempster, 1918) 速度収束質量分析器 (Aston, 1919)	1910年代  <p>国内初の質量分析装置 (Bainbridge-Jordan型) マグネットは国立科学博物館に寄贈</p>
装置の改良, 同位体測定 (Aston)	1920年代
二重収束質量分析器 (Dempster, 1935)	1930年代 日本初の質量分析装置 Bainbridge-Jordan型 (浅田, 奥田, 分解能8000, 1939)
原子質量の精密測定, 同位体分離・濃縮, 地質年代測定法の確立, 炭化水素混合物の測定	1940年代  <p>緒方・松田型 終戦後~1951年, 分解能90万, 61年の第二東京台風時に中之島で水没。64年に豊中に移動して改良型を再製作。分解能40万~50万をつねに発揮</p>
飛行時間型質量分析計 (Stephens, 1946)	緒方一松田型 (緒方, 松田, 分解能90万, 1951)
高精度原子質量測定, 高分解能装置の開発 Bainbridge (10万), Nier (6万) など	1950年代  <p>r-1 磁場型の世界最高分解能120万を達成 阪神大震災で崩壊, 国立科学博物館に寄贈</p>
四重極, イオントラップ (Paul, 1953)	1960年代 大分散質量分析器 r1 (松田, 世界最高質量分解能120万, 1968)
スパッター源, CI, FDなどのイオン化法 GC/MS 有機化合物の測定	おるち 原子質量を 10^{-9} のオーダーまで正確に決める目標をもって開発された超大型装置
SIMS フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計 (Marshall, 1976)	1970年代 おるち (緒方, 分解能80万, 1969) CQH (松田, 分解能24万, 1972)
生体高分子の測定	三次近似イオン軌道計算ソフトTRIO (松尾, 1976)
ESI (Fenn, 山下, 1984) LD	1980年代 六重収束飛行時間型質量分析計 (桜井, 1985) GEMMY (松田, 1988)
MALDI (Hillenkamp, 田中, 1991)	1990年代  <p>CQH 短寿命核の測定用に開発。その後、生体高分子やクラスターの測定に活用</p>
プロテオーム, メタボローム オービトラップ (Makarov, 1999)	1990年代  <p>GEMMY マグネットが9tある大型装置。蛋白質の測定を狙って開発</p>
	2000年代 MULTUM (豊田, 1998)
	 <p>六重収束飛行時間型質量分析計 直径40cmで飛行距離1.7m, 六重収束のイオン光学系, 分解能2000.</p>

図2: 質量分析の歴史.

光学系の装置開発を行ってきた。

次に寺田が、まさに阪大質量分析グループが1970年代に考案したCQH型のイオン光学系をもつ年代分析装置SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe) で見えてきた太陽系年代学の新しい視点と、現行の2次イオン質量分析計SIMSの問題点を紹介し

た。筆者は前職・広島大学で日本で初めてのSHRIMPを立ち上げ、以来17年にわたって岩石・隕石試料の局所U-Pb年代分析を行ってきた経験がある。

丸岡照幸氏は、独自の軽元素・質量分析計の装置開発と、それをを用いた生物活動を読み解くツールとしての同位体分析の可能性について示した。炭素同位体・

表1：講演会「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線」のプログラム。

「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線 ～地球惑星科学における装置開発の重要性～」

【日時】 2013年12月20日（金）13:00-20:00頃

【場所】 大阪大学大学院理学研究科H棟701号室（セミナー室A）

【世話人】 寺田健太郎、豊田岐聡（阪大理）

13:00-13:15	篠原厚（阪大理・研究科長） はじめに 豊田 岐聡（阪大） 阪大で開発されてきた質量分析装置
13:15-14:00	寺田健太郎（阪大） 局所絶対年代分析で拓く太陽系の歴史
14:00-14:45	丸岡 照幸（筑波大）生物活動を読み解くための同位体分析
14:45-15:30	角野 浩史（東大） 噴火に伴う火山ガスの同位体組成変動 〈休憩〉
16:00-16:45	佐々木 晶（阪大） 探査機 on-site 質量分析が拓いた太陽系科学
16:45-17:30	橋 省吾（北大） はやぶさ2：近地球C型小惑星リターンサンプルに我々は何を問いかけるか
17:30-18:15	矢野 創（JAXA） 将来の深宇宙探査構想における、その場質量計測・帰路試料分析の重要性
18:15-20:00頃	Closing & 立食懇親会

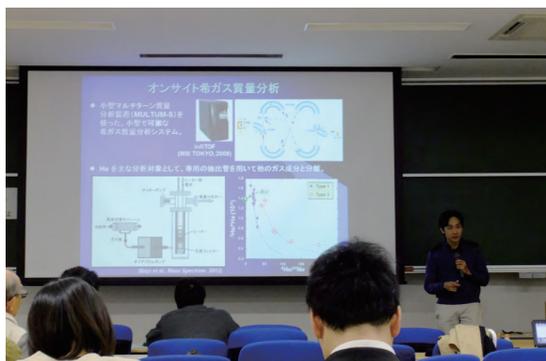


図3：角野氏によるプレゼンの1コマ。「on-site質量分析の重要性」について。

窒素同位体比を組み合わせると食物連鎖の生態系を読みとくことできるというのは、筆者には目から鱗であった。

角野浩史氏（東大）からは、火山噴火直前のヘリウム同位体比の変動などについて紹介があり、火山周辺地域における火山ガス・温泉ガスの同位体組成連続モニタリングの重要性、さらには、そのためのポータブルなオンサイト質量分析装置の開発の重要性が述べられた（図3）。

休憩をはさみ、後半のセッションでは、主に惑星探査の観点から3つの講演があった。まず、「on-site 質量分析が拓いた太陽系科学」と題し、佐々木晶氏（阪大）に、歴代の火星・金星・彗星探査機に搭載された質量分析装置が明らかにしたハイライト研究をレビューしていただいた。

橋省吾氏（北大）は「はやぶさ2で明らかにされるサイエンス」と題し、C型小惑星からのリターンサンプル分析の重要性と、分子雲→初期太陽系円盤→微惑星→地球型惑星という流れの中で、地球にもたらされる以前の生命材料の進化を追う事の重要性を説いた。

最後に、矢野創氏（JAXA）より、将来の深宇宙探査構想では、雪線を越えた外惑星領域での有機物・揮発成分の高精度分析が主要課題の一つであることが強調された。そのうえで「その場」あるいは地球への帰路中の質量計測の重要性と、探査機搭載に向けた次世代質量分析計の開発要素（完全電離、高分解能、汚染管理、軽量化、小型化、省電力など）が示された。氏の講演において、当講演会では初めての「アストロバイオロジー」という単語が出ると、惑星科学を専門としない聴衆も多くが魅了され、講演会の熱気は最高潮に達した（図4）。

聴衆は約60名で、学内はもとより、全国から参加者があった。また、Twitterやfacebookで宣伝したこともあり、地元の高中生や、科学館の学芸員、高校の理科教諭、私が教養教育で電磁気学を教えている医学部生達も参加してくれたことは望外の喜びであった。懇親会では、物理系、化学系、生物系の学生や教職員が参加し講演者を囲んで活発な議論が行われ、地球惑星科学への関心の高さ、期待の大きさを感じることができた。元来、地球惑星科学は学際領域分野であり、古典的学問体系でいう所の物理・化学・生物・地学の英知を結集し、初めて解き明かされていく研究分野で



図4：矢野氏によるプレゼンの1コマ。「アストロバイオロジーとは」について。

ある。講演会后、学外からの参加者の一人がtwitterで「分野(専攻)間の垣根に捉われず、純粋にサイエンスへの興味だけでオール阪大でサポートしあうチームワークの良さが、会場からのコメントに窺えたのが印象的でした」というつぶやきがあったことは嬉しい限りである。そのような場が、短時間であっても実現できたことは本望であり、今回の講演会が今後の学際共同研究のきっかけになればと願っている。

3. おわりに

現在、全国の地球惑星科学系の大学・研究所において、2次イオン質量分析系(SIMS)、ガスクロマトグラフィー質量分析計(GC-MS)、飛行時間型質量分析

計(TOF-MS)、表面電離型質量分析計(TIMs)、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)など、様々な市販の質量分析計が利用されている。この事は、元素分析・同位体分析が地球惑星の諸現象を解き明かす非常に強力なツールであることを意味する。一方で、火山や深海底などでのオンサイト同位体分析や、はやぶさ微粒子やプレソーラー粒子の重元素同位体分析など、現行の分析技術では困難なサイエンスに直面しているのも事実である。今後、新しいサイエンスを切り拓くには、汎用の市販の装置では不十分で、研究対象に特化した独自の装置が不可欠である。

大阪大学理学研究科では、世界的にみてもユニークで長い伝統と実績をもつ質量分析学を「扇の要」とした組織改編を行い、2011年に基礎理学プロジェクト研究センターを新設した。現在、【これまで見えなかったものを観よう】を合い言葉に、学内外の研究機関、産学界と連携しながら、「ニーズ(最先端理学研究)とシーズ(最先端技術開発)のマッチングによるフロンティア研究」を推進しはじめたところである(図5)。今後、皆様のご支援、ご声援を頂ければ大変有り難い。

4. 謝辞

本講演会は、大阪大学未来研究イニシアティブ・グループ支援事業「MULTUMで切り拓くオンサイトマススペクトロメトリー」により支援されました。

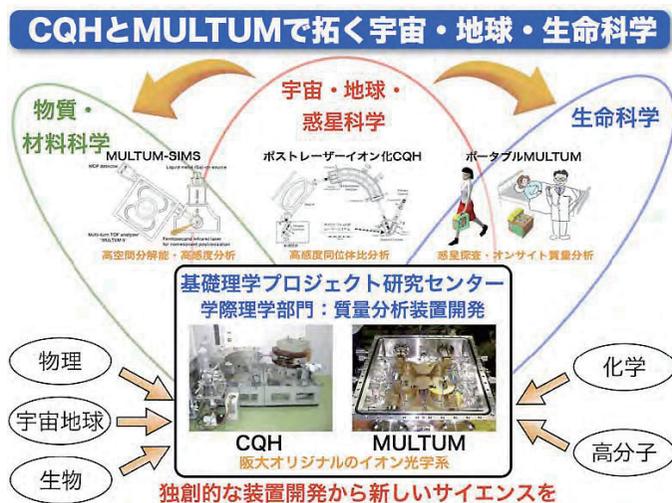


図5：「ニーズ(最先端理学研究)とシーズ(最先端技術開発)のマッチングによるフロンティア研究」構想図。

「天体衝突物理の解明(IX) ～火星の進化～」 参加報告

羽村 太雅¹

1. はじめに

ポプラ並木が綺麗に色づいた2013年10月23日(水)～25日(金)、歩みの遅い台風の進路を横目に見ながら、「天体の衝突物理の解明(IX)研究会」参加者は北海道大学低温科学研究所のある札幌の地に集まりました。石垣島での惑星学会が台風を避けて11月開催となったため、近年11月に開催されていた本研究会は今回10月に開催されました。幸い台風の影響もなく、例年よりも僅かに温かい気候の中、紅葉の綺麗な北大のキャンパスを満喫しました。

惑星系の起源と進化において天体衝突現象は様々なステージで重要な役割を果たします。本研究会はその天体衝突現象について、室内実験・数値シミュレーション・探査・天文観測の専門家が研究成果を持ち寄り議論する場として発足しました。9回目を迎えた今回は「火星の進化」をテーマに、白井寛裕さん(東工大)、寺田直樹さん(東北大)、栗田敬さん(東大)をお招きして火星の進化に関する研究をご紹介いただきました。一般講演は口頭発表が18件、ポスター発表が16件と、例年に比べると小規模な研究会となりましたが、その分いつにも増してアットホームな雰囲気の中で盛んに議論が交わされていました。本稿では研究会の概要と様子を紹介します。講演概要は著者の講演に対する理解や視点に基づくため、各講演の詳細は発表者に問い合わせるか、研究会のWebページ(<http://www.impact-res.org/impact13/index.html>)にアップロードされているスライドや要旨をご覧ください。

2. 講演概要

表1に研究会のプログラムを示しました(以下全て敬称略)。以下では著者なりの視点に基づいて講演内容を分類の上、概要を紹介します。

2.1 惑星系の進化

研究会の今回のテーマでもある「火星の進化」にちなんで、3件の招待講演がありました。火星の表層環境の変遷と現状(白井)、高層大気のプロセスによる散逸(寺田)、若い火山活動の起源(栗田)についての包括的な内容を一度に学ぶことができました。扱う対象もアプローチも異なり、普段は発表の場も異なるであろうお話を一度に聞くことのできる貴重な機会でした。一般講演では、橄欖石のHugoniot曲線改訂に伴う火星大気の組成・質量進化の見積もり(黒澤)や、火星を形成しうる原子惑星系円盤に対する制約(小林)も報告されました。

2.2 衝突現象の素過程

衝突に伴う諸現象は多数の素過程の複雑に絡み合う複合的な現象です。衝突現象を包括的に理解するためにも、惑星探査データの解釈のためにも、各素過程の研究が重要であることは本研究会の歴史の中でも再三指摘されてきました[e.g., 1, 2]。今回の研究会では素過程の理解に向けた実験的研究が多く報告されている印象を受けました。破壊の様子や弾丸・標的の振る舞いに関する研究(原田, 長岡, 松本, 河本)では、空隙率や物質強度に対する依存性に注目が集まっています。低重力下でのクレーター形成(木内)やクレーター放出物によるレイの形成(門野)に関しても多くの実験

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科
tiger@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp

表1:「天体衝突の物理の解明 研究会」プログラム 発表者名の下線は招待講演を表す。

10月23日(水)

13:00	原田 竣也	(神戸大)	空隙を持つ標的への衝突とそれに伴う低密度脆性弾丸の挙動
13:30	石山 謙	(東北大)	かぐや衛星観測データに基づいた月玄武岩層のバルク誘電率と空隙率推定
14:00	長岡 宏樹	(神戸大)	レゴリス模擬標的への衝突実験:インパクト破片と標的の固化
15:00	松本 恵里	(神戸大)	軽ガス銃を用いた衝突励起地震に関する実験的研究
15:30	大野 宗祐	(千葉工大)	炭酸塩岩の衝突脱ガス:封圧の影響に関する実験的研究
16:00	河本 泰成	(神戸大)	普通コンドライト母天体を形成した微惑星の低速度衝突実験
17:00	荒川 政彦	(神戸大)	はやぶさ2 SCI/DCAM3の現状報告
17:30	木内 真人	(神戸大)	模擬低重力における砂標的へのクレーター形成実験
18:00	柳澤 正久	(電通大)	Web動画の解析によるチェリヤビンスク火球の光度曲線
18:30	ポスターセッション		

10月24日(木)

10:00	黒澤 耕介	(千葉工大)	隕石重爆撃が火星大気に及ぼす影響
10:30	小林 浩	(名大)	衝突破壊が決める火星形成環境
13:30	<u>白井 寛裕</u>	(東工大)	火星表層水の変遷:シャーゴット隕石中の衝撃ガラス化学分析からの制約
14:30	<u>寺田 直樹</u>	(東北大)	火星の二酸化炭素と水の散逸について
15:45	<u>栗田 敬</u>	(東大)	Young Martian Volcanism
17:15	和田 浩二	(千葉工大)	イジェクタカーテン観測からイジェクタの放出角度と速さを推定する方法
17:45	辻堂さやか	(神戸大)	クレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究:Wada's methodの応用
19:00	ポスターセッション+懇親会		

10月25日(金)

10:00	平田 成	(会津大)	小惑星形状から考える内部構造と表面地質
10:30	古賀すみれ	(東大)	多バンド画像をもちいた小惑星イトカワ表面特性の高分解能解析
13:30	門野 敏彦	(産業医大)	実験室と月面のクレーターレイ
14:00	常 ユイ	(東大)	チクシュループ・クレーター内部の衝撃変成石英分析に基づくイジェクタ堆積環境の推定
14:30	諸田 智克	(名大)	クレーター生成率モデルの修正と月進化史への影響
15:00	総合討論&解散		

【ポスター発表】

今井 啓輔	(電通大)	電通大・木星火球観測システム(I)
森山 正和	(電通大)	電通大・木星火球観測システム(II)
片桐 陽輔	(電通大)	木星火球シミュレーション
青木 隆修	(神戸大)	イトカワ表面岩塊の形状
岡本 尚也	(神戸大)	高空隙ターゲットの衝突キャビティとキャビティ周辺部の密度変化
兵頭 拓真	(横国大)	はやぶさ2における小惑星模擬試料回収実験:衝突クレーター形成と回収量について
岡本 千里	(JAXA)	C型小惑星模擬物質への衝突実験
鈴木 絢子	(JAXA)	曲率のある面への衝突クレーター形成
千秋 博紀	(千葉工大)	iSale 試用レポート
黒澤 耕介	(千葉工大)	Impact jettingの超高速撮像計測
伊東 里保	(会津大)	月全球のクレーター空間分布の評価
樋口有理可	(東工大)	火星の衛星の力学的起源のレビュー
杉田 精司	(東大)	衝突破片1999JU3のスペクトル特性
羽村 太雅	(東大)	斜め衝突による下流方向高速放出物の質量と大気存在下における運動
高木 靖彦	(愛知東邦大)	玄武岩標的に作られたクレーターの三次元計測
谷川 享行	(北大)	衛星系形成:周惑星円盤への材料物質供給



図1：口頭発表の様子。ダイナミックな映像が出ると歓声が上がります。

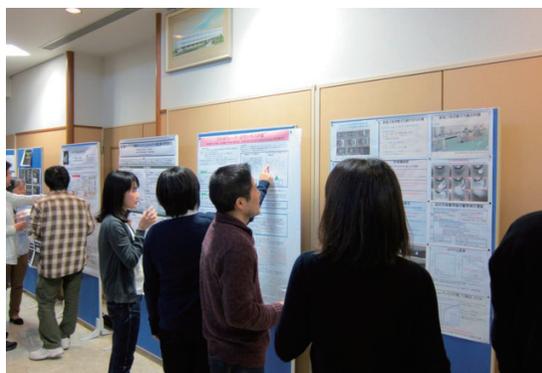


図2：ポスターセッションの様子。活発に議論が交わされている。

結果の蓄積が報告されました。素過程に関する発表群は現象論的な実験結果を整理することでモデル化していくスタイルの発表が多い一方、予測されるモデルの妥当性を実験的に検証するスタイルの発表も盛り上がりました。脱ガス効率の自由空間体積依存性(大野)は脱ガス現象が固相と気相の双方に影響を受けるものであることを再認識させられました。はやぶさ2による小惑星への衝突探査に伴う放出物に関する発表(荒川, 和田, 辻堂)は、放出物の軌道を簡単なモデルで記述して実験との整合性を検証していました。

2.3 探査・観測

探査や地質調査、地上観測により衝突現象による惑星表層への影響も様々な視点から議論されました。衝突によって変化した小惑星上の地形分布の推定(平田)、Itokawa表面反射特性の主成分解析による宇宙風化度分布の抽出(古賀)、月面のクレーターカウンティングによるクレーター生成率の長期的な時間変化(諸田)、衝撃変成石英の鉛直分布分析による堆積環境の推定(常)、かぐや衛星の探査データに基づくバルク誘電率と空隙率推定(石山)、チェリヤビンスク隕石の車載カメラ映像解析に基づく放射温度・供給エネルギー量推定(柳澤)と、それぞれユニークな報告が行なわれました。衝突の現場も衝突規模も、衝突に伴う惑星表層への影響も多様で、惑星上での衝突現象の普遍性を垣間みることができました。

3. 研究会の様子

講演やそれに対する議論の様子(図1)を観察していると、参加者の皆さんがとにかくこの会を愉しみにしているのがあらゆるところから伝わってきます。衝突実験の様子を撮影した動画が流れると歓声上がり、学生が発表に詰まるとまるで自分の研究のようにコメント・議論をして研究を進める。議論・質問のHeavy Bombardmentsでした。タイムスケジュールが遅れていても、ご当地の美味しいおやつを食べる休憩時間は確保する、懇親会でポスターを肴に飲むお酒を愉しみにしている(図2)、などなど。どんなに発表時間が長引いても、苛立った雰囲気なく議論を続ける「内輪」感溢れるアットホームな研究会です。衝突について皆で理解していこうという、温かい雰囲気が特徴です。

例年、「ワカモノ」が質問しないという指摘が繰り返されてきましたが、今回も同様の傾向が見られました。「ワカモノ」の一員である筆者も反省していますが、一方でポスターセッションでは年代を超えて活発な議論が交わされていました。気軽に議論できる雰囲気は本研究会の魅力のひとつであり、来年以降も大切にしていきたいですね。

4. 最後に

本研究会の後には引き続き「惑星表面の地形・地層形成のダイナミクス」と題した研究会が、同じく低温科学研究所にて開催されました。本研究会からも「衝

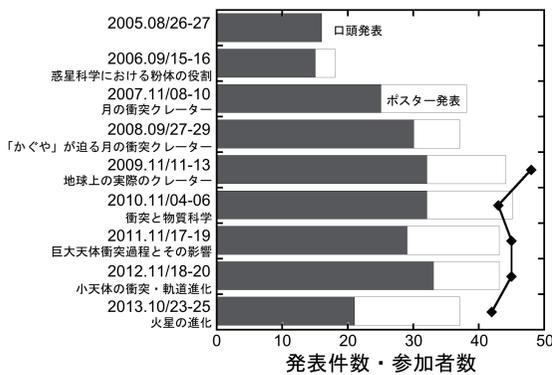


図3：天体の衝突物理の解明 研究会発表件数・参加者数の推移。黒塗り部分が口頭発表，白抜き部分がポスター発表の件数，折れ線が参加者数を表す。過去の本研究会参加報告には，2009年は60名以上[3]，2011年は51名[4]との記載があり，実際の参加者数は図中の値より多いと思われる。2008年以前の参加者数は集合写真も記録もなく不明。

突研究会からのポスター発表タイトル紹介」と題した発表が行なわれるなど，両研究会の交流が図られました。

まとめに変えて，衝突研究会の歴史を振り返り，過去9回の発表件数，参加者数をグラフに示しました(図3)。参加者数は遊星人に投稿された過去の参加報告記事中の集合写真に写っている人数を数えました。今年は口頭発表件数や参加者数が過去4~6年間と比べて減少したようです。時期的な問題なのか，偶然なのかは分かりませんが，筆者の個人的な感覚としては，テ

ーマに関連した発表が例年に比べて少なかったように感じました。毎年出席している参加者とテーマに応じてメンバーの変わる参加者が例年見られますが，今年は後者が少なかった印象です。衝突現象は惑星科学の非常に広い領域に現れる普遍的なテーマのひとつです。より幅広いテーマについて実験・数値計算・探査・観測など多様なアプローチを試みている専門家が議論する場であり続けるため，多くの皆さんの参加を心待ちにしております。

謝辞

今回，このような記事を執筆する機会をくださいました諸田智克さん，鈴木絢子さん，ありがとうございました。全講演に関して改めて見直し分類することで，講演を聴く以上に多くの学びを得ることができました。また，開催に際してご尽力いただきました世話人の皆様，低温科学研究所の関係者の皆様，誠にありがとうございました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 平田 成 他, 2004, 遊星人 13, 57.
- [2] 山本 聡, 2008, 遊星人 17, 82.
- [3] 千秋 博紀, 2010, 遊星人 19, 61.
- [4] 保井 みなみ, 2013, 遊星人 22, 34.



図4：集合写真。

研究会報告:「イプシロンロケットによる小型惑星探査」に関するシンポジウム

荒川 政彦¹, 高橋 芳幸¹, 早川 雅彦²

昨年夏のイプシロンロケット1号機の打ち上げ成功を受けて、今後、このロケットを用いた小型衛星の打ち上げと宇宙科学の推進が期待されている。日本惑星科学学会では、これまで「月惑星探査の来る10年」の活動を通して今後のフラッグシップ探査ミッションの立案を目指してきたが、この中・大型ミッションに加えて、イプシロンロケットを用いた小型の惑星探査ミッションも視野に入れた活動も必要となってきた。惑星科学学会の将来計画専門委員会(委員長:荒川政彦)では、昨年夏に副会長からの要請を受け、小型惑星探査ミッションのあるべき姿とその具体例について小型惑星探査WGの中で意見交換を行ってきた。その議論のまとめは、<https://www.wakusei.jp/~shourai/wiki/epsilon/>にあるので、興味のある方はご覧頂きたい。一方、昨年9月に出されたJAXAの宇宙科学ロードマップでは、惑星科学学会に関連深い太陽系科学探査は、次のように位置づけられることになった:「太陽系探査科学分野は、最初の約10年を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える」。このような背景のもと、本学会では、イプシロン搭載宇宙科学ミッションに対してどのように取り組んで行くかを2013年秋季講演会時の運営委員会及び総会で議論した。その結果、3つの論点からこの小型惑星探査についての検討を行うこととなった。まず第1の論点は、(1) イプシロンロケットを用いた小型惑星探査はコミュニティーに必要かという点である。これは多くの学会員のコンセンサスを得る必要が

あるので、機会ある毎に議論を積み重ねることとなった。第2の論点は、(2) 次の10年間の太陽系探査に対してイプシロンロケットを用いた小型惑星探査を中心に据えた時、我々はどのような探査を提案するのかという点である。第3の論点は、(3) 年度内にも公募が行われるイプシロンロケット3号機に対して、我々はどうのように取り組んだら良いかという点である。(2)、(3)に関しては、今後、学会主催のシンポジウムを開催し、さらに内容をつめる必要がある場合はWGを立ち上げて検討を行うことになった。今回企画したこのシンポジウムは、この総会での決定に基づいて、まずは主に(3)に関する議論を行うために開催した。

シンポジウムは、2014年1月22日に神戸大学惑星科学研究センター(ポートアイランド)で行った。シンポジウム会場の参加者は36名、テレビ会議では8箇所への中継を行った。シンポジウムではまず宇宙科学ロードマップの説明があり、引き続きイプシロン3号機への提案が予定されている3つのミッションを中心に、それらのミッションの限られたリソースの中でどのような惑星探査が可能かの議論を行った。そのため、DESTINY ミッション、SLIM ミッション、ペネトレータ実証機ミッションに関して提案チームから各提案の概要、サイエンスを紹介してもらい、その後、各ミッション提案に関連した観測機器やサイエンス提案に関して講演をしてもらった。さらに(2)に関連してイプシロンロケットを用いた今後の小型惑星探査についての講演があり、理工連携による小型惑星探査を推進する枠組作りについて議論を行った。その結果、今後、このシンポジウムは惑星科学学会だけに閉じることなく、イプシロンロケットを用いた小型惑星探査の議論の場を提供して行くことになった。そして、今後1年間は

1. 神戸大学大学院理学研究科

2. 宇宙航空研究開発機構

masahiko.arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp

3~4ヶ月毎にシンポジウムを開催して集中的に議論を行うことになった。さらに、このシンポジウムの目的は、増強型イプシロンロケットに対する理学・工学からの(どのような増強が必要かも含めて)要望を明確化することとし、そのために小型惑星探査のミッションコンセプトを立案・具体化する理工連携チームの立ち上げを目指すことになった。今後、理学、工学のそれぞれから小型惑星探査に関する提案を行い、各々の提案に対する理解を深めながら共同作業が可能なパートナーを見つけることを最初の目標とすることになった。シンポジウムのプログラムと各講演内容は学会ホームページ(<https://www.wakusei.jp/~shou-rai/wiki/epsilon/>)にあるので参照して頂きたい。将来計画専門委員会では、今後も引き続きイプシロン搭載宇宙科学ミッションの議論及び検討を学会員の皆様と伴に進めて行きたいと考えている。

//////////////////// プログラム //////////////////////

I. はじめに

10:00-10:20 上野宗孝(JAXA) (発表15分+議論5分)
「宇宙科学ロードマップの考え方」

II. DESTINYによる小型惑星探査を考える

10:20-11:00 川勝康弘(JAXA) (発表30分+議論10分)
「深宇宙探査技術実験機DESTINYの概要」
11:00-11:30 岩田隆浩(JAXA) (発表20分+議論10分)
「DESTINY 理学機器候補のレビュー」

III. DESTINYによる観測機器提案 各提案20分(発表10分+議論10分)

11:30-11:50 江副祐一郎 (首都大学東京 理工・物理)
「地球磁気圏を可視化するX線望遠鏡」
11:50-12:10 荒井朋子(千葉工業大学・惑星探査研究センター),
小惑星 Phaethon 探査検討チーム
「DESTINY 派生機による地球近傍ダスト観測

および地球近傍小惑星(流星母天体彗星-小惑星遷移天体など)探査」

12:10-12:30 亀田真吾, 成田憲保, 生駒大洋,
村上豪(立教大学, 国立天文台, 東京大学, 宇宙研)
「系外惑星大気の紫外光観測に関する検討報告」

IV. SLIMによるによる月着陸探査

13:30-14:10 坂井真一郎, 澤井秀次郎, SLIM/
WG(JAXA) (発表30分+議論10分)
「小型月着陸実験構想SLIMの概要」
14:10-14:40 春山純一(JAXA) (発表20分+議論10分)
「月着陸によるサイエンス」

V. ペネトレータ実証機による月サイエンス

14:40-15:10 田中智・白石浩章(JAXA) (発表30分)
「ペネトレータ実証機ミッションの説明」
15:10-15:30 白石浩章・田中智(JAXA) (発表20分)
「ペネトレータによる月サイエンス」
15:30-15:40 討論

VI. 月・火星探査提案(発表10分のみ)

16:00-16:10 石原吉明(JSPEC/JAXA)
「ペネトレータ1本で行う月内部構造探査」
16:10-16:20 山田竜平(国立天文台 RISE 月惑星探査検討室)
「ペネトレータ1点地震観測による月震の科学」
16:20-16:30 吉光徹雄(ISAS/JAXA)
「SLIMにおける小型ローバの提案」
16:30-16:40 長谷部信行, 太田亨(早稲田大学)
「M型小惑星探査機搭載の γ 線・中性子分光計」
16:40-16:50 小郷原一智(滋賀県立大), 今村剛(ISAS)
「火星気象オービター」
16:50-17:00 藤田和央(JAXA)
「イプシロンロケットによる火星着陸探査の可能性検討」
17:00-17:20 討論

Ⅶ. 小型惑星探査の将来

17:20-18:00 津田雄一(JAXA) (発表30分+
議論10分)

「イプシロンによる小型惑星探査の将来」

18:00-18:30 船瀬龍(東大) (発表20分+議論
10分)

「50kg級深宇宙探査機バスの開発:PROCYON」

18:30-19:00 総合討論

研究会開催報告： 計算惑星科学シンポジウム

林 祥介¹, 梅田 隆行², 梅村 雅之³, 小河 正基⁴, 亀山 真典⁵,
玄田 英典⁶, 小久保 英一郎⁷, 高橋 芳幸¹, 寺田 直樹⁸,
中本 泰史⁹, 西澤 誠也¹⁰, 牧野 淳一郎⁶

2012年に完成した「京」コンピュータの後継となる、エクサフロップス級計算機の開発計画が具体的になりつつある。文部科学省の「将来のHPCI^{*1}システムのあり方の調査研究」（2012年度、2013年度）^{**2}ならびに「今後のHPCI計画推進のあり方に関する検討ワーキンググループ」^{**3}等で調査・議論が重ねられ、「エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト（仮称）」が第116回総合科学技術会議（2013年12月17日）で評価を受けるに至った^{**4}。そこでは「様々な社会的・科学的課題の解決に資する演算性能1エクサフロップス（「京」の約100倍）レベルのスーパーコンピュータの開発・整備及びそれを活用するためのアプリケーションの開発を行い、平成32年（2020年）頃までに運用を開始する」とされている（図1左^{**5}）。対象とされる社会的・科学的課題や、それらを扱っていく上で解決されるべき諸問題とその見通しなどは、上記調査研究において「計算科学ロードマップ（概要、中間報告書）」（<http://hpci-aplfs.aics.riken.jp/document.html>）としてまとめられており、今後、ターゲット課題の絞り込みを行った上で、開発実施主体である理化学研究所計算科学研究機構を中心に、アプリケーション設計開発と連携協調したシステム構成の検討が進め

られることとなった（図1右⁶）。

さて、このような状況下において惑星科学に携わる研究者はどう振舞うべきか（あるいは、振舞わざるべきか）、今後何らかの形で高性能計算機に関わっていくであろう惑星科学関連研究者・学生が情報に接し、意見表明・交換する場の必要を、遅ればせながらではあるが感じて企画されたのが「計算惑星科学シンポジウム」である。「計算科学ロードマップ」に纏わる情勢を概観し、エクサフロップス級計算機の開発の方向について情報の共有をはかるとともに、惑星科学研究における課題の具体化とそれに必要となる研究開発体制等について議論する場とすることが有志主催者（すなわち、「計算科学ロードマップ」での惑星科学分野の

1. HPCI=High Performance Computing Infrastructure. 以下の脚注で説明するように固有名詞でもある。
2. 文部科学省HPCI計画推進委員会（第9回）資料1-「将来のHPCIシステムのあり方の調査研究の進め方について（案）」http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/020/shiryo/attach/1319672.htm
3. 文部科学省「今後のHPCI計画推進のあり方に関する検討ワーキンググループ」http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/ は、文部科学省の「HPCI推進委員会」（http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/020/、「京」コンピュータの建設に伴い文部科学省研究振興局長の私的諮問機関として2010年8月設置）の下に「京」以後を検討するべく設置。2012年4月から2013年11月現在までに23回の会合が行われている。固有名詞の「HPCI」あるいは「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ」とは「京」コンピュータを中核に、拠点大学基盤センター等のスーパーコンピュータを高速ネットワークで接続して連携運用を可能とすることによって、我が国における研究開発用高性能計算環境の提供を実現するシステムあるいは組織のことで、RIST（高度情報科学技術研究機構）により運用されている（<http://www.hpci-office.jp/>）。
4. 総合科学技術会議（第116回）資料1-2「総合科学技術会議が実施する国家的に重要な研究開発の評価『エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト（仮称）』の評価結果（案）」<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu116/siryol-2.pdf>

1. 神戸大学 理学研究科 地球惑星科学専攻・惑星科学研究センター
2. 名古屋大学 太陽地球環境研究所
3. 筑波大学 計算科学研究センター
4. 東京大学 総合文化研究科
5. 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター
6. 東京工業大学 地球生命研究所
7. 国立天文台 理論研究部
8. 東北大学 理学研究科 地球物理学専攻
9. 東京工業大学 理工学研究科 地球惑星科学専攻
10. 理化学研究所 計算科学研究機構 複合系気候科学研究チーム
comps-staff@cps-jp.org

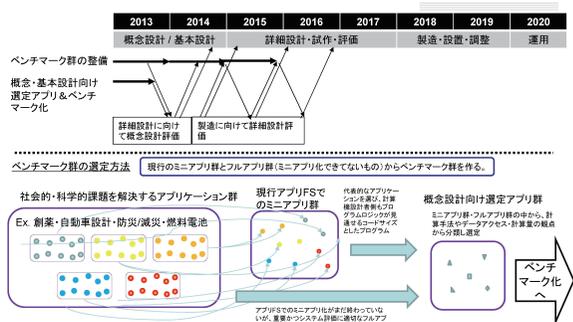
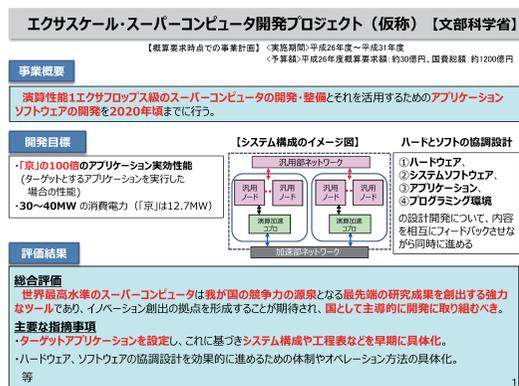


図1: (左)エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト⁶⁾。(右)エクサスケール・スーパーコンピュータ開発スケジュールイメージ。アプリケーション設計開発と連携協調するシステム設計開発⁷⁾。

執筆者ら)の目論見である。あるいは、より一般に、惑星科学における今後の計算科学の展開を展望し、必要とする計算資源をイメージし、その実現と運用に必要なとなる企画・研究・運営等の体制を当該分野関係者が主体的に検討・議論し描いていけるような雰囲気作り、流れ作りにつなげていければ、ということを目指した試みである。

本来なら、そのようないわゆる科学現場からのボトムアップな議論検討によって、計算環境や人的配置の実現がもたらされるのが望ましいことは言うまでもない。我が国が惑星探査を続ける限り、これを支援するシミュレーションやデータ解析の人材育成とソフトウェア開発能力の担保、その管理提供維持を担う情報基盤の組織の立ち上げは急務である。また、我が国が計算機開発を国策の一つに掲げる限り、これを必要とし応分の成果を提供する能力がある科学分野には計算資源の優先配分がなされること、従って、これに参入しうる<以下同文>もまた現実である。1990年代後半から始まる、地球シミュレータ、「京」コンピュータ

と続く計算機開発と計算科学の振興の流れにおいては、指定された重点投資分野に対しソフトウェア開発や利用のための人材予算措置がなされてきた。「京」コンピュータ計画においてはHPCI戦略プログラム5分野⁸⁾が設定され投資を受けるとともに、これら戦略分野で活動する人々が次世代HPCI計画の策定に大きく関わっている。惑星科学においては、地球科学あるいは天文学という経路で参入している人々を除けば、これまで残念ながらこの重点投資の流れからは外れてきており、人材育成やソフトウェア開発力の蓄積に遅れをとってきた懸念がある。今回の「計算科学ロードマップ」では、惑星科学研究が重点分野課題の候補の一つとして盛り込まれており、これまでの状況から離陸できる可能性を秘めているが、一方で、惑星科学分野においてHPCIに関わってきた人材は少なく、いわゆる「受注倒産」に至る危険性もはらんでいる。「計算惑星科学シンポジウム」の主権者企画意図は、そのような政策的な流れに巻き込まれない、という類の選択肢まで含めて、このような動きに関連しうる人々が科学的必要や戦術的・戦略的メリット・デメリットを議論し、意思疎通をはかることにある。

以上のような意図をもった活動のなんらかの継続性を期待して、「計算惑星科学シンポジウム」の主権者は有志個々人名ではなく、CPS(惑星科学研究センター)の協力によりにわかに立ち上げた任意グループ「計算惑星科学フォーラム」(http://www.cps-jp.org/~comps/)とした。企画意図に賛同いただいた、HPCI戦略プログラム分野5、日本惑星科学会、SGEPSS地球電磁気・地球惑星圏学会、国立天文台、CPS惑星科

5. 総合科学技術会議(第116回)資料1-1 総合科学技術会議が実施する国家的に重要な研究開発の評価「エクサスケール・スーパーコンピュータ開発プロジェクト(仮称)」の評価結果(案)【概要】 1 http://www8.cao.go.jp/cstp/siryoy/haihu116/siryoy1-1_1.pdf より

6. 文部科学省「今後のHPCI計画推進のあり方に関する検討ワーキンググループ(第22回)」資料3 フラッグシップシステムに関する検討状況 http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/028/shiryoy/_icsFiles/afiedfile/2013/11/07/1341268_04.pdf より。中のアプリはアプリケーションの略。

7. 文部科学省「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)の構築について」http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.htm

学研究センターには共催をお願いした。かくして、「計算惑星科学シンポジウム」は2013年11月23日(土)、惑星科学会秋季講演会の機会を利用し、石垣島離島ターミナル会議室にて話題提供者10名を含む38名の登録参加者+若干の飛び入り参加者の参集を得て開催された。以下提供された各話題の簡単な要約を記載する。各話題の資料のうち公開が許されたものは「計算惑星科学シンポジウム」のホームページ(<http://www.cps-jp.org/~comps/pub/2013-11-23/>)にPDFで格納しているので参照されたい。

プログラム

- ・林 祥介(神戸大・理/CPS)：趣旨説明
- ・中本泰史(東工大・理工学)：「計算科学ロードマップ」での惑星科学
- ・牧野淳一郎(東工大・ELSI)：今後の計算機と計算科学…なぜ我々は7年前の間違いを繰り返す、したのか
- ・小久保英一郎(国立天文台・理論)：惑星系形成進化における計算科学と計算機
- ・玄田英典(東工大・ELSI)：惑星形成研究における計算科学と計算機
- ・小河正基(東大・総合文化)・亀山真典(愛媛大・地球深部ダイナミクスセンター)：惑星内部研究における計算科学と計算機
- (昼休)
- ・高橋芳幸(神戸大・理)：惑星表層研究における計算科学と計算機
- ・梅田隆行(名大・STEL)・寺田直樹(東北大・理)：惑星圏研究における計算科学と計算機、6次元計算(エクサ)に向けた、現状(京)を踏まえ
- (休憩)
- ・梅村雅之(筑波大・計算科学研究センター)：宇宙生命計算科学連携拠点(CAB)について
- ・総合討論：次世代高性能計算機ってどうよ？
- (懇親会)

計算科学ロードマップでの惑星科学

中本は、「計算科学ロードマップ」の惑星科学分野の主要著者の一人であり、「計算科学ロードマップ」での惑星科学に関する扱いについて解説を行った。「計算科学ロードマップ」ではエクサスケール計算機が貢

献する社会的課題に重点が置かれているが、既存分野の連携により創出される新しい科学についても検討がなされた。惑星科学は、現在の「京」コンピュータの戦略5分野に含まれている「宇宙」および「地球科学」との連携強化により発展が期待される科学と位置づけられている。「計算科学ロードマップ」では、エクサスケール計算機により発展が期待できる惑星科学の課題として次の3つがあると述べている。すなわち、(1) 惑星系の形成、(2) 地球・惑星の形成、(3) 惑星表層環境の形成と進化、である。これらは執筆に携わった有志が選んだ茫漠としたものであり、十分な検討に基づくものとは言えない。今後、このような各課題に対する意見や、さらに、課題提案や次世代HPCI計画全般に対してなどの全般にわたっての意見を広くコミュニティから集めること、これらを「計算科学ロードマップ」最終版に反映していくことが必要である。

今後の計算機と計算科学…なぜ我々は7年前の間違いを繰り返す、したのか

牧野は、「京」の開発過程を振り返り、その問題点をまとめ、エクサスケール計算機の目指す方向について議論した。「京」では、できた計算機は要求仕様通りのものになっているが、半導体製造技術の進歩の方向から見ると、演算速度に対してメモリバンド幅や通信バンド幅に重点をかけすぎであり、しかも並列化効率を大きく左右する通信レイテンシについてはあまり重点がおかれていなかった。言い換えると、「独自RISCプロセッサによる大規模スカラー並列」という90年代に世界の主流であった方向を極限まで進めたものである。エクサスケール計算機ではアプリケーションの多様な要求に対して、その少なくとも一部については「現在ないし過去の主流」ではなく、半導体技術の発展方向からくるべきアーキテクチャで応える、という方向で進めようとしている。具体的には、「汎用部」+「加速部」で、加速部ではメモリ容量はある程度犠牲にして、メモリバンド幅と通信レイテンシを改善することで小規模な計算でも高い並列効率をあげることを目標にしようとしている。つまり、超大規模計算だけのためのスパコンではなく、やりたい計算を速く、を目指す。

惑星系形成進化における計算科学と計算機

小久保は、惑星系形成進化の問題における計算科学的展開をN体シミュレーションの具体例を用いて述べた。太陽系とは様相の異なる系外惑星系が多数発見されている現在、太陽系も含めた多様な惑星系の起源と進化を一般的に理解することは惑星科学ならびに天文学の最重要課題の一つである。現在の惑星系形成の標準シナリオでは、固体惑星やガス惑星の固体核は微惑星とよばれる小天体の衝突合体によって形成される。この過程で、微惑星は互いの重力散乱によって軌道を進化させながら、衝突合体/破壊によって質量分布を進化させる。この進化は重力多体問題として近似することができる。例えば、太陽系の微惑星数は1000億個程度と見積もられ、惑星集積の時間スケールは10億年になる。この問題の難しさは、系が衝突系であるため高精度計算が必要なこと、そして惑星集積の時間スケールが長いこと長期計算が必要なことである。現在の最大規模の多体シミュレーションは、重力多体問題専用計算機GRAPEを用いたもので10万体を10万年である。次世代計算機では惑星系の構造形成を理解するために1億体1億年規模の多体シミュレーションを実現したいが、そのためにはガスとの相互作用などの物理素過程の理解と高効率な並列化計算法の開発が必須である。

惑星形成研究における計算科学と計算機

玄田は、惑星形成の問題における計算科学的展開を、主に天体衝突に注目して述べた。惑星形成において、天体衝突は必然かつ頻繁におこる重要なプロセスである。例えば、微惑星形成時のダストの合体成長、原始惑星形成時の微惑星同士の衝突、地球型惑星形成時の原始惑星同士の巨大天体衝突などが挙げられる。惑星形成を理解するためには、詳細な衝突プロセスの検討が必須である。最近玄田らが行った微惑星同士の数値シミュレーションによると、衝突破壊が起こる条件が、数値計算の解像度に強く依存し、従来よりもかなり容易に壊れることがわかった。計算結果が収束するためには約1億粒子の解像度が必要であり、微惑星から原始惑星が形成されるまでのプロセスをカバーするためには様々な衝突条件(1000通り以上)での数値計算が必要である。また、巨大天体衝突は、地球型惑星の多

くの特徴に影響を与えたと考えられており、これまで多くの数値シミュレーションが行われてきたが、その解像度はそれほど高くない。巨大天体衝突によるコアとマンツルの混合や、大気・海との相互作用など、地球化学的に重要な事柄を検討するためには、従来よりも3桁以上解像度を上げる必要がある。

惑星内部研究における計算科学と計算機

小河・亀山は、惑星内部研究における計算科学的展開を、主に地球型惑星のマンツル対流に着目して解説した。マンツル対流シミュレーションが対象とする科学的課題の1つとして、地球型惑星内部の熱・化学状態とその進化過程の解明を挙げることができる。この自己無撞着な取り扱いには、固体マンツル物質の(部分)融解やこれに伴う物質分化過程を含んだ火成活動のモデル化が決定的に重要である。しかしながら、こうした火成活動とマンツル対流とを結合させた系のシミュレーションでは、時間刻みの制約や両者のフィードバックに伴う計算不安定が存在することもあり、これまでは主に2次元モデルによって基本的な性質を解明することに留まっており、3次元あるいは球殻ジオメトリを用いたモデリングの実現が強く望まれている。マンツル対流シミュレーションの技術的な課題は、その流れ場を各時間ステップでいかに高速かつ高精度で解くかに集約されている。そもそもマンツル対流とは、「岩石が固体状態のままゆっくりと流れる」という非常に特殊な流れであり、その流れ場は力学的定常状態を記述する悪条件な大規模連立一次方程式を解くことで定められる。連立一次方程式を数値的に解く作業は、頻繁な通信を伴うなど、計算の大規模並列化には本質的に不向きであるという困難がある。このような現状を受けて亀山らは近年、多重格子法と独自の緩和計算アルゴリズムを用いた3次元シミュレーションプログラムを開発した。この方法には、大規模並列計算に適用した場合でも性能の劣化がさほど深刻ではないという利点がある。これに加えて特に低レイテンシ・高速なPE間通信の可能なハードウェアを利用することができれば、火成活動・マンツル対流結合系の3次元シミュレーションの実現に向けた強力なプラットフォームの構築が可能となるであろう。

惑星表層研究における計算科学と計算機

高橋は、惑星大気を例に惑星表層シミュレーションモデルでの技術的問題を解説した。惑星の大気循環構造は、ハドレー循環のような惑星規模の運動構造から、局所的な熱対流や波動・乱流のような惑星よりも非常に小さなスケールの運動構造まで様々なスケールの運動の相互作用の結果として決定される。また、それらの循環による熱輸送と物質輸送は、大気中の物質分布や雲の分布を定め、それらの分布は翻って放射伝達による惑星大気全体のエネルギー収支と平均的な気候状態を定め、輸送構造を規定する。このような惑星大気の循環構造や気候の表現と理解に向けた数値計算において、今後の開発される大型計算機に期待される計算課題は、1) 惑星サイズに比べて小さな循環・擾乱を陽に表現する高解像度計算、2) 時定数の長い厚い大気や大気進化を直接的に扱うことのできる長時間計算、3) 様々な物理過程を考慮した計算、4) 多数のアンサンブル計算、であるだろう。数値モデルの信頼性を高め、太陽系内惑星および太陽系外惑星の循環構造や気候の研究の大きな進展につながるためには、これらの問題が有機的に解決できるような計算環境と人材育成が必要である。

惑星圏研究における計算科学と計算機

梅田・寺田は、「6次元計算(エクサ)に向けた、現状(京)を踏まえ」というサブタイトルで、エクサスケールコンピューティングに向けた惑星圏シミュレーションの課題を外観した。それらは、(1) MHD(磁気流体力学)近似の限界を超える超高解像度での惑星圏グローバルMHDシミュレーション、(2) ブラソフコードや全粒子コードを用いた6次元惑星圏グローバルシミュレーション、(3) 惑星放射線帯の粒子・流体混成シミュレーションなどである。(1)のMHDシミュレーションでは、従来の計算は惑星圏の大局的構造の再現に注力していたが、今後は大局的構造の再現に加えて、境界層乱流や、ホール項などの非MHD効果を含む、メソスケールの境界層過程の解像が可能となる。これにより、太陽風-惑星圏相互作用のメソ-マクロシミュレーションの実現が期待される。(2)(3)のブラソフコードや粒子コードにおいては、実空間(3次元)に加えて速度空間(3次元)も取り扱うため、さらに大規模な

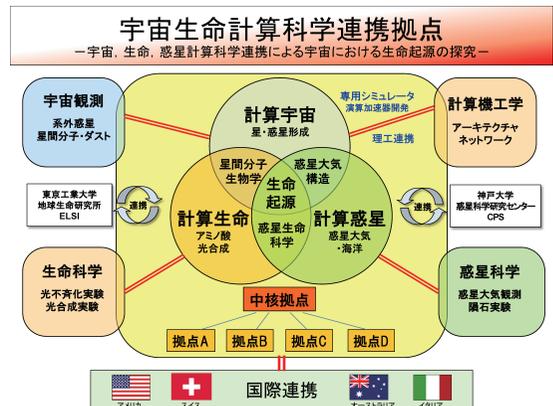


図2: 宇宙生命計算科学連携拠点(CAB, Computational Astro-Biology)のイメージ(梅村による)。

計算資源を必要とする。近年の計算機能力の発達によって、太陽風相互作用の全体とマイクロ過程を同時に記述する、5次元のマイクロ-マクロシミュレーションが行えるようになりつつあるが、今後は弱磁化天体周辺のプラズマ環境ならびに表層環境への影響の理解などを目的として、6次元のマイクロ-マクロシミュレーションを実現していく。惑星圏シミュレーションは、MHDコード、粒子コード、ブラソフコードなどの多様なコードから成るが、コードによって必要とする計算機が異なる。例えばMHDコードは高メモリバンド幅を必要とし、粒子コードは大きな共有メモリを必要とする。

宇宙生命計算科学連携拠点(CAB)

梅村は宇宙生命計算科学連携拠点(CAB)についてその概要を述べた(図2, http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/CCS/research/research_promotion/com-astrobio)。この10数年、系外惑星観測、星間分子観測、アストロバイオロジーの様々な取り組みにより、宇宙における生命起源探究の機運は急速に高まってきているが、宇宙分野と生命分野が密に連携して、計算科学により探究する拠点はまだない。本拠点は、宇宙分野、生命分野、惑星分野の協働なくしては探究できない宇宙生命起源に関わるキープロセスを探究し、宇宙生命計算科学の確立を目指すものである。本計画では、連携の中核拠点を置き、共同研究推進体制を作る。本拠点が取り組む研究課題は、星間分子生物学、惑星生命科学、星・惑星形成の3つを柱とし、これらを宇宙・

生命・惑星計算科学の連携の下で大規模シミュレーションによって探究する。具体的な課題は次のとおりである。(1)惑星形成:ダスト形成, ガス・ダスト系力学, 微惑星形成, 原始惑星形成, 惑星大気・海洋形成, (2) 星間分子生物学:星間分子化学, アミノ酸生成過程, アミノ酸ホモキラリテイ(円偏光波による不斉化), (3)惑星生命科学:惑星大気科学, 惑星分子化学, バイオマーカー(光合成, レッドエッジ)。現在, 22研究機関54名(天文・宇宙分野10名, 生命・物質分野22名, 惑星科学分野16名, 計算機工学分野 6名)で活動中である^{*8}。

総合討論「次世代高性能計算機ってどうよ?」は, 予想通り(?)時間が押して, あまりまったりとした議論ができなかったのが残念ではあった。当然一回の会合で, 今後エクサスケール計算機にむけての惑星科学研究における課題の具体化とそれに必要となる研究開発体制等について議論することは困難であるわけだが, エクサスケール計算機計画は進行中であり, 今後も同様な機会を設けていく必要は減じていない。今後, 惑星計算科学フォーラムは, 上記CAB等の諸組織・諸活動との連携をとりつつ, HPCIの展開だけでなく, 惑星探査や系外惑星観測に付随するべき計算情報インフラから個々の研究現場での諸問題に至るまで, 広い意味での惑星科学に関する様々なシーンでの計算科学的, 技術的, 政治行政的問題を論じ, 交流していく場として活動を続けていくつもりである。幅広い関係者の参加あるいは運営協力をお願いしたい^{*9}。

謝 辞

国立天文台水沢石垣島天文台の宮地氏と東工大の坪内さんには会場の手配, 設営, 懇親会の準備等で大変お世話になりました。ありがとうございます。おかげさまで懇親会では素晴らしい夕日を拝むことができました。懇親会でのさまざまな情報交換・交流活動を促進するのに大きな貢献であったと思います。

8. 宇宙生命計算科学連携拠点(CAB)問い合わせ先:筑波大学 計算科学研究センター 梅村雅之 umemura@ccs.tsukuba.ac.jp

9. 計算惑星科学フォーラム 問い合わせ先 e-mail: comps-staff@cps-jp.org

2013年度秋季講演会報告

渡部 潤一¹

2013年11月20日から22日にかけて、実行委員会である自然科学研究機構国立天文台の施設がある沖縄県石垣市の石垣市民会館にて、日本惑星科学会2013年度秋季講演会が行われました。場所の魅力もあってか、参加者は211名(うち事前参加申込者160名、当日申込者51名)という、秋季講演会始まって以来の参加者数を記録しました。発表数も196件(うち口頭発表が105件、ポスター発表が81件、口頭発表とポスター発表の両方が義務付けられている最優秀発表賞のエントリー講演数5件)と、過去最多数となりました。また、一般講演とは別に総会後に最優秀研究者賞特別講演が1件行われました。

今回は石垣市も主催に加わってもらったことで、会場経費などを大幅に押さえることができた上、一般の石垣市民にも門戸を開き、学会の雰囲気を楽しんでいただく機会となりました。開催期間中は、心配していた台風による飛行機の欠航や、大きな混乱や事故もなく、無事に講演会を終えることができました。ご参加いただいた皆様には、心から御礼申し上げます。

講演会場として使用した石垣市民会館の大ホールはややオーバースペックではありましたが、広い会場で余裕を持って講演を聴いていただくことができました。また、ポスター発表会場としてお借りした展示ホールおよびロビーも、かなり広く、ポスターを眺めながら熱心に議論していただけたかと思います。ただ、発表数が予想を超えたため、口頭発表の持ち時間は10分(質疑時間2分を含む)、最優秀発表者賞選考のための特別セッションでも15分(質疑応答3分を含む)として節約を試みましたが、開始時刻は初日は午前9時30分、



図1：秋季講演会会場：石垣市民会館大ホールの様子。

二日目から9時20分としても、終了時刻が午後7時になってしまうという嬉しい悲鳴のプログラム編成となりました。3日間という制約の中で、口頭発表をパラレルにせずに行うのは、このあたりが限界かもしれません。

1日目の最優秀発表賞選考セッションでは5件の講演がありました。その発表賞受賞者の表彰式は2日目の総会で行われ、国立天文台・総研大の片岡彰正会員が受賞されました。また、2012年度に最優秀研究者賞を受賞された国立天文台の成田憲保会員の特別講演が総会後に行われました。総会が押したため、特別講演の時間がいささか短くなってしまったのは残念でした。懇親会は、会場から徒歩5分ほどのホテルミヤヒラで行われました。こちらも参加者数は169名(石垣市および八重山星の会の招待者2名を含む)と過去最高となりました。また、地元のご厚意によって、八重山独特の踊りを見せていただき、最後には皆で八重山民謡に合わせて踊るという盛り上がりでした。懇親会

1. 自然科学研究機構国立天文台
Jun. watanabe@nao. ac. jp

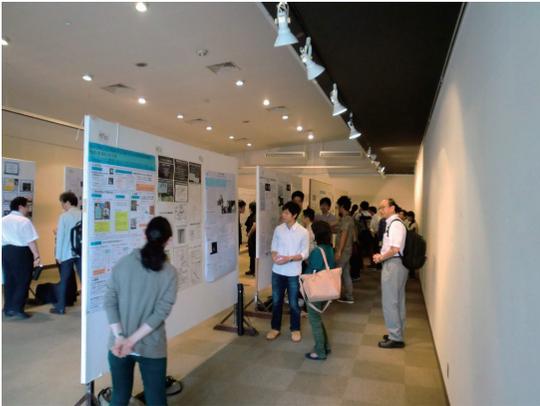


図2：ポスターセッションの様子。



図3：懇親会で踊る参加者の様子。

では、今回さまざまに便宜を図っていただきました石垣市副市長および八重山星の会会長にもお越しいたごき、ご挨拶をお願いしました。

本講演終了後の23日午後には、石垣市教育委員会主催、当学会と国立天文台の共催によって、同じ石垣市民会館大ホールにて一般講演会が行われ、東京大学および国立天文台の田村元秀教授に、「New Worlds：太陽系外惑星観測の最前線」というお話をいただきました。当日は、小学生からご年配の方まで、たくさんの方に参加していただき、また日本スペースガード協会のご厚意で、2月にロシアに落下したチェラビンスク隕石の破片展示を楽しんでいただきました。講演は大変好評で、講演終了後に多くの質問がありました。

学会期間中の委員会や会合は、大ホールの裏側にある楽屋を使用させて頂きました。学会前々日には実行委員会のメンバーは石垣島に入り、国立天文台の水沢

VLBI観測所石垣島天文台で最後の準備作業をさせていただきました。石垣島天文台のスタッフの皆様、また地元の石垣市、石垣市教育委員会、および八重山星の会の皆様には厚く御礼申し上げます。

最後に、国立天文台LOC実行委員として裏方で働いて下さった方々、当日アルバイトに入っていたいただいた学生の皆さん、多くの助言や御指南を頂いた行事部会や情報部会の皆様には、改めてこの場をお借りして深く御礼申し上げます。

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第104回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第40回総会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第104回運営委員会議事録

日 時：2013年11月20日(水) 19:10-21:50

場 所：石垣市民会館楽屋3と4

運営委員：

(出席) 田近英一, 渡邊誠一郎, 倉本圭, 中村昭子, 荒川政彦, 生駒大洋, 渡部潤一, 並木則行, 永原裕子, 千秋博紀, はしもとじょーじ, 平田成, 荒井朋子, 小久保英一郎, 佐々木晶, 城野信一, 小林直樹,
(欠席委任状有) 井田茂, 杉田精司, 橘省吾, 中本泰史, 林祥介, 藤本正樹,

オブザーバー：

木村勇氣(2014年LOC総務)

奈良岡浩(2014年学会賞選考委員会委員)

議題・報告事項：

1. 会計第12期上期中間報告

荒井財務専門委員長より収入支出も順調に進んでいるとの報告があった。

2. 会計第12期下期予算案

荒井財務専門委員長より収入は例年通りとの報告がなされた。特別会計は寄付金に依存している。支出について、EPS分担金の増額および支払い期日前倒して2年分支払うこと、来る10年などの研究会等補助、遊星人のカラーページなどの特記事項の説明がなされた。

80万円のマイナスについて議論がなされ、秋季講演会は収入支出が釣り合うように参加費等の設定を行うこと、遊星人はカラーページと原稿おこしあわせて20万円とすることが決められた。来る10年の要望は取り下げ、恒常的に赤字なのは問題なので対策を考える。

3. 自然災害に伴う会費免除措置等について

荒井財務専門委員長より説明がなされ、適用範囲を、災害救助法の適用とそれに準ずる場合と変更することとなった。

4. 入退会について

平田総務専門委員長より例年通りの定常との報告がなされた。

5. その他総務からの案件(議長・書記等)

平田総務専門委員長より総会の議長として阿部新助会員、書記として黒澤耕介会員が提案され、運営委員会によって承認された。

6. 遊星人の発行状況報告

はしもと編集専門委員長より、つつがなく発行されているとの報告があった。

7. 研究会・部会の消息確認について

千秋情報化専門委員会委員長より、学会サーバー上に名前は残っているが活動の無くなっている会があるので、年一度くらいアンケートして実態を把握し、活動が終わっている会はリンクから外すことが提案され、運営委員会に了承された。

8. 日本地球惑星科学連合の報告

永原日本地球惑星科学連合連携専門委員会委員長より、オープンアクセス化や投稿料など、連合の英語ジャーナルの状況について報告された。また佐々木欧文誌専門委員会委員長よりEPSについて説明が加えられた。EPSはなるべく盛り立てていくことが重要。

来年の連合大会は横浜パシフィコにて4月28日-5月2日の予定。

連合の代議員選挙が行われたことが報告された。今後、連合連携委員会のあり方・位置付けについて考え直す必要がある。連合の変化に合わせて学会のほうも対応をしていく。

9. 来る10年第三段階について

並木将来惑星探査検討グループ長より、来る10年のまとめの方針について説明がなされた。ただ一つのミッションを選ぶことはしないが、現時点でのミッションコンセプトの評価を行う。評価項目・基準について意見を聴く会を開催、コミュニティからの評価を受け付ける。秋季講演会で説明をする。

10. 2013年秋季講演会報告等

渡部2013年秋季講演会組織委員会委員長より報告がなされた。順調に行われており、例年以上の多くの参加者、発表者数があった。主催を石垣市にすることを追認。切り替え器とプロジェクターの相性の関係か、Macを挟むと切り替えが動かず、差し替えロスで時間が押してしまっている。

11. 2014年秋季講演会実施案および東北大学大学院理学研究科との共催について

木村2014年秋季講演会組織委員会総務より説明がなされた。東北大学片平さくらホールにて9月23日-26日に開催。一般講演会を23日に開催する。

1階ラウンジをポスター会場とし、2階会議室196席で口頭発表および総会を行う。中村智樹委員長、東工大サポートの体制で実施。会場光熱費13万円程度、印刷費10万円程度等の予算説明がなされた。東北大学の理学研究科との共催を承認。

12. 最優秀発表賞受賞者の決定

奈良岡学会賞選考委員会委員より2013年度学会賞選考委員会は片岡章雅会員を受賞者として推薦することが報告され、異議なく了承された。

13. 小型惑星探査の検討経過と惑星探査コンソーシアムの検討

荒川将来計画専門委員会委員長より、イプシロンロケットをめぐる状況および継続的惑星探査実現のためのアクションプランに向けて説明がなされ、議論が行われた。

1. 宇宙研の現ワーキンググループのミッションと来る10年の候補ミッションを戦略的に再構成する。
2. 工学との連携による惑星探査計画の立案と実施のための枠組みを構築する。宇宙研の探査ロードマップに太陽系探査科学分野は、最初の約10年を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える。来る10年のメンバーを含めた戦略ワーキンググループを新たに立ち上げる。工学の方も交えて議論し、3号機への提案、4号機以降につながるアイデアを募る。系外惑星などの天文分野や次の世代を取り込み、小型でも国際協力を考える必要がある。
3. 惑星科学コンソーシアムを中心とした継続的な惑星探査を可能にするための環境を構築する。惑星科学研究コンソーシアムミニワークショップを開催。コンソーシアムの具体化に向けて参加予定機関を中心に

継続的に議論を行っている。宇宙研以外でも中心となる拠点組織を決める必要がある。

14. その他

渡部運営委員より、Asteroids, Comets, Meteors 2012(日本惑星科学会後援)が日本政府観光局「国際会議誘致・開催貢献賞」を受賞したことが報告された。

◇日本惑星科学会第40回総会議事録

日 時：11月21日(木) 16:30-17:30

場 所：石垣市民会館大ホール

〒907-0013 沖縄県石垣市浜崎町1丁目1番2

正会員：641名

定足数：64名

参加人数：101名(開会時)、109名(議事3.1採択時)、110名(議事3.2採択時)

委任状：105通(議長：102、佐々木晶会員：1、生駒大洋会員：1、田近会員：1)

1. 開会宣言

平田総務専門委員長が開会を宣言。

2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に阿部新助会員、書記に黒澤耕介会員が選出された。

3. 議 事

3.1. 第12期上期(2013年度)中間報告

・会計報告

荒井財務専門委員長より会計の中間報告が行われた。収入・支出共に順調で、特記事項なし。

また、同じく荒井財務専門委員長より、議事3.2に関わる下半期予算案についても説明が行なわれた。運営委員会での議論の結果、事前準備された配布資料から変更があったため、その内容について説明された(学会webに掲示の会計資料は変更反映済み)。

収入:配布資料の予算案から、秋季講演会の収入を上方修正して昨年度と同等額とした。

前期繰越収支差額の算出方法を説明した(資料備考を参照のこと)。

支出：遊星人関連費用を10万円下方修正した(それでも昨年度よりは多い)。

春山会員より、2012年度決算のうち、講演会事業費額の中の諸謝金額の明細について2013年度、2014年度予算額と比較して特に多いのではないかと質問があった(ただし2012年度決算は第39回総会で承認済み)。荒井財務専門委員長は、講演会事業費は各年度LOCの提出した予算計画をはめ込んでいると説明。

また、同じく春山会員より、秋季講演会での赤字/黒字発生時の取り扱いについての指針を明確にしてほしいとのコメントがあった。

・各種専門委員会報告

・田近会長による初言：イプシロンロケットの打ち上げ能力

「来る10年」で検討しているフラッグシップミッションを行うことはできない情勢となった。10年以内には難しいが、旧M-Vクラスの打ち上げの機会に備えて、また、イプシロンによる小型ミッションの可能性について将来計画委員会で検討すべし、と指示した。

・荒川将来計画委員長による状況報告

- ・会長の指示を受けて検討を開始
 - ・宇宙研の現WGのミッションと来る10年の候補ミッションを戦略的に再構成。担当は並木会員。
 - －イプシロンロケットをどう生かすかがキーとなる
 - ・工学との連携による惑星探査の立案と実施の枠組み構築も重要。担当は荒川会員
 - ・太陽系探査科学の今後の見通し
 - －最初の10年:機動性の高い小型ミッション(イプシロンロケット)
 - －10年後以降:大型ミッション
 - ・12-1月にイプシロンロケットを用いた小型惑星探査に関するシンポジウムを実施する予定
 - －3号機への提案, 4号機以降に繋がるアイデアを募る
 - ・惑星科学コンソーシアムを中心とした継続的な惑星探査を可能にするための環境構築を行う。担当は倉本会員
- ・採 択
- 第12期上期(2013年度)中間報告の採択が行われ、賛成:213(うち出席者108)、反対:0、保留:1により採択された。

3.2 第12期下期(2014年度)予算案

荒井財務委員長より第12期上期(2013年度)会計の中間報告とともに、第12期下期(2014年度)予算案についても説明された。

・採 択

第12期下期(2014年度)予算案の採択が行われ、賛成:214(うち出席者109)、反対:0、保留:1により採択された。

4. 報告事項

4.1 自然災害に伴う会費免除措置について

荒井財務専門委員長より会費免除措置制度の説明と、適用を希望する際の申請方法について説明が行われた。

4.2 学会賞授賞式:2012年度最優秀研究者賞および2013年度最優秀発表賞

4.2.1 審査結果発表

最優秀発表賞には5名が応募し、片岡章雅会員が受賞した。

4.2.2 表彰状贈呈

田近会長より、表彰状と副賞が片岡章雅会員および成田憲保会員(2012年度最優秀研究者賞)に贈呈された。

4.2.3 審査講評

林学会賞選考委員長の代理で奈良岡選考委員より、最優秀発表賞の選考の経緯と講評の説明があった。

4.2.4 受賞者挨拶

片岡章雅会員より最優秀発表賞の受賞者挨拶が行われた。

4.3 2013年秋季講演会の報告

渡部2013年秋季講演会組織委員長より、今年の学会報告が行なわれた。200名を超える参加者で、惑星科学会の秋季講演会史上最高参加者数となった。講演数は194。

4.4 2014年秋季講演会の案内

木村2014年秋季講演会組織委員会総務より、来年の惑星科学会秋季講演会の案内が行なわれた。2014年はLOC東北大学(東工大関係者によるサポート)により、9/23-9/26の日程で、東北大学片平さくらホールで秋季講演会を開催する。

4.5 来る10年第三段階について

並木将来作成探査検討グループ長から「来る10年」検討の報告が行なわれた。

- ・ 検討は第三段階まで到ったが、一方で惑星科学探査をとりまく環境を鑑みると当初の目標は実現し得ない見通しである
- ・ 第三段階での検討の結論を出して、そろそろ一区切りつける時期と認識
- ・ 1つのミッションを選定する代わりに、各ミッションに「成績表」をつけ、惑星科学会としてのフラッグミッションを明示することとした
- ・ 最終報告は来年度の月惑星シンポジウムの時期になる見込み

4.6 その他

佐々木欧文誌専門委員長から、EPSとJpGU新ジャーナル(PEPS)についての報告が行なわれた。両誌とも5年間の科研費を獲得。当面は並立し、両方ともopen access誌となる。学会員は格安の投稿料。

5. 議長団解任

6. 閉会宣言

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2014年3月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

アメテック株式会社カメカ事業部
株式会社五藤光学研究所
有限会社テラパブ
株式会社ニュートンプレス

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a)場所、(b)主催者、(c)ウェブページ/連絡先など。
転記ミス、原稿作成後に変更等があるかもしれません。各自でご確認ください。

2014/04

4/28-5/2 日本地球惑星科学連合2014年大会

- (a)パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市
- (b)公益社団法人日本地球惑星科学連合(日本惑星科学会共催)
- (c)<http://www.jpгу.org/meeting/>

2014/06

6/24-6/28 第16回流れの可視化に関する国際会議(ISFV16)

(a) 沖縄コンベンションセンター, 神奈川県横浜市

(b) 可視化情報学会(日本惑星科学会共催)

(c) <http://www.isfv.org>

編集後記

前号から続いた、特集「月の火成活動からみた熱進化」はいかがでしたでしょうか。「かぐや」によって膨大なデータが取得されはじめてから、はや6年以上が経過しました。これまでに数多くの成果が発表されてきており、現在は月の進化の描像を塗り替えるようなモデルの提案がされている段階にまできています。一方で、この6年間で複数の他国ミッションの成功もあり、月科学の状況は目紛しく変化しています。専門外の方々にも現状の理解を紹介する機会になればと思います、今回の特集を企画させて頂きました。本特集だけ

では月科学の全体像までは読み取れないとは思いますが、現在何が議論されているか、の一端は感じて頂けたのではないかと思います。まだ読まれていないという方はぜひご一読ください。編集後記を読んでいる場合ではありません。

残念ながら、タイミングが合わずに投稿を見送った方もいらっしゃいましたので、また頃合いをみて企画したいと思います。その際はどうか、どうかよろしくお願い致します。

編集委員

はしもと じょーじ [編集長]

諸田 智克 [編集幹事: 特集「月の火成活動からみた熱進化」エディター]

上根 真之、岡崎 隆司、奥地 拓生、木村 勇氣、倉本 圭、小久保 英一郎、生駒 大洋、白石 浩章、杉山 耕一朗、関口 朋彦、田中 秀和、谷川 享行、成田 憲保、本田 親寿、三浦 均、山本 聡、渡部 潤一、渡部 直樹、和田 浩二

2014年3月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第23巻 第1号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 はしもと じょーじ(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A 日本印刷株式会社

発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail: staff@wakusei.jp

TEL: 03-6435-8789/FAX: 03-6435-8790

(連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を個人的な使用の目的以外で複写したい方は、著作権者から複写等の行使の依託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

TEL: 03-3475-5618/FAX: 03-3475-5619

e-mail: kammori@msh.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本惑星科学会へご連絡下さい。