日本惑星科学会誌　遊・星・人

第22巻　第4号

目　次

巻頭言　寺田 健太郎 …… 185

特集「月の火成活動からみた熱進化」

かぐやスペクトルプロファイラが発見した新しいタイプの月の火山砕屑物 …… 186
山本 聡，中村 良介，松永 恒雄，小川 佳子，石原 吉明，諸田 智克，平田 成，その他4名

月の海の玄武岩組成が示唆する月マントルの進化史 …… 194
加藤 伸祐，諸田 智克，山口 靖，大嶽 久志，大竹 真紀子

粘弾性変形理論に基づく月測地データの解釈：月進化史への示唆　鎌田 俊一 …… 200

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

海洋への隕石落下に伴う津波リスク評価 …… 207
後藤 和久，飯嶋 耕崇，和田 浩二，今村 文彦，常 昱

「スペースガード」とは何か　吉川 真，山口 智宏 …… 214

スペースガード観測の現状 …… 222
浦川 聖太郎，高橋 典嗣，浅見 敦夫，西山 広太，奥村 真一郎，坂本 強，その他4名

チェリャビンスク隕石の現地調査報告　高橋 典嗣，吉川 真 …… 228

「フロンティアセミナー・テキスト」地球惑星環境進化論 第2回 …… 234
門屋 辰太郎，渡邉 吉康，関根 康人，田近 英一

「2012年度最優秀研究者賞受賞記念論文」

観測による巨大惑星の軌道進化理論の検証　成田 憲保 …… 242

エポックメイキングな隕石たち その1 ～Allende隕石～　木村　眞，野口 高明 …… 252

系外惑星「遠い世界の物語」その1 ～SEEDSによる太陽型恒星GJ 504を公転する系外惑星の直接撮像～ …… 255
葛原 昌幸，田村 元秀，SEEDS/すばる望遠鏡/AO 188チーム

火の鳥「はやぶさ」未来編 その4 ～C型小惑星をもちかえる～ …… 261
橘 省吾，はやぶさ2サンプラーチーム

一番星へ行こう！日本の金星探査機の挑戦 その21 ～あかつき(PLANET-C)の広報活動～ …… 269
大月 祥子，あかつきプロジェクトチーム

研究会開催報告「衛星系研究会：衛星観測から探る衛星形成環境」 …… 274
谷川 享行，奥住 聡，木村 淳，倉本 圭，大槻 圭史

2013年度 惑星科学フロンティアセミナー参加報告　木内 真人 …… 277

「ALMAを利用した太陽系天体観測セミナー」開催報告　佐川 英夫，中川 広務，前澤 裕之 …… 280

はやぶさシンポジウム2013開催報告　安部 正真 …… 284

新刊書評　関根 康人 …… 286

JSPS Information …… 288

表紙デザイン：BROOKS

Contents

Preface K. Terada **185**

Special issue : Lunar volcanism and thermal evolution

A new type of pyroclastic deposit on the Moon revealed by the Spectral Profiler onboard Kaguya/SELENE
S. Yamamoto, R. Nakamura, T. Matsunaga, Y. Ogawa, Y. Ishihara, and 6 authors **186**

The thermal and structural evolution of the lunar mantle indicated by the composition of lunar mare basalts
S. Kato, T. Morota, Y. Yamaguchi, H. Otake, and M. Ohtake **194**

Interpretations of lunar geodetic data based on viscoelastic deformation theory : Implications for the lunar evolution S. Kamata **200**

Special issue : Chelyabinsk superbolide/meteorite fall and Impact risks

Tsunami risk assessment for the oceanic impact on Earth
K. Goto, Y. Iijima, K. Wada, F. Imamura, and Y. Chang **207**

What is Spaceguard ? M. Yoshikawa and T. Yamaguchi **214**

Status of spaceguard observations
S. Urakawa, N. Takahashi, A. Asami, K. Nishiyama, S. Okumura, and 5 authors **222**

Report on field survey in the Celyabinsk meteorite
N. Takahashi and M. Yoshikawa **228**

Evolution of surface environments of the Earth and terrestrial planets : II
S. Kadoya, Y. Watanabe, Y. Sekine, and E. Tajika **234**

Observational testing for giant planet migration theories N. Narita **242**

Epoc-making meteorites (1) —Allende meteorite—
M. Kimura and T. Noguchi **252**

Tales of distant exoplanet worlds (1)
—Direct imaging of an extrasolar planet in orbit around the sun-like star GJ 504—
M. Kuzuhara, M. Tamura, and SEEDS/Subaru Telescope/AO 188 team **255**

Phoenix "Hayabusa" : A tale of the future (4)
—Bringing back pristine sampled from a C-type asteroid—
S. Tachibana and Hayabusa2 Sampler Team **261**

Road to the first star : Venus orbiter from Japan (21)
—Education and public outreach activities—
S. Ohtsuki and AKATSUKI Project Team **269**

Report of Workshop on Satellite Systems
T. Tanigawa, S. Okuzumi, J. Kimura, K. Kuramoto, and K. Ohtsuki **274**

Report of Planetary Science Frontier Seminar 2013 M. Kiuchi **277**

A report on the seminar for solar system observations using ALMA
H. Sagawa, H. Nakagawa, and H. Maezawa **280**

Report of The 1st Symposium of Solar System Materials M. Abe **284**

Book review Y. Sekine **286**

JSPS Information **288**

←目次へ

巻頭言

不 易 流 行

【不易流行】いつまでも変化しない本質的なものを忘れない中にも，新しく変化を重ねているものをも取り入れていくこと．また，新味を求めて変化を重ねていく流行性こそが不易の本質であること(Goo辞書)．

巻頭言の依頼があった時，正直，荷が重いと思ったのだが，まあそういう年齢になったということなのだろうとお引き受けする事にした．駄文散文，ご容赦頂きたい．

惑星科学の面白みの１つは，普遍性と多様性(特殊性)の絶妙なバランスだと思っている．ほぼ同じ材料物質からできた地球型惑星の進化と現在の多様な姿はその最たる物である．1995年以降，続々と太陽系外惑星が発見され(本稿執筆時に1000を超えた)，惑星形成は普遍的なプロセスであることが明らかになった一方で，「われわれの太陽系は，あまねく存在する多様な惑星系の一形態にすぎない」というパラダイムシフトが起こった．「水」惑星とよばれる地球の誕生と進化が普遍的であるならば，この広い宇宙に生命体が我々だけってことはあり得まい．だとすれば，生物進化にも卓越した普遍性が存在するのだろうか(地球型生命と似た形態)，はたまた多様性が効くのだろうか(全く未知の生命形態)，興味は尽きない．2011年には主星の束縛を受けない浮遊惑星なる物まで発見され，我が銀河系に恒星と同程度(10^{11}個)も存在するという(Sumi et al. Nature 2011)．惑星の概念を根底から覆すようなコペルニクス的転回点に，我々は差しかかっているようである．

さて，話は変わるが，学会や科学界の進化発展にも，普遍性と多様性の絶妙なバランスが重要だと思っている．より遠くを観る(望遠鏡)，より小さいものを観る(顕微鏡)，より遠くに行く(探査)，より濃度の低い物を観る(高感度化)，より短時間の変化を観る・より早く計算する(高速度化)，などは普遍的な技術進化の方向性であろう．しかし，大型予算がついて，猫も杓子も同じ市販装置を購入する風潮は，学会や科学界の研究スタイルが画一化することを意味し，健全とは言えない．科学の発展には多様性も不可欠で，例えば「ビッグピクチャーを描ける人材」と「重箱の隅を緻密に研究できる人材」が共存共栄し，両輪となって学問分野を牽引するべきである．

先人方のご尽力で1992年に発足した日本惑星科学会も人間に例えると，もう「成人」．今後，成熟した「大人の学会」へと持続的に進化発展を続けるには，不易流行の精神で，「10を15や20に発展させる」メインストリームを踏襲しながら，「０から１を生み出す」萌芽的なminorityにも優しい時空間を醸成することが必要不可欠である．外縁天体のようなminor bodiesや，他分野から参入してきた，どこの派閥にも属さない「浮遊惑星」にもハビタブルな学会であって欲しいものである．

10月某日 泡盛のグラスを傾けながら...

寺田 健太郎(大阪大学大学院理学研究科)

←目次へ

特集「月の火成活動からみた熱進化」

かぐやスペクトルプロファイラが発見した新しいタイプの月の火山砕屑物

山本 聡[1]，中村 良介[2]，松永 恒雄[1]，小川 佳子[4]，石原 吉明[2]，諸田 智克[4]，平田 成[3]，大竹 真紀子[5]，廣井 孝弘[6]，横田 康弘[1]，春山 純一[5]

2013年9月18日受領，2013年11月1日受理.

（**要旨**）かぐや搭載のスペクトルプロファイラを使った観測により，熱の入江にある火山砕屑物で，可視域の吸収および2 μm付近に強い吸収を示す珍しい反射スペクトルを見つけた．スペクトル解析の結果，これらのスペクトルは，鉄およびクロムに富むスピネルを含む火山砕屑物によるものであると考えられる．月面上の他の火山砕屑物領域ではこのような物は見つからないことから，熱の入江は月の中でも特殊な火成活動があった場所であると考えられる．

1. はじめに

月周回衛星「かぐや」など各国の最近の月探査衛星による連続反射スペクトル観測により，月の主要鉱物（輝石・斜長石・カンラン石等）やマグネシウムが支配的なスピネル※1（以下ではMgスピネルと呼ぶ）に富む場所の全球分布が明らかにされつつある[e.g. 1-6]．これらの鉱物は，波長0.8 μm～2.3 μmにおいて特徴的な吸収（以下では，1 μm吸収および2 μm吸収と呼ぶ）を示す．一方，1 μmおよび2 μm吸収以外に可視域の0.6-0.7 μmに特徴的な吸収（以下では可視吸収と呼ぶ）を示す鉱物の存在が知られている．例えば，層状珪酸塩[7]，火山ガラスの一つであるブラックビーズ[8]，チタン鉄鉱[8,9]，衝突溶融物[10]，単斜輝石[11]，スピネル族の一部[12]等である．しかしこれまで，月面上において明らかな可視吸収を持つスペクトルが観測されたという報告はない．一例，ガリレオ探査機によるマルチバンド観測（連続波長ではなく，離散的な特定波長帯での反射スペクトル観測）によって，可視吸収に似たものが見つかったという報告があるが，その真偽についてはよく分かっていない[7]．というのは，可視吸収は1 μm吸収や2 μm吸収と比べて吸収深さが浅いため，マルチバンド観測では信頼のおける判断は難しいからである．

そこで，我々はかぐや搭載のスペクトルプロファイラ（以下SP）[1]の連続反射スペクトルデータを使って，月面上における可視吸収の捜索を行った[13]．その結果，顕著な可視吸収を示す特定領域を発見することができたが，その地質的およびスペクトル的特徴を詳しく調べていくと，月の火成活動に関わる興味深い事実に繋がることが分かった．そこでここでは，SPによる可視吸収の発見についての紹介と，そこから推定される月の火成活動について議論したいと思う．

1. 国立環境研究所
2. 産業技術総合研究所
3. 会津大学
4. 名古屋大学
5. JAXA/ISAS
6. ブラウン大学
yamachan@gfd-dennou.org

※1. スピネル鉱物は，酸素の立方的パッキングの4面体席（A）と8面体席（B）をAB_2O_4の比で持つ鉱物である．月面に産出するスピネル鉱物は，A席をFeやMgがほとんどを占め，B席をCr, Al, Tiが濃集する傾向にあり，$FeCr_2O_4$（クロム鉄鉱），Fe_2TiO_4（ウロボスピネル），CrとMgを少し含む$FeAl_2O_4$（クロム・プレオネイスト）などの固溶体となっている．

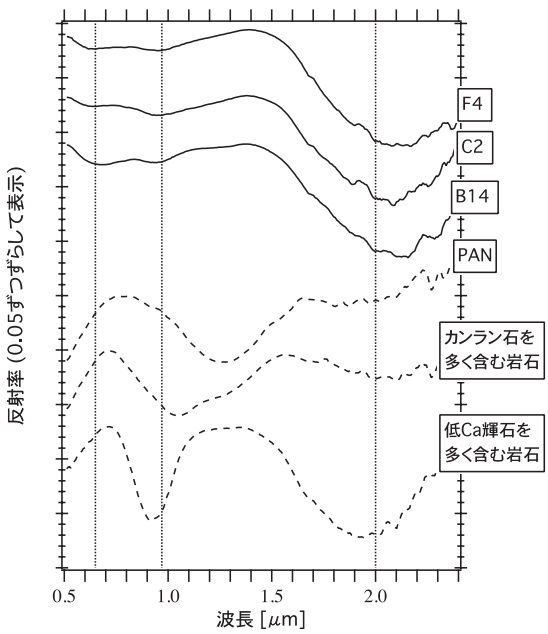

図1：SPが見つけた可視吸収を持つスペクトルの例(実線；F4, C2, B14は図3で示されている検知地点)．ここでは反射スペクトルから連続光成分(コンティニューム)を引いた後のスペクトルを示している．比較のため，SPによって月の他の場所で発見された，極めて純度の高い斜長石(Purest AnorthositeまたはPAN)，カンラン石を多く含む岩石，低Ca輝石を多く含む岩石の反射スペクトルも示した(破線)．縦点線は0.65 μm，0.97 μmおよび，2.0 μmに相当．

2. 月面上で可視吸収を示す特定領域の発見

2.1 SPデータによる可視吸収サーベイ

SPは月全球にわたって連続反射スペクトル観測を行った．その為SPの全データ(約7000万スペクトル)を解析することで，特定鉱物の月表面分布を明らかにすることができる．実際に，SP全データを使った特定スペクトルサーベイ研究により，極めて純度の高い斜長岩(Purest AnorthositeまたはPAN)が支配的な領域[1,3,5]，低Ca輝石を多く含む岩石が支配的な領域[2]，およびカンラン石を多く含む岩石が支配的な領域[4]の月全球分布が明らかにされている．

今回は，これと同じく全SPデータから可視吸収を持つスペクトルだけを探しだすということを行った．このスペクトルサーベイでは，全SPデータの中で波長0.5-0.8 μmの反射スペクトルが下に凸になっているデータだけを選び出している．図1にSPで発見された可視吸収の例を示す．0.8 μmより短波長側に注目すると，0.65 μmを中心に下に凸になっている浅い吸収を見ることが出来る．一方，PANや，低Ca輝石を多く含む岩石やカンラン石を多く含む岩石の場合，この波長域では鉱物種によらず上に凸になっており，可視

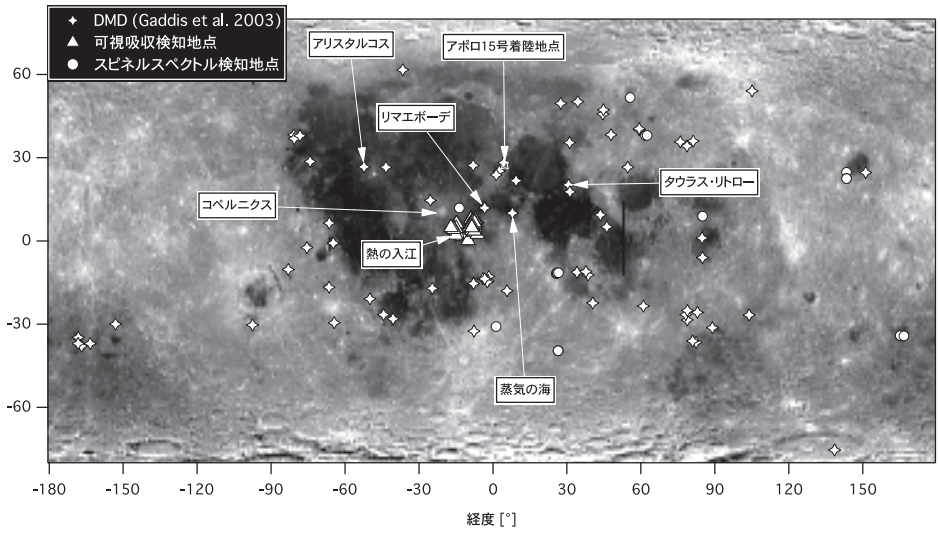

図2：可視吸収が見つかった70箇所の全球分布(△点)．背景の図はかぐやSPの750nmで作成されたアルベドマップ．また顕著な2 μm吸収を示すスピネルスペクトルが見つかった場所を○点で示す．比較のために月面上の代表的なDMD(75箇所)[8]の分布も示した(◇印)．また本文中で引用されるDMD及びアポロ15号の着陸地点について場所と名前も記した．

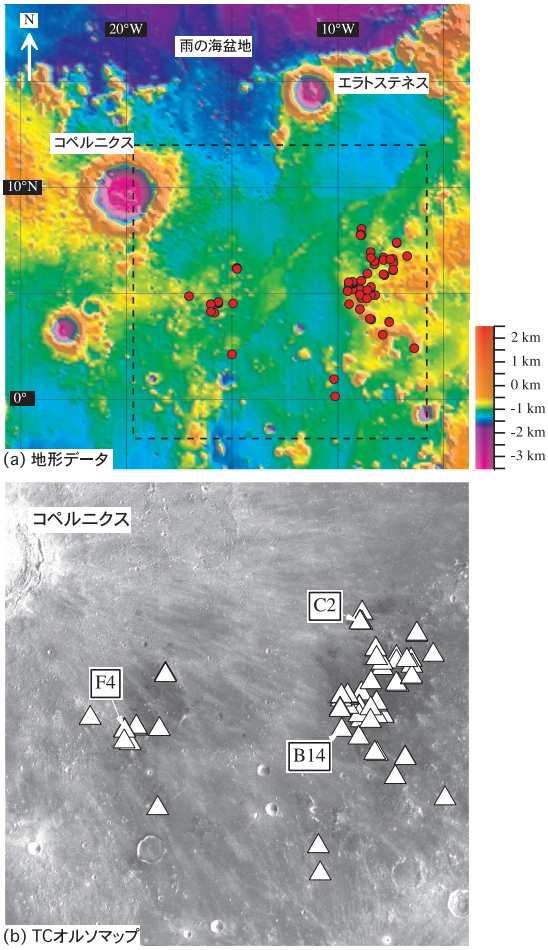

図3：(a)可視吸収が見つかった70箇所(○点)．背景の図はかぐや地形データ[15](白黒でわかりにくい場合は，電子版や[13]のカラー図を参照していただきたい)．(b)(a)図の点線で囲まれた領域について拡大した分布図．背景はTCによるアルベドモザイクマップ[14]．黒っぽい部分(熱の入江の火山砕屑物領域)にそって検知地点(△点)が分布している．

吸収とは明らかに特徴が異なる．つまり1 μmや2 μmの特徴に関わらずこの可視域にのみ注目することで，可視吸収を持つスペクトルだけを選別することが可能となる．もちろん，このような解析が出来るのはSPの持つ高い波長分解能と高いS/Nによるものであることは言うまでもない(従来のマルチバンド観測では不可能である)．

2.2 可視吸収を示す場所の全球分布と顕著な2 μm吸収

上記のアルゴリズムを7000万スペクトルに対して適用すると，わずか70スペクトルだけが選別された

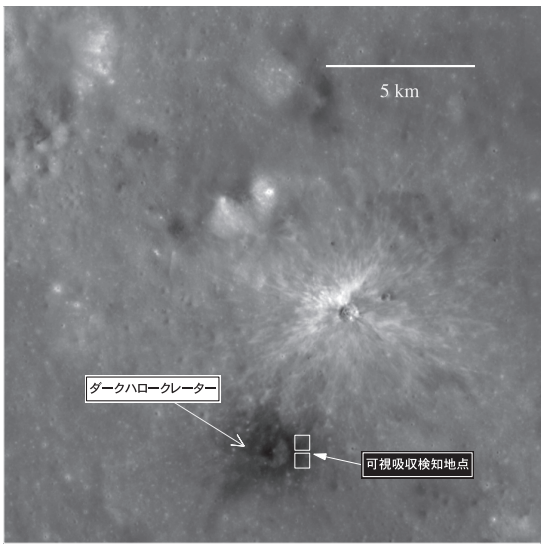

図4：可視吸収が検知された領域においてMIの波長750 nmバンドで撮像された反射率画像．四角(約500m×500mのSPのフットプリントサイズに相当)で示した二箇所が可視吸収の検知地点．これらは暗いダークハロークレーターの上に相当している．

(全SPデータのわずか0.0001% ‼)．面白いことに，検知された70スペクトルは，月面上の限られた領域(コペルニクスクレーターの東南方向)でのみ見つかることがわかった(図2)．また，局所的に見ると(図3)，地形的に高地に分布しており，海に覆われている領域では見つからない事がわかった(印刷物の図3が白黒でわかりにくい場合は，電子版のカラー図を参照していただきたい)．さらに，地形カメラ(TC) [14]によるアルベドモザイクマップと比較すると，可視吸収を示す場所は，比較的暗い領域にそって分布しているのがわかる．実はこの暗い領域は，熱の入江と呼ばれる火山砕屑物からなるダークマントル堆積物(DMD = Dark Mantle Deposit)に相当する．DMDは地球の火山で言えばハワイで見られるような火の噴水(Fire Fountain)による噴火によって撒き散らされたマグマの飛沫が周辺に堆積して形成したものと考えられている[8]．また，各検知地点についてTCやマルチバンドイメージャー(MI) [3]を使って詳細解析を行った所，いずれも暗い火山砕屑物の上でのみ見つかることが分かった．例えば，図4では，ダークハロークレーター(表層の下にある黒い物質(この場合は火山砕屑物)が衝突により表面に撒き散らされたもの)が見られるが，可視吸収が見つかるのはこの上のみであり，他の明るい

場所では一切見つからない．他の68箇所の検知地点についても同様に，MIまたはTCによる詳細解析を行った所，いずれも図4のように暗い火山砕屑物と解釈されるものの上でのみ見つかることが分かった．

さらにこれらの可視吸収を示すスペクトルは，顕著な2 μm吸収を示すという特徴を持つ．図1の代表的なスペクトルでは，いずれも2 μm付近に非常に深い吸収がみられる．また2 μm吸収に比べると吸収深さは弱いが，1 μm吸収も見ることが出来る．ここで思い出していただきたいのが，今回のスペクトルサーベイのアルゴリズムでは0.8 μmより長い波長のデータは使用していないにも関わらず，検知されたスペクトルはいずれも顕著な2 μm吸収を示すことである．つまり可視吸収と顕著な2 μm吸収は同じ物質からのものである可能性が高いと考えられる．

ところで，顕著な2 μm吸収を示す鉱物としてスピネルが挙げられる．実際月面上で見つかっているMgスピネルを多く含む岩石に富む場所は非常に強い2 μm吸収を示す[e.g. 6]．そこで可視吸収を示すスペクトルが見つかった場所とスピネルに富む領域の関連について調べるために，2 μm吸収に着目した「スピネルスペクトルサーベイ」を行ったところ，7000万スペクトルのうち，スピネルスペクトルが87箇所で見つかった(サーベイの詳細は[13])（検知地点について図2に表示した）．その結果，(1)それらの検知地点は過去に報告がされているMgスピネルが見つかった場所を含むこと，(2)熱の入江で見つかるスペクトルスペクトルは可視吸収を示すが，他の場所で見つかるスピネルスペクトルでは可視吸収は一切見られないこと，(3)熱の入江以外のDMDではそもそもスピネルスペクトルが見つからない事が分かった．

2.3　可視吸収を示す物質の正体

可視吸収と同時に顕著な2 μm吸収を示す物質の正体はなんなのであろうか？上でも述べたように，可視吸収を示す鉱物としては(a)層状珪酸塩，(b)衝突溶融物，(c)ブラックビーズ，(d)チタン鉄鉱，(e)単斜輝石や(f)スピネル族が考えられる．一方，今回見つかったものはいずれも火山砕屑物の中で見つかることから，(a)や(b)の可能性は極めて低いと考えられる．また，(c)や(d)は2 μm吸収を示さない[8,9]ことから，SPが見つけたものとは異なる．さらに(e)であるが，地球上に存在する単斜輝石の中でFe^{3+}による可視吸収と2 μm吸収の両者を示すものがあることが知られ

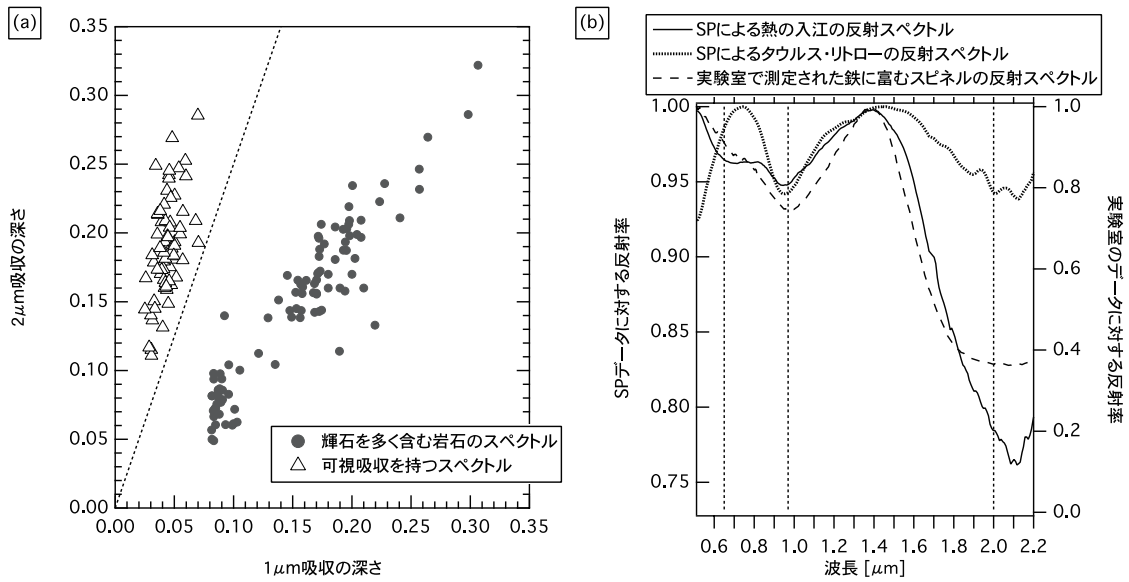

図5：(a)可視吸収を持つスペクトルの2 μm吸収と1 μm吸収の深さ比(△印)．点線は深さ比が0.4の場合の直線．SPによって発見された輝石を多く含む岩石が支配的な領域に対するデータ(●印)と比べると，可視吸収を持つスペクトルでは，2 μm吸収の深さが1 μm吸収とくらべて非常に深い．(b)SPが見つけた可視吸収を持つスペクトル(実線)と実験室で測定された鉄に富むスピネルのスペクトル(破線)の比較．両者は0.65 μmや1 μm，2 μmでの吸収特性(縦点線)がよく似ている．一方，他のDMD(e.g.,タウラス・リトロー)のスペクトルとは似ていない(薄い点線)．

ている[11]．しかし，1 μmと2 μm吸収の深さの関係について調べてみると，今回見つけたスペクトルの持つ1 μmと2 μm吸収の深さ比の特徴は，輝石が多く含まれる岩石とは明らかに異なる(図5(a))．

結局何が候補として残るかというと(f)であるが，確かに，スピネル族の中に可視吸収を示しかつ顕著な2 μm吸収を示す鉱物がある[9,12]．例えばウルボスピネルがあげられる．しかし，ウルボスピネルは波長1 μmや1.5 μmで反射スペクトルの急増を示すため[9]，図1でみたように1 μm吸収をもつスペクトルの特徴とは相容れない．一方，鉄やクロムに富むスピネル(e.g., 鉄スピネルやクロム鉄鉱)は可視吸収，適度な1 μm吸収，顕著な2 μm吸収を併せ持つ[12]．実際，図5(b)のように，実験室で測定された鉄に富むスピネルの反射スペクトルと比較すると，SPが見つけたスペクトルと非常に似た特徴を示す．さらに70スペクトルの中には可視吸収，1 μm吸収，2 μm吸収に加えて，1.3 μmに弱い吸収を示すものが見つかる(例えば，図1のB14)が，それらはクロム鉄鉱の特徴であることが知られている[12]．以上のことから，我々は，この熱の入江の火山砕屑物中には，鉄やクロムに富むスピネルが大量に含まれると結論づけた(より詳しいスペクトルに対する考察は[13])．

2.4 熱の入江の特殊性

月には多数のDMDが存在する(図2)．しかし従来の研究で，熱の入江だけが特殊であるというような報告はなかった．例えば，クレメンタイン探査機によるマルチバンドデータを使ったDMDの分類研究によると，熱の入江はチタンの量が高く，またブラックビーズを大量に含むという点で，タウラス・リトロー，リマエボーデ，蒸気の海のDMDと同じ分類であると報告されている[8]．一方，今回のサーベイで熱の入江以外のDMDでは可視吸収および顕著な2 μm吸収を示すスペクトルは見つかっていない．実際に幾つかのDMDについて直接反射スペクトルを調べてみても，可視吸収は見つからなかった(図5(b)にタウラス・リトローの反射スペクトルの例を示す)．ところで，PANやカンラン石に鉄およびクロムに富むスピネルが含まれている場合は，浅い吸収である可視吸収が見えなくなることが予想される．しかし，その場合でもスピネルの持つ顕著な2 μm吸収は観測されることになる．一方，2.2章で見たように熱の入江以外のDMDでは顕著な2 μm吸収を示すスペクトルは見つからなかった．つまり，月面上に数多くあるDMDの中で，熱の入江のDMDだけが鉄やクロムに富むスピネルを大量に含むということである．なお月面上では別のスピネル族であるMgスピネルが支配的な場所が多数見つかっているが，いずれも衝突クレーター構造に付随しており[e.g.6,13]，他のDMDでは一切見つかっていない(なおMgスピネルは可視吸収を示さない[12])．以上のことから，熱の入江は月面上で大量のスピネルが見つかる唯一のDMDであり，他では観測されていない鉄およびクロムに富むスピネルを持つ極めて特殊な火山砕屑物からなるということが分かった．

3. 熱の入江で起きた火成活動

この熱の入江のDMDの特殊性は何によって作られたのだろうか？残念ながら，我々は確固たる答えをまだ持っていないが，現時点でわかりうる限りの事実に基づき，ありそうなシナリオ(仮説)について議論してみたいと思う．

3.1 熱の入江の形成史

最初に，この熱の入江の形成史について考察を行ってみたいと思う．まず，これらの火山砕屑物が分布している領域は地形的に高地に位置する事がわかっている(図3(a))．ただし，高地に位置するがゆえに起伏があることと，火砕堆積物起源のレゴリス層は他のレゴリスと比べて比較的ルーズであり，数百メートルサイズのクレーターの保存状態が良くないことから，DMDが堆積した年代をクレータ年代学から直接的に決定する事は難しい．一方，DMD領域と海の南西側の境界をみると地形との対応が良いことから，この一帯に堆積したDMDを雨の海からの玄武岩溶岩が覆い隠しており，高い場所に堆積したDMDだけが海に覆われずに残ったと考えられる．従って，その層序関係をもとに，DMDが堆積している高地とDMD南西の海の年代を調べることで，形成年代の上限および下限を与えることができる．そこでTCの画像データを使ってDMDが堆積している高地とDMD南西についてクレーターのサイズ分布測定を行った．その結果を図6に示す．概ね，高地におけるクレーター個数密度は

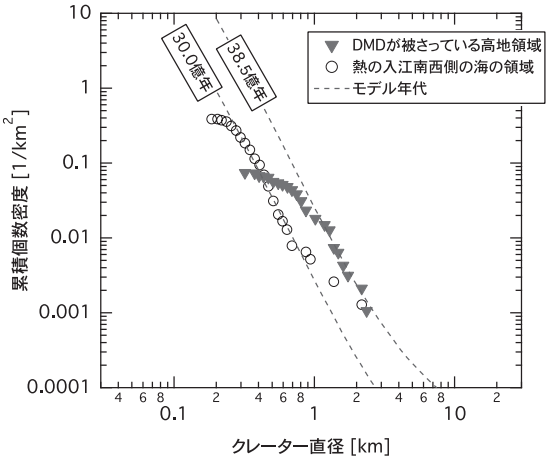

図6：熱の入江DMD の南西側の海（◯印）およびDMD の高地（▼印）におけるクレーターサイズ頻度分布．目安として30.0億年および38.5億年のモデル年代を破線で示した．

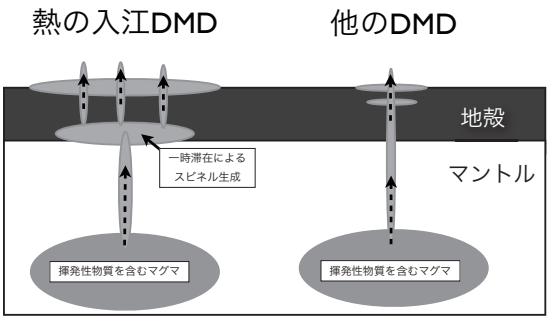

図7：熱の入江DMDの生成シナリオのポンチ絵．他のDMDとの違いは，下部地殻の深い所（10km 以深）での一時滞在によるスピネル生成過程の有無．

海のものと比べて高いことがわかるが，数100 mの大きさでは保存が良くないため海領域の個数密度よりも少なくなっている．このデータに対してモデル年代解析[16]を行ったところ，高地の年代は約38.5（+0.6/－1.1）億年で，海領域は31.7（+1.2/－2.6）億年と見積もられた．これより熱の入江DMDの形成年代は31.7～38.5億年前と考えられる．なお，この高地の年代は，雨の海盆地の形成年代38.5億年[17]とよい一致を示す．以上のことより，以下の様な形成史が考えられる．まず今から38.5億年前に雨の海盆地が形成され，その周辺に放出堆積物による高地領域が形成された．その後，火山砕屑物が噴出しこの周辺一帯に大規模なDMDが形成されたが，31.7億年前に吹き出した玄武岩の海がこの一帯の低地を埋め尽くし，現在我々が観測している熱の入江の姿を形成したと考えられる．

もしこの解釈が正しいとすれば，図3で見たように熱の入江が東西にわかれている理由は，単純にその間の低地が玄武岩の海で覆われたことが理由と考えられる．つまり，雨の海盆地の形成後，鉄やクロムに富む火山砕屑物はかなり大規模に噴出し，高地だけでなく低地も含めこの周辺一帯を埋め尽くした．しかし31.7億年程前に流れ出てきた玄武岩の海が低地の火山砕屑物に覆いかぶさり，熱の入江DMDを東西にわけた可能性が考えられる．実際，可視吸収は熱の入江の東側と西側の両方で見つかっているが（図3），それらの反射スペクトル特性に違いは見られなかった（例えば図1のC2とF4）．また，約10億年前に形成されたコペルニクスクレーターの放出物が上に覆いかぶさったことを考えると，元々の火山砕屑物はさらに大規模に広がっていた可能性も考えられる．たとえば仮に熱の入江がコペルニクス領域も含めこの一帯10度×10度程度の領域に広がっていたとすると，その総面積は約9万km^{2}になる．これはタウラス・リトロー（2,940 km^2）やリマエボーデ（6,620 km^2）のように月の代表的なDMDと比べても桁違いの大きさであり，さらに[8]において最も大きいとされているアリスタルコスDMDの49,013 km^{2}をも凌ぐ大きさである．つまり，この領域で起こった鉄やクロムに富むスピネルを含むマグマの噴出は，月面上で最大規模の噴出イベントであった可能性が考えられる．

3.2　成因

鉄またはクロムに富むスピネルを大量に含む火山砕屑物の成因はなんであろうか？最近行われた室内実験によれば，アポロ15号着陸地点で見つかったグリーンガラス組成のマグマと斜長岩組成の岩石が，地下10 kmより深い所で反応すると，鉄に富んだ（>5 wt%）スピネルが生成されると報告されている[18]．このことより，成因シナリオとして，以下のようなものを提案したい．まず，今から32億年以上も前に，マントル中の深い所で生成したマグマが表面に向かって上昇するが，熱の入江ではなんらかの理由で10 kmより深いところの下部地殻で一時的に滞在した（図7）．そこで下部地殻の斜長岩と反応することで，鉄やクロムに富むスピネルが生成される．一方，その後においても，深部から上昇してきた揮発物質が下部地殻に滞

在中のマグマにどんどん追加される．時間が経つにつれマグマ中の揮発性物質の割合も増え，ある臨界点を超えたところで月面最大規模の噴出を起こし，大量の火山砕屑物によるDMDが形成された．一方他のDMDでは，マグマの下部地殻での一時滞在は10 kmよりも浅い領域で起こった(または一時滞在そのものがなかった)ため，鉄やクロムに富むスピネルが生成されなかった．つまり，下部地殻におけるマグマの一時滞在の深さによる違いが，熱の入江DMDの特殊性を作った要因ではないかという仮説である．

残念ながら我々はこの成因シナリオに対して決定的な証拠をもっているわけでないので，そもそも10 kmより深い所での一時滞在が何故ここでだけ起こったのかも含め今後様々な検証を行う必要がある．一方で，もしこのシナリオが正しいのであれば，この熱の入江を生成したマグマには，地下深部で大量の地殻物質を溶かしこんでもなお，DMDとして噴出するのに十分な割合の揮発性物質を含んでいた可能性が高い．つまり，この熱の入江には水などの揮発性物質がそれなりに高い割合で含まれることが期待される．実際Saalたちによって，グリーンガラス内部に水が含まれることが報告されている[19]．また同位体解析によれば，それらの水は彗星起源ではなくC型小惑星に近いものであることが報告されていることから，それらの水は彗星などにより外部から持ち込まれたものではなく，月マントルの深部起源である可能性が高い[20]．つまり，地球-月系の形成時または直後に月深部に取り込まれた揮発物質が月の深部に保持されていると考えられるわけである．そのような水を多く含む可能性のある熱の入江の火山砕屑物に対するサンプルリターンを行うことにより，太陽系の初期情報とりわけ地球-月系における揮発性物質に関する貴重な資料を得ることができると期待できる．このような事から将来探査候補地点として熱の入江は非常に興味深い場所であると我々は考えている．

4. まとめ

かぐや搭載のスペクトルプロファイラを使った観測により，熱の入江にある火山砕屑物で，可視域の吸収および2 μ m付近に強い吸収を示す反射スペクトルを見つけた．スペクトル解析の結果，これらは鉄およびクロムに富むスピネルによるものであると考えられる．月面上の他の火山砕屑物ではこのような物は見つからないことから，熱の入江は月の中でも特殊な火成活動史を持つ領域である可能性が高い事がわかった．その成因については今後様々な面から議論されていくことが重要だろう．またそこからのサンプルリータンは地球-月系の揮発性物質の起源に関して重要な情報を持たらしてくれることが期待される．

謝 辞

鉱物学的解釈を進める上で有益なコメントを頂きました武田弘先生に感謝いたします．また査読者として数多くの有益で建設的なコメントをして頂きました佐伯和人先生に感謝致します．

参考文献

[1] Matsunaga, T. et al. 2008, Geophys. Res. Lett. 35, L23201.
[2] Nakamura, R. et al. 20, Nature Geoscience 28, NGEO1614.
[3] Ohtake, M. et al. 2009, Nature 461, 236.
[4] Yamamoto, S. et al. 2010, Nature Geoscience 3, 533.
[5] Yamamoto, S. et al. 2012, Geophy. Res. Let. 39, L13201.
[6] Pieters, C.M. et al. 2011, J. Geophys. Res. 116, E00G08.
[7] Vilas, F. et al. 2008, Earth Planets Space 60, 67.
[8] Gaddis, L.R. et al. 2003, Icarus 161, 262.
[9] Reiner, M.A. et al. 2009, Geophy. Res. Lett. 36, L02201.
[10] Tompkins, S. et al. 1997, Lunar Planet. Sci. XXVIII, abst 1255.
[11] Cloutis, E.A. and Gaffey, M.J. 1991, J. Geophys. Res. 96, 22809.
[12] Cloutis, E.A. et al. 2004, Meteoritics & Planetary Science 39, 545.
[13] Yamamoto, S. et al. 2013, Geophys. Res. Lett. 40, doi: 10.1002/grl.50784.
[14] Haruyama, J. et al. 2008, Earth Planets Space 60 (4), 243.

[15] Araki, H. et al. 2009, Science 323, 897.
[16] Morota, T. et al. 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L21202.
[17] Stoffler, D. et al. 2006, in New Views of the Moon (eds Jolliff, B.L. et al.), 60, 519 (The Mineralogical Society of America).
[18] Prissel, T.C. et al. 2012, Lunar Planet. Sci., XLIII, Abstract, 2743.
[19] Saal et al. 2008, Nature 454, 192.
[20] Saal et al. 2013, Science 340, 1317.

特集「月の火成活動からみた熱進化」

月の海の玄武岩組成が示唆する月マントルの進化史

加藤 伸祐[1]，諸田 智克[1]，山口 靖[1]，大嶽 久志[2]，大竹 真紀子[2]

2013年9月18日受領，2013年10月30日受理.

（**要旨**）固体惑星の形成と進化の体系的な理解に向けて，地球型惑星の小型端成分である月の初期進化を理解することは重要である．しかし，月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の大規模な構造変化の有無については未だに良く分かっていない．その解決の方法として，月の海の玄武岩の組成を調べることは非常に有効である．海の玄武岩の組成と噴出年代との関係からマントルの水平・鉛直方向の組成に関する情報が得られる可能性があり，それによって月マントルの進化モデルを制約できると期待される．そこで我々は，月周回衛星「かぐや」搭載のマルチバンドイメージャによる分光データから算出された溶岩流のチタン含有量と，噴出年代との関係を調べた．本論文では，その成果とそこから考えうる月マントルの進化シナリオについて考察する．

1. はじめに

月は地球型惑星の小型端成分であり，月の進化を理解することは地球型惑星の進化の理解に必要不可欠である．ところが，月の進化史については未だに理解されていないことが多い．例えば，月の初期の主要イベントであるマグマオーシャンからの固化過程や，マントルオーバーターンの様な大規模な構造変化が起こったかどうかについてはよく分かっていない．

月の起源を説明する有力なモデルとして，現在最も広く受け入れられているのが巨大衝突仮説である[1]．衝突による莫大なエネルギーのため，形成当時の月はマグマオーシャンと呼ばれる全球が溶融した状態であったと考えられている．次第に冷えるにつれてマグマオーシャンからまず始めに晶出するのはかんらん石や輝石であり，これらの鉱物は液相に比べて密度が大きいため，沈んでマントルを形成する．その後，マグマオーシャンの固化が進むにつれて，斜長石が晶出，浮上し，地殻を形成した．さらに固化が進むと，チタンを多く含むイルメナイト（$FeTiO_3$）が晶出し始め，最終的に残液にはKREEP（カリウム－希土類元素－リンの総称）と呼ばれる元素群が濃集した．このようにしてつくられた月マントルの組成は深部では低チタン，浅部では高チタンであったと考えられる．

マグマオーシャンからの固化に伴ってマントルの上部に濃集したイルメナイトは下部のマントルに比べて密度が大きいため重力的に不安定な状態であったと考えられる．そのため，マントルの密度構造の逆転が起こったことが指摘されており，これはマントルオーバーターン仮説と呼ばれる[2]．もしこの仮説が正しいならば，構造変化によって上部マントルに多く含まれていたチタンは深部に沈み込んだはずであり，深部ほど組成は高チタンとなったであろう．マントルオーバーターンは月の表裏の二分性形成やダイナモの駆動，マントル再溶融の原因となったことが指摘されており[3-5]，このようなマントルの密度逆転が起こったかどうかはその後の月進化を左右した重要な問題である．

海の玄武岩にはチタン含有量に多様性がある．この多様性はマントルの組成不均質を反映していると考えられ，マントル内でのチタン含有量の分布を理解することがマントルオーバーターンの有無や，その後の月マントルの進化過程を制約する重要情報をもたらすと期待される．月の3次元熱史計算研究によると[6]，月

1. 名古屋大学大学院環境学研究科
2. 宇宙航空研究開発機構
katou.shinsuke@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

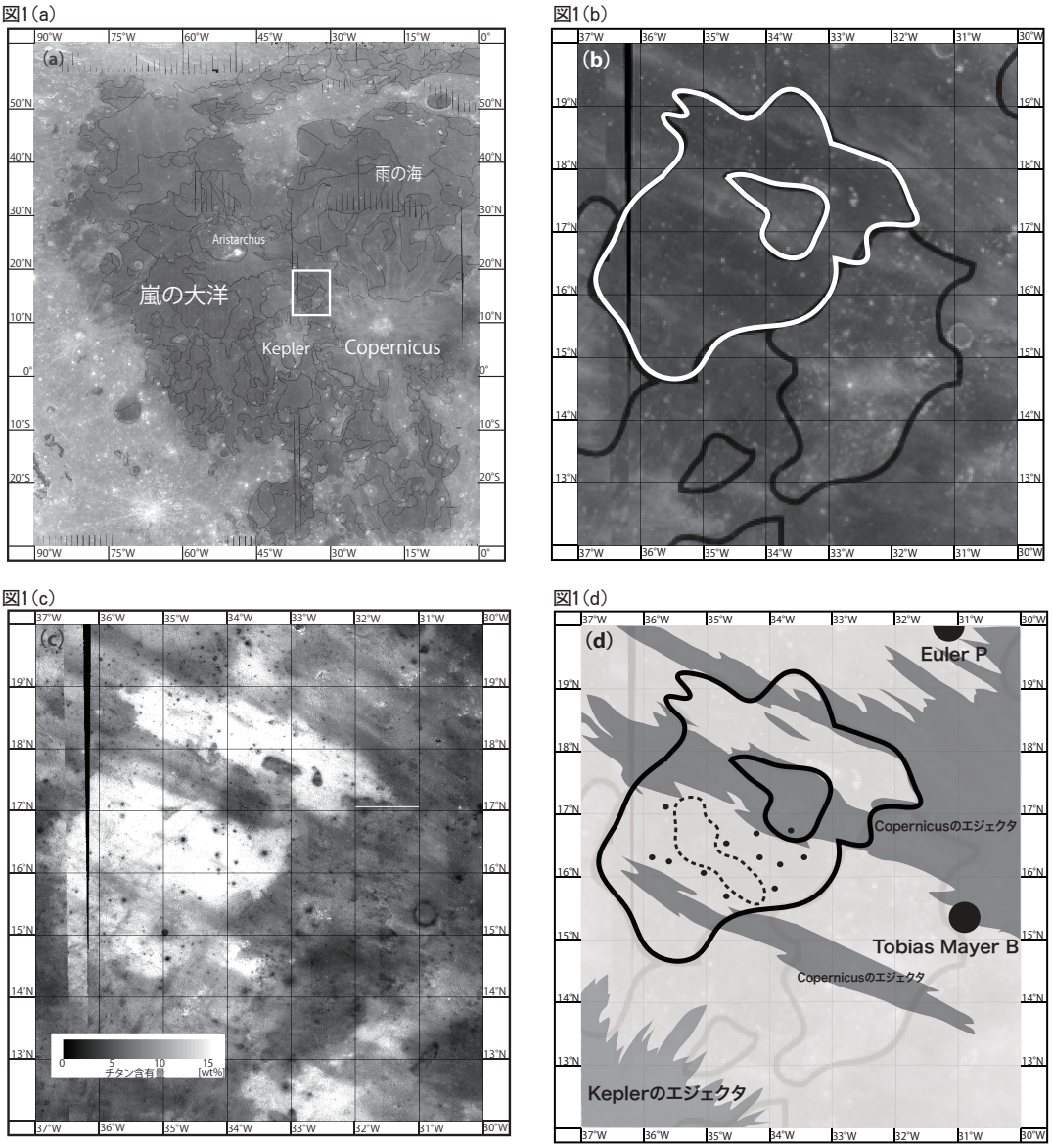

図1：嵐の大洋のユニットP43におけるチタン量算出例．(a)嵐の大洋，雨の海地域の広域図，以下(b)，(c)，(d)は白枠内を拡大．(b)MI750nm反射率，(c)チタン含有量．(d)地質図．(b)において，白線で囲まれた領域がユニットP43である．(d)の黒丸はP43の下位にある溶岩流を掘削しているクレーターの位置を表している．破線はチタン量の見積もりに用いた領域を表す．このように遠方からの放出物や下位層の物質を掘削したクレーターを避けて，チタン量解析に有用な領域を判別した．

の初期のマントル上部に発生した部分溶融域はリソスフェアの成長とともに浅部から冷えていき，時間が経つにつれて部分溶融域の上限は次第に深くなっていった．つまり，より後に噴出したマグマほどより深部に起源を持つと考えられる．そこで本研究では，マントルの鉛直・水平の組成分布とその時間変化に関する情報を得ることを目的とし，月の海の玄武岩のチタン含有量と噴出年代の関係を調査した．

2. 溶岩流のチタン量の推定

本研究では，月周回衛星「かぐや」に搭載されたマルチバンドイメージャ(MI) [7]によって得られたマルチバンドの画像データを使用する．「かぐや」データ

はその高い空間分解能に加えて，詳細な地形モデルが作成されているため，撮像条件（太陽入射角，出射角，位相角）によって変化する輝度値を正確に補正し，月面反射率を算出できる点が大きなアドバンテージである．本研究では全球的な解析を行う為に，輝度校正・幾何補正済みである月面全球反射率マップデータ（空間分解能240 m/pixel）を使用する．

チタンは主に月の海の玄武岩中のイルメナイトに含まれている．イルメナイトの反射スペクトルの特徴として，反射率が低いこと，目立った吸収帯が無くスペクトル形状がフラットであることが挙げられる．これに対して，月の玄武岩を構成するその他の主な鉱物（かんらん石や輝石など）は415 nmから750 nmにかけて反射率が増加する．そのため，チタン含有量が高いほど（イルメナイトが多いほど）750 nmの反射率は減少し，415 nmと750 nmの反射率の比（以後，415 nm/750 nm比）は増加する．一方，月面スペクトルは宇宙風化作用によっても変化する．宇宙風化作用は反射率を低下させ，スペクトルを赤化させる．つまり宇宙風化の進行は，チタン量の増加と同様に750 nmの反射率は減少させるが，415 nm/750 nm比も減少させるため，750 nm反射率と415 nm/750 nm比の関係を調べることで，月面のチタン含有量と宇宙風化の進行度を分離して評価することが可能である．この考え方にもとづいて，Lucey et al. [8] はアポロ計画で持ち帰られたレゴリス試料の750 nm反射率と415 nm/750 nm比を用いて，チタン含有量の定量化に成功した．「かぐや」のデータにおいても同様の方法でチタン含有量が推定されており，マップ化されている[9]．本研究ではこのチタン含有量マップを用いる．

本研究において解析を行った海は，嵐の大洋，雨の海，モスクワの海，南の海，静かの海，湿りの海，晴れの海，氷の海，東の海の9つである．それぞれの海は，噴出年代と組成の異なる複数の溶岩流ユニットで構成されている．本研究では合計で234個の溶岩流ユニットについて，以下の地形学的・地質学的条件を満たす領域のチタン含有量の平均値を算出し，各ユニットのチタン含有量とした．

（1）周囲からの飛来物質のない領域

（2）地形的な起伏が小さい，平坦な領域

(1)は周囲の別の地質ユニットからの混合の影響を避けるためであり，(2)はチタン含有量算出に用いたMI反射率データの校正精度を保証するためである．例として，嵐の大洋にあるユニットP43の解析領域を図1に示す．上記の地質学的条件から，図1の点線領域を選択し，チタン含有量の平均値を求めたところ，8.3 ± 1.0 wt%であった．一方，P43のユニット全体でのチタン含有量を平均すると6.2 ± 1.9 wt%であった．この違いはコペルニクスクレータからの低チタン物質からなる放出物の混合が影響しているためである．このように本研究では地質を考慮し最適な領域を選択することで，より正確に各ユニットのチタン含有量の決定を行った．

海の溶岩流ユニットの噴出年代はクレーター年代学にもとづいて多くの研究によって調べられてきた[10-16]．本研究では，「かぐや」データで更新された最新の年代マップ（図2）を用いてチタン量との相関関係を調べる．これらの研究から，月という地球型惑星の小型端成分にしては長い約20億年間マグマ噴出が続いていたこと，約40億年前に始まった火成活動はその後減衰していくが，約20億年前付近に再び噴出が活発化していることが分かっている．また，約40から約30億年前までは比較的広範囲で噴出が起こっていたが，約20億年前の噴出はほぼProcellarum KREEP Terrain（以後，PKT）と呼ばれる嵐の大洋と雨の海を中心としたKREEP成分に富む領域に限られていることがわかる（図2）．

3. チタン含有量と噴出年代との関係

図3にそれぞれの海におけるマグマの噴出年代とチタン含有量の関係を示す．これを見ると，約40から約30億年前の古い噴出については，チタン含有量は0.5wt%から14 wt%まで示しており，多様性があることが分かる．それに対して，嵐の大洋や雨の海などのPKT領域では，古い海の玄武岩に比べて若い玄武岩ほど選択的に高チタンである傾向が見られる．また，氷の海や南の海の玄武岩は全体的に低いチタン量を示している．これは，これらの海が周りを高地に囲まれた小さい海であるため，周囲からの高地物質の混合が影響している可能性がある．

次に上記の様な高地物質の影響を除き，火成活動の時間的変化を見るため，1つの海で噴出が長く続いていた嵐の大洋と雨の海のデータのみを解析に用いて詳

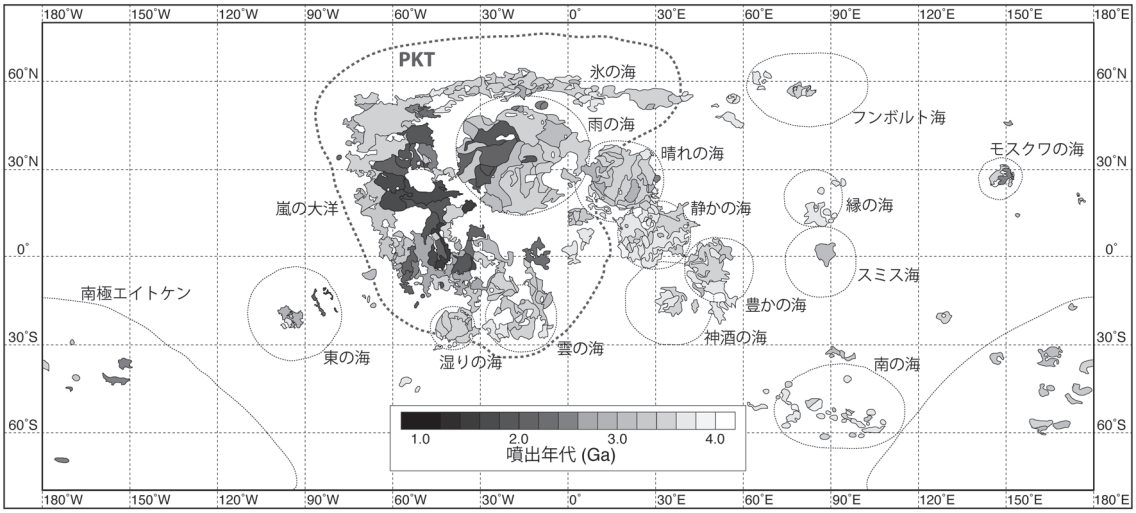

図2：海の玄武岩の年代マップ [15, 16].

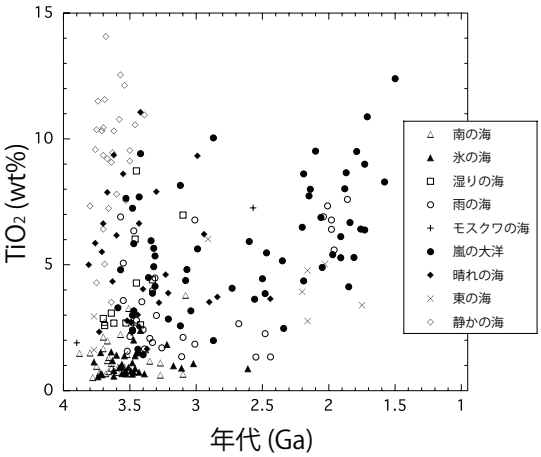

図3：マグマのチタン含有量と噴出年代との関係.

細に調べてみる．図4Aはそれらの地域における海の玄武岩のチタン含有量と噴出年代の関係を示す．これを見ると約40億年前から約23億年前まではチタン含有量は大きな多様性を示しつつも平均値は約4 wt%で変化がみられない．しかし，約23億年前に急激に増加し，その後は約7 wt％の平均値でほぼ一定の推移をしている．この平均値の差の有意性を確認するため，t検定を行った．23億年前の前後で両者の母集団が同一であると仮定し検定した結果，その仮定は有意水準99.9％以上で棄却可能であり，約23億年前以降のチタン含有量の増加は有意であることが分かった．このチタン含有量の変化はマグマソースが変化したことを示唆しているのかもしれない．そこで本研究では，23億年前以前を「Phase 1火成活動」，23億年前以後を「Phase 2火成活動」と呼ぶことにする．

表1：Phase1とPhase 2の火成活動における違い.

	Phase 1	Phase 2
Ti 含有量	多　様	高　い
空間的特徴	広範囲	主にPKT
時間的特徴	40～30億年前にピークそれ以降減衰	20億年前に集中

海の玄武岩の噴出年代分布をみると（図4B），20億年前付近に噴出のピークを持っており，これが高チタン玄武岩の噴出タイミング，つまり，Phase2火成活動と時間的によく一致していることがわかる．また，マグマ噴出の空間的な分布もPhase1活動とPhase2活動で変化が見られる．Phase1活動は月の広範囲で起こっているのに対し，Phase2活動はPKTに限られている．表1にPhase1とPhase2活動の特徴をまとめる．

4. 月マントルの進化シナリオ

Phase2活動におけるチタン含有量の増加を説明するモデルは2つ考えられる．以下ではそれぞれを概説する．

(1) マントル組成の反映

考えられるシナリオの１つは，チタン含有量の増加はマントルの鉛直方向の組成を反映しているという可

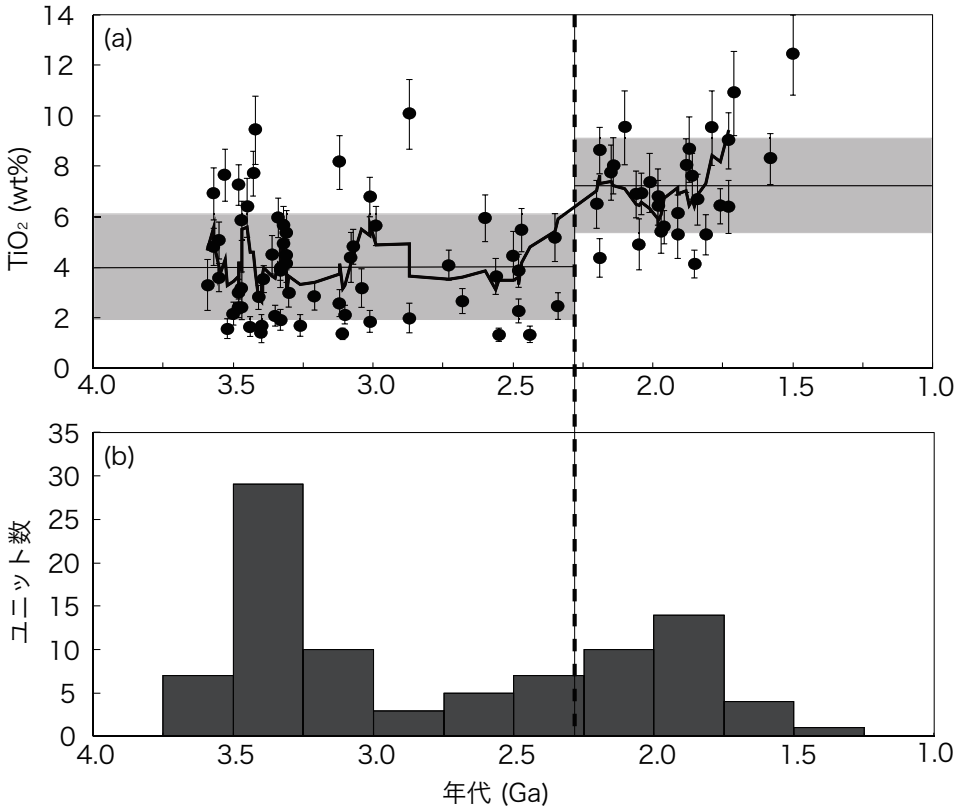

図4：(a)PKTにおけるチタン含有量と年代との関係．実線は5点ごとの移動平均を表す．(b)PKTの溶岩流ユニットのヒストグラム [10, 11, 15].

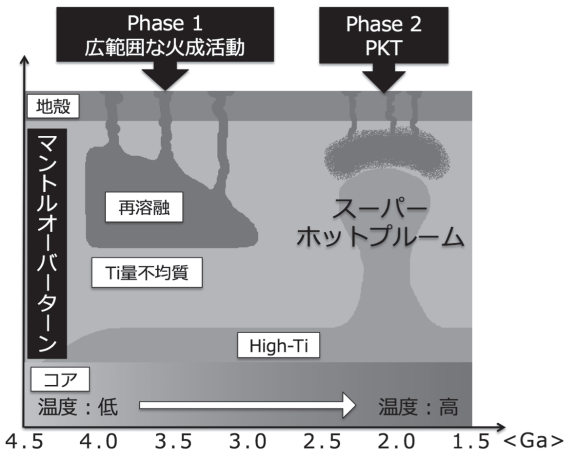

図5：マグマ活動の特徴を説明するマントルの進化シナリオ．

能性である．月の冷却プロセスは地球型惑星の中では比較的単純であるため，リソスフェアの成長に伴って，マントル部分溶融域の上限は時間とともに深くなっていったと考えられる[6]．これが正しいならば，若い海の玄武岩は深部のマントルの組成を反映しており，マントルの深部はチタン含有量が高かったと考えられる．このようなマントル組成の構造はマントルオーバーターンモデルから予測される構造と整合的であるように思われる．しかし，この仮説では20億年前に噴出ピークがあったことを説明できない．

(2) スーパーホットプルーム説

Phase2活動のチタン含有量の増加を説明するもう1つのモデルとして，スーパーホットプルームが起こったとするモデルが考えられる(図5)．マントルオーバーターンの直後に月の広い範囲で上部マントルの再溶融が起こった．この再溶融を起こした熱源は不明であるが，マントルオーバーターン時の上昇流での減圧溶融やKREEPによる加熱などがその候補としてあげられる．その後，時間が経つにつれて月内部は冷えていき，部分溶融の領域が縮小していくことで火成活動は弱まっていった．しかし，約20億年前に何らかの理由でPKT領域下のマントル深部でスーパーホット

プルームが発生し，この領域の火成活動が再び活発化した．このシナリオでは，Phase2活動が20億年前に集中した突発的な活動であること，オーバーターンによってイルメナイトは深部に降下しているので，チタン含有量が選択的に高いこと，限られた領域のみで起こっていること，のすべてが説明可能である．

問題は月形成の後，20億年以上も経ってから大規模なホットプルームを発生させる熱源が何か？である．最近の月の熱進化の数値シミュレーション研究によると[17]，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た放射性元素が月のコアをゆっくりと加熱し，約10～20億年かけて少なくとも2000 K程度にまで達した可能性が示されている．この加熱によって，深部のマントルでプルームが発生したとすれば，Phase2活動をうまく説明できる．

さらにスーパーホットプルームがPKTの下で発生したことは，上部マントル温度の水平方向の不均質で説明可能である．他の地域と比較して，地殻中に熱源元素が豊富であるPKT領域では，その下の上部マントルは冷やされにくいため，月の歴史を通して高温が保持された可能性が指摘されている[18]．月の深部でホットプルームが成長するには，対応するコールドプルームが成長しなければならない．コールドプルームは冷たい上部マントルの領域で起こらざるをえないため，ホットプルームは選択的に熱い上部マントルの領域，つまりPKT領域で起こりやすかったはずである．

40から30億年前の古い玄武岩になぜチタン含有量の多様性があるのかは，まだよく分かっていない．考えられる原因としては，マントルの上部では組成が不均一な状態であったためであると考えられる．マントルオーバーターンが起こった時に，チタン含有量の多いマントルが上部を撹拌し[2]，高チタンなマントルの一部が残って，それが上部の不均一を作ったと考えられる．初期の火成活動はマントルの上部で起こっていたため，古い海の玄武岩にはチタン含有量の多様性が見られるのかもしれない．

謝 辞

本論文で提案したモデルに関して，東京工業大学の木村淳氏から有益なコメントを頂きました．また，査読者の本田親寿氏には本稿に対して多くの重要なコメントを頂きました．厚くお礼申し上げます．

参考文献

[1] Hartmann W.K., and Davis D.R., 1975, Icarus 24, 504.
[2] Hess, P.C. and Parmentier, E.M.,1995, Earth Planet. Sci. Lett. 134, 501.
[3] Zhong, S. et al., 2000, Earth Planet. Sci. Lett. 177, 131.
[4] Parmentier, E.M. et al., 2002, Earth Planet. Sci. Lett. 201, 473.
[5] Takahashi, F. and Tsunakawa, H., 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L24202. doi:10.1029/2009GL041221.
[6] Spohn, T. et al., 2001, Icarus 149, 54.
[7] Ohtake, M. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 257.
[8] Lucey, P.G. et al., 1998, J. Geophys. Res. 103, 3679.
[9] Otake, H. et al., 2012, 43rd LPSC, abstract# 1905.
[10] Hiesinger, H. et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 29239, doi:10.1029/2000JE001244.
[11] Hiesinger, H. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, 5065. doi:10.1029/2002JE001985.
[12] Hiesinger, H. et al., 2010, J. Geophys. Res. 115, E03003. doi:10.1029/2009JE003380.
[13] Haruyama, J. et al., 2009, Science 323, 905–908. doi:10.1126/science.1163382.
[14] Morota, T. et al., 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L21202. doi:10.1029/2009GL040472.
[15] Morota, T. et al. 2011, Earth Planet. Sci. Lett. 302, 255, doi:10.1016/ j.epsl.2010.12.028.
[16] Cho, Y. et al., 2012, Geophys. Res. Lett. 39, L11203. doi:10.1029/2012GL051838.
[17] de Vries, J. et al., 2010, Earth Planet. Sci. Lett. 292, 139.
[18] Wieczorek, M. A. et al., 2001, Earth Planet. Sci. Lett. 185, 71.

←目次へ

特集「月の火成活動からみた熱進化」

粘弾性変形理論に基づく月測地データの解釈：月進化史への示唆

鎌田 俊一[1]

2013年10月1日受領，2013年11月1日受理.

（**要旨**）地質学的時間スケールにおける大規模地形の粘性緩和は，固体惑星の熱進化を反映し，その痕跡は測地データに反映される．本論文では，月周回衛星「かぐや」で得られた測月データと，熱進化を考慮した長期粘弾性変形計算を突き合わせることで，月内部温度構造の変遷を制約した．前ネクタリス期4(PN4)以前に形成した衝突盆地下のマントル隆起はほぼ緩和しており，同時代までマグマオーシャンが未固化であったことが示唆された．その後形成した盆地下にはマントル隆起が見られ，月上層の冷却が大きく進行したことが分かった．また，海全体が傾いていることから大波長変形が示唆された．これは，海形成以後も深部は熱かったことを示唆している．

1. 測地データから迫る月の熱進化

月面上に見られる典型的な大規模地形は「衝突盆地」と呼ばれる巨大な衝突クレーターや，その底を埋めるように広がった「海」と呼ばれる玄武岩で覆われた地域である．いずれも今から数十億年前に形成したと考えられており[e.g., 1]，これらの地形により生じた荷重は地質学的時間スケールの粘性流動を引き起こすと考えられる．月の地殻やマントルの主要な構成鉱物の粘性率は様々なパラメータによって決まるが，特に温度依存性が強いことが知られている[e.g., 2]．そのため，表面地形やモホ面(地殻－マントル境界面)起伏の粘性緩和に要する時間は内部の温度構造に強く依存する．したがって，大規模地形周囲の現在の地殻構造は，月の熱史を探る上で極めて重要な手掛かりとなる．

これまでも大規模地形の粘性緩和に着目した月の初期熱史研究はなされてきた[e.g., 3]．しかしながら，モホ面起伏の推定に必要な重力場データの空間解像度は非常に低く，短波長成分の誤差は非常に大きかった．また地形緩和計算においても，表面の弾性を無視した単純な粘性流体モデルが仮定されたり，粘弾性体モデルの場合でも一様定常粘性率が仮定されたりなど，極めて単純化された内部構造モデルを用いてしか行われてこなかった．特に古い衝突盆地が形成したと考えられる月形成から間もない頃においては，上層の冷却に伴う急激な粘性率の上昇と粘性緩和の時間スケールは拮抗する可能性があり，上記のような簡単なモデルで推定された温度構造と実際の過去の温度構造は大きく異なる可能性が高かった．

しかし近年，これら2つの課題は大きく改善された．月周回衛星「かぐや」は極域を含む月全球の地形データの取得に加え，子衛星を用いた裏側重力場計測にも成功し，全球測地データの精度を飛躍的に向上させた[e.g., 4]．また，我々[5]は非定常・多層粘性率構造を取り扱える，長期粘弾性変形計算手法を開発した．新たな観測データと新たな計算手法が揃ったことにより，測地データと理論モデルの詳細な比較が可能になり，月熱史に関してより定量的な制約が得られるようになった．

本論文では，我々がこれまでに得た月内部温度構造の時間発展についてまとめる．まず次章で計算モデルの概略を説明する．続く第3章では，本特集で特に取り上げている「海」に着目し，その形成後の内部温度構造について述べる．それ以降の章では海の有無に関わらず衝突盆地に着目し，その形成期の内部温度構造について述べる．解析に使用した地形データは1/16°

1. 北海道大学大学院 理学研究院
kamata@mail.sci.hokudai.ac.jp

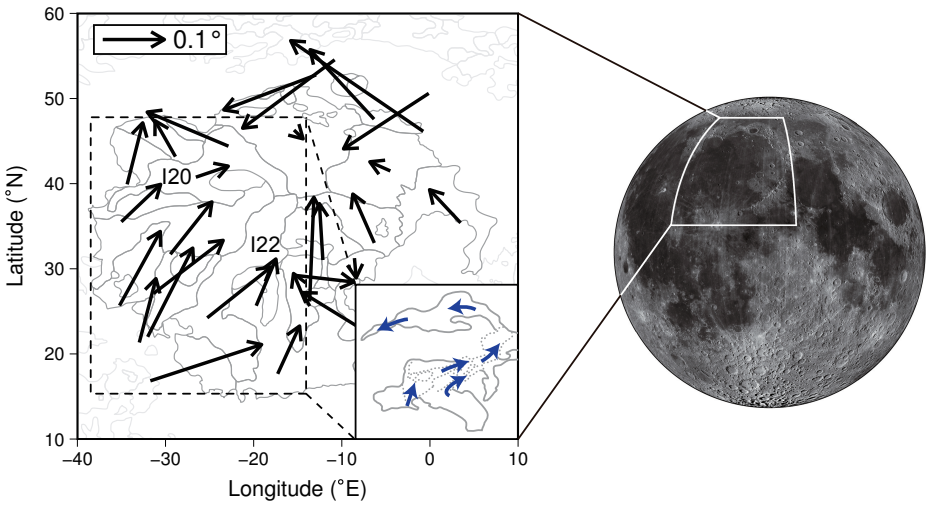

図1：雨の海の傾き．矢印は下流方向を示しており，その長さは傾斜角に比例する．灰色で解析したユニット境界を示している．右下は破線領域における，溶岩の流れた方向[12]を示す．ユニット名や境界は先行研究[9]による．

グリッドデータと359次まで球面調和展開したSTM359_grid-03，重力場データはSGM150jである．

2. 計算モデルの概要

月は半径1740 kmの，地殻とマントルの2層からなるマクスウェル粘弾性球と仮定した．いずれの層においても弾性率，密度，粘性率は動径方向にのみ変化し，角度依存性はないものとした．地殻，マントルの横弾性率はそれぞれ40，65 GPa，体積弾性率はそれぞれ80，125 GPaとし，各層内で一様定常とした．密度は地殻，マントルの上端でそれぞれ2800，3300kg/m^{3}とし，深さ1 km間隔でAdams-Williamson条件を満たすように与えた．地殻厚や粘性率の与え方は第3章と，第4，5章で異なるため，それぞれの章で述べる．パラメータ範囲などについての詳細についてはKamataら[6]を参照されたい．

球の表面や内部に荷重を置き，それによる球全体の変形を計算する．荷重を球面調和展開し，各次数での変形計算を行った後，重ね合わせることで最終的な表面地形やモホ面起伏を求める．詳細についてはKamataら[5]を参照されたい．

荷重以外にも，冷却による熱収縮も変形の要因の一つと考えられる．しかし，熱収縮で海の溶岩が一方向に傾く（一方向だけ収縮する）とは考えられない．また，地殻厚と同じ数10 kmオーダーのマントル隆起の緩和がほぼ熱収縮によって起きるとも考えられない．したがって，熱収縮の影響は以降の結果に大きくは影響しない．

3.「海」の傾き

月試料分析の結果，海の玄武岩は地球の玄武岩と比較してケイ素の含有量が低く，海の溶岩は非常に低粘性率であることが分かった[e.g., 7]．低粘性溶岩流は，まずは乱流状態で流れ出し，冷却によって高粘性率となるにつれて層流になる[8]．海の大きさは様々であるが，「雨の海」のような巨大な衝突盆地の大部分を覆うような海は単一の噴出でできたわけではなく，複数のユニットからなることが分かっており[e.g., 9]，その典型的な厚さは数十mと見積もられている[10]．そのような厚さの溶岩流が，地表面傾斜角0.1°の典型的な斜面を乱流で下る距離は数百km以上と見積もられる[8]．これは噴出ユニットの典型的な直径と同等かそれ以上である．したがって，海の溶岩流は斜面を下る途中では固化しきらず，流れた先で十分に貯まって，表面地形は「セレノイド」と呼ばれる等重力ポテンシャル面に沿った可能性が非常に高い．これはちょうど，地球の平均海面が「ジオイド」と呼ばれる等重力ポテンシャル面に沿っていることに対応している．

噴出直後に地形とセレノイドが沿っていた溶岩流がその固化後に変形した場合，地形とセレノイドが沿わない可能性が高い．つまり，セレノイドに対する表面地形の現時点でのズレは，海形成後に起きた変形の記録である可能性がある．Brownらはアポロ17号でのレーダー計測に基づく，同号のある1軌道直下の高度プロファイルを解析した[11]．その結果，海領域だけを繋ぐ「きれい」な円が描け，その中心は現在の重心とも形状中心とも異なることを見出した．もし海形成時のセレノイドと現在のセレノイドが同一であれば，海の中心は現在の重心に一致することが予想される．この予想と反するBrownらの結果は，現在のセレノイドは海形成時のそれから変化したことを示唆している．しかし解析データが1軌道なので，「きれい」な円が描けたのは偶然である可能性が否定できない．また，その後のClementineなどの高度データを使った同様の解析例は報告されていない．

ここでは，かぐやデータを用い，月全球の海について海形成後の比較的大規模（波長＞～100 km）の変形の可能性を探る．具体的には，まず地形とセレノイドの差を算出し，その差に平面フィットを行い，傾きの方向と大きさを求める．次に粘弾性変形計算を行い，その傾きを説明可能な内部構造に対する条件を求める．上述のように，多くの大きな海は噴出年代の異なる複数のユニットからなる[e.g., 9]．変形が噴出期間中にも起きたとすれば，例え同じ海だとしても，傾きの大きさ・方向はユニット毎に異なる可能性がある．そのため，傾きの算出は各ユニットについて行った．

図1に雨の海の解析結果を示す．盆地のリムにある小さなユニットを除くと，多くのユニットの下流方向は北東方向であり，典型的な傾きは0.1°である．傾きの有意性（傾きの大きさが0ではない）については，解析点をランダムに選び，統計的検定を行うことで確認している．図1には，先行研究[12]で求められた溶岩流の流れた方向も示している．ユニットI20は北東方向に流れ，一方のユニットI22は南西方向に流れているが，現在の地形・重力場から推定される下流方向は両ユニット共に北東方向である．また，傾きの大きさは前者よりも後者の方が小さい．このことは，雨の海形成後，北東方向が相対的に沈むような変形が雨の海全体に渡って起きたと解釈することができる．

雨の海以外でも同様の解析を行ったが，全球を通して一方向に傾いているというようなことはなかった．ただし，解析した月全球の海>300ユニットのほぼ全ての傾きの大きさは有意である（0ではない）．このことは，重心の移動のような変形が起きたのではなく，より短波長（球面調和次数>2）の変形が長期に渡って起きていた可能性を示す．

さて，どのような条件下であればセレノイドに対して地形が0.1°傾くような変形が起きるのであろうか．まず一つは，月内部の粘性率が高すぎないことである．もう一つは，変形を引き起こすのに十分な荷重があるということである．なぜなら，仮に月内部が非常に高温で低粘性率だったとしても，そもそも荷重が全くなければ変形は起きないためである．粘性率や荷重に対して定量的な制約を得るため，粘弾性体数値計算を行った．地殻厚はかぐやデータから示唆される全球平均値とほぼ同じ，50 kmとした．海の形成は月形成から数億年後であり，すでにリソスフェアが発達していて急激な冷却は起きていなかったと考えられる[e.g., 13]．そのため，ここでは定常粘性率を仮定するが，上層に行くにつれて高粘性率となるような多層構造を仮定し，各層の粘性率はパラメータとして振った．また，変形の原因として内部にある面荷重を仮定した．これは，全球の海で傾きが観測されたたため，荷重は局所的ではないと考えられるためである．荷重の深さ，大きさを様々に仮定して低次（≦10，波長＞～1000 km）の面荷重に伴う変形計算を行った．

図2に，海の形成時期とセレノイドに対する地形の現在の傾斜の関係を示す．海形成直後においてセレノイドと地形は平行であると仮定しているため，海が古ければ古いほど，現在の観測される傾斜は大きくなる．パラメータスタディの結果，荷重が数十MPa程度で比較的浅い（<300 km）ところにある場合，深さ＞～200 km で粘性率$<10^{24}$ Pa s であれば最大傾斜角は0.1°以上になることが分かった．荷重がより小さい（大きい）場合にはより小さい（大きい）粘性率が必要である．また，荷重がより浅い（深い）場合にはより小さい（大きい）粘性率が必要である．

荷重によって引き起こされる変形を考えているため，荷重の波長と変形の波長は同一である．雨の海全体が傾くような大波長成分を持ち，浅部にあり，そして数十MPaの圧力を生じる内部荷重とは何か．一意に限定はできないが，その一つの候補としては大局的な地

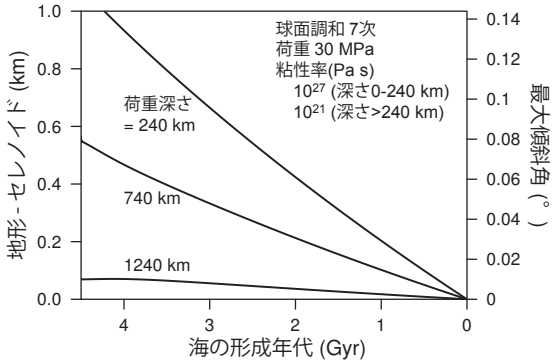

図2：海の形成年代と最終的な傾斜角の関係．海形成時には地形はセレノイドに沿ったと仮定している．内部荷重が浅いほど，同じ荷重でも大きく変形する．

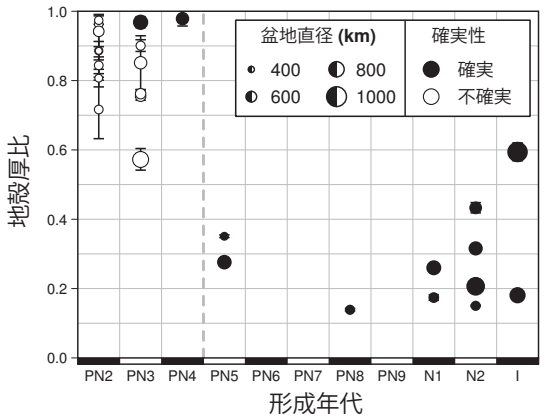

図3：衝突盆地の形成年代と地殻厚比の関係．地殻厚比は，衝突盆地中心の地殻厚を周囲の地殻厚で規格化したものである．周囲の地殻厚は，盆地直径の1.5−2.5倍の位置における地殻厚である．盆地直径や位置，確実性，形成年代は先行研究[1]による．PN,N,Iは前ネクタリス期, ネクタリス期, インブリウム期に対応する．

殻厚のばらつきが考えられる．また，マグマオーシャン固化の最終段階で出来る，イルメナイトに富む重たい層がマントルオーバーターンで深部に移動しきらずに浅いところに残っているとすれば，それも海の変形を引き起こす荷重となり得る．

一方の粘性率についての条件は月の熱史と整合的なのであろうか．前述のように，粘性率は温度以外の様々なパラメータ，例えば粒径や圧力にも依存する．しかしこれらの依存性を実際に考慮しても，>1300 Kであれば乾燥したオリビンの粘性率は$<10^{24}$ Pa sと推定される[14]．したがって，荷重が数十MPa程度の場合，深さ＞～200 kmで温度が>1300 Kであれば最大傾斜角は0.1°以上の変形が可能である．海形成は表側中緯度では～1 Gaまで続いたと考えられるが[e.g., 9]，その時代まで部分溶融領域が内部に存在するためには上記の温度条件よりも熱い必要がある[e.g., 15]．したがって，比較的最近まで若い溶岩ユニットの地下＞～200 kmで>1300 Kであった可能性は十分に考えられる．古いユニットも含めて海全体が傾いているという結果は，単一の溶岩ユニットより大きな水平スケールで最近まで内部が熱かったことを示唆している．

4. 新鮮な衝突盆地の地殻構造

「新鮮な」衝突盆地とは，測地データに明確な同心円構造を残す衝突盆地のことである．多くの場合，新鮮な衝突盆地中心には正のブーゲー異常が見られる．これは盆地中心下でマントルが盛り上がり，地殻が薄くなっていると解釈される[e.g., 16]．図3は，衝突盆地の形成年代と地殻厚比（盆地中心の地殻厚を周囲の地殻厚で規格化したもの）との関係を示している．本章で解析するのは地殻厚比<0.7となる衝突盆地で，いずれも前ネクタリス期5（PN5）以降に形成したものである．

衝突盆地形成期に月内部が非常に高温だったとすると，粘性緩和が進行し，表面もモホ面も平らになってしまい，正のブーゲー異常は極めて小さくなると考えられる．換言すると，最終的な地殻構造が測地観測結果と整合的になるようにしつつ熱い条件を仮定すると，衝突盆地形成直後のマントル隆起は現在よりも遙かに大きくなる必要がある．その結果，あまりにも熱い内部構造を仮定した場合，衝突盆地形成直後における盆地中心での地殻厚が負という非現実的な初期地殻構造が必要となってしまう．この章では，新鮮な衝突盆地について，その初期地殻厚がゼロとなる最も熱い内部構造について述べる．

ここでは変形を引き起こす荷重は表面とモホ面における起伏であり，その他の内部荷重は考えていない．これらの起伏を面荷重の重ね合わせとして考え，70次まで球面調和展開し，各次数の変形を計算した．地殻厚は各盆地に合うように40～100 kmで振った．衝突盆地形成期には月上層の冷却が進行し，それに伴う急激な粘性率上昇が変形に影響した可能性がある[e.g.,

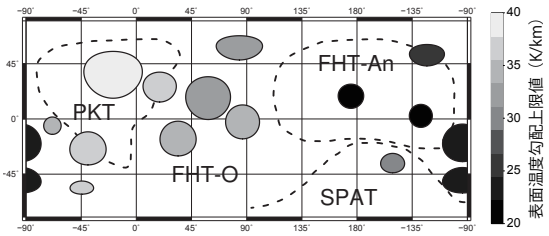

図4：初期地殻厚がゼロとなる初期温度勾配．左側，右側がそれぞれ月の表側，裏側に対応する．地質区分は先行研究[17]による．FHT-Anで最も低く，PKTで最も高い．

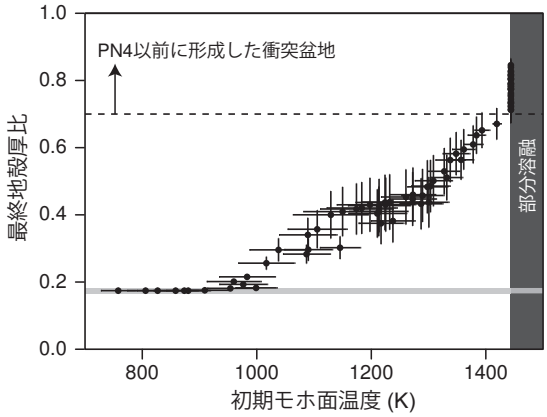

図5：初期温度構造と最終地殻厚比の関係．初期地殻構造は現在のMendel-Rydberg盆地（周辺地殻厚58km）．<1000Kでは変形はほぼ起きない．>1000Kでは粘性緩和が起き，地殻厚比は大きくなるが，同比が0.7を超えるためには初期モホ面温度がソリダスを超える必要がある．

13]．そのため，ここでは前章と異なり，熱進化と粘弾性変形を同時に解いた．熱進化は熱伝導のみを考え，熱伝導率や放射性元素濃度などはパラメータとして振った．地殻には斜長石，マントルにはオリビンの流動則を適用し，時々刻々と変化する粘性率構造を決めた．各熱進化モデル下で最終地殻構造が現在となるような初期地殻構造を算出し，衝突盆地中心における地殻厚を求めた．

図4に，初期地殻厚がゼロとなる最も熱い温度構造における地温勾配を示す．地温勾配上限値は，裏側高地で最も小さく，表側のProcellarum KREEP Terrane（PKT）と呼ばれる地域[17]で最も大きいことが分かった．

この結果から得られる重要な示唆は，裏側高地地殻が放射性元素に枯渇しているということである．放射性元素は熱進化で最も重要な熱源であることに加えて，液層濃集性ゆえにマグマオーシャン固化過程を解き明かす鍵となる．これまで，ガンマ線計測による表面での放射性元素濃度は求められてきたが，地下深くの濃度についてはほとんど分かっていない．我々の結果は，裏側高地地殻中に含まれるトリウム濃度は鉛直平均で<0.5 ppmであることを示唆している．これは月面での最低値とほぼ同じであり，裏側高地地殻は表層だけでなく深部まで放射性元素に枯渇していることを示唆している．他方，表側のPKTではその10倍以上の濃度も許容されることが分かった．放射性元素濃度の大きな地域依存性は表層だけでなく地殻深くまで及んでおり，月はマグマオーシャン固化の段階から非常に不均質な熱進化をしてきたことが示唆される[e.g., 13]．

5. 崩れた衝突盆地の地殻構造

本章で解析するのは，前ネクタリス期4（PN4）以前に形成した，地殻厚比が>0.7となる衝突盆地である（図3参照）．これらの衝突盆地について前章と同様の解析を行っても有意な結果は得られない．なぜならば，観測された最終地殻構造が非常に平坦なため，非現実的なほど熱い内部構造を仮定したとしても初期地殻構造は現在とほぼ変わらず平坦なものとして計算されるためである．

そのためここでは前章とは逆に，初期地殻構造を仮定した上で，最終構造が平坦になる最も冷たい条件を調べる．今は残されていない初期地殻構造を直接観測することは不可能な上，数値計算で求めることも困難である．そのためここでは第一次近似として，現時点で地殻厚比が極めて小さい衝突盆地（例えばMendel-Rydberg盆地）の現在の地殻構造を初期地殻構造として粘弾性変形計算を行った．前章と同じパラメータ空間での計算を行った．

図5に初期温度構造と最終地殻厚比の関係の一例を示す．パラメータスタディの結果，最終地殻厚比が>0.7となるために必要なモホ面温度は衝突盆地周囲の地殻厚（つまり衝突前の地殻厚）に強く依存しており，特に周辺地殻厚が <60 kmの場合にはモホ面の温度がソリダス以上でなければないことが分かった．

「かぐや」だけでなく，最近のLunar Reconnaissance Orbiter（LRO），Gravity Recovery and Interior Laboratory（GRAIL）による測地観測から，大部分の

月地殻厚は<60 kmと示唆されている[18]．また，崩れた衝突盆地は地殻厚<60 kmにのみ見られるわけではなく，広く分布している[1]．これらより，崩れた衝突盆地の形成期，つまりPN4以前には月モホ面の大部分は部分溶融するほど熱かったことが示唆される．

本章における重要な仮定は，現在は崩れて平坦になってしまった衝突盆地の形成直後の地殻構造は，新鮮な衝突盆地の現在の地殻構造と同じである，ということである．もし最初から地殻厚比が～0.7のような平坦な地殻構造であったとすれば，より冷たい内部構造を仮定しても最終地殻厚比が0.7を超えることが予想される．非常に平坦な初期地殻構造を形成するためには，低密度天体が低速度かつ低角度で（地面をこするように）衝突する必要がある[e.g., 19]．このような衝突「しか」PN4以前に起きないという仮定は非現実的である．そのため，PN4以前に形成した衝突盆地の大きな地殻厚比は，最初から平坦な地殻構造をしていたためというのは考えにくく，やはりPN4以前では月内部は非常に熱く，粘性緩和が進行したためと考えられる．

前章の解析から，表層だけでなく地殻深くまで，放射性元素はPKTに集中していることが示唆されている．そのため，マグマオーシャンが固化した後，PKT外において衝突盆地と同等かより広範囲で部分溶融をマントル上端で維持するのは困難であると考えられる．したがって，PN4まで月モホの大部分が部分溶融しているということは，PN4までマグマオーシャンは完全に固化していなかったことを示唆している．また，PN5以降の全ての衝突盆地の地殻厚比が<0.7であることも，マグマオーシャンが固化したことでモホの全球的な部分溶融がなくなり，激しい粘性緩和は起きなくなったためと解釈できる．

PN4までマグマオーシャンが固化していなかったということは，他の先行研究の結果とどの程度整合的なのであろうか．PN4/5境界の絶対年代が決まっていない以上詳細な議論はできないが，他の理論モデルとの整合性については議論できる．マグマオーシャンが液体から固化していく過程において，放射性元素の濃集や潮汐加熱を考慮した場合，固化には約2–3億年かかると推定される[e.g., 20]．月形成年代の不確定性[13]を考えても，4.1Gaより前に固化したと考えられる．ネクタリス代の開始が遅くとも4.0 Gaと考えられるので[e.g.,1]，マグマオーシャンの固化，つまりPN4/5境界がこれに先立つという点は整合的である．

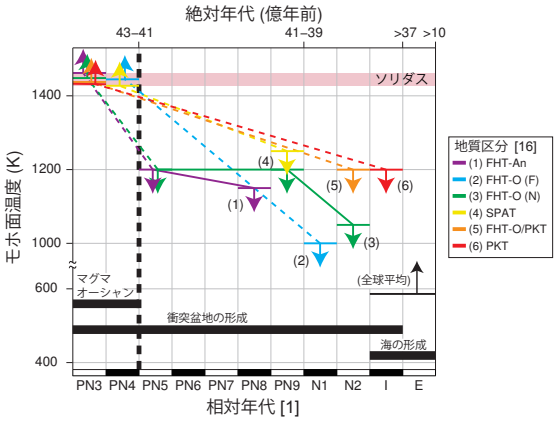

図6：モホ面温度の時間変化．PN4までは全球的にソリダス以上．PN5－Iは地域依存．海形成以降の平均は，深さ240kmで1300Kとし，定常状態を仮定した場合の深さ50kmにおける温度．

PN4までマグマオーシャンが固化していなかった場合，月面で最も大きい衝突盆地であるSouth-Pole Aitken盆地や，その存在が示唆されるProcellarum盆地が形成したPN1は，まだ地殻形成段階にあったと考えられる．そのような古い時代における巨大衝突は，地殻組成の不均質を促進した可能性がある．

また，後期隕石重撃期に関しての示唆も得られる．4.0–3.9 Gaにおける後期隕石重撃期においてほぼ全ての衝突盆地が形成したとする説がある[21]．この場合，マグマオーシャン固化後にほぼ全ての衝突盆地形成が必要となり，粘性緩和によって地殻を平坦にすることはできない．したがって，この「激しすぎる」後期隕石重撃期モデルは，我々の結果からは支持されない．その一方で，より「穏やかな」後期隕石重撃期モデルとは調和的であることも分かった．同時期における衝突体としてE-ベルト天体というものを仮定し，4.0 Gaにおける後期隕石重撃期の開始はネクタリス代の開始と同じとするモデルである[22]．この場合，PN1の年代は>4.3 Gaと推定され，PN4/5境界が>4.1 Gaということとは矛盾しない．

6. まとめ

モホ面温度という観点で全ての結果をまとめたもの

を図6に示す．PKT地殻に放射性元素を濃集させるようなマグマオーシャンの不均質固化や巨大衝突を経て，PN4の終わりにマグマオーシャンは固化した．ここまでに形成した衝突盆地は激しい粘性緩和を経験した．PN5以降では部分溶融領域は時間と共に深くなってゆく[e.g., 13,15]．この間も衝突盆地の形成は続くが，マントル隆起がなくなるほどの激しい粘性緩和は起きない．衝突盆地の形成は後期隕石重撃期にピークを迎えたかもしれないが，～0.1 Gaという短期間に現在月で認識される衝突盆地の全てが形成するほど激しい隕石衝突はなかったと思われる．インブリウム期以降では衝突盆地の形成はないが，引き続き海の火山活動が起きたと考えられる．特にPKT地殻は放射性元素に富むためにマントル全体が比較的高温に保たれ，局所的な海の形成が～1 Gaまで続いた[e.g., 9]．上層は冷えているが深部は水平方向に大きな空間スケールで暖かいために，衝突盆地より大きな空間スケールの変形は継続した．以上が，かぐや測地データと粘弾性変形モデルの示唆する月の初期進化史である．

謝 辞

千葉工業大学の千秋博紀博士と東京大学の杉田精司教授よりいただいた建設的なコメントに感謝いたします．

参考文献

[1] Wilhelms, D. E., 1987, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1348.
[2] Karato, S., 2007, “Deformation of Earth materials” (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
[3] Mohit, P. S. and Phillips, R. J., 2006, J. Geophys. Res. Planets 111, doi:10.1029/2005JE002654.
[4] Namiki, N. et al., 2009, Science 323, 900.
[5] Kamata, S. et al., 2012, J. Geophys. Res. Planets 117, doi:10.1029/2011JE003945.
[6] Kamata, S. et al., 2013, J. Geophys. Res. Planets 118, 398.
[7] Murase, T. and McBirney, A. R., 1970, Science 167, 1491.
[8] Williams, D. A. et al., 2000, J. Geophys. Res. Planets 105, 20189.
[9] Hiesinger, H. et al., 2011, GSA Spec. Pap. 477, 1.
[10] Hiesinger, H. et al., 2002, Geophys. Res. Lett. 29, doi:10.1029/2002GL014847.
[11] Brown, W. E. et al., 1974, Proc. Lunar Sci. Conf. 5th, 3037.
[12] Schaber, G. G., 1973, Proc. Lunar Sci. Conf. 4th, 73.
[13] Shearer, C. K. et al., 2006, Rev. mineralogical geochem. 60, 365 (Chantilly: Mineralogical Soc. Am.)
[14] Korenaga, J. and Karato, S., 2008, J. Geophys. Res. Solid 113, doi:10.1029/2007JB005100.
[15] Ziethe, R. et al., 2009, Planet. Space Sci. 57, 784.
[16] Neumann, G. A. et al., 1996, J. Geophys. Res. Planets 101, 16841.
[17] Jolliff, B. L. et al., 2000, J. Geophys. Res. Planets 105, 4197.
[18] Wieczorek, M. A. et al., 2012, Science 339, 671.
[19] Schultz, P. H. and Anderson, R. R., 1996, GSA Spec. Pap. 302, 397.
[20] Meyer, J. et al., 2010, Icarus 208, 1.
[21] Ryder, G., 2002, J. Geophys. Res. Planets 107, doi:10.1029/2001JE001583.
[22] Morbidelli, A. et al., 2012, Earth Planet. Sci. Lett. 355, 144.

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

海洋への隕石落下に伴う津波リスク評価

後藤 和久[1,2]，飯嶋 耕崇[2]，和田 浩二[3]，今村 文彦[1]，常 昱[4]

2013年9月14日受領，2013年11月6日受理.

（**要旨**）天体が海洋に衝突した場合，巨大津波の発生が懸念される．本稿では，太平洋への隕石落下頻度を検討し，数値計算に基づき日本への衝突津波リスク評価を予察的に行った．その結果，他の災害に比べれば衝突津波の発生頻度は低いものの，現実的な災害リスクとして認識する必要があることがわかった．衝突津波のリスクは確率的に評価が可能なため，現在の量的津波予報のような形でデータベース化することが可能であると考えられる．将来的には，衝突から津波伝播・遡上までの一連の過程の計算を連続的に行うことが望ましい．数値計算技術の高度化が進めば，火星の古海洋の存在可能性の検討など，惑星科学分野での応用範囲も広いと考えられる．

1. はじめに

2013年2月15日にロシア・ウラル地方で発生した隕石落下に伴う衝撃波により，チェリャビンスク市では多くの人的・物的被害が発生した(以下，チェリャビンスクイベント)．チェリャビンスクイベントは，隕石落下という極めて低頻度の事象が人間社会において災害を引き起こしうるということを，あらためて世界中の人々に示したと言える．このイベントでは，天体は空中で分裂・爆発したため衝撃波による被害が中心であったが，地表面に到達する規模の天体が落下すると，落下地点周辺では甚大な被害が発生することは容易に想像できる．

天体衝突は，地球史のスケールで見れば頻繁に発生する現象の一つである．特に，地球表面の約3分の2は海洋で占められている．そのため，過去の天体衝突の多くは海洋で発生したと考えられる．ところが，世界中で報告されている衝突クレーターのうち，海洋衝突によると考えられるものはわずかに20％程度である[1](図1)．後藤ら[2]が指摘しているように，海底の衝突クレーターは発見が困難であること，海洋プレートの沈み込みによって大部分がすでに消失していること，海洋衝突クレーターの探査が組織的に行われていないため，北米や北欧など研究が特定地域に偏っていることなどが理由としてあげられる．

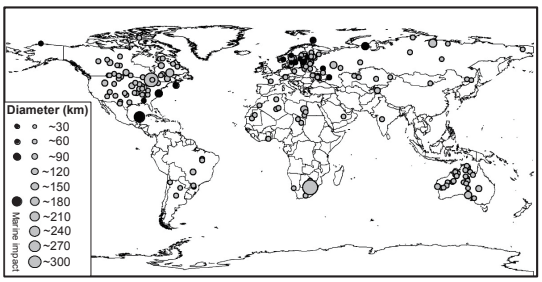

図1：地球上の陸上，海洋衝突クレーターの分布．Earth Impact Databaseに基づく．

海洋衝突現象を災害としてとらえた場合，衝突により発生する様々な現象の中でも津波の影響が大きいものと考えられる．これは，陸地から離れた地点で衝突が起きても，津波は広域に伝播し沿岸部の広い範囲に影響を及ぼしうるためである．本稿では，衝突に伴う津波(以下，衝突津波)に焦点を絞り，既往研究のレビューと，予察的な数値計算結果に基づき我が国沿岸部への影響について検討する．

1. 東北大学 災害科学国際研究所
2. 東北大学大学院 理学研究科
3. 千葉工業大学惑星探査研究センター
4. 東京大学大学院 理学系研究科
goto@irides.tohoku.ac.jp

2. 衝突津波の研究事例

衝突津波に関する既往研究は，地質時代に起きた巨大衝突に伴う津波の規模を推定した研究，地球に将来衝突する可能性のある天体を想定した研究，または衝突頻度を踏まえて津波リスク評価を行った研究に区分することができる．以下に，それぞれの代表的な既往研究をまとめる．

まず，地質時代に起きた衝突津波としては，約6600万年前のチチュルブ(Chicxulub)衝突(メキシコ・ユカタン半島) [3]やエルタニン(Eltanin)衝突[4]が代表的事例として挙げられる．チチュルブ衝突は，水深200 m(または600－2000 m)の海域で起きた巨大衝突であり，衝突天体の直径は約10 km，クレーターのサイズは約180 kmと推定されている．Matsui et al. [3]は，津波発生，伝播，遡上計算までを実施し，衝突クレーターへの海水の流入・流出に伴い発生した津波は，最大波高約300 m，周期10時間と推定している．

約215万年前に発生したエルタニン衝突は他の事例とは異なり，衝突クレーターは発見されていない．深海掘削試料中の津波堆積物にイジェクタが取り込まれている様子が観察されており，直径1-4 km程度の天体が深海域に衝突したものと推定されている[4]．衝突天体のサイズにより異なるものの，この衝突に伴って発生した津波は，チリ沿岸部に到達時に100 mを超えていたものと推定される[5]．また，太平洋沿岸には，同時代に堆積したと思われる津波堆積物が報告されており，エルタニン衝突津波起源である可能性が指摘されている[6]．このように，地質時代に起きた衝突津波に関する研究は，クレーターやイジェクタ，津波堆積物が存在するなど，衝突津波の規模を評価するための材料が得られている事例に限られている．

地球に将来衝突する可能性のある天体を想定した研究の代表例は，西暦2880年3月16日に地球に衝突する確率が0.3％未満の小惑星1950DA(直径1.1 km)を例とした研究である．Ward and Asphaug [7]は，大西洋にこの規模の天体が衝突したと仮定した場合，アメリカ東海岸に100 m超の津波が押し寄せる可能性があると推定している．衝突頻度を踏まえて，津波リス

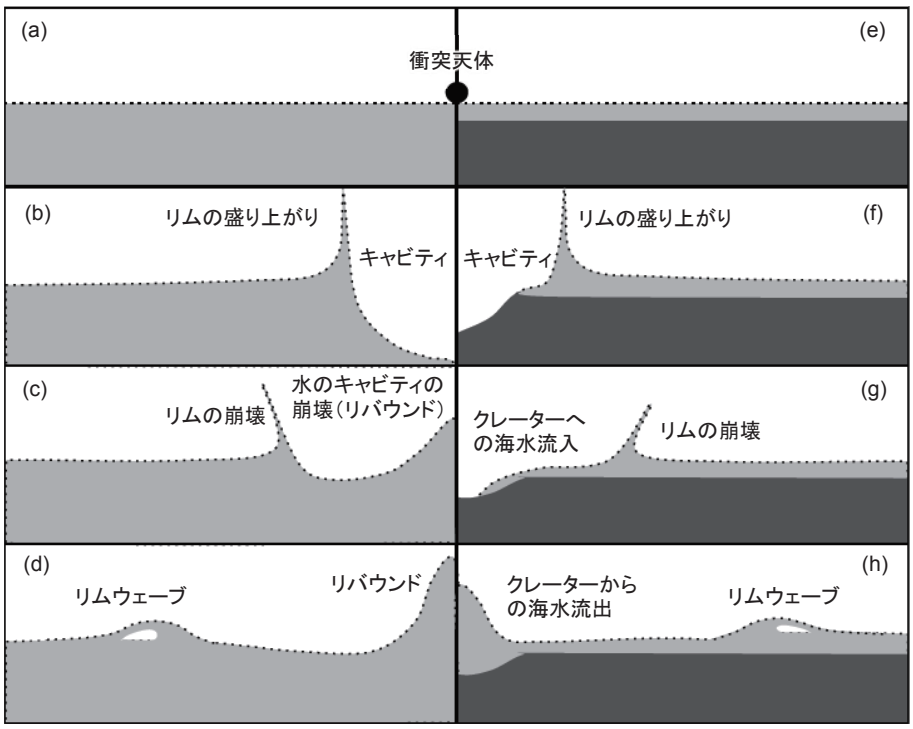

図2：(a)-(d)海底面にクレーターが形成されない場合の津波発生メカニズム．(e)-(h)海底面にクレーターが形成される場合の津波発生メカニズム．

ク評価を行った研究の代表例としては，Ward and Asphaug [8]が挙げられる．彼らは，衝突津波のリスクを確率的に評価し，東京やニューヨークなど世界の大都市に今後1000年以内に来襲しうる津波の波高とその確率を推定している．

2000年代前半の議論は，津波の波高や波長を解析的に求めたものが多いのに対し，2000年代後半になると，衝突プロセスから津波発生・伝播までを数値計算により求める研究が多くなされるようになった[9-11]．その結果の多くは，Ward and Asphaug [8]に代表されるような従来の解析的な研究は，衝突津波のリスクを過大評価していることを指摘している．

海水中に衝突孔(キャビティ)が形成されると，縁(リム)の盛り上がりはリムウェーブとして外向きに伝搬していく(図2a-d)．一方，キャビティ自体は水の流入や底の上昇(リバウンド)によって崩壊し，元の状態に戻ろうとする．衝突により発生する津波は，上記の過程の中でリムウェーブと水のキャビティの崩壊(またはクレーターへの海水の流入と流出)により発生すると考えられる[3]．リムウェーブは，波高は高いものの周期が極めて短くすぐに分散してしまうため，通常は考慮されない．衝突津波の数値計算を行った研究のほとんどは，水のキャビティの崩壊またはクレーターへの海水流入・流出を対象としている．

Wünnemann et al. [10]は，衝突に伴う津波発生プロセスを数値計算により検討し，深海での衝突後のキャビティ崩壊に伴い発生する波は，非線形性が強く急速に減衰するため，地震性の津波の数値解析などで利用される浅水理論の適用外となる場合があることを指摘している．彼らの計算によれば，深海域での衝突ではクレーターが形成されず，水のキャビティは数分で復元される．そのため，波の周期も数分～数十分と短く，地震性の津波(数十分～1時間以上)と比べても短い波になることがわかる．

同様に，Gisler et al. [11]は，数値計算の結果から直径500 m以下の小天体が海洋に落下しても，沿岸部に甚大な影響を及ぼすような大きな津波は発生しないとしている．その理由として，キャビティの崩壊のプロセスでは，波長が短い波(キャビティの直径の2倍程度が最大)が発生する．そのため，深海域で砕波すること，衝突に伴う風の影響で進行が妨げられることにより，こうした波は遠方まで効率的に伝播しないと考えられる．Gisler et al. [11]の推定では，直径500 mの天体が5 kmの深さの海に衝突しても，沿岸部での津波高は2004年インド洋大津波(<30 m)より規模が小さいと考えられる．

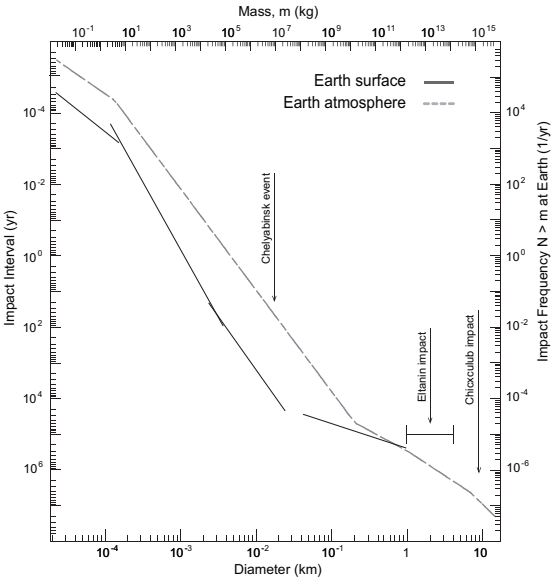

図3：衝突天体の直径と衝突頻度の関係(Bland and Artemieva, [13,14]を改変)．地球表層への衝突頻度は，大気圏に衝突する頻度より大幅に低くなる．

以上の研究は，衝突地点の水深が深く衝突天体のサイズが小さければ，長波として遠方まで伝播しうる津波が発生しないことを意味している．その一方で，衝突地点の水深が浅く天体のサイズが大きければ，海底にクレーターが形成され(図2e-h)，場合によってはリムにより衝突クレーターへの海水流入が阻止されるため，やはり効率的に津波が発生しないということになる．つまり，衝突天体のサイズと衝突地点の水深をパラメータとして，あるサイズの衝突天体に対して，発生する津波が最大になりうる水深が存在すると予想される．しかしながら，こうした可能性についての検討事例はまだない．もちろん，以上は理想的な地形条件下で言えることであって，津波の発生や伝搬には海底や地上の地形や地質の影響がかなり効くことに留意が必要である．

3. 衝突津波の発生頻度

地球への天体衝突頻度についての既往研究[12]に基づけば，直径10 m，直径100 m，直径500 mの天体の地球(大気圏)への衝突頻度は，それぞれ約10年，6000年，14万年に一度程度となる(図3)．ただし，こうした頻度分布は小惑星帯の小惑星のサイズ分布や月面のクレーターのサイズ分布などから推定されている．厚い大気を有する地球の場合，大気圏通過中に天体が分裂する場合があり，実際に海面に衝突する際のサイズが大気圏に突入する前のサイズと同じとは限らない．また，衝突津波の発生頻度を議論するには，陸域を除いた海洋に衝突するケースのみを考慮する必要がある．

Bland and Artemieva [13, 14]は，大気中で天体が破壊される効果を考慮した場合の地表面への衝突頻度を推定している．それに基づけば，直径数100 m以下の天体が大気圏に突入しても粉々になり，破片集団として質量で2割程度が地球表面に落下するにすぎないと考えられる．また，地表面に直径10 m，100 mの天体が衝突する頻度は，それぞれ約1500年，4.5万年に一度程度と，大気圏に突入する時点での天体のサイズを用いた頻度分布より数桁低い頻度となる(図3)．一方，直径500 mクラスになると大気の影響をほとんど受けないので，地表面への衝突頻度は15万年に一度程度となり，大気圏に突入する頻度と大きくは変わらない．

ここで，日本への衝突津波の影響を考える場合，太平洋が地球表面に占める割合(約1/3)を考慮する必要がある．つまり，日本に影響を及ぼしうる津波の発生頻度(＝太平洋への衝突頻度)は，直径10，100，500 mの天体について，それぞれ4500年，13.5万年，45万年に一度程度と極めて低くなる．

4. 衝突津波リスク評価は必要か？

2章と3章で述べたように，衝突津波は従来考えられていたよりも効率的に伝播しないと考えられることに加え，海洋に実際に衝突する際の天体のサイズを用いた場合の衝突頻度は低い．人間社会，特に日本に影響を及ぼしうる太平洋への衝突に限定すれば，その発生確率はさらに低くなる．ただし，確率が低ければ衝突津波のリスク評価を行わなくても良いというわけではない．2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は1000年に1度程度の低頻度災害であった．チェリャビンスクイベントも，同サイズの天体の衝突頻度だけ見れば100年に1度程度と比較的高頻度であるが，人口密集地帯で発生する確率ははるかに低かったはずである．河田[15]によれば，我が国での歴史上の地震・津波災害のうち，1割の低頻度巨大災害で，9割の犠牲者数を占めており，低頻度巨大災害のリスクを評価することが，いかに重要かがわかる．

また，既往研究の問題として，伝播・遡上計算がほとんど実施されていない点が挙げられる．これは，衝突プロセスから津波発生，伝播，遡上までの一連の計算を連続して行うことが現在の技術・計算機の能力では困難なことが最大の理由であろう．実際に，衝突津波の研究をこれまで行ってきた研究者の多くは衝突計算の専門家であり，津波の広域伝播計算が実施された例はほとんどない．

衝突津波の研究は，津波高が100 mを超える場合があり得るため，地球史を研究する地球科学者の大きな興味の対象でもある．そのため，地質スケールの痕跡が残るかが重要で，数値の大きさが取り上げられがちであるという問題もある．Gisler et al. [11]は，500 mの天体が5 kmの深さの海に衝突しても，2004年インド洋大津波より沿岸部での津波高は小さいと結論している．これは，地球史上のイベントとして考えた場合，広域に影響を及ぼしうるような規模にはならないという，惑星科学・地球科学的な考え方ではある．しかしながら，自然災害として考えた場合，Gisler et al. [11]が比較対象として挙げた2004年インド洋大津波で，20万人を超える犠牲者が出たことに目を向けなければならない．つまり，災害としては十分に大きいのである．

5. 日本を対象とした衝突津波の伝播計算

本研究では，実際にどの程度の津波が我が国沿岸に来襲しうるのかを予察的に検討するため，津波の伝播計算を実施した．初期条件として，衝突天体の直径(10, 50, 100, 500 m)から，Ward and Asphaug [8]に基づきクレーター直径と深さをまず推定した．ここで，リムウェーブの影響は無視して初期水位分布を与えた．

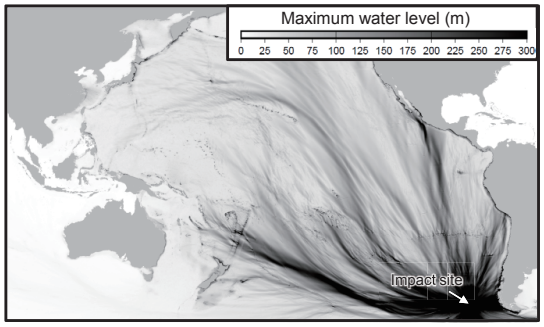

図4：エルタニン衝突を仮定した場合の太平洋全域での最大水位分布(m).

また，海洋底にどの程度のサイズのクレーターが形成されうるかについては系統立てて評価した研究事例がほとんどないため，本研究ではクレーターが海底に形成されない程度の深さに天体が衝突した場合についてのみ評価対象とした．つまり，水のキャビティが衝突により形成された状態を初期条件とし，キャビティが崩壊することで津波が発生すると仮定している．また，衝突に伴う海水蒸発の効果は考慮していない．

津波の伝播計算には，浅水理論を用いた[16]．ただし，初期条件によっては非線形性や分散性が強くなり，浅水理論が成り立たない場合があり得るため，将来的には砕波の影響なども考慮した高度なモデル(ブジネスクモデルやMAC法など)を使用する必要がある．なお，計算に用いた地形データは1 kmメッシュで，日本近海の複数の水深エリアにクレーターを設置し計算を実施した．

まず，本研究での計算結果と既往研究を比較するため，エルタニン衝突を仮定しWard and Asphaug [5]の結果との比較を行った．ここで，約215万年前の海水準は，現在より0–50 m程度低かったと考えられるが[17]，先行研究との比較を主目的としているため，海水準は現在と同じと仮定して計算を行った．図4に

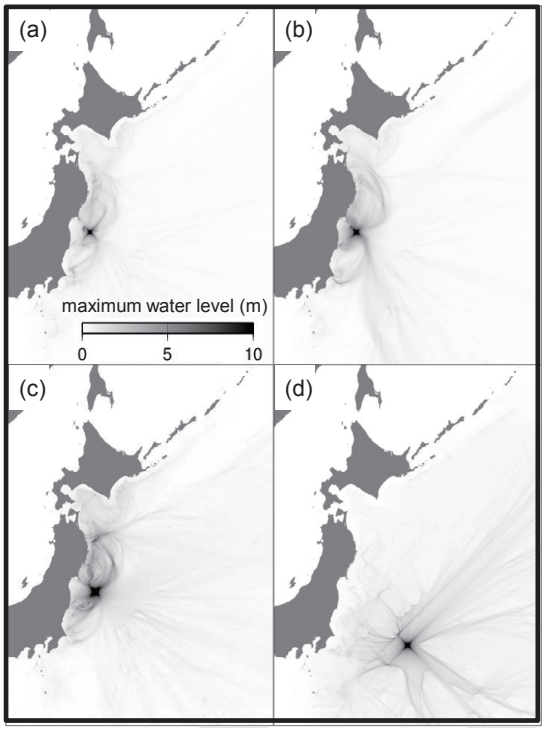

図5：直径10 kmの天体が水深(a)210 m，(b)500 m，(c)1000 m，(d)5000 m地点に衝突した際に発生する津波の最大水位分布(m).

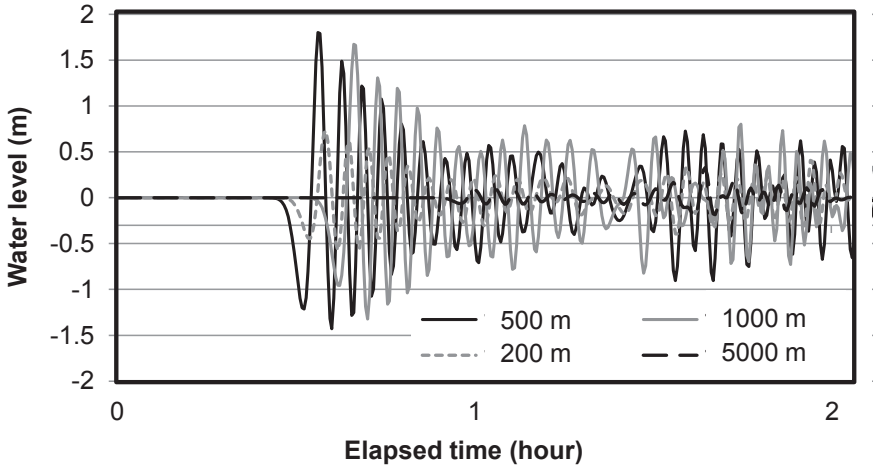

図6：図5に示した各事例について，東北沖の水深50 m地点での水位の時系列変化.

図7：直径500mの天体が水深5000m地点に衝突した際に発生する津波の最大水位分布(m).

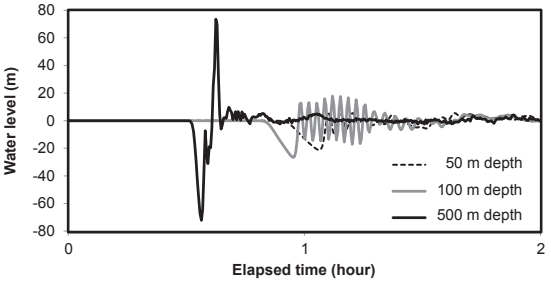

図8：図6に示した各事例について，東北沖の水深500m，100m，50 m地点での水位の時系列変化.

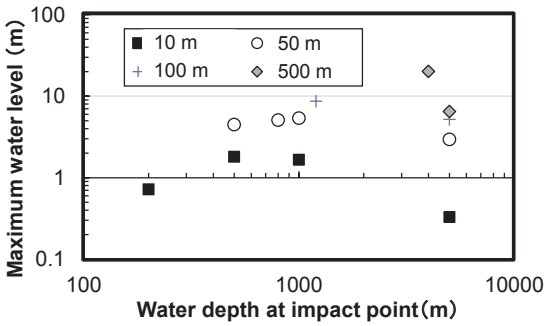

図9：各直径の衝突天体が特定の水深に衝突した際の，水深50m地点での最大水位(m).

示すように，基本的には衝突地点からの距離が増すほど津波高さは低減していき，約1000 km地点での波高は100 m程度と，Ward and Asphaug [5]の結果とおおむね整合的であった．この場合，我が国沿岸での沖合いの津波高は約30 m程度となる．

図5には，直径10 mの天体が日本近海での水深210 m，500 m，1000 m，5000 mの海洋に衝突した場合(クレーター直径1.0 km，深さ0.2 kmを仮定)の最大水位分布を，図6には各地点で発生した津波が水深50 m地点に到達した際の水位の時系列変化を示している．海岸線付近では，浅水変形によりさらに水位が増大すると考えられる．図5を見ると，衝突地点から沿岸部までの海底地形を反映して波の指向性が確認できる．また，図6から，水深500 mに衝突した場合の水位がもっとも沿岸部で高いことがわかる．これは，2章で述べたように衝突天体のサイズと水深により，発生する津波が極大となる事例が存在することを示唆している．

図7には直径500 mの天体が日本近海の水深5000 mの海洋に衝突した場合(クレーター直径12 km，深さ4 kmを仮定)の最大水位分布を，図8には水深50 m，100 m，500 m地点での水位の時系列変化を示している．衝突地点周辺では100 mを超える水位となるものの，沿岸部に押し寄せるのにつれて急速に水位が低減し，東北地方沿岸の水深50 m地点ではわずか数mにまで減衰する．この理由はまだ明らかではないが，大陸棚縁辺部で急速に水位が低下しているように見えることから，大陸棚で反射波が発生し，その影響による波のエネルギー減衰などが考えられる．大陸棚の沖合では，第一波の押し波が到達する前に約80 mもの水位低下から始まっており，大陸棚上が浅瀬になるほどの水位変動が起きることになる．その後に80 mの水位の波が押し寄せるため，波形勾配が増加し大陸棚縁辺部で砕波が起きることも考慮する必要がある．こうした大陸棚の影響はヴァン・ドーン効果と呼ばれ[18]，衝突津波の沿岸波高を低減させるのに大きな効果を発揮していると言える．一方で，伊豆―マリアナ海溝沿いの島々周辺など，大陸棚が存在しない場所では，水位が高くなっていることがわかる．

図9には，各衝突天体のサイズについて，衝突地点

の水深と水深50 m地点での最大水位を表示している．この図からも，津波の波高は必ずしも衝突天体のサイズや衝突地点の水深に依存せず，津波が最大となる衝突天体のサイズと衝突地点の水深の組み合わせが存在することが予想される．太平洋に直径10 mの天体が衝突する確率は4500年に一度程度と推定されるが，この程度の小規模衝突でも，沿岸部での津波高は数mに達し，被害が生じうることは留意すべきであろう．

6. まとめ

衝突津波の発生頻度は，他の災害に比べれば低いものの，現実的な災害リスクとして認識する必要があることは確かである．重要なのは，衝突津波のリスクは確率的に評価が可能な点である．この点は，海底火山カルデラ崩壊や海底地すべりに伴う津波など，どこでいつ発生するかを確率的に予測することが困難な事象とは大きく異なる．国や自治体，原子力発電所の安全審査等，どの程度の発生頻度のハザードまで考慮するかは対象によって異なるものの，衝突津波の影響は太平洋全域を対象に多数の計算を一度実施しておけば，現在の量的津波予報のような形でデータベース化することも可能である．

一方で，衝突津波は惑星科学的にも興味深い現象の一つである．例えば，Iijima et al. [19]は，火星に海洋が存在したと仮定して衝突津波の数値計算を実施し，どのような地形条件の場所で衝突津波の地質学的痕跡が残りうるかを検討している．超高精度の衛星画像が得られるようになった現在，数値計算により津波の地質学的痕跡が見出せる可能性のある画像（地点）を選定することで，効率的に研究を実施できると言う利点もある．

今後の検討課題としては，クレーターが海洋底に形成されうる規模，水深での衝突津波の計算を行う必要がある．この場合，津波の周期がより長くなると予想され，今回の検討とは大きく異なる結果になると予想される．また，海水蒸発の効果，グリッドの細分化や高度なモデルを使用するなどの検討が必要である．

謝 辞

査読者であるダヌンツィオ大学の小松吾郎博士には，本稿を改善するにあたって極めて有益なご意見を賜った．ここに謝意を表する．

参考文献

[1] Dypvik, H. and Jansa, L. F., 2003, Sediment. Geol. 161, 309.
[2] 後藤和久ほか，2004，遊星人 13, 241.
[3] Matsui, T. et al., 2002, Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 356, 69.
[4] Gersonde, R. et al., 1997, Nature 390, 357.
[5] Ward, S. N. and Asphaug, E., 2002, Deep-Sea Res. II 49, 1073.
[6] Goff, J. et al., 2012, The Holocene 22, 1067.
[7] Ward, S. N. and Asphaug, E., 2003, Geophys. J. Int. 153, F6.
[8] Ward, S. N. and Asphaug, E., 2000, Icarus 145, 64.
[9] Weiss, R. et al., 2006, Geophys. J. Int. 167, 77.
[10] Wünnemann, K. et al., 2007, Meteorit. Planet. Sci. 42, 1893.
[11] Gisler, G. et al., 2011, Pure Appl. Geophys. 168, 1187.
[12] Chapman, C. R. and Morrison, D., 1994, Nature 367, 33.
[13] Bland, P. A. and Artemieva, N. A., 2003, Nature 424, 288.
[14] Bland, P. A. and Artemieva, N. A., 2006, Meteorit. Planet. Sci. 41, 607.
[15] 河田恵昭，2001，防災学ハンドブック(朝倉書店), 740p.
[16] Goto, C. et al., 1997, IUGG/IOC Time Project, IOC Manuals and Guides, 130 pp.
[17] Compton, J. S., 2011, Quart. Sci. Rev. 30, 506.
[18] Melosh, H. J., 2003, LPSC Abstract, #2013.
[19] Iijima et al., in press, Planet. Space. Sci.

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

「スペースガード」とは何か

吉川 真[1]，山口 智宏[2]

（**要旨**）天体の地球衝突を扱う活動が「スペースガード」であるが，この活動が本格化してから20年以上が経過した．地球接近天体（NEO：Near Earth Object）の発見数も1万を超え，この数は今後もさらに増加していくことが予想される．国連でのスペースガードの議論も10年以上となり，今後の対処方針も固まりつつある．そのような状況下で，ロシアに隕石が落ち大きな被害が生じた．ここでは，スペースガードとはどのような活動なのかについてまとめ，その問題点や今後について議論する．

1. スペースガードとは

天体の地球衝突を扱う活動を「スペースガード」と呼ぶ．スペースガード（Spaceguard）という言葉は，アーサー・C・クラークのRendezvous with Rama（1973年刊，邦訳「宇宙のランデブー」，早川書房）というSF小説で，初めて使われた言葉である．直訳すれば，「宇宙監視」とか「宇宙保護」あるいは「宇宙防衛」とでもなるであろうが，日本語でもそのまま「スペースガード」と呼んでいる．実際に意味するところは，“宇宙から衝突してくる天体から地球を守る”ことである．

天から星が降ってくるということは，天文学がどんどん進展していく中，長い間まじめに取り上げられることはなかった．まさに，“杞憂”であった．もちろん，天体が衝突するという事実は認識されていたわけであるが，防ぐべき自然災害としては認識されなかったのである．その理由は，地球に接近するような天体があまり発見されなかったためである．しかし，観測技術が進んで地球近傍にも多数の天体が行き交っていることが分かってきた．それで，比較的最近になってからスペースガードが真剣に取り組まれるようになったのである．その様子を，図1に示す．図1は次の章で述べる地球接近小惑星の月別の発見個数である．1980年代は一月あたり数個発見されれば多い方であったが，1990年代になると毎月のように発見されるようになり多い月には5個を超えるようになった．この頃からスペースガードというものに意識的に取り組まれるようになったのである．そして，1997年の終わりからは観測が本格化したため，発見の個数が一気に増えた．

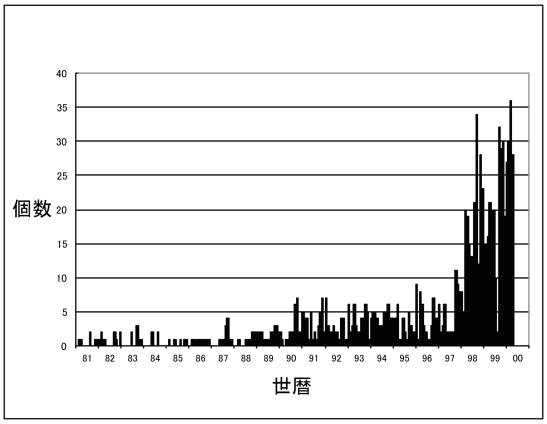

図1：地球接近小惑星の月別発見個数．1981年から2000年初頭までのデータを示す．（マイナー・プラネット・センター[1]が公開しているデータより作図）．

さて，2013年2月15日，久々に天体衝突による大きな被害が発生した．ロシアのチェリャビンスクに落ちた隕石である．「久々に」と書いたのは1908年にシベリアで起こったツングースカ大爆発というものがあるからである．ツングースカの方は大きさが60 m程度の天体の衝突によると考えられており，2000平方

1. 宇宙航空研究開発機構
2. GMV, ESA-ESOC
yoshikawa.makoto@jaxa.jp

キロメートルもの森林が被害を受けた．チェリャビンスクに落ちた隕石の方は，NASAの推定によると17 mくらいの大きさの天体であるということである[2]．この隕石では多くの建物が被害を受け，負傷した人は1500人にものぼったという．

大きさが17 mとか60 mの天体でも地球に衝突すると大きな被害を生じるわけであるから，さらに大きな天体がぶつかってきたら大変なことになる．最も極端な例は，約6500万年前に起こったとされる天体衝突であろう．約6500万年前に恐竜を含む多くの生物が絶滅し，地質年代が中生代から新生代に大きく転換した．その原因として，直径10 kmくらいの天体の衝突が有力視されているのである．また1994年には，大きさが数kmの多数の核に分裂したシューメイカー・レビー第9彗星が木星に衝突し，地球規模の大きさの変色域をその表面につくったことがある．木星への衝突は地球への衝突とは異なるであろうが，衝突エネルギーの大きさをまざまざと見せつけてくれた．

このような災害が起こりうるということを知ってしまったからにはその対応策を検討しなければならない．それでスペースガードという活動が約20年前から始まった[3][4]．スペースガードは，最初は小惑星の研究者（観測や軌道計算）が中心で地球に衝突するような天体を把握しようという活動であった．この活動は現在でも続いているが，最近ではさらに衝突回避や自然災害対策という立場からも検討が行われるようになってきた．米国と欧州で活動が盛んであるが，日本でも1996年に日本スペースガード協会（現在はNPO法人）が設立され，小惑星の観測・研究や天体の地球衝突という問題を正しく知ってもらうためのアウトリーチ活動を行っている．また，後述するように国連の場でもスペースガードは10年間以上に渡って議論されている．

スペースガードとして重要なことは，まずは地球に衝突しうる天体をすべて把握することである．そのためには，望遠鏡による観測を行う必要がある．次に重要なことは，地球に衝突してくる天体をいかにして回避するかである．以下では地球に接近する天体やスペースガードについての現状をまとめてみることにする．

2. 地球接近天体・NEO

太陽系には，8つの惑星，5つの準惑星（2013年現在），惑星の周りをまわる衛星，多数の小惑星・彗星，そして地球大気に飛び込むと流星となる惑星間塵のような様々な天体があるが，近年，太陽系小天体と呼ばれる小惑星や彗星が注目を浴びるようになった．その理由は，太陽系や生命の起源や進化を調べたいという科学目的が主であるが，スペースガードも重要な理由である．スペースガードとしては，太陽系小天体の中でも

表1：地球接近天体（NEO）の分類

分類名		定義	説明
NEC		q<1.3 AU P<200 years	NEA=Near Earth Comet 近日点距離が1.3 AU以下． 周期が200年以下．
NEA		q<1.3 AU	NEA=Near Earth Asteroid 近日点距離が1.3 AU以下．
	アティラ（Atira）型	a<1.0A U Q<0.983 AU	小惑星の軌道全体が地球軌道の内側にある． （163693）Atiraにちなんで，命名．
	アテン（Aten）型	a<1.0 AU Q<0.983 AU	地球軌道と交差する小惑星で，主に地球軌道の内側に存在する．（2062）Atenにちなんで命名．
	アポロ（Apollo）型	a<1.0 AU Q<1.017 AU	地球軌道と交差する小惑星で，主に地球軌道の外側に存在する．（1862）Apolloにちなんで命名．
	アモール（Amor）型	a>1.0 AU	軌道は地球軌道の外側にある．ただし，近日点距離は1.3AUより小さい．（1221）Amorにちなんで命名．
	PHA	MOID<=0.05 AU, H<=22.0	PHA=Potentially Hazardous Asteroid NEAのうち，地球軌道との最小距離（MOID*）が0.05 AU以下で，絶対等級（H）が22等より明るい天体．

*Minimum Orbit Intersection Distance

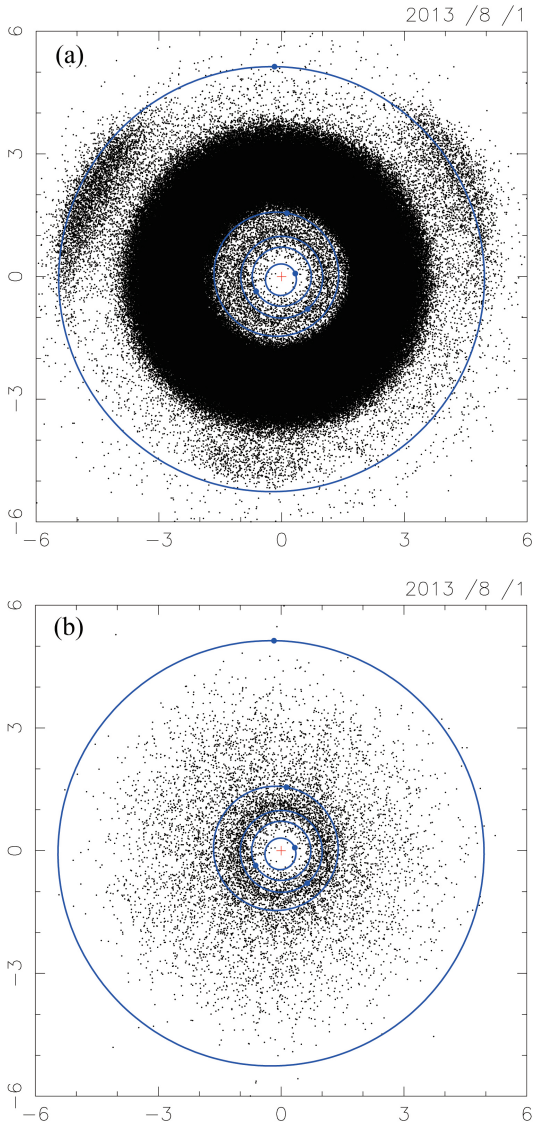

図2：小惑星とNEOの分布
2013年初めまで，に軌道が算出された全小惑星を(a)に，その中のNEOを(b)示す．中心が太陽，軌道は水星～木星，黄道面(地球の軌道面)に天体の位置・軌道を投影した．天体の位置は，2013年8月1日現在の位置である．(ローエル天文台[5]が公開している軌道データより作図)

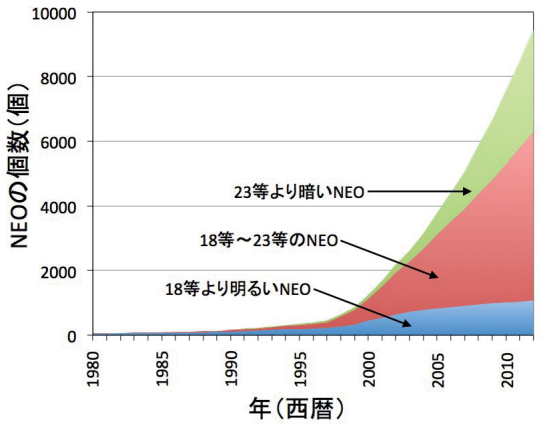

図3：発見されたNEOの累積数．
各年までに軌道が算出されたNEOの累積数を示す．等級は絶対等級※であり，小惑星の大きさに対応する．小惑星の大きさは小惑星表面のアルベド(反射率)によるが，アルベドを小さく0.05と仮定した合，絶対等級18等は直径1500m，23等は150mに相当する．(マイナー・プラネット・センターが公開しているデータより作図)
※太陽系天体の絶対等級とは，太陽および地球から1天文単位の距離にあり，位相角(太陽-天体-観測者がなす角)が0度と仮定したときの視等級のことである．

地球接近天体(以下では英語のNear Earth Objectの頭文字を取ってNEOと記す)と呼ばれている天体に注目している．

NEOとは，彗星や小惑星で太陽に1.3天文単位以内に接近する天体のことである．NEOは，軌道の特徴によって表1のように分類されている．近い将来について地球衝突を気にすべきものはPHA(Potentially Hazardous Asteroid)であるが，PHAでないNEOも太陽系の歴史のタイムスケールで見れば，地球に衝突する可能性がある天体ということになる．NEOには小惑星と彗星があるわけだが，ここでは小惑星の方に着目する．もちろん，地球衝突を考える上では彗星も小惑星同様に重要であるが，その衝突頻度は遥かに小さい．以下では特に混乱の恐れはないので，小惑星のNEO(つまりNEA)を単にNEOと書くことにする．

図2に最近の小惑星の分布を示す．2013年7月には，発見されて軌道が算出された小惑星が62万個を超えた．このうち，NEOは約1万個にのぼる．図2(a)にプロットした小惑星の中でNEOだけ抜き出したものが図2(b)である．この図を見れば分かるように，地球に接近してくる小惑星は木星軌道近辺まで分布しているのである．

NEOの発見第1号は，1898年に発見された小惑星エロスにまで遡る．しかし，スペースガードとしてNEOが注目されるようになったのは，すでに図1で，見たように1990年代になってからである．そして，NEOの観測が本格化するのは1997年末くらいからとなる．図3にNEOの発見の累積個数の推移を示す．1998年くらいからNEOの発見が急に増えた理由は，

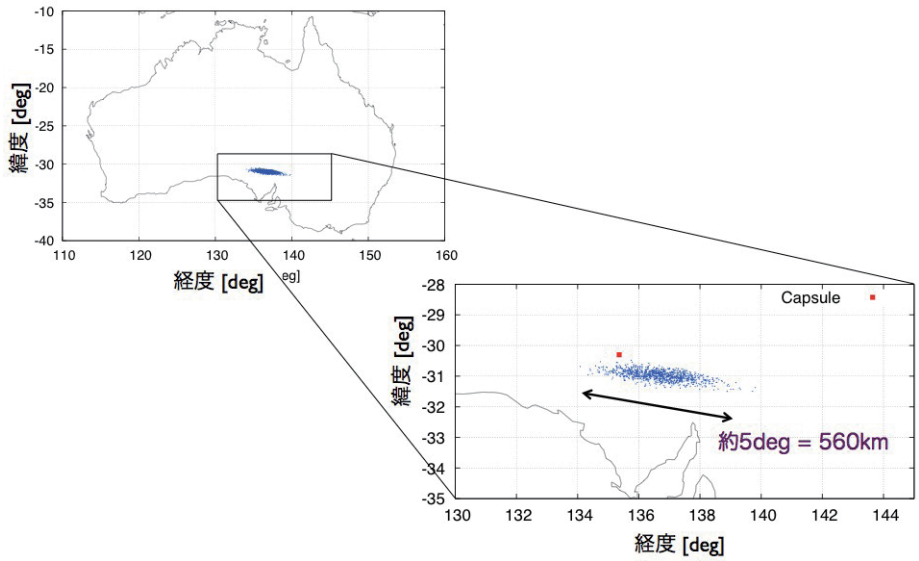

図4：小惑星探査機「はやぶさ」を隙石と見立てて観測したときの地球衝突予測位置．
光学観測データより「はやぶさ」の軌道を決定し，その誤差範囲についてモンテカルロシミュレーションで落下位置を予測した．右下の図で小さな■は実際に「はやぶさ」のカプセルが着地した位置を示す．

米国でLINEAR（リニア）というNEO発見のプロジェクトが始まったためである[6]．その後も米国を中心としていくつかの観測プログラムが動き出しており，発見数は増大の一途をたどっている．

図3には小惑星の明るさ（絶対等級）別の内訳も示されている．特徴的なことは18等よりも明るい小惑星，つまりより大きな小惑星の発見数の伸びが鈍っていることである．これは，大きな小惑星についてはだんだんと発見し尽くされてきたということを意味している．それに対してより小さな小惑星の発見数は直線的に増大している．このことは，我々が知らない小さなNEOがまだまだ沢山あることを示唆している．

3. スペースガードの活動

スペースガードとしては，まずは地球に衝突しうる天体をすべて把握するということが重要である．これは，主に地上の望遠鏡での観測による．事前に地球に衝突してくる天体を発見し軌道を正確に決めることができれば，いつどこに天体が衝突するかは正確に予測できる．実際，2008年10月にスーダンに落下した隕石については，落下の1日弱前ではあるが，発見された小惑星2008 TC3[7]が地球に衝突することが計算され，衝突場所や時刻が判明していた．また，小惑星探査機「はやぶさ」が地球に帰還するときに，「はやぶさ」を地球に衝突してくる小惑星と見立てて光学望遠鏡により観測を行い，衝突場所を特定できることを筆者らが実証している[8]．

この「はやぶさ」のケースについて簡単に説明する．もちろん，「はやぶさ」は電波航法でその軌道が決定されているのであるが，「はやぶさ」が地球帰還するときに光学望遠鏡で観測キャンペーンを行った．その結果，「はやぶさ」のカプセルのリエントリ（=「はやぶさ」本体の大気圏突入）の約10時間前から7時間前にかけて，合計23個の観測データ（天球上の赤経・赤緯）を得ることができた．これを地球に衝突してくる小惑星のデータだと思って電波航法の情報は何も使用せずに「はやぶさ」の軌道を決めて，地球への衝突位置を予測してみたのである．その結果を図4に示す．カプセルの着地位置とかなり近いところに「はやぶさ」の落下位置が推定できていることがわかる．つまり，地球衝突直前でも観測データさえ取得できれば，衝突位置（および時刻）の推定は十分可能なのである．図4におけるカプセルの着地位置と推定位置のずれは，カプセルの方はパラシュートを開いて着地したのに対して，推定位置の方は大気抵抗は考慮せずに軌道計算したためだと思われる．また，より長い期間についての観測データが取得できれば，誤差範囲はより小さくなる．

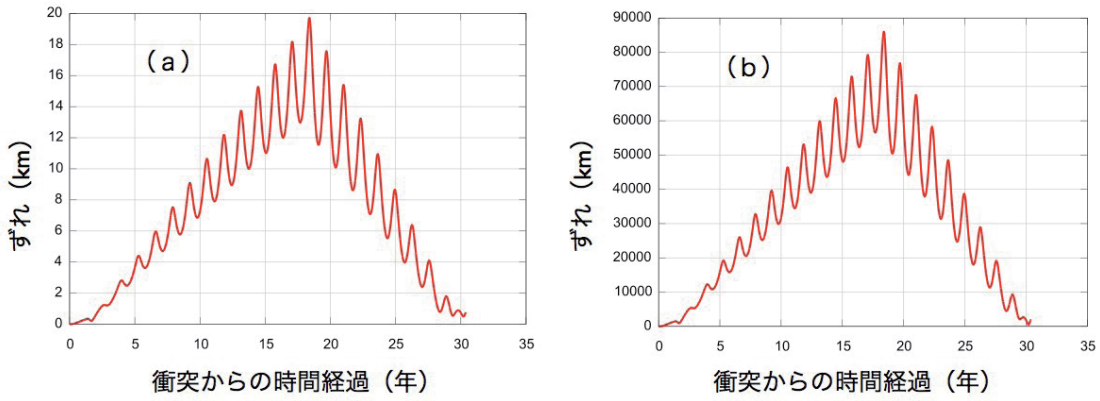

図5：小惑星に探査機を衝突させたときの軌道のずれ．
小惑星に探査機を衝突させたときに，元の軌道からどのくらいずれるのかを計算した．(a)は小惑星の大きさを1000m，(b)は60mと仮定した．小惑星の密度は，小惑星イトカワと同じ1.9g/cm^{3}とした．

このように，観測さえきちんとできれば，天体の地球衝突は，衝突場所と時刻が予測可能である．スペースガードの観測は米国を中心として発見・追跡観測が盛んに行われているが，チェリャビンスク隕石をきっかけにさらに進んだ観測を行おうと言う機運が高まってきた．日本では，日本スペースガード協会が10 m程度の大きさの天体を地球衝突2日前くらいまでに発見できるような観測施設の整備を呼びかけている．

次に重要なことが，天体の地球衝突を回避するためにどのようなことを行うかである[9]．実は，天体の衝突回避は難しい．現在の技術で可能なことは，探査機(宇宙船)を小惑星に衝突させて小惑星の軌道を変えることである．たとえば，大きさが100 mくらいの天体が20年後とか30年後に地球に衝突するというような場合には，なるべく重い探査機を大急ぎで打ち上げてその天体に体当たりさせれば，衝突は避けることが可能である．つまり，小惑星の軌道が探査機の衝突で少しだけ変化して，その変化(ずれ)が時間が経つと増大し地球衝突が回避されるわけである．

筆者らは，試みに「はやぶさ2」の探査天体である1999 JU3という小惑星の軌道を用いて，そこに500 kg程度の探査機を衝突させたとして小惑星の軌道がどのくらい変化するのかを計算してみた．計算では，小惑星の大きさを実際に近い1000 mとした場合と，ツングースカ大爆発の時の60 mと仮定した場合の2ケースを行った．その結果を図5に示す．小惑星の大きさを実際に近い1000 mとしてしまうと探査機を衝突させたくらいではほとんど軌道はずれないが，大きさが60 mとすれば，ずれは20年近く経つと7万km程度までになる．つまり，これなら地球との衝突を回避できることになる．もちろん，衝突を回避する小惑星の軌道や探査機を衝突させるタイミングや条件によって小惑星の軌道のずれは様々に変化するが，いずれにしても100 m以下の小さな天体ならば，このやり方で衝突回避が可能であると考えられる．

しかし，天体がより大きかったり，地球衝突までの時間が短かったりするとこの方法は使えない．他の衝突回避手段としては，重力による牽引(グラビティートラクター)，レーザー光線や太陽光圧を利用するもの，物質を勢いよく放り出すマスドライバー，核爆発などが考えられているが，どれも決定的ではない．天体が大きい場合や衝突までの時間が短い場合には，エネルギー的には核エネルギーしか対応できないが，核爆発をうまく小惑星の軌道を変えるのに使えるかどうか詳細な検討が必要である．ちなみに，映画によくあるように衝突してくる天体を爆破して破壊してもあまり意味はない．爆破できたとしても多数の破片が地球に衝突してくるから被害を避けることはできないのである．

衝突の回避ができない場合，次に考えることは被害を最小にすることである．事前に発見できていれば，いつどこに天体が衝突するかは正確に予測できるから，被害範囲を予測して被害が最小になるような措置をとるとともに人々を避難させればよい．すでに述べた2008 TC8という天体の場合は，わずか衝突1目前ではあるが発見されてすぐ地球に衝突することが分かり，正確な衝突位置が割り出された．この天体は大きさが

3 m程度と小さかったこともあり，人々の避難というようなことにはならなかったが，事前に天体衝突が予測できれば人々の避難も可能である．チェリャビンスク隕石の場合には，太陽の方向から天体が接近したために事前に発見されなかった．このようなケースについては，事前発見をどのように行うかが課題である．

この被害を最小にするという考え方は，衝突してくる天体が小さくて被害が局所的にとどまる場合に有効であるが，衝突してくる天体が大きい場合には解決策にはならない．避難することで直接的な災害から逃れることができたとしても，衝突後に生じると思われる地球環境のグローバルな変化からは逃れることはできないからである．大きな天体の衝突については，まだ具体的な解決策はない．

4. スペースガードに対する小天体探査の役割

天体の地球衝突を回避する場合，事前に相手の天体の素性を調べておくことが重要である．小惑星イトカワは小惑星探査機「はやぶさ」が探査した小惑星であるが，その軌道は地球軌道にかなり接近するものになっている．つまり「はやぶさ」は，世界で初めて実際に地球に衝突してくるような天体を詳細に調べたわけで，「はやぶさ」のイトカワ探査の結果はスペースガードの立場からも注目された．特に注目されたことは，イトカワの構造がラブルパイル（がれきの寄せ集め）ではないかと推定されたことである．大きさが500 m程度の天体が1つの固まりからできているのではないということは，このような天体が地球に衝突してくる場合の回避方法を考える上で重要である．

ただし，地球に衝突する可能性があるNEOを詳細に調べたのはまだイトカワの一例のみである[10]．アメリカのニア・シューメイカー探査機がNEO第1号である小惑星エロスを詳細に調べているが，エロスはその大きさが38 kmもある天体で，このように大きな天体が近い未来に地球に衝突する可能性は無い．イトカワはその反射スペクトルからタイプがS型と呼ばれる小惑星であるが，この他にもC型と呼ばれるものがある．地球に接近してくるC型の微小NEOもラブルパイル構造をしているのかどうかは，まだ分かっていない．それを調べるのが，日本が計画している「はやぶさ2」である（2014年打ち上げ予定）[11]．さらに，米国のOSIRIS-RExはB型の微小NEOの探査をする計画であり（2016年打ち上げ予定），これらの探査の結果が出ると，NEOの素性がかなり理解できることになると思われる．

探査機によって小惑星の軌道の変更を試みる構想もある．例えば，欧州で議論がされていたドン・キホーテ（Don Quijote）というミッションは，小惑星に探査機を衝突させて小惑星の軌道を変えることができるかどうかを検証するミッションである．1つの探査機が先に小惑星に到着しており，そこに2機目が来て高速で小惑星に衝突する．その後，引き続き最初の探査機が小惑星の周りに滞在し，軌道や自転運動が衝突によってどのように変化したのかを調べるのである．このミッションは，検討されたが実行に移されていない．一方，最近ではAIDA（Asteroid Impact & Deflection Assessment）ミッションの検討が欧米協同で行われている．この検討では，バイナリー小惑星（衛星がある小惑星）の衛星の方に探査機を衝突させ，別の探査機でその衝突の様子や軌道変化を調べようというものである．

さらに米国では，小惑星そのものを捕獲してしまおうというミッションも提案されている．ARMというAsteroid Retrieval Mission（後に Asteroid Redirect Mission）と呼ばれるもので，小惑星を丸ごと捕獲して地球近傍まで運んでこようというミッションである．ただし想定している小惑星のサイズは7 m程度までなので，スペースガードとしてはすぐには役に立たない．このくらいのサイズの天体なら，仮に地球に衝突しても大きな被害をもたらすことにはならないからである．

小惑星の軌道を変えることまではできなくても地球に衝突する可能性がある小惑星に探査機を送って，その探査機の軌道を正確に決定することで，小惑星の軌道をより正確に把握し，衝突をより正確に予測しようというアイディアもある．通常，小惑星の観測は光学望遠鏡を用いて行われており，その軌道決定精度は探査機の軌道決定精度に比べると低い．レーダーによる小惑星観測が行われれば軌道決定精度は上がるが，小惑星が地球に接近しないとレーダー観測が成立しない．そのために，探査機を小惑星に送って小惑星の軌道決定を行うことは，非常に有効である．また，何らかの手段でその小惑星の軌道変更を試みたときに，実際にどのくらい軌道が変化したのかを知るためにも有効で

表2：小天体探査とスペースガード

探査の種類	スペースガードとしての目的	具　体　例
科　学　探　査	小惑星の形状，質量，密度，表面，内部構造などを詳細に把握することで，衝突回避のための情報とする．	ニア・シューメイカー，はやぶさ，はやぶさ2*，OSIRIS-REx*
軌　道　変　更	探査機を衝突させることで，小天体の軌道を変更する．	スター・ダスト，ドン・キホーテ*，AIDA*，ARM*
軌道の詳細決定	探査機を小惑星近傍に滞在させることで，その小惑星の軌道を正確に把握する．	はやぶさ2*
観　測　（発見）	スペースから小天体を発見する．（地上観測における制約を軽減できる：太陽方向からの接近する天体の観測など）	NEOSSat
観　測　（物理）	小惑星の大きさや組成について，小惑星まで行かずに推定できる．	IRAS，あかり，WISE，MSX，ISO，Spitzer，Herschel

*印は，まだ打ち上げられていない探査機を示す

ある．

この他，宇宙を利用するケースとしては，宇宙からの小惑星の観測（発見と追跡）が考えられる．最近では，人工衛星からの小惑星の観測も行われるようになってきた．特に，赤外線観測衛星のIRAS（Infrared Astronomical Satellite），「あかり」，WISE（Wide-field Infrared Survey Explorer）などが小惑星の観測を行っている．他には，MSX（Midcourse Space Experiment），ISO（Infrared Space Observatory），Spitzer Space Telescope，Herschel Space Observatoryなどの宇宙赤外線望遠鏡が小惑星観測を行っている．これらは主に科学目的の物理的な観測であるが，最近カナダが打ち上げたNEOSSat（Near-Earth Object Surveillance Satellite）では，宇宙からNEOを探そうという試みがなされている．

以上をまとめてみると，表2のようになる．スペースガードのためには，地上からの観測だけではなく，スペースを積極的に活用していく必要がある．

5. 国際的協力

スペースガードについては，国際的な協力が重要である．観測についてはすでに国際天文学連合のマイナー・プラネット・センターを中心とした国際的な協力がある．一方，衝突回避の方はいろいろな問題がある．そもそも上述したように技術的に難しいと言うことに加えて，衝突回避に失敗したらどうするか，衝突回避をしたために別の地域に天体が衝突してしまったらどうするかなど，国際関係にも議論は及ぶ．

したがって，スペースガードについては1999年頃から国連でも議論が始まっているのである．国連での議論は，COPUOS（国連宇宙空間平和利用委員会）の中に設定されたアクションチームで行われてきたが，2013年の2月・6月の議論で，スペースガードに対応する国際的な対応案がほぼ固まり，実行に移していく段階に入りつつある．具体的には，NEOの観測や軌道解析などのネットワークを充実・強化し各国の防災関係者とのつながりも築くこと，および，衝突回避に向けては各国の宇宙機関に参加を求めて衝突回避の方策を議論するグループを作るということである．2013年のCOPUOSでの議論では，前者はIAWN（International Asteroid Warning Network），後者はSMPAG（Space Mission Planning Advisory Group）と言う名称で検討を進めていくことになった．

6. まとめ

小さな天体でもチェリャビンスク隕石のように地域的には大きな災害になりうるし，より大きな天体が衝突すれば人類の存亡にも関わることになる．頻度は少ないが起こると大変なことになるこの天体衝突という問題に対して，我々の子孫のためにもきちんとした行動を起こす時が来たと言える．これは「人類としての危機管理」であり，その基礎となるのが太陽系天体・隕石・地震・津波・環境・防災など幅広い地球惑星科学の知識なのである．そして，天体の衝突回避のためには探査やスペースでの活動が重要になる．

日本は，ミッションの主目的ではなかったにしろ「は

やぶさ」というミッションを通して，スペースガードに大きく貢献した．そして，今後，「はやぶさ2」の副産物としてスペースガードに貢献することになろう．その上で，人類共通の課題として国際的な協力体制を構築して，スペースガードの活動を進めていく必要があろう．

参考文献

[1] http://www.minorplanetcenter.net
[2] Yeomans, D. and Chodas, P., 2013, http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html.
[3] Bekey, I., 2009, Dealing with the Threat to Earth from Asteroids and Comets, IAA Publications.
[4] 日本スペースガード協会，2013，大隕石衝突の現実，ニュートンプレス．
[5] http://www.lowell.edu
[6] Stokes, G. et al., 2000, Icarus 148, 21.
[7] Jenniskens, P. et al., 2009, Nature 458, 485.
[8] Yamaguchi, T. et al., 2011, Publication of Astronomical Society of Japan 63, 979.
[9] Belton, M. J. S., Morgan, et al., 2004, Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids, Cambridge University Press.
[10] Scienceはやぶさ特集号：Science, 312 (2006), 1327-1353, Science, 333 (2011), 1113-1131.
[11] 吉川真，2012，日本航空宇宙学会誌 60, 455.

←目次へ

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

スペースガード観測の現状

浦川 聖太郎[1]，高橋 典嗣[1]，浅見 敦夫[1]，西山 広太[1]，
奥村 真一郎[1]，坂本 強[1]，橋本 就安[1]，三輪田 真[1,2]，布施 哲治[1,3]，
吉川 真[1,2]

（**要旨**）スペースガードとは，地球へ接近する太陽系小天体（Near Earth Object＝NEO）の発見，衝突回避の研究を行う活動である．1990年頃より，NEOの早期発見と軌道導出を行うスペースガード観測が世界各地で行われており，現在では1万を超えるNEOが発見されている．美星スペースガードセンターは国内唯一のスペースガード観測に特化した施設であり，NEOを始めとする太陽系小天体の発見，追観測，科学観測を行っている．本稿では，スペースガード観測の現状と，美星スペースガードセンターで行われている実際の観測，さらに将来の展望について紹介する．

1. スペースガード観測

1994年に起こったシューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突を一つのきっかけとし，彗星や小惑星といった太陽系小天体が地球へ衝突する脅威について広く認識されるようになった．そして，2013年2月15日のチェリャビンスク隕石落下により，衝突の脅威はより現実的なものであると改めて知らされた．スペースガードとは，地球へ接近する太陽系小天体（Near Earth Object=NEO）に対する発見，衝突回避の研究を行う活動である．このうちNEOの発見観測（以下，スペースガード観測）は，1990年頃より様々な観測プロジェクトにより実施されている．初期のスペースガード観測の国際的な目標は，地球に衝突すれば人類存続に致命的な影響を与える，直径1 km以上のNEOの90%を発見することと設定された[1][2]．現在までのNEOの発見数を表1にまとめる．861天体が直径1 km以上（絶対等級で17.75等級以上に相当）のNEOである．これはサイズ分布から推定される直径1 km以上のNEO数のほぼ90%に達しており，初期の目標は達成されたと言える．一方，直径1 km以下のNEOであっても，国/都市レベルの壊滅をもたらすには十分なエネルギーを有している．今後は，2030年頃までに直径140 m − 1 km（絶対等級で17.75 − 22.00等級に相当）のNEOの90%を発見することが，新たな目標として設定されている[3][4]．チェリャビンスク隕石の元になったNEOの直径は約20 mと推定されている[5]．この大きさのNEOは，地球に非常に近づいたタイミングで，運良くサーベイ網にかかることでしか発見できないのが現状である．

将来地球に接近するNEOの状況について述べる．2013年10月25日時点では，2010 RF_{12}が2095年9月5日に地球に衝突する確率が最も高く，8.1%である．しかし万が一衝突したとしても，このNEOの推定直径は7 mであり被害はほとんど起こらない．この直径は唯一落下予測に成功した2008 TC_3と同程度である[6]．NEOの危険性を評価する為には衝突確率だけでなく，衝突エネルギー（NEOの直径や衝突速度）を考慮しなければならない．直径が比較的大きいNEOのうち，衝突確率が高いものは1999 RQ_{36}（=101955）Bennu，2007 VK_{184}，2009 FDである．これらのNEOの推定直径はそれぞれ560 m，130 m，130 m，衝突確率は0.054%，0.055%，0.18%，最接近日時は2182年9月24日，2048年6月3日，2185年3月29日である．さらに，ごく最近になって，2013 TV_{135}が発見された．このNEOの推定直径は440 m，衝突確率は0.031%，最接近日時は2032年8月26日である．かつて，地球

1. 日本スペースガード協会
2. 宇宙航空研究開発機構
3. 情報通信研究機構
urakawa@spaceguard.or.jp

表1：2013年10月7日時点でのNEOの発見状況
（http://www.iau.org/public/themes/neo/nea/）．発見数の括弧内は，2178年までに地球に0.05AU以内に接近する天体（Potentially Hazardous Asteroids = PHA）の数．アルベド=0.15を仮定．

直　径　D（m）	＞ 1000	1000 - 140	140 - 40	40 - 1	全　体
絶対等級　H	＜ 17.75	17.75 - 22.00	22.00 - 24.75	＞ 24.75	
推定存在数	966 ± 45	～ 14000	～ 285000	---	---
発見数	861（155）	4923（1260）	2614	1909	10307（1415）
発見割合	89% ± 4	～ 35%	～ 1%	---	---

表2：主な観測プロジェクト

プロジェクト名	場所	口径	F値	視野
Spacewatch	アメリカ　アリゾナ	0.9 m	3.0	1.9°×1.8°
		1.8 m	2.7	0.6°×0.6°
LINEAR/GEODSS	アメリカ　ニューメキシコ	1 m×2	2.2	1.2°×1.6°
CSS	アメリカ　アリゾナ	68 cm	1.9	2.9°×2.9°
	アメリカ　アリゾナ	1.5 m	2.0	1.1°×1.1°
	オーストラリア　ニューサウスウェールズ	1.0 m	3.5	2°×2°
Pan-STARRS（PS1）	アメリカ　ハワイ	1.8 m	4.4	φ3.0°
ADAS	イタリア　アシアゴ	67 cm	3.2	0.8°×0.8°
LSSS	スペイン　ラサグラ	45 cm×3	2.8	1.6°×1.6°
TOTAS	スペイン　テネリフェ島	1 m	4.5	0.7°×0.7°
KLENOT	チェコ　Klet’	1.1 m	2.7	0.55°×0.55°
YSTAR,NEOPAT	韓国	50 cmなど		2°×2° など

への衝突が話題となった小惑星アポフィスの衝突確率は無視できる程小さくなっている．衝突確率が減少した要因は，追観測で軌道精度が向上した為である[7]．NEOの発見情報や軌道情報はMinor Planet Center（MPC）[注1]やNASA/JPLのNear Earth Object Program[注2]に詳しく紹介されている．

2. 世界のスペースガード観測

NEOの発見を行っている観測プロジェクトは，発見数のほとんどを占めるLINEAR（Lincoln Near Earth Asteroid Research），CSS（Catalina Sky Survey）などの大規模サーベイグループとそれ以外に大きく分けることができる．大規模サーベイはすべてアメリカ合衆国における組織であり，事実上，アメリカにおける大規模サーベイとそれ以外の国での小規模サーベイに分かれる．1990年代～2000年代初頭にかけての代表的な観測プロジェクトは，LINEAR，NEAT（Near-Earth Asteroid Tracking），Spacewatchなどである．これらのプロジェクトは口径1 mクラスの望遠鏡に広視野CCDカメラの組み合わせというシステムで観測を行っている．現在のスペースガード観測の中心　は，CSSとPan-STARRS（Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System）に移っている．CSSはアリゾナ州ツーソンのSteward天文台を中心に，同じアリゾナ州のレモン山天文台とオーストラリアのSiding Spring天文台で連携して行っているプロジェクトである．2013年の前半期までに4500を超えるNEOを発見している．Pan-STARRSは，ハワイ・ハレアカラ山頂で行われているサーベイプロジェクトである（NEOの発見だけを目的としていない）．口径1.8 m望遠鏡と広視野カメラからなる観測システムで，約7平方度（直径3度の円形状視野）の領域を一度に撮像する事ができる[8]．計画ではこの観測システムを4台稼働させる予定であり，2010年からプロトタイプを兼ねた1台目（PS1）での本格稼働が始まっている．現在，PS1だけで年間のNEO発見数の約半分を占めるまでになっているが，さらに2台目のPS2も完成している．アメリカ以外では，イタリア，スペイン，チェコ，韓国などで観測が行われている．一例として，スペインのLSSS（La Sagra Sky Survey）では，チェリャビンスク隕石落下の翌日に地表から27700 kmの距離まで接

注1：http://minor.planetcenter.net
注2：http://neo.jpl.nasa.gov

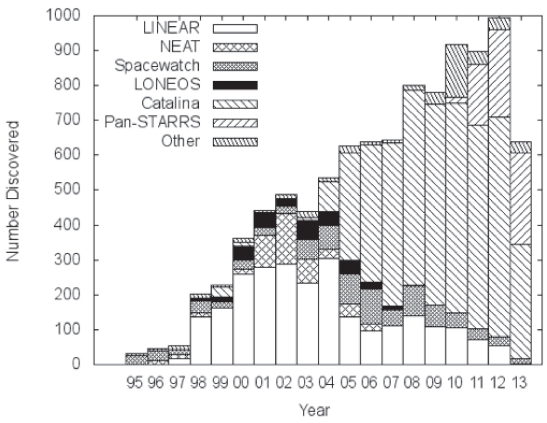

図1：観測プロジェクト別のNEO発見数の推移（MPCの公開データ．http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.htmlより作成）．2013年は9月7日までの発見数．

近した2012 DA_{14}を発見している．主な観測プロジェクトを表2にまとめる．

近年では，宇宙からの観測も実施されている．NASAの宇宙望遠鏡WISE（Wide-field Infrared Survey Explorer）は，口径40 cmの赤外望遠鏡であり，その観測波長は3.4 μm, 4.6 μm, 12 μm, 22 μmである．冷却剤がなくなり当初の観測計画は終了したが，冷却なしでも比較的問題の少ない3.4 μm帯と4.6 μm帯を用いたNEOサーベイをNEOWISEと名付け運用期間を延長して実施した．WISEによる観測で129のNEOが発見された．また，直径1 km以下のNEOのサイズ分布の再調査を行い，これまで予測されていたより，直径1 km以下のNEOが少ない事を明らかにした[9]．延長運用は2011年2月に終了したが，チェリャビンスク隕石落下により，スペースガード観測の重要性が再認識され，2013年9月に再運用を行うという発表があった．図1は観測プロジェクト別のNEOの発見数を示す．1990年代後半から2000年代初頭にかけて主要なプロジェクトであった，LINEARやNEATでの発見数は近年減少しており，CSSやPan-STARRSによる発見数が増加している．2010年に「Other」が急増しているが，これはWISEによる発見である．

3. 日本におけるスペースガード観測

日本におけるスペースガード観測は，岡山県井原市美星町の美星スペースガードセンター（以下，BSGC[注3]）で2000年から開始した[10]．BSGCは，口径1 m望遠鏡，口径50 cm望遠鏡，口径25 cm望遠鏡からなり，通常は口径1 m望遠鏡と口径50 cm望遠鏡を用いて観測を実施している（図2）．口径1 m望遠鏡の検出器は4096 × 2048ピクセルの4枚のCCDからなり，その視野は約2.6平方度である．口径50 cm望遠鏡の検出器は2048 × 2048ピクセルのCCDであり，その視野は約2.8平方度である．BSGCでは，NEOとともにスペースデブリの観測も行っている．観測は6人の観測者により，2人1組の交代制で，午後6時から翌朝午前6時まで365日体制で行っている．メインとなる口径1 m望遠鏡は2002年に完成し，その後も改良と改修を重ねて2007年から十分な性能を発揮できるようになった．これまでのNEOの発見は，25 cm望遠鏡による2000 UV_{13}（=20826）と1 m望遠鏡による2007 YZの2天体に留まっている．

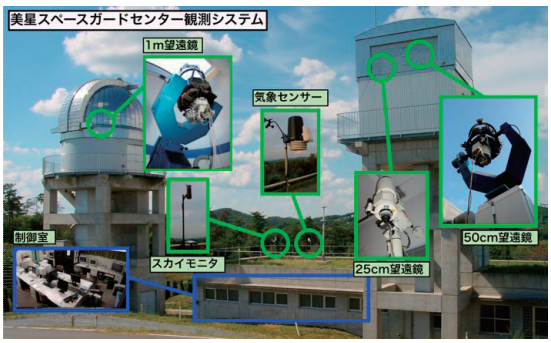

図2：美星スペースガードセンター観測システム

BSGCにおけるNEOの観測の実際について述べる．NEOは，メインベルト小惑星と異なり，黄道面付近に存在しているとは限らない．しかし，それでも存在確率は黄道面付近が一番高い．従って，黄道面付近の衝の位置を観測するとNEOを発見しやすい．ただし，この領域は他の観測プロジェクトも観測するため，BSGCではやや高黄緯の領域を観測することが多い．このようにして決めた領域を一晩に4回程度撮像し，その4枚の画像をパラパラ漫画のように比較する事で，NEOの検出を行う．恒星は視野内で動かないが，NEOは移動する．これをブリンク法という．BSGCでは，移動天体の検出を目視で行っている．これは，他の観測プロジェクトと比較して劣っている限界等級

注3：BSGCの施設は，一般財団法人日本宇宙フォーラムが所有し，日本スペースガード協会（JSGA）が観測を行っている．

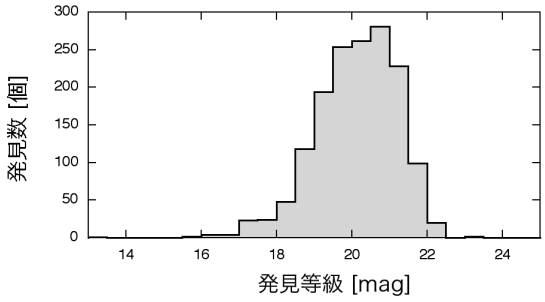

図3：NEOの発見等級の分布（MPCの公開データ，http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.htmlより作成）．現在では，短時間の露出で20 等級を検出できなければNEOの発見は困難である．

を補うためには，ノイズと同レベル程度の信号を判別することが可能な目視による検出が必要だからである．一般に，NEOはメインベルト小惑星より天球上での動きが速い．また，その動きの速さや方向は決まっていない．このような条件は，NEOを発見するために，長時間の露出をかけて限界等級を上げる事は難しく，30秒から60秒程度の短い露出時間で観測を実施する必要があることを示す．BSGCの場合，30秒露出を行った場合の典型的な限界等級は18等級である．この限界等級で発見できるような，大型のNEOの大半は発見されている．図3は2012年以降のNEOの発見時の等級を示す．現在のNEOの発見時の等級は20.5等級にピークがある．また，図4は発見されたNEOの絶対等級（直径に相当）の年次推移を示す．ごく稀に絶対等級16等程度（～直径2 km）のNEOが発見されるものの，平均すると年を経るごとに発見されるNEOの直径は小さくなっている．現在では絶対等級22.5等（～直径100 m）のNEOの発見が多い．従って，現在ではBSGCでNEOを発見する事は困難な状況であり，NEOの発見を目指した積極的な観測は行っていない．一方，Pan-STARRSなどで発見されたNEOの暫定的な軌道情報はMPCのNEO Confirmation Page[注4]で公開される．この暫定的な軌道に基づきNEOの動きに合わせて望遠鏡を追尾させれば，長時間の露出が可能となり，BSGCでも暗いNEOを検出することが可能となる．このような，即時追観測はNEOの正確な軌道導出をする上で重要である．例えば，2013年9月2日までの一年間に月軌道の5倍以内の距離まで地球に

注4：http://www.minorplanetcenter.net/iau/NEO/toconfirm_tabular.html

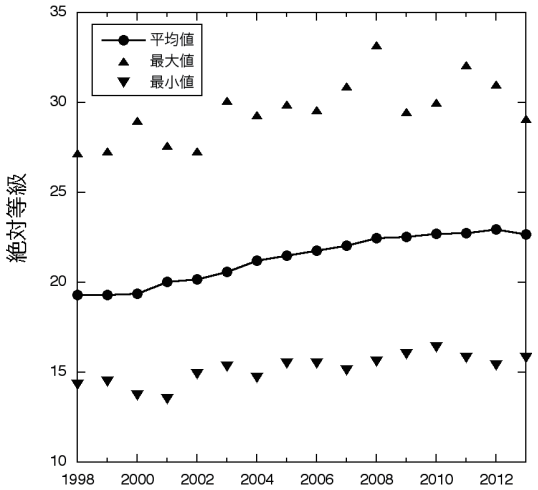

図4：発見されるNEOの絶対等級の年次推移（MPC の公開データ，http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.htmlより作成）．

近づいたNEOは110天体ある．このうち107天体が発見前後の数日の間に地球へ最接近している．発見されたNEOが次の回帰で必ず観測できるとは限らない（多くの場合，大型望遠鏡でも観測不可能な25等級以下になる）．従って，BSGCのような常に観測体制にある観測所において即時追観測を実施し，可能な限り正確に軌道を求めておくことが重要である．NEOの追観測に加え，既知のNEOであっても軌道精度を改良するためにある程度の期間ごと（典型的には数ヶ月から数年程度毎）に位置測定観測を実施する必要がある．

表3：美星スペースガードセンターで実施した観測のうち，Minor Planet Centerへ報告した天体数の推移．即時追観測を実施したNEO数とは，NEO Confirmation Pageに公表されたNEO候補天体に対する観測数である．発見候補天体は，観測時点において未発見であった太陽系小天体であり，主にメインベルト小惑星である．MPCに集約されている過去のデータとの精査の結果，必ずしもすべての発見候補天体が発見とならない．BSGCで発見したNEO,-2007 YZ-,は2007年の発見候補天体に含まれる．2010年よりNEOCP天体の即時追観測に観測の重点を移している．

年	即時追観測を実施したNEO数	観測をした既知のNEO数	発見候補天体数
2012	189	76	40
2011	212	97	133
2010	192	132	503
2009	39	13	1417
2008	24	14	301
2007	7	22	511

月明かりがあり，暗いNEOの検出が難しい状況下では，この種の観測もBSGCで実施している．2007年以降，BSGCで行った観測の状況について表3にまとめる．

2007年よりBSGC 1 m望遠鏡には，SDSSのg, r, i, zフィルターと，860 nmと1020 nmに中心波長を持つ狭帯域フィルターが導入された．これらのフィルターを用いる事で多色測光による小惑星のスペクトル型決定といった科学観測が可能となった．また従来から，ライトカーブ観測は可能である．これまで，イトカワや1999 JU_3のような探査天体のライトカーブ観測や，107P/Wilson-Harringtonのライトカーブ観測及び多色測光観測を実施してきた[11][12]．BSGCでは365日観測体制にあるので，太陽系小天体の突発現象にも即時対応できる．この利点を生かした科学観測を今後も行う予定である．BSGC以外での国内における小惑星の観測状況について述べる．常時の観測体制にはないものの，JAXA入笠山観測所で小惑星の観測が行われている．また，アマチュア天文家も観測を実施している．特に，世界各地の大規模サーベイプロジェクトが本格的に稼働するまで，小惑星の発見報告数は日本のアマチュア天文家が世界をリードしてきた．小惑星の発見報告は，MPCに集約される．未知の小惑星は，2日分の観測でその存在が確認されて初めて発見と認められる定義であった(2010年3月まで)．特定の天球上の領域を2日に渡り望遠鏡を向けるような入念な観測は，アマチュア天文家の得意とするところであり，十分な観測技術を有した日本のアマチュア天文家の貢献は非常に大きかった．しかし，MPCは1夜だけの観測報告を認めるようになった(2010年4月より)．さらに，その後の追観測で小惑星を確認できた時，発見者は最初に1夜目の観測を行った者と定義が変更された．この変更により，小惑星の発見はほとんど大規模サーベイプロジェクトのものとなり，アマチュア天文家の楽しみはなくなってしまった．著者自身の印象では，この変更は，様々な観測プロジェクトによるNEOの発見の増加に伴い「効率的なスペースガード観測のために世界中の観測者が協力すべき」というMPCの姿勢を反映したものであり，スペースガード観測の点では良かったと思っている．しかし，結果として小惑星の発見を行うアマチュア天文家が減少してしまった．もっとも，小惑星のライトカーブ観測に重点を移した者もおり，その分野で素晴らしい貢献を引き続き行っている[13].

4. 今後のスペースガード観測

チェリャビンスク隕石落下により，改めてスペースガードの重要性が認識されたように思う．しかし，現状ではチェリャビンスク隕石の元になったような小型のNEOの網羅的な発見は難しく，今後15－20年の期間で，直径140 m－1 kmのNEOの90%を発見し，軌道決定しようという段階である．Pan-STARRSに加え，計画中であるLSST(Large Synoptic Survey Telescope)では，口径8.4 m，視野9.6平方度の観測システムでサーベイ観測を実施する予定である．ここでもNEOの発見が重要な観測テーマとして提案されている．また，すばる望遠鏡Hyper-Suprime Camや検討が開始された宇宙望遠鏡WISH(Wide-field Imaging Survey for High-redshift)など，今後行われる大規模サーベイ観測でもNEOの検出が期待できる．この他にも，太陽方向から飛来するNEOの発見を目的として，カナダ宇宙庁により宇宙望遠鏡NEOSSat(Near-Earth Object Surveillance Satellite)が打ち上げられた．また，宇宙望遠鏡NEOCam(Near-Earth Object Camera)がNASAで検討されている．このような宇宙からのスペースガード観測も今後，重要な役割を果たすであろう．

一方，日本スペースガード協会においては上述したような観測を行ってきたが，1 mという望遠鏡の口径は，直径140 m－1 kmのNEOの発見を行うには力不足な感は否めない．この状況を変えるには，次世代の望遠鏡が必要不可欠である．現在，我々は次期望遠鏡の検討作業を行っている．スペースガード観測には，それ相応の資金や人的資源が必要である．しかし，これは人類存続に対する保険のようなものであると思う．今後ともスペースガード観測の発展のため，協力，理解を頂ければ幸いである．

参考文献

[1] Shoemaker, E.M. ed., 1995, Report of the Near-Earth Objects Survey Working Group. NASA, Washington DC. (Available on line at http://impact.arc.nasa.gov.)
[2] Morrison, D. et al., 2002, in Asteroids III, ed. W. F.

Bottke Jr. et al. (University ofArizona Press, Tucson), 739.
[3] Morrison, D. ed., 2006, Report of NASA NEO Workshop. NASA, Washington DC. (Available on line at http://impact.arc.nasa.gov.)
[4] Report to Congress, Near-Earth Objcet Survey and Deflection Analysis of Alternatives, 2007, NASA.
[5] Boslough, B., 2013, DPS meeting abstract 45, 110. 01.
[6] Scheirich, P. et al., 2010, Meteorit. & Planet. Sci. 45, 1804.
[7] Bancelin, D. et al., 2012, A&A 544, id.A 15.
[8] Kaiser, N. et al., 2010, Proceedings of SPIE 7733, article id. 77330E.
[9] Mainzer, A. et al., 2011, ApJ 743, 156.
[10] Isobe, S., 1999, Adv. Space Res. 23, 33.
[11] Muller, T. G. et al., 2011, A&A 525, 145.
[12] Urakawa, S. et al., 2011, Icarus 215, 17.
[13] Hamanowa, H. et al., 2009, The Minor Planet Bulletin 36, 87.

特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」

チェリャビンスク隕石の現地調査報告

高橋 典嗣[1,2]，吉川 真[1,3]

（**要旨**）ロシア，ウラル地域チェリャビンスク州に隕石が落下し，天体衝突による自然災害が発生した．隕石落下から43日後の3月30日に出発し，現地に赴いた．チェバルクリ湖の氷上には隕石落下の傷跡が，市街地には被害状況が残されていた．現地では，隕石爆発地点の計測，隕石落下地域の推定と隕石が採集された場所の確認，市街地の被害状況等を視察した．調査の過程で隕石を含む貴重な関連資料を収集することができた．本稿では調査全般について，及び調査で得られた知見について報告する．

1. はじめに

2013年2月15日9時20分26秒（YEKT），NASAの推定によると直径17 m，1万トンの小惑星が秒速18 kmの速度で地球大気圏に突入し，ロシア南部のウラル地域，チェリャビンスク州に落下した[1][2].

隕石は，チェリャビンスク市街地の南南東約60 kmから約40 km，上空約45 kmから28 kmで爆発し，28.89 kmで最大光輝となった．落下速度をカメリンスク・ウラルスキーで撮影された車載カメラの映像から求めると，最大光輝の前は18.9 km/sであったが，大爆発後には14.3 km/sに減速したことがわかった．チェバルクリ湖の手前5 km地点では4.8 km/sで落下していき，湖面には約2 km/sで衝突したと推測される．また落下経路に沿った直下の広範囲で多数の隕石が収集されている．隕石の最終到達地点と考えられるチェバルクリ湖では，湖上の氷に直径6 mの穴が空いた．現地調査の時には，穴は氷で閉ざされていた．その後10月16日には水深12 mの湖底から570 kgの隕石が収集された．

爆発地点から40 kmから50 km離れたチェリャビンスク市内の全域では，隕石の落下に伴う大爆発で生じた衝撃波によって，約3300棟の窓ガラスが割れ，約1500人が怪我をするという天体衝突による大きな自然災害となった．

この天体衝突による自然災害をもたらしたチェリャビンスク隕石落下の実体を把握することを目的とし，3月31日から4月3日までの4日間，現地調査を行った．

現地調査では，隕石爆発地点の計測，隕石落下地域の推定と隕石が採集された場所の確認，市街地の被害状況等を視察した．調査の過程では，チェリャビンスク隕石や被災の様子を映したビデオ画像などの資料を収集することができた．

2. 調査範囲

チェリャビンスク市は，ロシアのチェリャビンスク州の州都で，ヨーロッパとアジアの境界となるウラル山脈の南東部に位置し，鉱山資源を背景に18世紀から栄えた[3][4]．市内のチェリャビンスク駅はシベリア鉄道の起点となっている．

調査は表に示した日程で行った．図1には調査地域を示した．チェリャビンスク市内のホテルを起点とし，20 km北に位置する鉄鋼の町クルチャトフスキー，西南西70 kmに位置するチェバルクリ湖，西南西180 kmに位置する鉱山の町サトカ，南に30 kmに位置する石炭鉱山の町コルキノ，エマンジェリンカ，デプタツキーなどの広範囲の地域を調査した．

1. 日本スペースガード協会
2. 明星大学教育学部
3. 宇宙航空研究開発機構
takahasn@ge.meisei-u.ac.jp

表： 調査日程(出国：3月30日，帰国4月4日)

月　日	時　刻	調　査　地	調　査　内　容
3月31日	05:55	ホテル到着	調査計画の確認
	13:00	ホテルロビー	調査計画の打ち合わせ
	16:00	チェバルクリ湖	落下穴、市街地視察
	18:00	クルチャトフスキー	計測、被害状況視察
4月1日	09:30	テクノパーク	被害状況視察
	09:55	亜鉛工場・ペンキ工場	被害状況視察
	10:30	スケート場	被害状況視察
	12:00	歴史博物館	資料収集
	14:00	チェリャビンスク大学	資料収集、被害状況視察
	15:00	南ウラル大学	資料収集、被害状況視察
	16:30	キチキノ	計測、被害状況視察
	17:00	デプタツキー	隕石分布調査
	17:30	エマンジェリンカ	隕石分布調査
	18:00	コルキノ	計測、被害状況視察
4月2日	18:00	ウラル山脈	プレート境界視察
	18:00	サトカ	計測、資料収集
	18:00	自然史博物館	資料収集
	18:00	クルチャトフスキー	計測（再調査）
4月3日	09:00	チェリャビンスク市街地	資料収集、被害状況視察
	12:00	チェリャビンスク空港	資料収集

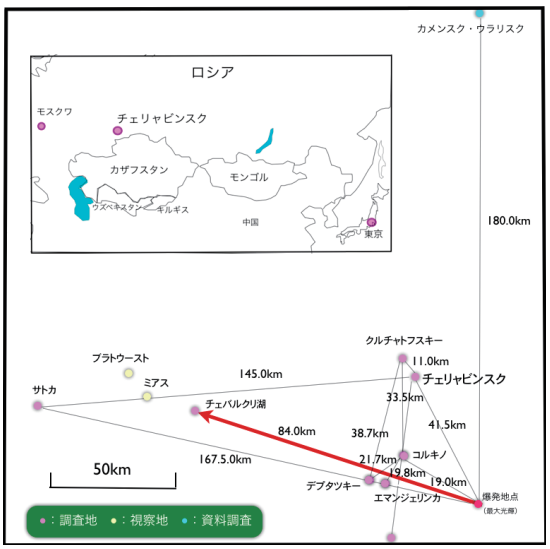

図1： 調査位置図.

図2： 計測地
①②の枠内の写真は車載カメラから，③の枠内はチェリャビンスク州警察提供，④はアレクシ・バブリック氏撮影.

3. 調査のあらまし

3.1　爆発地点の算出

ロシア国内の交通事情で，事故後の顛末の証拠として記録を残すために車載カメラを装備する車が多い．これが幸いし，隕石落下の様子が各地を走行していた車の車載カメラによりとらえられた．また隕石雲も多数撮影されている．

爆発地点は，最終落下地点のチェバルクリ湖(54° 58′ 00″ N，60° 18′ 18.9″ E)と車載カメラで撮影された場所が確定できた2箇所，隕石雲が撮影されたサトカの4地点(図2)から爆発の最大光輝の位置の方位と地平高度を計測して求めた．

現地調査により撮影地点を確定することができた場所は，クルチャトフスキー(55° 13′ 21.5″ N，61° 17′ 37.6″ E)，爆発地点直下のコルキノ町のマーケット(54° 53′ 27.9″ N，61° 23′ 58.2″ E)，西に120 km離れたサトカのアパート4階の部屋(55° 02′ 1.7″ N，58° 58′ 37.1″ E)の3地点であった．

この結果，爆発により最大光輝となった位置は，チェリャビンスク市の南南東41 km地点，上空28.89 km(54° 46′ 56.9″ N，61° 31′ 33.4″ E)となった．

最大光輝に達した後も，隕石は小爆発による分裂を繰り返し，破片を経路の直下に落としながら落下していった．最終到達地点のチェバルクリ湖から最大光輝の位置のなす地平角は19.5度で，大気圏に低角度で突入して落下したことがわかった．

3.2　隕石の落下範囲の推測

爆発地点から北に180 km離れたカメリンスク・ウラリスキー(Kamensk Uraiian，56° 23′ 53.8″ N，61° 55′ 56.1″ E)の車載カメラで撮影された画像には，最大光輝に達した後，隕石が小爆発を繰り返して落下して

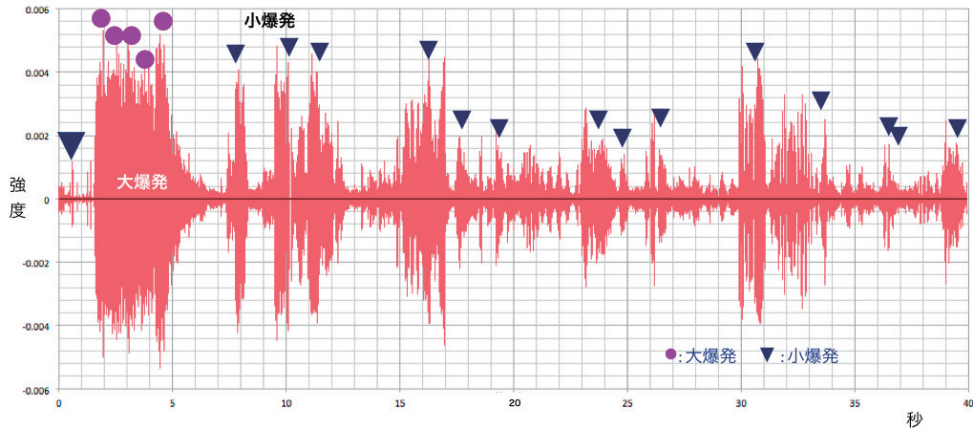

図3：爆発音のスペクトル．

図4：隕石落下の飛跡と隕石の分布推定．
カメリンスク・ウラリスキーで撮影された車載カメラの画像に爆発箇所を記載．最大光輝の位置からチェバルクリ湖までの水平距離84 kmの線上に推定した隕石分布と採集された隕石の位置を線上に記載した．

いく様子が明瞭に記録されていた．また，チェリャビンスク市内の南ウラル大学の学生が撮影したビデオカメラには，衝撃波の爆発音が録音されていた．

爆発音を解析すると図3のスペクトルが得られ，これより爆発の状況を読み取ることができる．大爆発の直前に小爆発が起きていた．その直後に最大光輝となる大爆発が起こる．大爆発は，4回の爆発が重なって一つになっていることがわかった．その後，隕石は小爆発を繰り返しながら落下していった．他の3地点で録音された音声の解析からも同様の結果が得られた．

南ウラル大学での爆発音は，約2分23秒遅れて到達している．この遅れを考慮すると，カメリンスク・ウラリスキーでの画像に記録されている大爆発，小爆発は，相対的に一致していた．

これらの爆発によって本体の隕石から分裂または剥離した隕石は，それぞれダークフライトして図4に示した経路の真下の地域に落下していると推察することができる．

現地調査では，大爆発に対応（直前と4回の大爆発）する経路上の直下に位置するエマンジェリンカ，デプタツキーで大量の小さな隕石が採集されていたことを確認した．しかし，ここで採集された隕石は，約1.5 kgのものもあったが，ほとんどの隕石は20 gから数gの小片であった．

隕石は，爆発地点の南北5 kmとチェバルクリ湖の衝突穴を結ぶ84 kmの範囲に点在しているものと推察され，分布密度は最大光輝の直下から離れると小さくなる．しかし，落下経路の先端ほど大きな隕石が分布すると考えられる．

雪解け後のロシアの調査では，予想した分布に対応する場所から多くの隕石が発見されていて，隕石の分布の地図も作製されている．10月16日には，チェバルクリ湖の湖底から570 kgの隕石が回収された．

しかし，チェバルクリ湖の手前とチェバルクリ湖の先，西側に最大の隕石がある可能性も残されているが，まだ発見の報告はない．

3.3 被害状況と現地の様子

(1) 概況

チェリャビンスク隕石の落下に伴う被害範囲，被害状況を把握することは，今後の天体衝突における被害域を予測し，衝突地域のハザードマップの作成につながる．また衝突する天体が実際に発見された際に，ハザードマップに基づいて衝突地域の防災計画，避難計画を策定する上でも重要な資料が得られると考えられ

図5：チェリャビンスク市の被害状況.

図6：衝撃波による被害状況（南ウラル大学）.

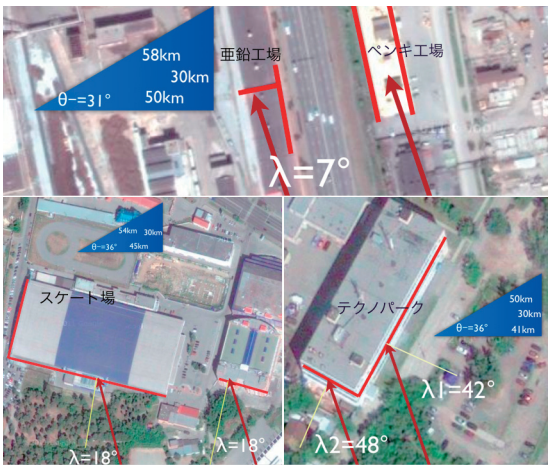

図7：建物被害と衝撃波の入射角.

る．そこで，チェリャビンスク市街地および落下経路に沿った地域において被害状況の視察を行った．

チェリャビンスク市の市街地は，隕石が爆発し最大光輝になった地点から北北東に約40 kmから50 km離れている．隕石は上空で分裂したため，大きさを維持したまま地上に衝突することは避けられた．しかし，上空での爆発による衝撃波が広範な地域を襲い，甚大な被害と多くの負傷者を出した．死者が出なかったことは不幸中の幸いであった．

市街地の被害状況を図5に，衝撃波による被害の瞬間の様子を図6に示した．特に大きな被害を受けた亜鉛工場，スケート場，テクノパークの3箇所で，建物の被害状況を精査した．衝撃波の飛来方向を爆発で最大光輝となった位置とすると，その方向を向いた構造物の面に被害が集中していた．損壊率や被害状況を図7のように衝撃波の侵入方向と入射角度で推測することができる．

衝撃波は，図8のようにチェリャビンスク市の市街地のほぼ全体を襲い，最大光輝の位置から半径50 kmの広範囲に及んでいたことがわかった．

次に，チェリャビンスク市街と州内の地域で調査した被害状況などを示す．

(2) チェリャビンスク市街地の状況

① チェリャビンスク大学

大学の校舎に被害はなかった．

② 亜鉛工場

亜鉛工場の崩落した煉瓦の壁は，現在修復中で，修復の完了は間近であった．報道された壁の大規模な倒

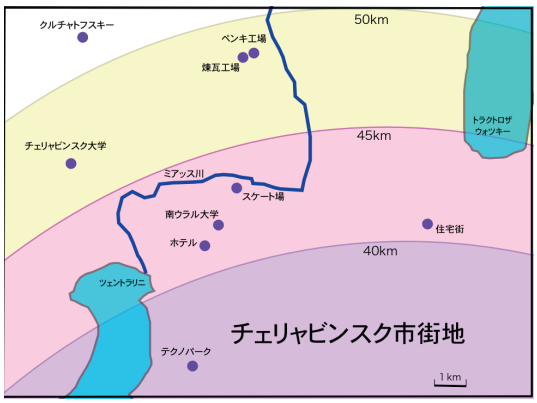

図8：チェリャビンスク市街地の調査位置と衝撃波の範囲.

壊は，まず衝撃波が垂直に当たった2階の壁が亜鉛工場の内面に落下した．このため工場内で起きた爆発により，道路に面した東側の壁が外側に崩落し，惨事となった．

③ ペンキ工場

亜鉛工場から道路を渡った建物で，屋上の看板がすべて落下し，窓枠や窓ガラスも壊れた．落下した看板が空き地に重ねて片付けられたいた．割れかけた窓ガラスには，ビニールや板を貼って補修されていた．

④ スケート場

スケート場の南側に面した2面の大きな壁面の壁が折れ曲げられ，天井のパネルのほとんどが壊れ，宙づりになっていた．そのままの状態で残されていたので，衝撃波の破壊力の威力を想像することができた．

⑤ 歴史博物館

チェリャビンスク市の歴史，自然史，州内で採集された鉱物が展示されている．州最大の博物館で，庭には岩石園がある．衝撃波による大きな被害はなかった．

⑥ ホテル

滞在したホテルは，被害がなかったが，周囲の建物の窓ガラスは割れた．また道路に沿った多くの建物に，窓ガラスが割れるなどの被害が出ていた．

⑦ 南ウラル大学

一瞬太陽より明るい閃光に包まれて真っ白くなった．閃光から2分23秒経過して衝撃波がキャンパスに到達，校舎内では窓ガラスや学生が飛ばされ，飛散したガラス片に当たり怪我をする学生が続出した(図6)．大学校舎の南を向いた面の窓ガラスのほとんど(約1690枚)が割れ，壁が折れているところもあった．衝撃波の音と隕石雲を学生が撮影した画像，校舎内の防犯カメラ，駐車場の監視カメラの映像を収集することができた．

⑧ テクノパーク

南面の窓ガラスのほとんどが壊れ，建物に大きな被害が出た．その傷跡と倒壊した窓枠やガラスの残骸が建物の下に残されていた．被害は，上層階ほど大きく，最上階は窓枠と壁まで折れ曲がっていた．

(3) チェリャビンスク州内の状況

① クルチャトフスキー (Kurutyatofusky)

周辺のビルに被害は出ていない．

② チェバルクリ湖(Lake Chebarkul)

隕石落下直後に直径6 mあったチェバルクリ湖の氷上の落下穴は，視察した3月31日には氷で塞がっていた．周囲には隕石の採集を試みた試掘穴が数個あり，採集の際に湖底から汲み出された泥で汚れていた．視察に訪れた時にも朝から隕石を採集していたグループに遭遇した．湖畔の町と隕石落下経路となった直下の民家に，窓ガラスが割れた痕跡は見当たらなかった．

③ コルキノ(Korkino)

この町は，閃光に包まれたマーケットの屋根の雪が，その後に到達した衝撃波で落ちる映像で知られている．1階建て家屋に大きな被害がないが，4階立てのアパート等の窓ガラスの多くが壊れた．道路の路肩には，窓枠とガラス片がまだ積まれていた．

④ デプタツキー (Deputatskoye)

デプタツキーでは，落下直後の雪原に無数の小さな黒い隕石が散布されていて，雪上に穴の空いた場所を見つけると，雪を60 cm掘った雪床に3 cmほどの隕石が取り出せたという．また，チェリャビンスク市から西に約100 kmに位置するミアス(Miacc)市の自然史博物館が，ここで大規模な隕石の採集を行っていて，大量の隕石が採集されている．

村のお店のタチアナ(Tatyana)氏は，採集した隕石を訪れた人に頒布していた．村に大きな建物はなく，衝撃波による被害は出ていない．

⑤ エマンジェリンカ(Emanzhelinka)

エマンジェリンカでは，現地調査に訪れる直前までロシア科学アカデミーとチェリャビスク大学のチームが大規模な隕石採集と調査を行っていた．

車で通過，車窓から見るかぎり，小さな家屋に被害はないが，ビル窓枠には，黒い古い窓枠と最近付け替

えられた新しいアルミサッシ窓枠が混在していた．建物の向きによって大きな被害が出ていることが確認できた．

⑥ **キチキノ(Kichikino)**

学校の鉄筋校舎に被害はない．ドライブインにも被害はないが，閃光後の大きな爆風(衝撃波)と窓が振動する音に驚いたとのを証言を得た．

⑦ **ミアス(Miacc)自然史物館**

自然史博物館の開館時刻に間に合わなかったため，展示を見学できなかったが，売店と収蔵庫を見ることができた．博物館には，鉱物，隕石に詳しい学芸員がいて，落下後にデプタツキーで採集した隕石を販売していた．

⑧ **サトカ(Satoka)**

4階建てのアパートの4階に住むバブリック(Alexeypavlyk)氏の部屋を訪問した．被害は無いが，隕石雲と隕石雲の影が伸びているのが印象的であったとの説明を受け．隕石雲の画像をいただいた．

4. 収集した隕石

調査の過程で，チェバルクリ湖(2個)，エマンジェリンカ(2個)，デプタツキー(19個)の3地点で合計23個の隕石を収集することができた．これら収集した隕石は普通コンドライト(LL5)で，表面は黒色の溶融被膜に覆われ，割れた断面は明るい白と濃い灰色のコンドリュールが見られる．また一部に酸化したような変質が見られた(図9)．チェリャビンスク大学でドウドロフ(Alexandr Dudorov)氏よりエマンジェリンカで採集した隕石をいただいた．その際に，南ウラル連邦大学のグロフォスキー氏の分析結果によると，カンラン石(27.9 ± 0.35 mol%)，輝石(22.8 ± 0.8 mol%)，鉄・ニッケル・イルメナイトなどの金属(10 w%)からなり，形成年代は原始微惑星起源で45億7000万年，数千万年前に形成された衝撃変成がったとの説明を受けた．

5. 今後の対応

調査により天体衝突に伴う衝撃波の甚大な被害状況が明らかになった．これまでは，小惑星衝突時のクレーター形成[5]に伴う被害[6]について検討してきたが，今回のような衝撃波による被害を想定していなかった．

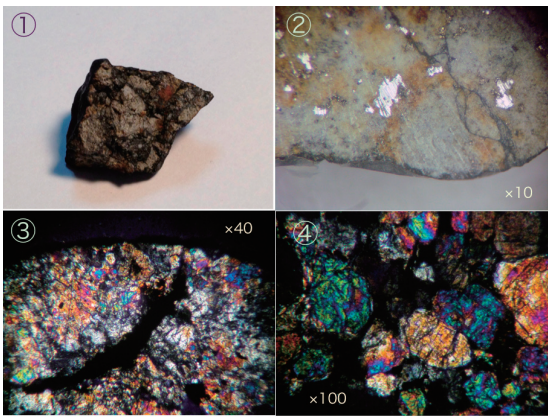

図9：収集したチェリャビンスク隕石．
② 実体顕微鏡，③④ 偏光顕微鏡．

チェリャビンスク隕石クラスの天体衝突に伴う衝撃波による自然災害も未然に察知する必要がある．そのためには，10 m以上の地球接近小惑星を衝突の2日前までに軌道上で検出することが重要となるが，現状の観測体制では対応できていない．新たなスペースガード専用の大型観測設備の必要性を訴えるため，2月24日に緊急声明[7]を発表した．

今後は，調査で得られた知見についての詳細な精査を行っていく予定である．また既存の観測施設を活用したネットワークによる観測体制の強化やスペースガード専用の次期大型観測設備の構築に向けての構想の策定に取り組んでいきたい．

参考文献

[1] 下田力, 高橋典嗣, 吉川真, 2013, ニュートン 33(5), 14.
[2] 中島林彦他, 2013, 日経サイエンス 43(5), 48.
[3] Chelyabinsk City.,2008, in 1999-2000 CHELYABINSK REGION in PHOTOS.
[4] Natalia Denisova, in The CHELYABINSK REGION (GuidBook).
[5] 高橋典嗣, 2013, 隕石と宇宙の謎(宝島社).
[6] 日本スペースガード協会, 2013, 大隕石衝突の現実(ニュートンプレス).
[7] 高橋典嗣, 2013, 緊急声明「ロシアの隕石落下に伴う日本スペースガード協会の対応と方針」(日本スペースガード協会).(http://www.spaceguard.or.jp/ja/index.html)

《フロンティアセミナー・テキスト》

地球惑星環境進化論 第2回

門屋 辰太郎[1]，渡邉 吉康[1]，関根 康人[2]，田近 英一[2]

2012年7月25日受領，2013年10月18日受理.

（**要旨**）太陽系外惑星系におけるハビタブルプラネットを考える上で，私たちが知り得るハビタブルプラネットの唯一の実例である地球の環境の理解は必要不可欠である．本稿では，地球環境の進化および変動の原因，そしてそれらの生命進化との関わりについて比較惑星環境学的視点から議論する．第1回（第1章～4章）では，地球史最初期から原生代後期までの大気表層環境史について議論した．これを踏まえ，今回は顕生代における生物の大量絶滅イベント（第5章）や天体衝突が引き起こす環境変動（第6章）について議論する．さらに第7章では，生命が生存可能なハビタブルプラネットの条件について再考し，問題点を議論する．

5. 物質循環と生物進化 ・顕生代の地球環境変動・

5.1 顕生代における生物進化と気候変動

顕生代（約5億4100万年前～現在）は，生物による生体鉱化作用（バイオミネラリゼーション）が始まり，地層中に化石記録がたくさん残るようになった．そのため，大量絶滅などの地球史的イベントに対する理解がそれ以前の時代と比べて格段に進んでいる．

図1に，顕生代における古土壌などの環境指標や物質循環モデリングによって推定されている大気CO_2濃度の変動と，氷河時代が訪れたタイミングを示す[e.g., 1, 2]．CO_2濃度は，顕生代全体を通じて，基本的には時間とともに低下してきたことがわかる．これは太陽光度の長期的な増加による温暖化の傾向が，炭素循環による負のフィードバックによって補償されるためである．こうしたCO_2濃度の長期的減少傾向の下，より短期的なタイムスケールでは，プレート運動にともなう火成活動の変動などに起因してCO_2濃度の変動が起きていたことが知られている．そして，CO_2濃度の低い時代には氷河時代が訪れているなど，CO_2変動と地表面温度の変動は高い相関をもっている．

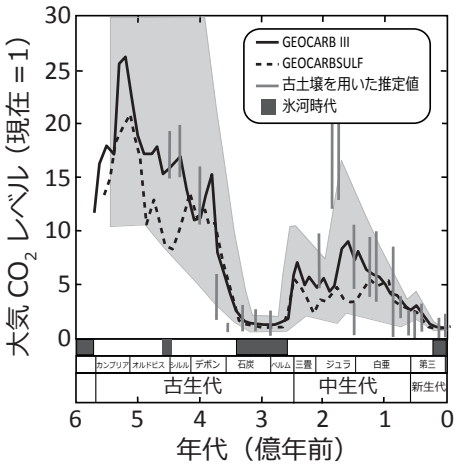

図1：顕生代における大気中CO_2濃度（現在との比）の時間変化（[1, 2]に基づく）．大気中のCO_2濃度はより短周期のゆらぎを伴いながら，大局的には時間と共に低下してきたと考えられている．網掛け部分は，モデルの誤差を表す．

特に，古生代後期の石炭紀（約3億年前）には，顕生代を通じて最も氷床が拡大したゴンドワナ氷河時代が訪れたことが知られている．この時期には，大気中のCO_2濃度は現在とほぼ同レベルにまで低下していた（図1）．さらに，当時は現在よりも太陽光度が3％程度低かったためにより寒冷となり，最大で南緯35°まで氷床が拡大していたと考えられている．

1. 東京大学大学院理学系研究科
2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科
kadoya@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp

それでは，なぜこの時期のCO_2濃度は前後の時期に比べて著しく低下していたのだろうか．この原因として有力な説は，生物の影響，とくに陸上植物の大繁栄によるとするものである[3]．石炭紀には維管束植物が大森林を形成していたことが知られている．すると，植物の根やバクテリアの活動などによって土壌が厚く安定に維持されるようになり，陸上の化学風化効率が格段に増加する．これによって，CO_2濃度が低下して地表面温度が下がっても，大気海洋システムへの火山ガスによる供給速度と釣り合う速度でCO_2を固定することができる．

そのほか，維管束植物がつくるリグニンやフミンといった新しい有機物を分解する微生物が当時まだ出現していなかったために，有機物の埋没効率が高かったことも示唆されている[3]．実際，顕生代における海水の炭素同位体比変動を調べてみると，約3億年前に大きな正異常が生じたことが知られている．これは，軽い炭素を含む有機物の埋没率が増加したことを示唆し，その結果，大気海洋システムから大量のCO_2が除去された証拠と考えられる．つまり，陸上植物の埋没率の増加は石炭紀後期におけるCO_2濃度の低下のもうひとつの要因であったことが示唆される[3]．

顕生代最大規模の氷河時代であるゴンドワナ氷河時代は，生物活動が直接の原因となったことが地質記録から強く示唆されるという点で，地球史的にみて非常に興味深い．

5.2 顕生代の酸素濃度変動

大気中のO_2濃度の変動は，正味の生成過程である有機炭素や黄鉄鉱の埋没と，除去過程である有機炭素や黄鉄鉱の酸化の収支の差によって生じる．ここでO_2の生成過程は炭素と硫黄の特徴的な同位体分別作用を伴うことが知られているため，物質循環モデルに海洋における炭素と硫黄の同位体比変動記録を境界条件として用いることによって，顕生代を通じた大気中のO_2濃度変化が推定されている[2, 4](図2)．他方，室内実験によれば大気中のO_2濃度が35 %を超えると植物の自然発火確率が非常に高くなり，森林火災によって陸上植物は全焼するものと推定されているが，地質記録にはそのような形跡が見られないため，O_2濃度は35 %以上にはならなかったと考えられている[5]．逆に，O_2濃度が約15〜13 %を下回ると植物が燃焼しなくなるが，デボン紀以降は森林火災の証拠である木炭化石(チャコール)が継続的に産出するので，そのようなレベルにまで低下したことはなかったと考えられている．これらのことから，O_2濃度は13〜35 %の範囲で変動してきたものと考えられている[2, 4](図2)．

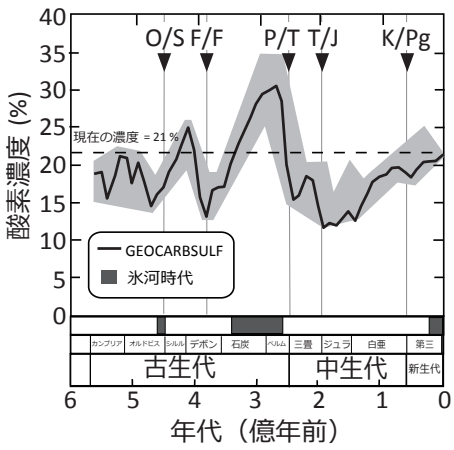

図2：顕生代を通じた大気中O_2濃度の変動及び5大絶滅イベント([2, 4]に基づく)．網掛け部分はモデルの誤差を表す．図中のO/Sはオルドビス紀とシルル紀の境界，F/Fはフラスニアン期とファメニアン期の境界，P/Tはペルム紀と三畳紀の境界，T/Jは三畳紀とジュラ紀の境界，K/Pgは白亜紀と古第三紀の境界を示し，大量絶滅が起きたと考えられている．

前述のように，ゴンドワナ氷河時代が訪れた石炭紀には有機物の埋没が増加した．有機物の埋没とO_2の放出は地球化学的に等価であり，当時の大気中のO_2濃度は約35 %に達していたことが示唆されている[4]．このように高いO_2濃度は，当時の陸上に進出していた昆虫類にとって大変有利であった．というのは，昆虫類は大気中のO_2を拡散によって体内に取り込んでいるからである．たとえば石炭紀には，体長75 cmにも及ぶ巨大トンボ(*Megamaura*)や2〜3 mにも及ぶ巨大ムカデ(*Arthropleura*)などの化石に見られるように，昆虫類が巨大化したことが知られている．興味深いことに，最近行われたキイロショウジョウバエの飼育実験から，高O_2濃度条件下では，世代を経るごとに体サイズが大きくなることが分かってきた[e.g., 4]．

古生物の進化を理解する上で，O_2濃度が低い時期も注目される．たとえば，いわゆる5大絶滅イベントのうち，小惑星衝突に起因する白亜紀／古第三紀境界以外のものについては，すべてO_2濃度が低いレベルに低下した時期と一致しているようにみえ[4, 6]，両

者の関連性が示唆される(図2)．また，三畳紀／ジュラ紀境界以降の数千万年間は，顕生代の中でもとくにO_2濃度が低かった可能性が示唆されている(図2)．恐竜(獣脚類)はこのような低いO_2濃度(～13 %)に適応するために，気嚢システムと呼ばれる呼吸器官を獲得したのではないかと考えられている[7]．気嚢システムでは，吸気(O_2)と排気(CO_2)が混ざることなく一方向に行われるため，哺乳類の横隔膜を用いた肺呼吸と比べて呼吸効率が非常に良い．このような気嚢システムは鳥類に引き継がれ，空気の薄い大気上空における飛行運動を可能にしたと考えられる．

5.3 海洋無酸素イベント

生物の大量絶滅の原因として，海洋無酸素イベントが注目されている．海洋無酸素イベントとは，海洋内部に無酸素水塊が広がる現象のことであり，地質学的には有機物に富んだ黒色頁岩の堆積からその発生が示唆される[8]．これらの堆積した時期は，温暖とされる地質時代に対応するものが多い[8]．無酸素水塊中では，ほとんどの海棲生物が生存できなくなると考えられる．ここではまず，海洋無酸素イベントの発生条件を理解するために，海洋内部の物質循環の概略を述べる．

海洋における酸素や栄養塩の鉛直分布は，生物ポンプと海洋循環の競合で決まる．栄養塩(生物が利用可能なリン，窒素，炭素などの水溶性化合物)は，海洋表層における生物生産によって生物に取り込まれる．生物の遺骸は，重力によって沈降しながら酸化分解を受け，海水に栄養塩を放出する．この生物による栄養塩の鉛直輸送を生物ポンプと呼ぶ．分解して無機化された栄養塩は，海水の湧昇によって海洋表層に供給され，再び生物生産に用いられる．酸化分解を免れた一部の有機物は，海底に堆積する．

一方，O_2は海洋表層で大気から取り込まれた後，海洋の深層水循環によって海洋深部へと供給される．海洋内部のO_2は有機物の酸化分解によって消費される．有機物の酸化分解の大部分は，水深1000 mまでの海洋中層水付近で生じるため，現在の海洋ではこの深さにO_2濃度の極小帯が形成されている．

このことを踏まえて，海洋無酸素イベントが発生する条件を考えてみる．それには，主として 1)海洋循環が停滞することで海洋深層水へのO_2の供給が低下すること，もしくは 2)光合成活動の活発化により有機物の沈降量が増加して海洋内部のO_2除去が増加すること，の2つの可能性が考えられる．海洋物質循環モデリングによってこの両者を検討すると，1)の場合は，海洋循環速度が現在の1/5～1/10以下にならないと海洋無酸素イベントは発生しないが，2)の場合，海洋表層への栄養塩供給率が現在の1.5～2倍程度にまで上昇すれば，海洋無酸素イベントが発生することが分かる[9]．海洋への栄養塩供給は大陸の化学風化に起因しているため，温暖な環境下では栄養塩の供給が活発になり，酸素の海水への溶解度の低下とも相まって，海洋は比較的容易に無酸素状態に陥るという結果が得られる．このことは，海洋無酸素イベントが温暖期に頻繁に発生しているという事実とも調和的である．

一方，富酸素条件から無酸素条件に推移する際，アノキシア-生物生産フィードバック(A-Pフィードバック)と呼ばれるリンに関する正のフィードバック機構がはたらく [e.g., 9]．富酸素条件下において，リンは最終的に有機物や燐灰石(アパタイト)，あるいは水酸化鉄への吸着によって海水から除去される．一方，無酸素条件下では水酸化鉄が存在しないためリンの除去効率は低下し，さらに有機物中のリンが選択的に海水中にリサイクルするようになることが知られている．この結果，何らかの理由で無酸素水塊が発生した場合，海水中のリン濃度が増加するため，海洋表層における生物生産の増加が引き起こされ，海洋中層水におけるO_2消費を促進する．こうして，無酸素水塊は拡大し，海洋は急激に無酸素化することになる[9]．

海洋無酸素イベントは，生物に大きな影響も及ぼす．海洋無酸素イベントが生じれば，好気的な底生生物(海底に生息する動物)は絶滅する．また，大規模な海洋無酸素イベントが発生したことで知られる，約2億5000万年前のペルム期／三畳紀(P/T)境界において，緑色硫黄細菌に由来するイソレニエラテンというバイオマーカーが発見されている．緑色硫黄細菌は電子供与体として硫化水素(H_2S)を用いる絶対嫌気性の光合成細菌であるため，この活動が発見されたということは，海洋表層の有光層(～100 m)にまでH_2Sが充満するような極度の無酸素環境が発達していた可能性を示唆している．もしH_2Sが大気中に漏れ出したとしたら，当然，陸上生物にも大きな影響が及ぶであろう．

最近の研究によれば，シベリアントラップを形成し

た洪水玄武岩の噴出活動によって温暖化が生じた結果，大陸の化学風化率の増加に伴い海洋への栄養塩供給が増加して海洋無酸素イベントが発生し，またそれに伴って海洋表面の有光層にまでH_2Sを含む水塊が上昇したことが，ペルム期／三畳紀境界で起きた大量絶滅の原因だったのではないかと示唆されている[10]．一方で，海洋における無酸素水塊の拡大は，将来の地球温暖化に伴う海洋の応答と環境変動を評価する上でも重要な検討項目と考えられる[11]．

6. 天体衝突イベント

6.1　白亜紀/古第三紀境界における大量絶滅

顕生代においては，5回におよぶ生物の大量絶滅イベントが起きたことが知られている（図2）．その中で一番最近のものが，約6600万年前の白亜紀／古第三紀境界（K/Pg境界[1]）における大量絶滅イベントである．恐竜やアンモナイトを含む，科のレベルで20 %，属のレベルで50 %に相当する生物の分類群が絶滅したことが知られている[12]．

Alvarezら[13]は，ヨーロッパに分布するK/Pg境界の厚さ数mm～1 cm程度の粘土層において，白金属元素のイリジウムが異常濃集していることを発見した．イリジウムは親鉄性元素であり，地球形成時に大部分はコアへ分配されたために，地殻中にはほとんど存在していない．したがって，K/Pg境界層にみられるイリジウムの異常濃集は，小惑星の衝突によってもたらされたと考えられる[13]．この他にも，天体衝突時の衝撃波による高圧条件下で生成した衝撃変成石英や，衝突溶融物が急冷して生成したガラス質のスフェルールが発見され，K/Pg境界における小惑星衝突説を強く支持する証拠となった．そして，重力異常や磁気異常から，ユカタン半島北部の地下2 kmに，直径約200 kmにもおよぶ円形構造が存在することが明らかになり，ボーリングコア試料と近傍のK/Pg境界層から採取された試料から，誤差の範囲でK/Pg境界の年代に合致する衝突溶融ガラスが発見されたことで，K/Pg境界において巨大衝突クレーターを形成する天体衝突が生じたことが決定的になった[e.g., 14]．

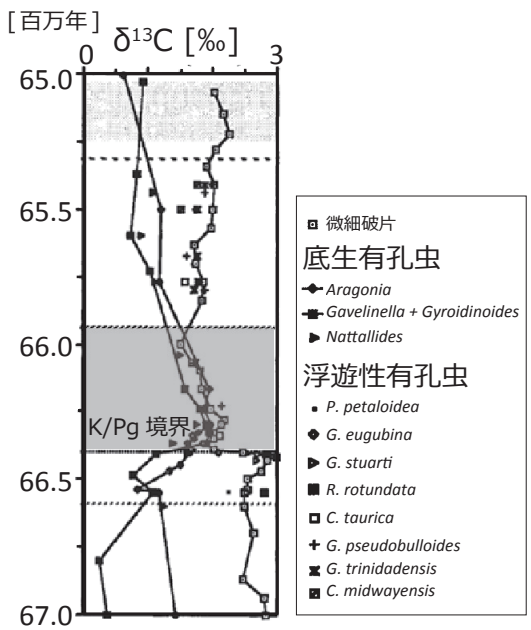

図3：K/Pg境界における海洋の炭素同位体比変動（[16]に基づく）．浮遊性有孔虫と底生有孔虫の殻に含まれる炭素同位体比の比較から，K/Pg境界後50万年間に渡って，海洋における炭素同位体比が鉛直方向に均一化していることがわかる（灰色ハッチ部分）．

天体衝突と大量絶滅の因果関係を結びつける仮説として有名なものが，“衝突の冬”と呼ばれるシナリオである．これは，衝突によって巻き上げられたサブミクロンサイズ以下の塵粒子が地球全体を覆うことによって日射が遮られ，それによって植物の光合成が停止し，食物連鎖が崩壊することによって大量絶滅がもたらされたというシナリオである[13]．

ただし，その後の研究によって，光合成を停止させるような大量の塵が大気中に存在できる期間は，数ヶ月程度であると見積もられた．このため，衝突の冬仮説は必ずしも妥当ではないかもしれないと考えられるようになった．しかしながら，衝突の冬と類似の環境変動が生じたであろうことは，生物の絶滅パターンからも類推されている．たとえば，K/Pg境界においては，底生有孔虫に比べて海洋表層水に生息する浮遊性有孔虫が選択的に絶滅している[15]．このことは，衝突の冬仮説で示唆されたように，まず光合成を行う1次生産者に大きなダメージが与えられ，それにより生態系全体が影響を受けて大量絶滅に至ったというシナリオ

1. かつては第三紀（Tertiary）の頭文字をとってK/T境界と呼ばれていたが，地質年代区分名の改訂の結果，現在では用いられなくなった．

を支持しているようにみえる．

大量絶滅のメカニズムを解明するためには，海水中の炭素同位体比の挙動のような地球化学的証拠が重要となる．前述のように，海洋内部においては，プランクトンの遺骸の重力沈降とその酸化分解によって生物ポンプがはたらいている（第5章参照）．海洋表層では，光合成における炭素の同位体分別効果により，軽い炭素（^{12}C）が優先的に固定されるため，海洋表層水中の無機炭素の同位体比（δ^{13}C値）は大きな値になる．一方，海洋中深層水においては，有機物の酸化分解によって軽い炭素が放出されるためにδ^{13}Cは小さな値となる．つまり，生物ポンプの働きによって海洋における炭素同位体比は，特徴的な鉛直構造をもつ．

ところが，K/Pg境界前後において海洋表層にすむ浮遊性有孔虫と海洋深層にすむ底生有孔虫の殻のδ^{13}C値を調べると，絶滅イベント直後に鉛直方向の炭素同位体比の差が無くなることが明らかになった[16]（図3）．このような炭素同位体比の均一化は，その後50万年近くも続いている（図3）．HsuとMcKenzie[17]は，このような海洋鉛直方向のδ^{13}C値の均一化は，生物生産（光合成活動）及び生物ポンプの停止を意味するのではないかと考え，“ストレンジラブ・オーシャン[2]”と呼んだ．ストレンジラブ・オーシャンを示唆する炭素同位体比の挙動は，これまで知られている限り，K/Pg境界直後のみにみられる特徴的な現象である．

この炭素同位体比の挙動は，光合成活動の完全な停止を意味するようにみえるが，実のところ，話はそう単純ではない．それは，生物活動が完全に停止していたと考えれば，海洋のδ^{13}C値の鉛直方向の均一化は説明できても，その絶対値（1.5 ‰）は説明できないからである．すなわち，もし完全に生物活動が停止したならば，海水のδ^{13}C値は数十万年スケールで火山ガスの組成（～－5 ‰）に漸近するはずであるが，実際には高い値を保っている．Kump[18]は，K/Pg境界でみられる炭素同位体比の鉛直分布とその絶対値を説明するためには，外洋域においては生物生産がほぼ完全に停止ししていたが，浅海域では白亜紀末と同程度の生物活動が継続していたと考える必要があると主張している．つまり，K/Pg境界における海水のδ^{13}Cデータは，小天体衝突の生命活動に対する影響が，全球一様にあったわけではなく，むしろ地域性を持っていたことを示唆する．

6.2 天体衝突が引き起こす環境擾乱

地球史における天体衝突の普遍性を考えれば，K/Pg境界の大量絶滅イベントに限らず，天体衝突がどのような環境擾乱を引き起こすのかを明らかにすることは重要である．とくに，地球の場合，地表面の7割が海洋で覆われているため，海洋への衝突による環境擾乱を評価することが重要となる．しかし，海洋衝突は地球独自の現象であり，惑星科学的にもその理解は乏しい．

K/Pg境界での衝突イベントでは，衝突地点が浅海底だったため，衝突クレーター近傍のメキシコ湾からカリブ海にかけて，衝突で発生した巨大津波による津波堆積物が広く分布している．この津波堆積物を詳細に調べると，通常の津波では影響の少ない深海底においても非常に厚い津波堆積物が堆積しており，通常の地震津波に比べて桁違いのエネルギーをもった巨大な“衝突津波”が発生していたことが示唆されている[19-22]．また，津波堆積物の構造から津波の流向を復元した結果や衝突津波のモデリングの結果などから，クレーターに向かう津波と逆向きの津波が繰り返されていたことも明らかになっている[19-22]．

一方，海洋衝突が地球表層環境に及ぼす擾乱には，衝突津波のような物理的影響だけでなく，化学的影響も重要である．AhrensとO’Keefe[23]は，衝突時の海水の蒸発により，成層圏へ水蒸気や塩分が供給され，それらの光解離反応によってオゾン層が激減する可能性を指摘している[24]．また，衝突地点直下の海底堆積物に含まれる炭酸塩や硫酸塩の蒸発で，CO_2やSO_2が大気中に大量に放出されたとも考えられている[25-27]．その場合，これらのガスの温室効果や，エアロゾルの生成による日傘効果，あるいは酸性雨など，気候や生物に対するさまざまな影響が指摘されている[25-27]．

惑星科学において，天体衝突や衝突クレーター形成に関する研究は，月や火星，氷衛星などを対象に行なわれてきたが，地球を対象とした研究例は多くない．

2. 映画“博士の異常な愛情”（スタンリー・キューブリック監督，1964年）に登場するストレンジラヴ博士から採られたもの．核戦争により地球上の全生物が絶滅する絶望感が広がる中，選ばれた男女を地下坑道へ避難させることで人類滅亡を避けるのだという持論を熱弁する．

地球史におけるK/Pg境界以外の大量絶滅イベントの原因として，一時期は天体衝突の可能性が疑われたが，現在ではどれも否定されており，天体衝突と環境変動の因果関係を明らかにする研究は下火になっている．しかしながら，衝突起源物質や衝突クレーターについて地質調査を通じて研究することは，地球でしかできないものである．特に，地球史における天体衝突現象とそれによる環境擾乱の評価は，後期隕石重爆撃期や初期地球環境の推定，将来の衝突リスク評価などのためにも，重要な課題である．

7. ハビタブルプラネット

7.1 温暖湿潤環境の成立条件

第1章で述べたように，ハビタブルゾーン内部に地球のような惑星が存在しても，必ずしも温暖湿潤な気候状態が実現されるわけではない．惑星環境を温暖湿潤に保つためには，十分な温室効果ガスとそれを維持するための気候の安定化メカニズムの存在が必要となる．地球の場合，基本的には炭素循環によるウォーカー・フィードバックがその役割を担ってきたと考えられる（第1，2章参照）．

しかしながら，ウォーカー・フィードバックは，大気へのCO_2の供給と除去が釣り合う定常状態へ地表環境が向かうメカニズムであり，地表環境が温暖に保たれることを保証するものではない．つまり，CO_2供給率が変動するなど境界条件が変われば，それに応じて地表環境も変化する．たとえば，CO_2の脱ガス率が現在の数分の一以下になった場合，化学風化を介したCO_2の除去を脱ガスで補えなくなるため，数十万年程度で地球は全球凍結状態へ落ち込んでしまう[28]．また，火成活動がマントルプルームの活動のみによるなど，CO_2の脱ガスが炭素循環の特性時間である10万年スケールでみて間欠的である場合，たとえ一時的に温暖な環境が実現されたとしても，火成活動の弱い期間にCO_2は急速に除去されて，再び全球凍結に陥ってしまうと考えられる．つまり，温暖湿潤環境を維持するためには，プレートテクトニクスのように連続的かつ十分な量のCO_2供給メカニズムが必要不可欠となる[28].

このような境界条件は，固体惑星の進化と変動を反映したものであるため，ハビタブルプラネットの成立条件を理解するためには，固体惑星の内部進化及びそのダイナミクスに関する一般的な理解が重要となる[28].

7.2 スノーボールプラネット

ここまでは，温暖湿潤な環境を持ち，表面に液体の水が存在している惑星をハビタブルプラネットであると考え，その存在条件について議論してきた．このような考えは従来の多くの研究についてもあてはまる．しかしながら，惑星表面の水が凍結している全球凍結惑星（“スノーボールプラネット”）[29]もハビタブルプラネットの一形態であるかもしれない．

たとえば，原生代において，地球は全球的に氷に覆われはしたが，地球内部からの熱の供給により，海洋は表層1000 mが凍っただけで完全には凍結しなかったと考えられている．つまり，全球的に氷で覆われた惑星の表面下には“内部海”が存在する可能性が考えられる[29].

惑星内部の熱源として長寿命放射性核種（^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{40}K）の壊変エネルギーを考え，惑星の熱進化と地殻熱流量変化を計算すると，水の存在度や惑星サイズが地球程度であれば，数十億年程度の期間，氷の下に液体の海が存在しうる．また，質量が地球の数倍程度のスーパーアースにおいては，さらに長期間にわたって高い地殻熱流量が維持され，内部海の寿命は延びるであろう[29]．スノーボールプラネットでは，中心星からの放射ではなく惑星内部からの地殻熱流量によって内部海が形成・維持されるため，浮遊惑星にも内部海が存在しているかもしれない．こうした氷地殻下に内部海が存在するスノーボールプラネットにおいては，地球の海底熱水系において生息しているような化学合成独立栄養生物が生存しているかもしれない．太陽系内にも，木星の衛星エウロパやガニメデ等に内部海が存在する可能性が示唆されている．それらはスノーボールプラネットのアナロジーとして重要な研究対象といえる．

スノーボールプラネットは，中心星から離れた軌道でも存在しうるため，ハビタブルゾーン内部に限定される温暖湿潤気候を持つ惑星よりも普遍的に存在する可能性がある．そのような惑星にも生命が生存可能かどうかは不明だが，もし可能だとすればハビタブルゾ

ーンの概念は，これまでの惑星表面に液体の水が存在するというものから惑星表層付近に液体の水が存在するものへと拡張が必要になるかもしれない．

7.3 水惑星の多様性

ここまで地球を例として，炭素循環や生命の存在，海洋やプレートテクトニクス，大陸など，特徴的な要素について考えてきた(図4)．しかし，これらの要素が水惑星に共通なものであるかどうかは，まだほとんどわかっていない．地球とは異なった仕組みで，液体の水を地表に保持した惑星が存在する可能性も考えられる．そこで最後に，水の量という観点から，水惑星の多様性について議論する．

これまでは水惑星を地球と同程度の水を持つ惑星と定義していたが，ここではより一般的に，表面に水が存在する惑星を水惑星と再定義し，水量の違いに由来する多様性を考える．すると，水惑星は，惑星表層に存在する水の量から以下の3種類に大別することができると考えられる．一つ目は，惑星表層に大量の水(≫0.023 wt%)が存在する“海惑星”(オーシャン・プラネット)である．このような惑星には，大陸地殻が存在しないか，あっても海面下に水没している．二つ目は，惑星表層に地球程度の水(～0.023 wt%)と大陸が存在する“海陸惑星”(オーシャン＝ランド・プラネット)である．現在の地球は，この海陸惑星に相当する．そして三つ目は，惑星表層に水がほとんど存在しない“陸惑星”(ランド・プラネット)である．もう少し定量的に考えると，水の地理的な分布が地表面での水輸送によって決まる惑星を海陸惑星と定義し，大気循環によって水が極域に局在してしまうような惑星を陸惑星と定義することができる[30，31]．

炭素循環の観点に立つと，上記の3種類の惑星ではCO_2の除去プロセスに違いがある．すなわち，海陸惑星では地球と同様に陸上での風化によってCO_2が除去されるのに対し，海惑星では海底風化や海底熱水作用がそのプロセスを担うものと考えられる．また，陸惑星では，熱水系や地下水系における風化過程が重要なプロセスとして機能する可能性が考えられる．これらの違いは，表面温度や大気中のCO_2濃度，そして気候の安定性に大きな違いをもたらす可能性がある．

地球型惑星の検出が比較的容易とされ，今後の観測に期待が寄せられているM型星(質量が太陽の半分以下の主系列星)のハビタブルゾーンでは，材料物質に氷成分を多く含む惑星が形成される可能性が高い[32]．そのような惑星表面が温暖であると，深さ数百km以上の海が形成され，海底には高圧氷からなる氷マントルが形成される可能性がある[33]．このような惑星においては，地球でみられるような，海底における岩石の風化作用や熱水作用が生じないことも考えられる．したがって，ウォーカー・フィードバックのような珪酸塩の風化に由来するCO_2等の温室効果気体の調節作用ははたらかず，その結果，海が存在できるかどうかは，与えられた惑星の軌道長半径と大気中に含まれる温室効果気体の量で左右されてしまう可能性が考えられる．

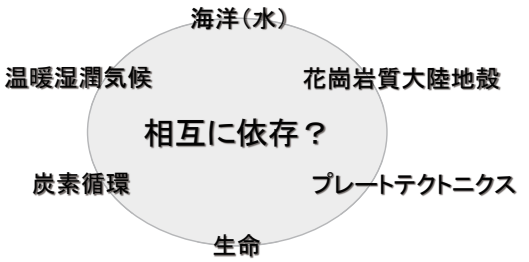

図4：地球のような海陸惑星システムの重要な構成要素．本論で議論した内容をまとめたもの．これらは全て地球だけに見られる特徴であるが，互いに相互依存の関係にあるようにもみえる．もしかすると，地球のような惑星は必然的にこれらの要素をすべて持つことになる(すなわち普遍性がある)のかもしれない．

このように，水の量だけ考えても，水惑星の存在形態は多様であり，地球を唯一無二のモデルケースと考えることはできない．太陽系の既成観念にとらわれず，“多様性”を念頭に置いて検討することが重要である．その一方で，現時点で我々にできることは，我々が知る唯一のハビタブルプラネットである地球と，他の惑星や衛星の進化を比較惑星学的に理解することであろう．こうした理解なくして，ハビタブルプラネットの本質を捉えることはできないように思われる．

8. まとめ

本稿では，地球における表層環境と生命の共進化を俯瞰的に眺めることによって，生命が生存可能なハビタブルプラネットで起こるであろう種々のプロセスや相互作用について考えてきた．地球においては，気候

を安定化するメカニズムとして大気－海洋－地殻－マントル間の炭素循環が重要な役割を担っており，大陸の形成やプレートテクトニクスなど惑星内部の活動と連続的かつ十分な量のCO_2の脱ガスが，地球環境を温暖に維持するために必須である．このような，基本的に安定化された環境において，まれに生じる短期的な大規模変動によって安定状態が壊されることで，大気組成が大きく変化したり，生命の大量絶滅が起きたり，生物進化が促進されるなどの不可逆的な変化が生じてきた．そのひとつの具体例として，全球凍結イベントのような破局的な地球環境変動が，大気中のO_2濃度の上昇を介して真核生物や多細胞動物の出現をもたらした可能性に言及した．

一方で，太陽系外の水惑星の多様性を考えるためには，地球について得られた知見をいかに一般化できるかが今後の大きな課題であると言える．そのためには，地球について得られた知見を太陽系外惑星にまで外挿するためのマイルストーンとして，火星や金星，氷衛星などの天体の表層環境進化や内部進化を実証的に解明することが重要である．地球上ではたらいてきたようなフィードバックシステムや生命と環境の共進化の理解，そして太陽系内惑星の進化の理解を総合することにより，従来のハビタブルプラネットの想定を超える，新たな生命存在可能惑星の概念を構築できるものと期待される．

謝 辞

本稿の作成にあたって，査読者の倉本圭先生には有益なコメントを多くいただきました．深く感謝申し上げます．

参考文献

[1] Berner, R. A. and Kothavala, Z. , 2001, Am. J. Sci. 301, 182.
[2] Berner, R. A., 2006, Geochim. Cosmochim. Acta 70, 5653.
[3] Berner, R. A., 1997, Science 276, 545.
[4] Berner, R. A. et al., 2007, Science 316, 557.
[5] Watson, A. et al., 1978, Biosystems 10, 293.
[6] Ward, P. et al., 2006, PNAS 103, 16818.
[7] O'Connor, P. M. and Claessens, L. P. A. M., 2005, Nature 436, 253.
[8] Jenkyns, H. C., 2010, Geochem. Geophys. Geosyst. 11, Q03004.
[9] Ozaki, K. et al., 2011, Earth Planet. Sci. Lett. 304, 270.
[10] Xie et al. , 2009, Geology 35, 1083.
[11] Stramma, L. et al., 2008, Science 320, 655.
[12] Russel, D. A. , 1976, in Cretaceous-tertiary extinctions and possible terrestrial and extraterrestrial causes, 11.
[13] Alvarez, L. W. et al., 1980, Science 208, 4448.
[14] Hildebrand, A. R. et al., 1991, Geology 19, 867.
[15] Kaiho, K., 1994, Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 111, 45.
[16] Zachos, J. C. et al., 1989, Nature 337, 61.
[17] Hsu, K. J. and McKenzie, J. A., 1985, in The Carbon Cycle and atmospheric CO2: natural variations, Archean to present. 487.
[18] Kump, L. R. , 1991, Geology 19, 299.
[19] Takayama, H. et al., 2000, Sediment. Geol. 135, 295.
[20] Tada, R. et al., 2002, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 256, 109.
[21] Goto, K. et al., 2008, Cretaceous Res. 29, 217.
[22] Matsui, T. et al., 2002, in Catastrophic Events and Mass Extinction: Impacts and Beyond (Colorado: Geological Society of America).
[23] Ahrens, T. J. and O'Keefe, J. D. , 1983, J. Geophys. Res. 88, A799.
[24] Klumov, B. A., 1999, JETP Lett. 70, 363.
[25] O'keefe, J. D. and Ahrens, J. T., 1989, Nature 338, 247.
[26] Pope, K. O. et al., 1994, Earth Planet. Sci. Lett. 128, 719.
[27] Pope, K. O. et al., 1997, J. Geophys. Res. 102, 645.
[28] Tajika, E., 2007, Earth Planet. Space 59, 293.
[29] Tajika, E., 2008, ApJ, 680, L53.
[30] Abe, Y. et al. , 2005, Icarus 178, 27.
[31] Abuku, K. and Abe, Y., 2008, Proc. ISAS LPS.
[32] Ida, S. and Lin, D. N. C., 2005, Apj. 626, 1045.
[33] Leger, A. et al., 2004, Icarus 169, 499.

←目次へ

「日本惑星科学会2012年度最優秀研究者賞受賞論文」

観測による巨大惑星の軌道進化理論の検証

成田 憲保[1]

2013年9月30日受領，2013年11月3日受理.

（**要旨**）太陽系外には実に多様な軌道を持った惑星が発見されている．この多様な軌道の惑星の存在を説明するため，太陽系の枠を超えた惑星の形成と移動の理論（以下，軌道進化理論）が提案されている．一方で，それらの理論を実際の観測によって検証しようという試みも行われている．本稿では，特に巨大惑星の軌道進化理論について，観測的検証の取り組みがどのようにして行われてきたかを筆者の研究を交えて解説し，より低質量の惑星も含めた今後の研究の展望について紹介する．

1. はじめに

1995年のペガスス座51番星bの発見に始まる太陽系外惑星の発見により，私たちの世界観は一変した．太陽系とは全く異なる姿を持つ多様な惑星系が，宇宙には存在することがわかったのである．このことは，惑星科学においても非常に大きな意味を持つ．これまで太陽系に限られていたその存在を説明するべき惑星が，より多様になり飛躍的に増加したのである．

太陽系外惑星の発見は多くの難題を惑星科学者につきつけた一方で，見方を変えれば，太陽系外惑星は太陽系も含めた多様な惑星系形成の理論を検証する場を与えてくれたとも言える．この意味で，太陽系外惑星は太陽系という存在をもっと大きな視点から理解する機会をもたらしてくれたと言えるだろう．

2010年より以前まで，発見された太陽系外惑星の大多数は木星に近い質量・サイズを持つ巨大惑星であった．近年では巨大惑星より小さくて軽い太陽系外惑星の発見も相次いでいるが，本稿では巨大惑星の軌道進化に話題を絞って解説する．もちろん，巨大惑星の軌道進化もまだ統一的な理解が得られているわけではないが，全体像の解明にはまだ道半ばであることを踏まえた上で，これまでにどんな研究が行われ，どんなことがわかってきたのかと，今後の研究の展望を紹介したい．

1. 国立天文台
norio.narita@nao.ac.jp

2. 太陽系外惑星の軌道の多様性と軌道進化理論

2.1 太陽系の惑星の軌道と太陽系外惑星の軌道

太陽系の8つの惑星は，どれもほぼきれいな円軌道を持ち，太陽の自転の向きと同じ向きに公転している．また，太陽系ではスノーライン（主星のまわりで水・二酸化炭素などの揮発性物質が凝固し始める限界の位置．ここでは特に水のスノーラインを指す）の内側には岩石を主体とした地球型惑星が存在し，スノーラインの外側には木星・土星といった巨大惑星が存在している．

一方，太陽系外ではペガスス座51番星bを始めとして，公転周期がたった数日程度の主星近傍に存在する灼熱の巨大惑星（ホットジュピター）が数多く発見されている．また，太陽系の惑星はどれもほぼ円軌道であるのに対して，太陽系外では大きな軌道離心率を持った惑星（エキセントリックプラネット）も多数発見されている．

これらの多様な軌道の太陽系外惑星の姿は，私たちの太陽系の常識からすれば奇妙に見える．なぜなら，太陽系形成を説明した京都モデル[1]では，巨大惑星がそのような高温の場所でその場形成されるとは考えられないし，原始惑星系円盤の中で巨大惑星が最初か

ら大きな軌道離心率を持って形成されることは困難だからである．しかし，ホットジュピターやエキセントリックプラネットは宇宙に少なからず存在しており，むしろこれらの多様な軌道を持った惑星系の姿が宇宙における真実であると言える．そのため，この惑星軌道の多様性を生み出す要因をきちんと理解できれば，惑星形成の全体像を理解していくことができるだろう．特に，巨大惑星はより小さな惑星の軌道にも大きな影響を与えることから，その軌道がどのような過程を経て形成されるのかを理解することは重要である．ホットジュピターやエキセントリックプラネットなどを含む巨大惑星の軌道進化理論はこれまでにいくつか提案されているが，本稿では話を整理するため，それを3つに大別して紹介する．

2.2　円盤相互作用モデル

まず最初は，コア集積モデルによる惑星形成の延長として，惑星と原始惑星系円盤との相互作用を考えたモデル（以下，円盤相互作用モデル）である．円盤相互作用モデルは，惑星が円盤に間隙を空けない場合のType I移動と，惑星が周囲の円盤ガスを取り込み，間隙を空ける場合のType II移動などに分けられるが，特に巨大惑星の場合は後者に対応する．このモデルでは例外的な場合を除いて，惑星は中心星へ向かって落下する方向に移動する．太陽系はこのモデルの範疇で，惑星の内側への落下がほとんど起きなかった場合に相当すると考えられる．

このモデルが予言する巨大惑星の軌道は，円盤のガスとの相互作用によって軌道離心率が減衰するため太陽系の巨大惑星のようにほぼ円軌道となり，主星と共に回転する原始惑星系円盤の中で形成されるので，惑星の公転軸も主星の自転軸とほぼ揃ったものとなる．このモデルでは，惑星の落下が主星近傍で止まったと考えれば離心率の小さなホットジュピターは説明ができる[2]．また，太陽系外惑星の軌道長半径の分布はこのモデルの予言ともほぼ一致する[3]．しかし，大きな軌道離心率を持たせることができないため，このモデルだけで全ての巨大惑星の軌道を説明することは不可能である．

2.3　惑星散乱モデル

一方で，巨大惑星に大きな軌道離心率を持たせるモデルが，以下で紹介する惑星散乱モデルと古在移動モデルである．

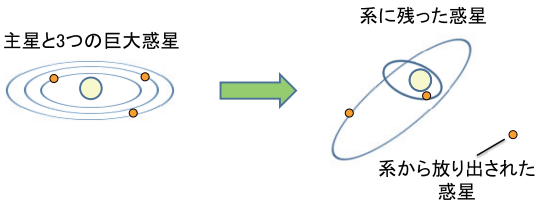

図1：惑星散乱の模式図．

惑星散乱モデルは，コア集積あるいは重力不安定によって惑星系に複数の巨大惑星が形成された場合，円盤が晴れ上がった後に惑星同士が軌道不安定を起こし，重力的に散乱される状況（図1，[4,5]）を考えたモデルである．

このモデルではエキセントリックプラネットが持つ大きな軌道離心率を説明することができる．さらに，内側に散乱された惑星が惑星散乱の結果，あるいはその後の別の惑星による永年効果によってだいたい0.1天文単位以下の小さな近星点距離を持った場合，主星からの潮汐力によって軌道が少しずつ円軌道化するため，最終的にホットジュピターを作り出すこともできる[6]．また，惑星散乱の際には惑星の軌道離心率だけでなく軌道傾斜角も大きく変化する可能性があり，このモデルは軌道が大きく傾いた惑星の存在も予言する．

2.4　古在移動モデル

古在移動モデルは，太陽系外惑星の軌道進化に古在機構[7]の考え方を取り入れたモデルである．古在機構とは，ある天体を公転する質量の小さな天体の軌道が，外側の別の天体からの摂動を受けて，その近点経度が90度または270度のまわりで振動（秤動）する現象である．この時，内側の天体の軌道離心率も長期的な変動を起こし，角運動量のz成分（$\sqrt{GMa(1-e^2)}\cos i$）を保ったまま時間変化する．ここでGは重力定数，Mは天体の質量，aは軌道長半径，eは軌道離心率，iは軌道傾斜角である．そのため，軌道傾斜角も軌道離心率と連動して振動することになる．特にこのiが約40度を超えていると，eとiは大きく変化し，天体の軌道は小さな軌道離心率で大きな軌道傾斜角を持つ状態と，大きな軌道離心率で小さな軌道傾斜角を持つ状

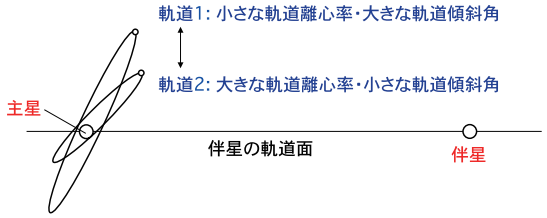

図2：伴星による巨大惑星への古在機構の模式図.

態で連続的に変化する(図2).

複数の巨大惑星の存在を仮定する惑星散乱モデルに対して，古在移動モデルは遠方に伴星の存在を仮定している[8,9]. 古在移動モデルでは，伴星の軌道が惑星の軌道に対して約40度以上傾いていた場合，伴星が惑星に対して古在機構を引き起こし，惑星の軌道離心率と伴星の軌道面に対する惑星の軌道傾斜角が変化する.

このモデルでも，軌道離心率が大きくなって近星点距離が小さくなれば潮汐力によってホットジュピターが形成できる．そのため，惑星散乱モデルと同様にエキセントリックプラネットとホットジュピターの形成を説明することができ，さらに軌道が傾いた惑星の存在も予言する.

ただし，このモデルは伴星の質量や軌道長半径，軌道の傾きなどが，惑星系の年齢より短いタイムスケールで古在機構を起こすことができるという条件を満たさなくてはならない．とはいえ，遠方の伴星の軌道は主星の自転軸や惑星の公転軸と揃っている必然性はないので，伴星が存在してその軌道面が惑星の軌道面に対してランダムに傾いているとすれば，条件が満たされる場合も多い.

また，最初から遠方に伴星がいる場合(伴星による古在移動)だけでなく，惑星散乱によって外側の軌道に散乱された惑星が内側の惑星に古在機構を起こす場合(散乱された惑星による古在移動[10])もあり，3つ以上の惑星があって最も外側の軌道が傾いていると外側から内側へ順々に古在機構が働くという場合(連続的古在機構[11])もある.

本稿ではこのように古在機構が絡んだ移動モデルを古在移動モデルと総称するが，混乱をさけるため，以下では何による古在移動などと明記する.

3. 軌道進化理論の検証方法

多様な太陽系外惑星の発見後，2010年より前までに以上のような軌道進化理論が提案されてきた．それでは，これらの理論で考えられているような状況は，果たして宇宙で実際に起こっているのだろうか? 起こっているとしたら，どのモデルのシナリオがどの程度の割合で実現しているのだろうか? それらを検証していくためには，それぞれの理論が含んでいる仮定や結果を，実際の観測によって確かめていくことが必要である.

この章では，その検証のために行われてきたいくつかの観測の方法論を紹介する.

3.1 ロシター効果

太陽系外惑星が発見されて間もない頃から視線速度によって惑星の軌道離心率は測定されてきたが，もうひとつの重要な惑星の軌道要素である軌道傾斜角は長らく測定されてこなかった．なお本稿では，惑星の公転軸が主星の自転軸に対してどれくらい傾いているかを表す量を軌道傾斜角と呼ぶこととする．一方，太陽系外惑星の軌道のパラメータとして使われる「軌道傾斜角」という言葉は，地球から見た天球面に対して惑星の軌道がどれだけ傾いているかを表す量で，ここでの定義とは異なる量なので注意されたい(図3を参照).

この軌道傾斜角(より正確には軌道傾斜角を天球面

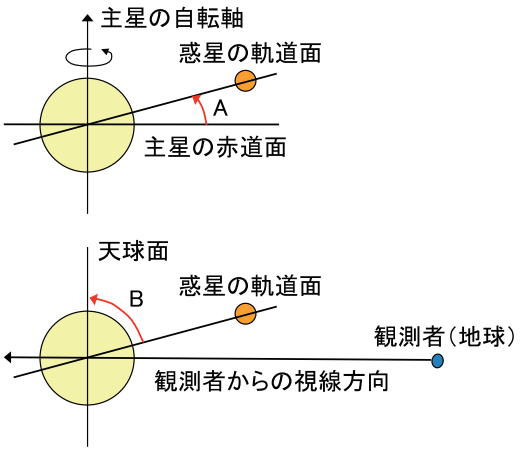

図3：本稿での惑星の軌道傾斜角の定義(A)と，系外惑星のパラメータとしてよく使われる軌道傾斜角の定義(B)の違い.

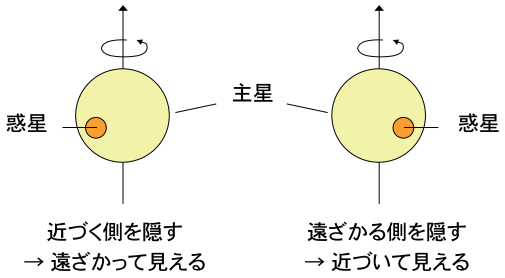

図4：ロシター効果の模式図.

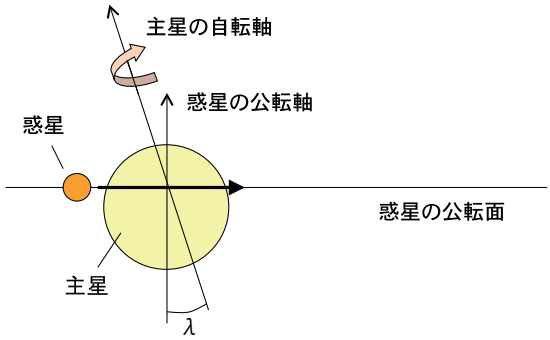

図5：ロシター効果の観測量であるλの模式図.

上に射影した角度）を測定できるのが，惑星が食を起こすようなトランジット惑星系で観測されるロシター効果である．ロシター効果はもともと1924年に食連星に対して発見された効果[12,13]であり，食の最中に恒星のスペクトルの吸収線のうち観測者に対して近づく側あるいは遠ざかる側の速度成分が隠されてしまうため，視線速度の解析を行うと本来の主星の視線速度からずれてしまう現象として知られていた．トランジット惑星系の場合では，惑星がトランジットをする際に同様の現象が観測される．結果的に，主星の前を惑星が通り過ぎる時に，近づいてくる側を隠すと主星が遠ざかって見え，逆に遠ざかっている側を隠すと近づいて見えるという効果となる（図4参照）．

この効果をトランジット惑星系で観測すると，惑星の軌道傾斜角の値によって見かけ上の視線速度の変化が異なるため，トランジット中の視線速度変化を観測すれば結果として惑星の軌道傾斜角（図5のλ）を測定することができる．

ロシター効果で測定できるのは現在の惑星の軌道傾斜角だが，惑星の公転軸が惑星形成直後は主星の自転軸と揃っていたと考えると，この軌道傾斜角は軌道離心率と同様に惑星の軌道進化の過程を反映している．

3.2　高コントラスト直接撮像

惑星軌道進化の理論のうち，伴星による古在移動モデルであればその惑星系には伴星が存在するはずであり，惑星散乱モデルや，惑星散乱＋惑星による古在移動のモデルなどでは，内側だけでなく外側にも別の巨大惑星が存在するはずである．この理論の仮定を証明できる観測方法が高コントラスト直接撮像と，次で述べる長周期視線速度測定である．

高コントラスト直接撮像は，望遠鏡に地球大気による光の波面の乱れを補正する補償光学と，主星の明るい光を低減して主星のまわりにある暗い天体まで観測できるようにするコロナグラフといった装置を用いて，主星に対しておよそ10^{-6}倍の明るさ（高いコントラスト比）の暗い天体を発見・観測する方法である．すばる望遠鏡の高コントラスト観測装置HiCIAOは，主星から1秒角ほど離れたところで10^{-6}程度のコントラストを出すことができるが，これは主星が年老いた太陽型星の場合，そのまわりにある褐色矮星程度の質量の天体まで発見できる感度に相当する．つまり，現在の装置では惑星系の外縁部にある別の巨大惑星そのものを発見することはできないが，主星から数十天文単位よりも外側に伴星があるかどうかについてははっきりと判別できる．

3.3　長周期視線速度測定

恒星のまわりを惑星が公転していると，惑星の存在によって主星も惑星と同じ公転周期で運動する．例えば，公転周期が約12年である木星は，約5天文単位のところにあって太陽に振幅約12メートル毎秒の視線速度変動を与えている．そこで恒星の視線速度を長期にわたって測定すれば，周期の長い惑星まで発見することができる．

現在の世界の望遠鏡に搭載されている視線速度測定装置では，1メートル毎秒ほどの精度で恒星の視線速度が測定可能である．惑星がもたらす視線速度の振幅は質量に比例するため，長周期の低質量惑星の発見は困難だが，数年以上にわたって視線速度測定を行うこ

とで，だいたい10天文単位より内側の巨大惑星の有無は現在の観測装置で十分に調べることができる．

このように長周期視線速度測定は，惑星系のかなり遠方しか調べられない高コントラスト直接撮像とは相補的に，惑星系のやや外側にある巨大惑星以上の質量の天体を発見することができる．

4. 観測の取り組みとその結果

本章では，2章で紹介した惑星の軌道進化理論の観測的検証を行うことを目標として，3章で紹介した観測手法を用いて筆者がどのような研究を行ってきたのかを，世界の他のグループによる取り組みのエピソードも交えて紹介する．

4.1 ロシター効果の観測競争

太陽系外のトランジット惑星に対する最初のロシター効果の観測結果は2000年に発表された[14]．これは測光観測による最初のトランジット惑星HD209458bの発見[15]とほぼ同時に行われたもので，軌道傾斜角の決定精度は約20度とそれほど高くなかったものの，HD209458bが太陽系の惑星と同様に主星の自転と同じ向きに順行していることが明らかにされた．

さらに2004年以降，地上のトランジット惑星探索グループによって新しいトランジット惑星が発見され始めた．筆者を含めていくつかの世界の観測グループが興味を持ったのは，発見された新しいトランジット惑星たちについてもロシター効果を観測していくことだった．これは主星の自転軸に対する惑星の公転軸の傾きを多数のトランジット惑星で調べることで，その軌道傾斜角の分布がどの惑星移動理論の予言とよく一致するかを調べるためである．

そこで筆者は，新しく発見されてきたトランジット惑星のロシター効果の観測を，すばる望遠鏡の共同利用観測に提案することを開始した．その頃アメリカやヨーロッパの他の研究グループも新しいトランジット惑星のロシター効果の観測に取り組み始め，2005年頃から世界でロシター効果の観測競争が行われることになった．

4.2 逆行惑星の発見まで（の裏側）

筆者らの観測グループは，すばる望遠鏡の観測時間を獲得し，可視の高分散分光器HDSを用いてロシター効果の観測に取り組んだ．しかし，2008年3月までに7個のトランジット惑星でロシター効果の観測を行ったものの，軌道が大きく傾いた巨大惑星は発見できていなかった．また世界の他のグループでも，2008年までに10個近くのホットジュピターやエキセントリックプラネットでロシター効果の測定が行われていたが，大きく軌道が傾いた惑星は発見されていなかった．

大きな転機となったのは2008年に発見されたXO-3bというトランジット惑星である[16]．この惑星は公転周期が約3.2日のホットジュピターである上に，軌道離心率が0.26という比較的大きな値を持つエキセントリックプラネットでもあった．そしてロシター効果の観測から，この惑星の天球面上で見た軌道傾斜角が37度程度と有意に傾いていることが明らかとなった[17,18,19]．

大きな軌道傾斜角を持つ巨大惑星が存在することが明らかになったことにより，世界の観測グループの大きな興味はもっと多くのトランジット惑星でロシター効果を測定し，その軌道傾斜角の分布を統計的に明らかにすることと，理論的には存在が予言されている主星の自転に逆行して公転する「逆行惑星」の発見に移っていった．この逆行惑星という存在は，円盤相互作用モデルで説明できないという点では大きく傾いていて順行している惑星と物理的な意味に大きな差はないが，当時はひとつのマイルストーンとして認識されていた．

その中で筆者たちのグループはすばる望遠鏡での観測を続け，8個目の観測ターゲットとして2008年5月30日にHAT-P-7bというホットジュピターのロシター効果を観測した．それまでにすばる望遠鏡で観測した7個の観測ターゲットのロシター効果は全て惑星の公転が主星の自転と揃っている形だったが，この惑星のロシター効果は図6に示すように最初に視線速度が若干マイナスになり，後半で少しプラスになるという逆行を示す形をしていた．

しかし当時，筆者を含めて共同研究グループの中では，これは恒星由来などのノイズによるものかもしれないという慎重な意見が多く，再観測の結果が出るまで論文化は見送る方針となった．また，その解析結果が出たのが2009年前期のすばる望遠鏡の観測提案の

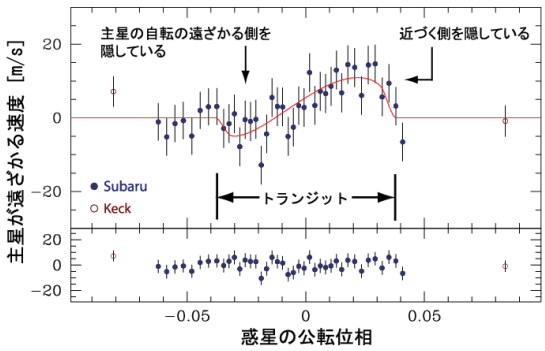

図6：すばる望遠鏡で観測されたHAT-P-7bのロシター効果（[20]の図を改変）．

締め切りを過ぎた2008年9月半ばだったこともあり，共同研究者のWinn氏に解析結果を送り，独立な観測をしてはどうかと提案した．その結果，Winn氏らはハワイ大学時間で2009年前期のすばる望遠鏡の観測時間を獲得し（ハワイ大学時間は観測提案の締め切りが10月1日なので間に合った），2009年7月1日にHAT-P-7bのロシター効果の再観測が行われた．

Winn氏からその観測結果の連絡があったのは，2009年7月31日（金）だった．メールの内容は「この惑星は逆行しているかもしれない．できれば来週には論文を投稿したい．」というのである．そこでWinn氏や日本の共同研究者との調整の結果，HAT-P-7bのロシター効果の論文を日本とアメリカのグループで2本に分けることとなり，7月31日から論文執筆を開始した．8月3日（月）にはWinn氏からアメリカグループの完成形になった初稿が届いて焦りつつも，日本グループも論文執筆を急ぎ，8月5日（水）には両グループがそれぞれ論文を投稿することができた．この短時間での論文作成のため，解析やモデル化，英文の校正などをすぐに行っていただいた共著者の佐藤文衛氏，平野照幸氏，田村元秀氏には深く感謝したい．

しかしこれで無事に世界初の逆行惑星の発見となったかというと，実はそうではなく，この後でもうひとつ波乱があった．Winn氏らが投稿していた論文が，イギリスの科学雑誌に不掲載の判断をされ，その翌日にイギリスのグループが別の逆行惑星WASP-17bの発見をarXivに掲載したのである．そこでWinn氏らは別の科学雑誌に論文を再投稿し，筆者とWinn氏も相談の上，その日のぴったり同じ時刻にarXivにお互いの論文を投稿することとした．しかし折しも筆者はシンガポールで開催されていたAsia Oceania Geosciences Societyの会議に参加しており，インターネットの回線速度が予想外に遅かったため，同時に投稿したはずではあるもののアップロードに時間がかかってしまった．筆者らの論文のarXivの番号がWinn氏らの論文より1だけ大きい（時間的に遅い）のはこのためである．

以上のようにいろいろ波乱はあったものの，筆者らの論文[20]は2009年8月27日に，Winn氏らの論文[21]は2009年8月21日に受理され，どちらも2009年10月に出版された．一方，イギリスグループの論文[22]は2009年11月30日に受理され，2010年1月に出版された．このように逆行惑星の発見とその発表は，ほぼ同時期に日米欧の3つのグループによって行われた（最初の観測と論文投稿は日本，最初の論文受理と出版はアメリカ，最初のarXiv掲載はイギリスが最も早い）．これが最初の逆行惑星の発見時のエピソードである．

4.3　その外側には何があるのか?

HAT-P-7bなどの逆行軌道の発見によって，宇宙には逆行惑星も実在することが明らかとなった．これはエキセントリックプラネットの存在と合わせて，惑星散乱や古在移動のような軌道進化が宇宙で実際に起きていることの強い証拠である．しかし，ロシター効果の観測結果や軌道離心率の情報だけではその惑星が惑星散乱で軌道進化してできたのか，古在移動で軌道進化してできたのかはわからない．軌道進化の仕方をもっと詳しく判別して，この惑星系がどのようにしてできたのかを明らかにするためには，外側に何があるのかを明らかにしなくてはならない．

そこで筆者らはHAT-P-7bの軌道進化の仕組みを解明することに取り組んだ．ちょうど筆者らがHAT-P-7bの逆行軌道を発表した2009年は，すばる望遠鏡に高コントラスト直接撮像装置であるHiCIAOが搭載され，120夜に渡る直接撮像観測を行うSEEDSプロジェクトが始まった年であった．そこでその試験観測の時間を使わせていただき，2009年8月6日にHAT-P-7bの観測を行うことができた．そこで見つかった伴星の可能性がある候補天体については，同じ固有運動（天球面上での移動）をしているかどうかを確認するため，2012年にもHiCIAOでの再観測を行った．

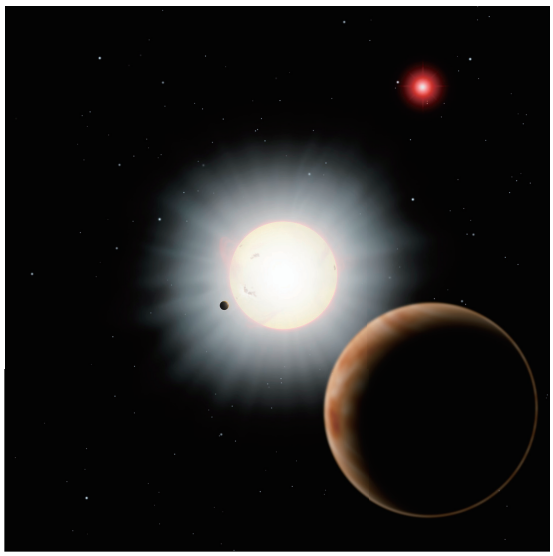

図7：すばる望遠鏡が明らかにしたHAT-P-7のイメージ図(クレジット：国立天文台)．

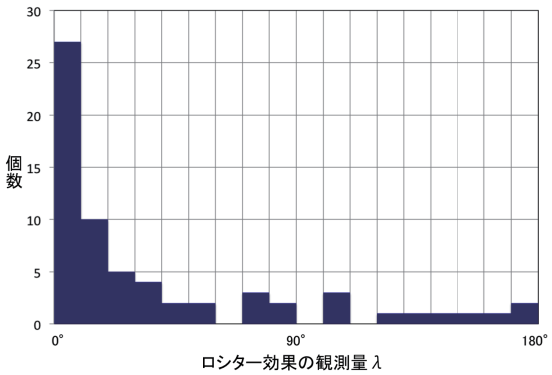

図8：これまでにロシター効果で測定された巨大惑星のλの分布．

また，3章で紹介したように惑星系の遠方を探査できる直接撮像とは相補的に，惑星系のやや外側の巨大惑星の存在を調べるには長周期視線速度測定が必要である．そこで筆者らはHAT-P-7の視線速度を2010年にも測定し，長周期の変化がないかどうかを調べた．

この結果，HiCIAOでの直接撮像観測では外側にひとつの赤色矮星の伴星が見つかり，長周期視線速度測定では別の巨大惑星の存在が確認された[23]．このことから，惑星系HAT-P-7は約0.04天文単位という主星のすぐそばに逆行するホットジュピターを持ち，約5天文単位より外側に別の巨大惑星，さらに約1500天文単位の距離に赤色矮星の伴星を持つという姿をしていることがわかった(図7参照)．このように視線速度の観測と直接撮像の観測によって，ひとつの逆行惑星系の内側から外側まで(巨大惑星以上の質量の天体だけではあるが)を明らかにすることができたのは，これが初めてである．

では結局この惑星系がどのようにしてできたかを考えてみよう．まずこの惑星系で初期に2つの巨大惑星が惑星散乱を起こしたかどうかはこれまでの情報では判別できない．しかし，外側の伴星と外側の巨大惑星の軌道のなす角度が最初から，あるいは惑星散乱によって約40度を超えて古在機構の条件を満たした場合，それによって傾いた外側の巨大惑星がさらに内側のHAT-P-7bに対して古在移動を引き起こせば，逆行軌道を生み出すことが可能である．あるいは，惑星散乱でいきなりHAT-P-7bが逆行軌道になった可能性も考えられるが，その場合も外側の巨大惑星からの古在機構を受けて現在の軌道を形成・維持したと考えられる．このように少なくともHAT-P-7というひとつの惑星系では，古在移動が惑星軌道進化の重要な形成要因になっていたのではないかと考えられる．

4.4 これまでの観測結果

前節ではHAT-P-7というひとつの惑星系について詳細に述べたが，ここではロシター効果と直接撮像に関する全体的な観測結果について紹介したい．

図8は2013年10月までにロシター効果で測定された巨大惑星の軌道傾斜角の分布のヒストグラムである．これまでにロシター効果の観測は約60個の巨大惑星で行われ，その約3分の1から2分の1が有意に大きな傾きを持っていることがわかってきた．その中には，逆行惑星も10個近く発見されており，逆行惑星系も決して希少な存在ではないことが明らかとなっている．

一方，直接撮像観測についてはまだSEEDSプロジェクトの観測が完了していないため暫定的な結果になるが，これまでにわかってきたことを紹介する．まず，エキセントリックプラネットを持つ惑星系は伴星があるものもないものもあり，伴星を持つ確率は太陽系近傍の恒星が伴星を持つ確率とあまり変わらないようである．そして，伴星がないエキセントリックプラネットが少なからず存在しているということは，惑星散乱による軌道進化が多く起こっている可能性が窺える．

一方で，軌道傾斜角が有意に傾いている惑星系の外

側では伴星候補が多く見つかっている．これはもしかしたら，軌道が傾いた惑星系では伴星の存在確率が高いことを示しているのかもしれない．ただし，これらの伴星候補はHAT-P-7で行われたような固有運動の確認がまだなされていないので，今後の追観測によって本物の伴星かどうか確認していき，それから軌道進化を議論する必要がある．このSEEDSプロジェクトの観測結果は，今後の論文での発表をご期待いただきたい．

4.5 新しい理論の展開

ロシター効果の観測で測定された軌道傾斜角の分布の考察は，逆に新たな理論的研究の発展を促した．

図8を見ると，巨大惑星の軌道傾斜角はほとんど傾いていない0度のあたりに大きなピークがあり，そこから逆行軌道の180度までまんべんなく分布していることがわかる．しかし，円盤相互作用だけでは有意に傾いた軌道の惑星は形成できず，惑星散乱や古在移動のモデルでは0度のまわりにピークはできないため，まず円盤相互作用，惑星散乱，古在移動の単一のモデルでは説明ができないことがわかる．これまでの分布からは，特に円盤相互作用と惑星散乱が主な軌道進化の仕方ではないかという指摘がなされている[24]．この点からすると，伴星と別の巨大惑星が存在して古在移動が起こった可能性が高いHAT-P-7は例外的な惑星系なのかもしれない．

また，この軌道傾斜角の分布と恒星のさまざまなパラメータとの相関を取ってみると，主星の温度が6250 Kより高い場合には有意に傾いていることが多いという指摘もなされた[25]．これは主星表面に対流層が発達している6250Kより温度が低い恒星では，惑星が潮汐力によって主星（の表面）の自転を惑星の公転に揃えてしまっているのではないかと仮説が立てられている．しかしこの理論では，惑星のQ値によっては惑星が主星に落下してしまう時間スケールが典型的な惑星系の年齢（数十億年）より短く，主星の自転軸が揃う前に惑星が主星に落下してしまうのではないかと言われており，まだ決着が着いていない[25]．

一方で，それ以外にもロシター効果の観測結果を解釈する上でいくつかの理論的な問題提起が行われてきた．例えば，恒星内部の重力波（流体力学で出てくるgravity waveのことで，一般相対性理論から予言されるgravitational waveではない）によって惑星とは無関係に自転軸が傾くのではないか[26]，とか，そもそも原始惑星系円盤の軸と主星の自転軸は揃っていなかったのではないか[27]，などである．

これらは惑星の軌道傾斜角の分布という新しい観測の結果が新しい理論的問題を生み出した例で，これらはまた観測によって検証する必要がある．具体的には，ケプラー宇宙望遠鏡で発見されている複数トランジット惑星系で主星の自転軸と複数の惑星の軌道傾斜角の関係を調べて，もし惑星同士の軌道の傾きはほぼ一緒なのに主星の自転軸だけが傾いているような場合があれば，主星の自転軸がもともと傾いていたのではないかという理論の観測的根拠となるだろう．あるいは，生まれたての星から噴き出すジェットと，その星のまわりの原始惑星系円盤のなす角度を測定できれば，直接的に初期の原始惑星系円盤と主星の自転軸のなす角度を調べることができるだろう．

このように新しい理論の検証のためにまだやるべき観測的研究は多く，まだ全容の解明への道のりは長いものの，惑星の軌道傾斜角の研究は最先端の観測と理論がせめぎあっている場となっている．

5. その他の取り組みと残された課題

3章と4章では特に筆者が取り組んできた観測手法を中心に紹介したが，本章では観測による惑星軌道進化の検証のために行われてきたその他の観測手法や，残されている課題について述べる．

5.1 別の方法論の取り組み

観測による惑星軌道進化の検証方法としてもうひとつ知られているのが，トランジット周期変動の測定である．これは，トランジット惑星系のまわりに別の惑星が存在しなければ基本的にトランジットの周期が一定になるのに対し，近く（特に共鳴軌道）に別の惑星が存在するとトランジットの周期が変動する現象として知られている[28,29]．この観測からわかってきたことは，ホットジュピター（公転周期が数日以内）のまわりには別の惑星が存在しないらしいということである．一方，公転周期が10日程度以上の巨大惑星になると，ケプラー宇宙望遠鏡の観測でトランジット周期変動が発見された例も多く[30]，ホットジュピターとやや公

転周期が長い巨大惑星では軌道進化の仕方が異なる可能性を示している．特にホットジュピターが円盤相互作用で形成されたと考えると外側の共鳴軌道などに別の惑星を伴ってもよいはずなので，この傾向が本当なのかさらに検証が必要だろう．

またこの傾向に関連して，まだ統計的に十分に有意ではないものの，金属量の大きな主星の惑星系では大離心率で近星点が主星に近く，後にホットジュピターに軌道進化するような巨大惑星が多いという傾向が指摘されている[31]．これは定性的には，金属量が大きな惑星系では巨大惑星が多く形成されるので惑星散乱による軌道進化がより多く起こっていると説明できる．逆に金属量が小さな惑星系では，やや公転周期が長くて離心率の小さな巨大惑星が多いことも指摘されており，これは巨大惑星が少ない惑星系では円盤相互作用モデルが起こっていると定性的に説明できる[31]．この傾向はトランジット周期変動の観測結果の示唆とも矛盾しないが，これもまだ統計的に十分有意な水準ではないので，今後検証が進められていくだろう．

5.2 より小さな惑星へ

これまでは巨大惑星を対象とした研究が中心であったが，最近ではロシター効果とはまた違った新しい方法で，より小さな惑星の軌道傾斜角を測定しようという試みもなされている．例えば，(a)主星の黒点を惑星が隠す現象を連続的に観測することで，惑星の公転が主星の自転と揃っているかどうかを調べたり[32]，(b)トランジット惑星(惑星の公転軸は天球面と揃っている)で主星の自転周期と見かけの自転速度を求めることで，主星の自転軸が天球面から傾いていないかを調べる[33]，といった方法である．これらの方法の他に，今後は赤外線による視線速度観測装置が登場すれば，赤色矮星のまわりのより小さな惑星でも視線速度やロシター効果の測定が可能となる．

これらの方法によってより小さな惑星の質量，軌道離心率，軌道傾斜角などの分布がどのようになっているのかを調べていくことは，これまで巨大惑星に対して行われてきたのと同様に，低質量惑星の軌道進化が系外惑星系でどのように起こっているのかを知る手がかりとなる．巨大惑星だけでなく低質量の惑星の軌道進化の仕方も明らかにすることができれば，それは惑星系形成の全体像を理解することにつながるだろう．そのため，今後は低質量惑星の軌道進化理論と観測の結果を比較していくことが，惑星軌道進化の研究における重要な課題となると考えられる．

5.3 より外側の惑星へ

現在のすばる望遠鏡のHiCIAOでは，惑星系の外側にある伴星は発見することができるが，恒星より質量の小さな巨大惑星を発見するのは難しい．しかし高コントラスト直接撮像装置の性能が向上すれば，巨大惑星程度の質量の天体まで発見することが可能になると期待されている．これが実現して惑星系の外側にある木星のような巨大惑星まで発見できるようになれば，その惑星系の巨大惑星の数や伴星の有無を含めてその惑星系の全体像を明らかにすることができる．そうなれば，HAT-P-7で行われたようにそれぞれの惑星系の軌道進化の仕方を詳細に議論できるようになるだろう．

6. これまでの理解と今後の展望

本稿ではこれまでに行われてきた巨大惑星の軌道進化理論の観測的検証について紹介してきた．

これまでの研究によって明らかとなった惑星の軌道傾斜角の分布や伴星の有無，またトランジット周期変動や主星の金属量との相関などの情報を合わせると，あくまで個人的な印象としては，円盤相互作用モデルと惑星散乱(それに伴う外側の惑星による古在移動を含む)が多くの惑星系での軌道進化を占め，伴星を持つ系では伴星による古在移動も少ない割合だが実際に起こっているというのが現在の印象である．この印象が正しいのかどうかを，複数惑星系における軌道傾斜角の測定，次世代の観測装置による高コントラスト直接撮像，より精度の高い長周期の視線速度測定などの様々な方法を駆使して検証していくことが必要である．

また，5章で述べたように今後はさらに小さな惑星や外側の惑星の軌道分布も明らかになっていくと考えられる．太陽系外惑星系でも太陽系のように内側から外側まで，そして低質量惑星から巨大惑星に至るまでの軌道分布が明らかになってくれば，太陽系のような惑星の分布が宇宙の中でよくあるタイプなのか，希少なのかを知ることができ，惑星の軌道進化の全体像に迫ることができるだろう．

7. さいごに

以上で紹介してきたように，太陽系外惑星はこれまで太陽系の研究をもとに培われてきた惑星形成・移動理論を観測的に検証する場を与えてくれた．何度も言うようにこの研究はまだ道半ばであるが，今後の太陽系外惑星系の観測的研究と理論的研究の進展によって，より大きな視点から惑星形成と軌道の進化を理解していくことができるだろう．

また，本稿では特に惑星軌道進化の研究に焦点をあててきたが，同じようにこれまでの太陽系の惑星の知識が太陽系外惑星の研究でも活かされるような場が，これからの系外惑星大気の研究にもあるはずである．特に今後はより小さな太陽系外惑星の軌道進化や大気の観測的研究も進んでいくと考えられる．その際には，現在太陽系を中心とした研究をされている方々にも，ぜひその検証の場として，太陽系外惑星へと目を向けていただければ幸いに思う．

謝 辞

本稿は日本惑星科学会2012年度最優秀研究者賞受賞論文として執筆させていただきました．今回の受賞に際し，私を推薦してくださった生駒大洋准教授に厚くお礼申し上げます．また，本稿の執筆にあたり助言をいただいた堀安範氏に感謝いたします．本稿で紹介させていただいた筆者の研究は，どれも多くの方々との共同研究であり，その協力なくしては成し得なかったものです．全ての方のお名前を列挙できず申し訳ありませんが，この場を借りて全ての共同研究者の皆様に深く感謝いたします．最後に，本稿で紹介した中の多くの重要な研究が日本人の研究者によってなされていることに鑑み，今後もこの分野の研究が日本で発展していくことを期待しております．

参考文献

[1] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, 1100.
[2] Lin, D. N. C. et al., 1996, Nature 380, 606.
[3] Ida, S. and Lin, D. N. C., 2004, ApJ 616, 567.
[4] Rasio, F. A. and Ford, E. B., 1996, Science 274, 954.
[5] Marzari, F. and Weidenschilling, S. J., 2002, Icarus 156, 570.
[6] Wu, Y. and Lithwick, Y., 2011, ApJ 735, 109.
[7] Kozai, Y., 1962, AJ 67, 591.
[8] Wu, Y. and Murray, N., 2003, ApJ 589, 605.
[9] Fabrycky, D. and Tremaine, S., 2007, ApJ 669, 1298.
[10] Nagasawa, M. et al., 2008, ApJ 678, 498.
[11] Kita, Y. et al., 2010, Astrobiology 10, 733.
[12] Rossiter, R. A., 1924, ApJ 60, 15.
[13] McLaughlin, D. B., 1924, ApJ 60, 22.
[14] Queloz, D. et al., 2000, A&A 359, L13.
[15] Charbonneau, D. et al., 2000, ApJ 529, L45.
[16] Johns-Krull, C. M. et al., 2008, ApJ 677, 657.
[17] Hébrard, G. et al., 2008, A&A 488, 763.
[18] Winn, J. N. et al., 2009, ApJ 700, 302.
[19] Hirano, T. et al., 2011, PASJ 63, L57.
[20] Narita, N., et al., 2009, PASJ 61, L35.
[21] Winn, J. N., et al., 2009, ApJ 703, L99.
[22] Anderson, D. R. et al., 2010, ApJ 709, 159.
[23] Narita, N. et al., 2012, PASJ 64, L7.
[24] Morton, T. D. and Johnson, J. A., 2011, ApJ 729, 138.
[25] Winn, J. N. et al., 2010, ApJ 718, L145.
[26] Rogers, T. M. et al., 2012, ApJ 758, L6.
[27] Lai, D. et al., 2011, MNRAS 412, 2790.
[28] Holman, M. J. and Murray, N. W., 2005, Science 307, 1288.
[29] Agol, E. et al., 2005, MNRAS 359, 567.
[30] Ford, E. B. et al., 2011, ApJS 197, 2.
[31] Dawson, R. I. and Murray-Clay, R. A., 2013, ApJ 767, L24.
[32] Sanchis-Ojeda, R. and Winn, J. N., 2011, ApJ 743, 61.
[33] Hirano, T. et al., 2012, ApJ 756, 66.

←目次へ

エポックメイキングな隕石たち(その1):Allende隕石

木村 眞[1], 野口 高明[1]

(**要旨**) 隕石は現在でも貴重な太陽系形成過程や惑星の分化過程などを知るための重要な物質である. 本解説記事ではよく知られた代表的隕石を紹介する. 第1回はAllende隕石を紹介する. この隕石は炭素質コンドライトに属し, 構成物質の化学組成や形成年代などの特徴から, 多くの太陽系最初期の情報が得られてきた.

1. はじめに

現在, 地球外物質を研究するための試料として月や小惑星から回収された物質(リターンサンプル), 彗星起源物質など様々なものを利用することが可能となっている. しかし最も古くから研究されている地球外物質である隕石はリターンサンプルに比べると圧倒的に手軽に多量に使えることもあり, 今日でも広く研究されている. 隕石には様々な種類のものがあり, 原始太陽系星雲(円盤)の形成から天体の分化過程に到る一連の過程を明らかにするために貴重な情報を提供している. このような理由で隕石の重要性は現在でも変わらない.

今回, 遊星人編集委員会からこのように重要な物質である隕石の中でも代表的なものを簡潔に紹介する連載記事の提案がなされた. われわれはその世話人を依頼されたので, 第1回目の記事として, 隕石の中でも最も有名なものの一つであるAllende(アイェンデ)隕石を紹介したいと思う. 今後は多くの研究者に執筆を依頼して様々な隕石をこのコラムで紹介していきたいと考えている. なお記事の性格上, 文献は最小限にとどめた.

Allende隕石は1969年2月8日にメキシコ, チワワ州に隕石シャワーとして落下した隕石である. 多量に採集されたこと(総回収重量2トン以上), 数少ない炭素質コンドライトに属すること, そこに含まれる難揮発性包有物から太陽系最初期の物質形成過程が推定されたこと等から最も有名な隕石となっている. 多量に試料があることから炭素質コンドライトという貴重な隕石であるにもかかわらず, ミネラルフェアなどで容易に入手でき, 博物館などの展示でも最も良くお目にかかる隕石の一つである.

2. 分 類

まずはAllende隕石の分類上の位置づけについて述べよう. 隕石は始源的隕石(コンドライト)と分化隕石に大きく二分される. 前者は基本的に母天体内で溶融して分化した形跡のないもので, そのため原始太陽系内で起こった様々な現象や物質に関する情報が得られる. コンドライトはさらに炭素質コンドライト, 普通コンドライト, エンスタタイト・コンドライトに分類される(他にこれらに属さないものも少数ある). なお, 最新の隕石の分類体系についてはWeisberg et al.[1]を参照されたい.

Allende隕石は炭素質コンドライトのグループの一つであるCVに属している. 他のグループ(CI, CM, COなど)とは化学組成, 酸素同位体組成に加えて構成物質(後述)によっても区別される. CVグループはさらに酸化的な環境を示すCVox, 及び還元的なCVredに区分される. CVoxはさらに, CVoxAとCVoxBに細分され, Allendeは前者に分類される.

1. 茨城大学理学部
makotoki@mx.ibaraki.ac.jp

以上のような隕石の詳細な分類は専門家でない人にとっては煩雑で”マニアック”な意味しかないように見えるかもしれないが，これは単に特徴を区分するというだけでなく，後述のような成因的意味が込められている．従って，隕石の研究に当たっては，まずは分類を正しく行うこと，あるいは認識することが必須となっている（自然科学の基本だが）．分類に当たってはある程度訓練を積み「鑑定眼」と知識を十分持てば，それほど大変なことでは無い．

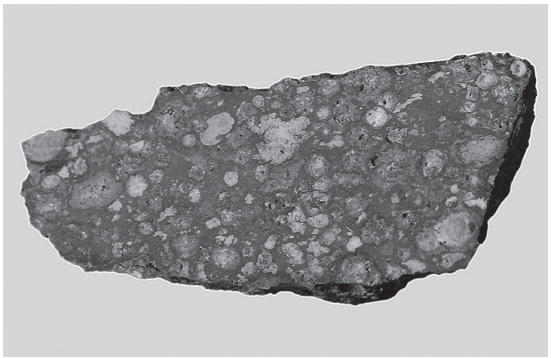

図1：Allendeチップの写真．暗色のマトリックス中に白色から灰色の構成物質が分布する．横幅24mm.

3. 構成物質

Allende隕石の外見は暗色で，その中に白色から灰色で不規則形状から球形の構成物質が容易に識別できる（図1）．これをさらに岩石薄片にしてみたものが図2である．Allendeはコンドルールという球形等の形状（薄片では円や楕円形に見える）を示す物質（破片になったものも含む），不規則形の難揮発性包有物（CAIなど），鉱物片とそれらの間を埋めるマトリックスから構成されていることがわかる．

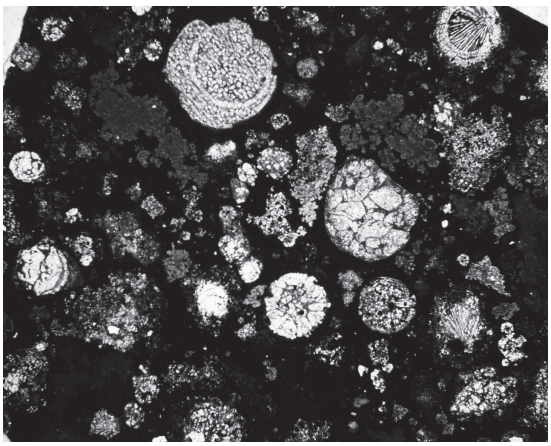

図2：薄片写真．大小のコンドルールが多く含まれる．横幅12 mm.

特にCVグループの特徴はコンドルールが平均して45 vol.%ほどを占め，マトリックスも多く含まれる（40%）ことが特徴である [1]．難揮発性包有物は10%程度含まれる．またコンドルールは平均直径が約1 mmで，他の炭素質コンドライトのものより大きい．難揮発性包有物もCVでは大きいものまであり，cmサイズになることもある．このような点でAllendeなどのCVグループの隕石は他の炭素質コンドライトとは容易に区別がつけられる．

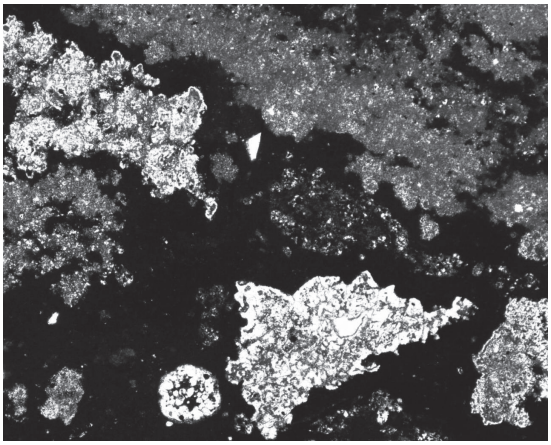

図3：難揮発性包有物の薄片写真．この写真上の構成物質はほとんどが難揮発性包有物である．横幅 2.3 mm.

難揮発性包有物は溶融して球形になっているもの（コンドルール状）もあるが，不規則形で融けていないものが多く，また構成鉱物が異なること，縁に薄いリムが観察されることがあるといった特徴からコンドルールと容易に区別できる（図3）．化学組成的にはCa, Al, Tiに富むことが特徴的で，さらにZr, Irなどの元素をコンドルールなどより多く含み，Si, Fe, Naなどに乏しい（後述の変質部分を除く）．これらの元素は平衡凝縮説で予想される超難揮発性，ないしは難揮発性元素である．このような化学組成を反映して，メリライト（$Ca_2Al_2SiO_7$–$Ca_2MgSi_2O_7$），Ca，Alに富む輝石（$CaMgSi_2O_6$–$CaAl_2SiO_6$），スピネル（$MgAl_2O_4$）といった鉱物が主要なものとなっている．また，最近では微

少な鉱物の同定が行えるようになったため，次々とミクロンサイズの新鉱物がAllendeや他の炭素質コンドライトの難揮発性包有物から報告されている．例えばAllendeite（$Sc_4Zr_3O_{12}$）等が知られている．

いずれにせよ，このような特徴から難揮発性包有物は太陽系最初期の高温凝縮物と見なされている．また酸素等の同位体組成異常がこの難揮発性包有物に顕著に認められることや，太陽系最初期の年代を与えることなども広く知られている([2]など)．Allendeなどから難揮発性包有物が多数発見され集中的に研究され，それにより太陽系最初期の情報が得られたことからAllende，あるいはCVグループの隕石が注目されることとなったのである．

コンドルールはさまざまな鉱物集合体がいったん融けて，その中で結晶が生じたものである．コンドルールは化学組成的にはMg, Siなどの親石元素としては元素存在度的に最も主要な元素を主としているが，これらは難揮発性包有物を構成する元素の後に凝縮するものである．これを反映して鉱物としてはカンラン石，輝石が多く含まれる．年代としては難揮発性包有物より1-3My年ほど若い結果が得られている [2].

4. 変質作用と意義

難揮発性包有物もコンドルールも原始太陽系星雲内で生じたもの，と考えられているが，形成後，多くのものが二次的な変質作用を被っている [3]．特にCVoxA, CVoxBでそれが顕著で，Na, Feを多く含む変質鉱物が知られている．さらにCVoxBには含水珪酸塩鉱物が含まれている．CVコンドライトの変質作用の場については様々な議論があるが，母天体内で起こったとする考え方が有力である．ただし，最終的な母天体が形成されてからというより，それ以前の段階の可能性が高い．このように最終的な母天体が形成されるまでには複雑な過程があったことが推定されている．なおCVの細分はこのような二次的作用の程度や過程を反映したものである．

こうした意味でも炭素質コンドライト＝太陽系の“始源“物質と単純に考えてはいけないことになってきた．つまりAllendeなどの“始源的”隕石は原始太陽系に関わる初生的性質と二次的作用の両方の性質を持っている．このことを認識して，分析などを行うことにより，それぞれの過程に関する知見が今後とも得られると思われる．いずれにせよ，炭素質コンドライトが太陽系形成時の貴重な情報を保持していることには変わりは無く，今後とも広く研究が行われていくであろう．

謝 辞

岡崎隆司氏，はしもとじょーじ氏からはこの原稿執筆の機会を与えて戴いた．また岡崎氏には粗稿を読んで戴いた．岸山浩之氏，山口亮氏には写真を提供して頂いた．これらの方々にこの場をお借りして感謝いたします．

参考文献

[1] Weisberg, M. K. et al., 2006, In Meteorites and the Early Solar System II,19.

[2] Kita, N. T. et al., 2005, In ASP Conference Series 341, 558.

[3] Brearley, A. J., 2006, In Meteorites and the Early Solar System II 587.

系外惑星「遠い世界の物語」その1 ～ SEEDSによる太陽型恒星GJ 504を公転する系外惑星の直接撮像～

葛原 昌幸[1]，田村 元秀[2]，
SEEDS/すばる望遠鏡/AO188 チーム

（**要旨**）直接撮像法は軌道の大きな巨大惑星の探査に有効な手法であり，その大気や組成を調べることも可能にする．太陽系外惑星や星周円盤を直接撮像探査する戦略的な計画，SEEDSがすばる望遠鏡で進められている．SEEDSは最新の観測装置，観測技術を採用し120夜の観測時間で探査を行なうことで，これまで知られていなかった系外惑星の知見を得ることを目標としている．その代表的な成果の一つとして，我々は太陽型主系列星GJ 504を公転する巨大惑星（GJ 504b）の直接撮像に成功した[1]．本稿では，その惑星の特徴や意義について説明する．また，普段は紹介する機会が少ないGJ 504bの発見に至るまでのSEEDSにおける我々の活動についても説明する． *[1] Kuzuhara et al. 2013, ApJ 774, 11

1. 系外惑星の直接撮像観測

我々が太陽系“外”惑星の存在を知ったのは，わずか20年ほど前のことである[2]．しかし今では，観測技術の進歩に伴っておよそ1,000の系外惑星の存在が知られている．これらの系外惑星の観測は，我々に多くの知見をもたらし，人類は宇宙に存在する惑星が多種多様であることを知ることになった．

系外惑星は主に視線速度法やトランジット法などの手法によって探査されてきたが，これらの手法は惑星から放たれる光を直接とらえるものではなく，間接的な手法である．地球が太陽より可視光でおよそ10^{-10}倍暗いことから分かる様に，惑星はその中心星に対して圧倒的に暗い．このように明るい中心星の光に邪魔された状況で，惑星の光を見つけ出すことは，天文観測では極めて難しい課題となる．これは，例えるならばサーチライトの中をさまよう蛍の光を見つけ出す様なことである．しかし近年，8m級の主鏡をもつ大型望遠鏡，補償光学装置や高感度赤外検出器，惑星と中心星のコントラスト比の障害を克服するための高コントラスト撮像技術が登場し，系外惑星の直接撮像は決して「見果てぬ夢」ではなくなってきた．実際に，現在の観測技術では巨大ガス惑星の検出に限られるが，2005年あたりから惑星やその候補天体の撮像に成功したという報告がなされるようになってきた（e.g., [3, 4]）．惑星が放つ光を直接観測し画像におさめることは学問的に利益が大きいばかりでなく，より一般的にも夢のあることであろう．そして，それは今日では現実的な課題なのである．

惑星を直接撮像することで，我々は惑星の放射フラックス，中心星に対する位置の情報を得ることができる．さらに，多波長の撮像観測や，分光観測を用いることで惑星のフラックスを波長の関数として知ることができる．これは，惑星の有効温度や大気構造，そして組成などの理解につながる．さらに直接撮像観測では，他の手法では困難な数10 AUという軌道長半径を持つ大軌道惑星の探査が可能になるが，この点も直接撮像観測による大きな利点と言える．大軌道惑星の探査が可能になれば，コア集積理論や重力不安定理論，惑星の軌道進化理論などを検証する新たな観測的資料を得ることができる．

すばる望遠鏡では，系外惑星および星周円盤を直接撮像探査するための戦略的な探査プロジェクト（Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru；略称SEEDS）が進められている．SEEDSで

1. 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻
日本学術振興会特別研究員
2. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
m.kuzuhara@geo.titech.ac.jp

はすばる望遠鏡に併せて，最新の補償光学装置AO188，我々が新たに開発した近赤外カメラHiCIAOを用いる．さらに，Angular Differential Imaging（ADI）などの最新の高コントラスト撮像技術が採用されている．また，合計120夜の観測時間がSEEDSに与えられていることも含めると，SEEDSは過去行なわれた直接撮像探査の中で，最も強力な探査計画であると考えられる．SEEDSの最終的な目的の一つとして，軌道の大きな系外惑星を直接撮像し，その特徴を評価することがあげられる．これまで，系外惑星は20程度の星の周囲で直接撮像されたにすぎない（その中には褐色矮星を公転する天体など，惑星と呼ぶべきものかどうか意見が分かれるものも多く含まれている）．この限られた検出数のため，大軌道惑星の特徴は良く知られていない．従って，その特徴を観測から明らかにしていくことは重要な課題である．また，SEEDSのもう一つの重要な課題として，大軌道惑星の存在頻度などを統計的に導出することがあげられる．これもまた，巨大惑星の形成・進化理論に対して重要な制限の一つになるだろう．

我々は，SEEDSを2009年秋に開始し，これまで系外惑星の探査を進めてきた．その結果，3つの系外惑星やその候補天体の直接撮像に成功するなど多くの成果をあげてきた．その代表的な成果として，太陽型恒星GJ 504から約44天文単位の距離を公転する，これまで直接撮像された惑星の中で最も木星に近い質量や有効温度をもつ惑星（GJ 504b）を発見した（図1）．我々SEEDSチームはこの発見に至るまで，多くの地道な作業や議論を積み重ねてきたが，その点についてはあまり知られていないだろう．そこで，本稿はまず，普段は紹介する機会の少ないGJ 504bの発見に至るまでの我々の活動について重点を置いて紹介する．その後，その惑星の特徴や発見の意義を説明し，最後に我々の今後の計画について述べる．

2. GJ 504b発見に至るまで

2.1 観測ターゲット選定

SEEDSはいくつかの観測カテゴリーに分かれているが，各カテゴリーが各々の設定した科学的な目標に基づいてターゲットを選定する．各カテゴリーにおいて共通する作業として，ターゲットの年齢を推定する必要がある．その理由は，直接撮像で検出された惑星の質量を推定するためには，その光度と年齢を，惑星の光度を年齢や質量の関数としてモデル化した惑星光度進化理論[3]と比較する必要があるためである．そのような方法を用いる理由は，惑星の軌道周期が長いため，力学的な質量測定が困難なためである．恒星の最も基本的な年齢推定方法として，恒星進化理論モデルとその星の観測された光度や有効温度を比較する手法がある．星団の星を多数利用して，そこに含まれる星の年齢を統計的に求める方法も代表的な手法の一つである．しかし，これらの手法はゆっくり光度進化する太陽型主系列星や，星団に属していない恒星に適用するには現実的ではない．

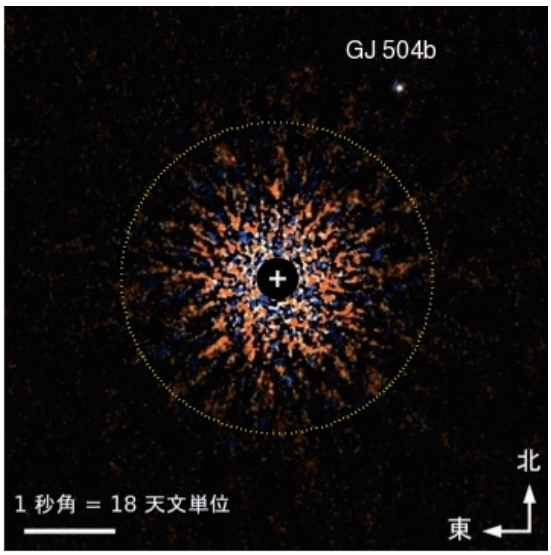

図1：観測から得た，GJ 504 の*J*-band（～ 1.2 μm; 青）と*H*-band（～ 1.6 μm; オレンジ）の2色合成図．中心星の位置は十字で示す．画像上では，GJ 504bは白い像としてみえる．黄色の点線は海王星の軌道長半径に相当する．カラーの図は電子版を参照されたい．[1] の図を一部改訂．

太陽型主系列星の年齢推定法の一つとして，その自転周期を指標として年齢を評価するgyrochronology法[5]がある．自転周期は非常に高い精度で測定が可能であり，さらに星は主系列に達した後，恒星風によって角運動量を失い自転が時々刻々と遅くなる．そのため，gyrochronology法は自転周期が測定されてい

3. 巨大ガス惑星は重力収縮によって光を放射するが，ある与えられた質量を持つ惑星光度の時間進化を数値的にモデル化した研究がいくつか存在する．

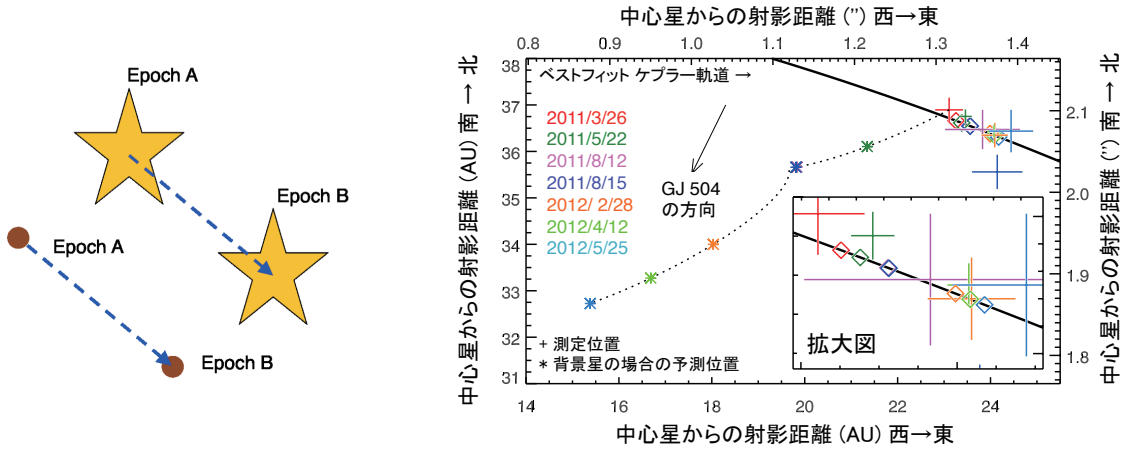

図2：左：検出した光源がターゲットの恒星に束縛しているかどうかを検証するための，固有運動を利用したテストの概念図．光源が惑星ならば共に同じ固有運動をする．一方，惑星（円）が背景星ならば，Epoch AでもEpoch Bでも天球面上を動かないので，主星との位置関係は変化する．右：GJ 504bのGJ 504に対する位置関係を示した図．各測定位置と背景星の場合に期待される位置に対して，それぞれの時期を色で分けて示す．図から明白であるが，フィッティングした場合も，各測定位置はGJ 504bが背景星と仮定した場合とは一致しないが，ケプラー軌道でよく再現される．カラーの図は電子版を参照されたい．[1]の図を一部改訂．

る太陽型主系列星に対しては有効な手法であり，星団に含まれていない恒星に対して，他の手法と比較して高い精度で年齢を推定できる．著者は国立天文台で行なわれているあるセミナーの発表のために，たまたまgyrochronology法について勉強していた．そしてその手法に基づいて多くの星の年齢を推定し，それらをSEEDSの観測ターゲットとして提案した．今回，紹介するGJ 504の年齢推定にもgyrochronologyを用いている（実際のGJ 504の年齢は，その他の手法も総合的に用いて評価されている）．太陽近傍には，多くの主系列星が存在するが，散開星団などの星団は比較的遠方にある．もし太陽近傍の主系列星の年齢が精度よく推定できれば，地球との距離が近い天体を観測ターゲットに追加できるため，より星近傍が分解可能なり，さらにはより暗い惑星の探査も可能になる．これは太陽近傍の恒星を観測する利点である．

2.2　すばる望遠鏡での観測

2011年3月，日本はその月に未曾有の大災害となった東日本大震災を経験していた．我々SEEDS観測チームは，その大震災が起きたおよそ10日後，観測のためにハワイのマウナケア山に向かった．震災直後であったため，著者がハワイに向かった便の中には人がほとんどいなかった．このときの観測にはGJ 504がターゲットとして含まれており，また実際に無事観測することができた．観測チームは，観測後に簡易解析をして，観測の達成度を確認するが，GJ 504の簡易解析画像からは，非常に暗い光源（GJ 504b）が存在しているのが確認できた．一回の天文観測からは，検出した光源が背景の星か，その中心星に付随する天体かどうかを判断できない．しかし，GJ 504は銀河面から70度ほど離れていることもあり，背景星が入ってくる確率は非常に小さい．そのため，著者は画像を見た際，「これはけっこう有望なのではないか」と感じた．また，帰国後に行なった本解析でもやはり検出が確認された．

宇宙のあらゆる天体は地球から見てそれぞれ固有の運動をしている．GJ 504は太陽近傍にあるため，その天球面上での固有運動が非常に速い．従って，もし今回検出された光源が背景の天体であるならば，GJ 504bとGJ 504の天球面上での位置関係は比較的早く変化する．SEEDS観測の位置測定精度ならば，この変化を数ヶ月後の観測で確認することができる．一方，お互いが重力的に束縛されている場合，位置変化はほとんど生じない（図2参照）．そこで，GJ 504bが背景星かどうかを検証するために，我々は2011年5月にGJ 504を再観測した．その結果，見事再検出することに成功した．このときの観測ではHiCIAOの光学系

を少し変更していた結果，ピクセルスケールが変わっており，初めは重力的に束縛されていた場合に期待される位置に光源が現れずがっかりした覚えがある．しかし，その光学系の変更の影響をデータ解析時に補正した結果，背景星の場合期待される位置からは測定した位置が明らかにずれており，GJ 504bはGJ 504に束縛されている可能性が非常に高いことが分かった(図2)．それをより確かにするために，我々は2011年8月から2012年の5月の間にさらに5度観測を行なった．そうして得た合計7回の位置測定はGJ 504bが背景星ではないことを結論するためには十分なデータになった．さらに，7回の測定位置はわずかながら変化していたが，その位置変化はGJ 504を中心とするケプラー軌道で説明できることが分かった．また，その7回の観測の際は，1.2, 1.6, 2.1, 3.8 μmの波長のデータを取得したが，各波長での測光観測から求められたGJ 504bの色は惑星の様な低温天体でないと説明できない色であった．観測に用いられた，3.8 μmの波長はHiCIAOでは使えない波長であるため，IRCSという別の赤外線カメラを用いた．著者は大学院生になって初めて解析したデータがIRCSのものだった．そのため，IRCSの特性についての知識やデータ解析の経験を有していたため，今回のデータ解析はそれほど苦にならなかった．過去に得たIRCSのデータ解析の経験やgyrochronologyの知識が今回の研究に活かされたわけであるが，これはAppleのSteve Jobsが述べた様に，過去に打った点が今につながり線になったのではないかと，著者が少しばかり感じた瞬間になった．

SEEDSは開始直後，GJ 758という恒星に対して褐色矮星または質量の大きいガス惑星に相当する伴星を発見した．それ以後，星周円盤の華やかな成果を多く発表していたが，2011年3月までは惑星探査を粛々と進める中，実は惑星は検出されていなかった．そこで，中盤に差し掛かったSEEDSプロジェクトとしてもインパクトのある惑星の検出が望まれていた．GJ 504bは，まさにそのような時期に発見されたのである．さらに，後述する様にGJ 504bはこれまで発見された系外惑星と比較して多くの興味深い特徴を有しており，非常に重要な成果となった．観測天文学は天候との戦いである．天体観測に最適な場所と知られているマウナケアといえども，毎晩晴天に恵まれる訳ではない．実際に，SEEDSでも悪天候のため観測できないということが決して少なくはなかった．この3月の観測で天候に恵まれていなければ，または何かトラブルがあれば，GJ 504を観測することはできていなかったかもしれない．我々は運がよかったのは確かだろう．しかし以下で説明する様に，我々の日頃の積み重ねがあったからこそ，無事取得したデータを惑星の発見として報告することができたのもまた事実である．

2.3 SEEDSチームの日々の活動

SEEDSは今でこそ多くの成果を論文として発表しているが，その成果を世に出せたのはSEEDSメンバーおよび，これまですばる望遠鏡に携わってきた人全ての努力の賜物である．SEEDSで用いているHiCIAOやAO188の観測装置はそれを開発するための科学研究費申請の段階から，多くの準備・作業があった．全ての例をあげることはできないが，ここでは，いくつかその作業についても説明する．

SEEDSが120夜という非常に多くの観測時間を得るには，それが本当に科学的に有益であるかどうかを審査する必要があった．その審査のためのプロポーザル準備や，計画を煮詰めるための多くの作業をこなす必要があった．また当然のことながら，完成した直後の装置は，それが期待通り働いているかどうかを検証する作業が必要になる．さらにデータの較正ための観測データを取得し，補正用のプログラムを作成する必要がある．例えば，HiCIAO観測では天体位置の測定精度が重要になるため，光学的歪みを補正するために多くの試験を行ない，慎重に議論を重ねてきた．また，HiCIAOの赤外検出器は新しい種類のものなので，そのデータの較正に対しても観測チーム内で慎重に議論をして，方法を構築した．観測装置の保守・改良，データ解析方法の検討，データ解析ソフトの開発・バグ出しなどの細かい点から，全体としてのプロジェクトの進め方まで，SEEDS代表者の田村元秀教授を中心として，ほぼ毎週ミーティングを開いて対応してきた．ハワイに観測に行くと言うと，よくうらやましがられるが，現地で観光できるようにスケジュールは組まれていない．さらに冬の観測になれば，夕方5時には出発して，朝7時に望遠鏡ドームから帰るというスケジュールであり，酸素の薄い山頂に長い間滞在しなければならない．その日のターゲットの簡易解析が終わっていなければ，宿泊所に戻った後に仕事をすることも

ある．2011年12月の観測の際には，21日から翌月の1日（つまり，正月）まで著者を含めた観測チームはマウナケアの山頂で観測をすることになり，決して楽とは言えない状況だった．

また，SEEDSの各カテゴリーでは，それぞれの設定したテーマの解明のためにそのメンバーが必要な仕事を多くこなしてきた．さらに，全体でそれぞれのカテゴリーの目的・進捗を確認するために月に1度の全体会を行い，さらに年に少なくとも1度は顔を合わせて議論を重ねてきた．その際の会議では，SEEDSには外国の研究機関の研究者も多く参加しているため，当然英語が用いられる．

このように，期待する成果をあげるために多くの作業をこなしてきたが，その中には非常に泥臭いことも多く含まれている．GJ 504bの発見を報告する論文の原稿を作成する際も著者は，非常に細かいことも含めて一つ一つの問題を共同研究者と協力しながら検討し，つぶしていった．もちろん，このような作業は全てのプロジェクトで，またあらゆる研究で共通することであり，SEEDSに限られたことではないだろう．しかし，この記事で紹介するGJ 504bの発見を含めて，SEEDSの全ての研究成果が多くの小さな積み重ねの上に成り立っていることをやはり述べておきたい．

3. GJ504bの特徴と意義

以下では，中心星GJ 504（年齢：$1.6^{+0.5}_{-0.6}$億年．質量：太陽の1.2倍）を公転していることを確認したGJ 504bの特徴を説明する．まずGJ 504bの質量であるが，その近赤外線光度と年齢（中心星の年齢と等しいと仮定）を惑星の光度進化モデルと比較することで導出した（図3）．最も一般的に用いられているモデル[6]を採用した場合，GJ 504bの質量は木星質量（$M_{\rm Jup}$）の$4^{+4.5}_{-1}$倍に相当する．この質量は過去直接撮像された惑星（e.g., HR 8799b[3]）と比較して，最低値の一つである．この質量推定における一つの重要な注意点として，これまで発表されている全ての惑星光度進化モデルが無視できない不定性を持つことがある．特に問題な点として，惑星光度進化は，未だ十分に制限されていない惑星の熱的な初期条件（物理的には，初期エントロピー）に依存する点があげられる[7]．近年，従来想定されていたよりもガス惑星がより低温の状態から進化を始めるモデル（cold-startモデル）が提案された[7, 8]．仮に，そのモデルを最も有名な直接撮像された惑星の一つであるHR 8799b（年齢：～3千万年，質量：～5 $M_{\rm Jup}$）に適用した場合，惑星と褐色矮星の質量の境界を天文学的に定義する質量（13－14 $M_{\rm Jup}$）よりも推定結果が優位に大きくなる．この例にデモンストレーションされるように，初期条件不定性の影響は直接撮像された惑星の質量推定において大きな問題である．しかし，この初期条件への惑星光度進化の依存性は惑星が年をとれば収束していくことが知られており，特に年齢がおよそ1億年を超えると，設定した初期条件によらず惑星光度はほぼ同じになることが理論計算より導かれている[7, 8]．そのため，GJ 504bにcold-startモデルを適用した場合，推定される質量は惑星と褐色矮星の境界質量以下になる可能性が高い（つまりGJ 504bの場合，初期条件不定性によって生じる質量推定の不定性はおよそ10 $M_{\rm Jup}$以下になる）．これは，過去に直接撮像された系外惑星と比較して，GJ 504bの質量推定のモデル不定性への依存が非常に小さく，その推定値の信頼度が非常に高いことを意味している．

また，質量推定と同様の手法でGJ 504bの有効温度を導いた結果，その有効温度はおよそ500 Kであることもわかった．この有効温度は過去直接撮像された惑

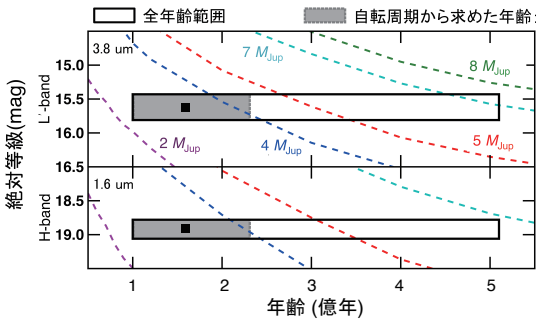

図3：惑星の光度進化モデル[6]との比較による質量推定．破線がそれぞれ図中に示された質量の惑星の光度進化を示す．上のパネルはL'-band（～3.8 μm），下のパネルは*H*-band（～1.6 μm）の波長での光度進化にそれぞれ対応する．また，黒の四角は1.6億年に相当する．仮に上のパネルに着目すると，GJ 504bの質量が2－8 $M_{\rm Jup}$に相当することが図から分かる．本研究ではGJ 504惑星系の年齢推定として，今回用いた手法で最も直接的な手法であるgyrochronologyから推定される年齢（$1.6^{+0.5}_{-0.6}$億年）が最も適切であると結論した．最終的には，全年齢範囲と今回用いた全ての波長の光度からの質量推定を考慮して，GJ 504bの質量を推定した．カラーの図は電子版を参照されたい．[1]の図を一部改訂．

星の有効温度と比較すると，最低温の値である．GJ 504bがそのように低温であることは，惑星大気にメタンの吸収があることからも確認された[9]．もう一つ興味深い特徴として，GJ 504bの近赤外での色が過去直接撮像された惑星と比べると非常に青いことがわかったが，これはGJ 504bの大気中の雲の量が過去直接撮像された惑星と比較すると少ないことを示唆している．最後に，GJ 504bは太陽型の主系列星を公転する系外惑星として最も確実な直接撮像例である．以上の様な特徴をもつ系外惑星はこれまで観測されていなかったが，本研究はそのような特徴を持つ惑星を発見し，それが実際にこの宇宙に形成される可能性があることを初めて観測的に示したということで科学的な意義が高い．GJ 504bは中心星から44 AU離れたところに発見されたが，標準的な惑星形成理論に基づくと，そのような軌道の大きな惑星が“その場”でコア集積過程に従って形成される可能性は低い．従って，その起源としてはガス円盤の重力不安定過程によって直接現在の位置に形成されたか，またはコア集積過程で内側に形成された後，他に形成されたガス惑星との力学的な相互作用の結果，外側に散乱された可能性を検討する必要性がある．現在得られている観測データからはそのどれがGJ 504bの起源としてもっともらしいかを結論するのは困難である．しかし，GJ 504の惑星系を様々な観測手法で，今後さらに観測していくことでそのヒントを得ることができると我々は期待している．例えば，視線速度法や次世代の直接撮像観測装置を用いて，内側の惑星を探査することができれば，散乱が起きた場合必要な相互作用の相手の存在に対して制限を与えることができるかもしれない．また，GJ 504bの多波長測光観測や，分光観測をすることで，大気の組成について制限を与えることもその起源を明らかにするための糸口になるはずである．

4. まとめと今後

SEEDSはGJ 504bを発見するということで，系外惑星の研究を少なからず前に進めることができただろう．また，惑星や星周円盤に対する論文をそれ以外にも多く出版しているが，これらも惑星の研究の発展に大きく貢献するものになるだろう．今後は，GJ 504も含めた重要な天体を追加観測することでさらなる知見が得られるはずである．また，まだ多く残っている未観測のターゲットを観測することで，系外惑星を新たに発見する可能性もある．さらに，今後はSEEDSの全探査結果を統計的に分析し評価した結果を発表する予定である．これらの成果は，我々の惑星に対する理解を深めるだけではなく，“地球型惑星の直接撮像”の様な挑戦的な研究課題を達成するための重要な試金石になるだろう．

謝 辞

本研究は日本学術振興会からの助成金をもとに行いました．感謝致します．この記事の図は[1]に掲載されている図を改訂して作成されたが，AASから転載許可を頂いています．

参考文献

[1] Kuzuhara, M. et al., 2013, ApJ 774, 11.
[2] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature 378, 355.
[3] Marois, C. et al., 2010, Nature 468, 1080.
[4] Lagrange, A.-M. et al., 2010, Science 329, 57.
[5] Mamajek, E. E. and Hillenbrand, L. A., 2008, ApJ 687, 1264.
[6] Baraffe, I. et al., 2003, Astron. Astrophys. 402, 701.
[7] Marley, M. S., 2007, ApJ 655, 541.
[8] Spiegel, D. S. and Burrows, A., 2012, ApJ 745, 174.
[9] Janson, M. 2013, ApJL 778, L4.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その4 ～ C型小惑星をもちかえる～

橘 省吾[1]，はやぶさ2サンプラーチーム

（**要旨**）「はやぶさ2」計画では，地上での汚染や大気圏突入によるサンプリングバイアスのないC型小惑星試料を地質情報とともに複数地点から採取し，地球にもちかえることをめざす．リターンサンプル（<5 mm）の詳細分析と，リモートセンシング機器，小型ランダーで得る天体スケール（km）から表層粒子スケール（cm–mm）での構造・物質・熱といった現在の情報をリンクさせ，対象小惑星（1999 JU_3）そのものの形成と現在までの進化を理解するだけでなく，太陽系の誕生から最初期の物質進化，そして，地球の海や生命の材料となる揮発性元素の最終進化の場としての小惑星の役割を明らかにする．

1. 地球外物質をもちかえる

地球の外に飛び出し，地球外物質をもちかえるサンプルリターンミッションはこれまで惑星科学に大きなブレークスルーをもたらしてきた．アポロ計画ではおよそ400 kgにもなる月岩石試料の回収に成功し（1969－1972），マグマオーシャン仮説，クレーター年代学といった太陽系固体天体の形成，進化の理解への重要な概念，ツールを生み出した．スターダスト計画ではWild2彗星から放出された塵の回収に成功し（2006），彗星塵が小惑星帯からの隕石中の鉱物と同様に，太陽系の平均的同位体組成をもつ粒子であることがわかった．初期太陽系円盤内側領域（数AU）から彗星形成領域（20－30 AU）までの物質移動があったということが示唆されている．ジェネシス計画は太陽風の回収に成功した原子レベルのサンプルリターンである．地球帰還時（2004）に地面に衝突するというアクシデントはあったが，太陽風が地球より軽い酸素（^{16}O）に富み，太陽系最古の物質CAI（難揮発性の鉱物からなる隕石構成要素）の酸素同位体に近いことが明らかとなった．「はやぶさ」計画は日本初のサンプルリターンミッションであり，近地球S型小惑星イトカワに二度着陸し，当初予定していたサンプリング方法ではなかったが，1500粒以上の表面岩石粒子の採取に成功した（2010）．回収試料の分析は，小惑星イトカワがかつては直径20 kmを越える微惑星であり，破壊・再集積の結果として，現在の姿となり，今なおその表面は太陽風照射や隕石衝突といった地質活動が起きていることを明らかにした．

これらにつづくサンプルリターンミッションが「はやぶさ2」である [1].

1. 北海道大学大学院理学研究院
tachi@ep.sci.hokudai.ac.jp

2. 次なるターゲットはC型小惑星

太陽系小天体の一部は天体規模の融解が起きず，集積したままの未分化な状態を保持し，初期太陽系でつくられた物質や太陽系誕生以前に形成された物質が保存されている．これらの天体の破片として地球に落下してきた隕石（コンドライト）の分析によって，太陽系元素存在度や太陽系誕生年代が明らかとなり，初期太陽系での物質進化の年表がつくられている（例えば [2]）．

小天体起源の太陽系始原物質の科学は，(1) 太陽系史をそれ以前の母分子雲や銀河での物質進化史につなげ，(2) 初期太陽系から惑星誕生までの化学進化を追うことをめざすものである（図1）．初期太陽系は分子雲から恒星・固体惑星までの十数桁の密度上昇を伴う構造変化の場であり，この大きな物理的変化は，温度

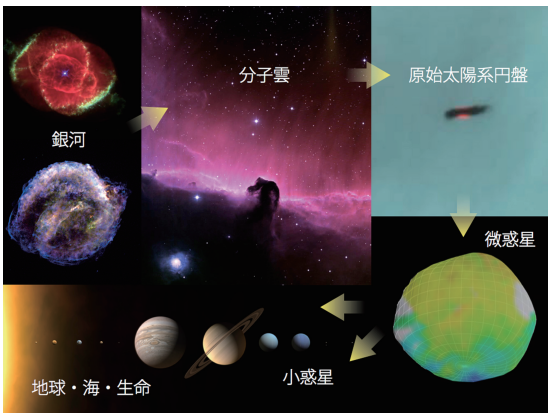

図1：太陽系始源物質に記憶される銀河から地球までの物質進化

や圧力変化を生み出し，物質の化学的変化も引き起こす．この大規模変化を起こす初期太陽系を始点とし，(1)は分子雲，銀河という時間をさかのぼる流れであり，(2)は微惑星，原始惑星，惑星という私たちの地球や生命につながる流れである．近年の始原物質研究の進展のひとつは，スターダスト計画での彗星有機物の発見を含めた地球外有機物研究であるが，地球外有機物に地球外水(氷)を含めたC-H-O-N系物質は(1)，(2)両者の研究を推し進める重要な対象であることもわかってきた．

例として，重水素や^{15}Nに濃集した地球外有機物が発見されており，低温の分子雲や初期太陽系円盤外縁部でつくられた有機物ではないかと考えられている．また，Wild2彗星中有機物は，隕石中有機物に比べ，N/C比やO/C比が高く熱変成が進んでおらず，より始源的情報をもった有機物である可能性が示されている(例えば [3, 4])．これらの有機物は(1)の流れで起こる低温の化学反応を追うことが可能な物質である．

微惑星での液体の水が促進した有機物の化学反応の証拠も見つかっている．始原隕石中有機物を加水分解して得られるアミノ酸のL体過剰が隕石の水質変成の程度と相関している可能性が指摘されている他，粘土鉱物の存在量とL体過剰との関連も報告されている(例えば [5, 6])．同一隕石において，水質変成が進んだ岩片ほど，低温起源と考えられる同位体過剰をもつ有機物の量が少ないという報告もある．これはひとつの小惑星で水の作用が地域的または時間的に異なった可能性を示唆するものである．小惑星は地球に有機物や揮発性成分をもたらした可能性の高い天体であり，そこで起きる有機物の多様化は，地球に有機物がもたらされる前の最終進化であるということができる．すなわち，小天体での有機物多様化を明らかにすることは，初期太陽系円盤→微惑星→地球という時間の流れのなかで惑星や生命の材料物質がどのような変遷を遂げたかという(2)のサイエンスに対応する．特に有機物の変遷を明らかにすることは地球での生命誕生の初期条件を与えることにもなり，宇宙における生命の普遍性や特殊性を考える際のひとつの出発点であるともいえる．

C-H-O-N系物質(特に有機物)は低温の分子雲から原始惑星系円盤の高温期，小惑星での熱過程において，相変化することで様々な固体をつくり，分子雲から小惑星までの長期間にわたる広い温度領域のイベントのトレーサーとなる物質ともいえる．しかし，その性質ゆえに長期間のプロセスが混在し，解読を難しくしている．C-H-O-N系物質からの地球外物質科学をさらに展開していくための努力を世界の研究者はおこなっているが，結晶構造をもち，化学組成がはっきりと決まるため，異なった条件での化学反応の証拠が鉱物種の違いとして残りやすい鉱物とは異なり，有機物は多様な化学組成を持ち，条件の変化が構造，官能基，化学組成，同位体など種々に連続的に変化するため，鉱物学・岩石学の手法の適用が困難という本質的問題もある．C-H-O-N系物質の多様化に重要な役割を果たす水も液体(や気体)として小惑星内を移動し，鉱物や有機物にその痕跡を残しながら，小惑星から失われていくため，さらに解読を困難にする．

この問題の本質的部分を解決するために重要なのは，プロセスが起きた場の情報を得ることである．地球外物質科学において，試料の地質学的情報が欠落していることは古くからの問題であったが，C-H-O-N系物質を基軸とした次世代の地球外物質科学にはプロセスが起きた場の情報は特に重要である．それが可能となるのは，サンプルリターン探査のみである．リモートセンシング観測で小天体スケールでの水や有機物の分布をさぐり，その情報に基づき，回収試料の分析データから小惑星プロセスを解読する．分子雲，円盤でのプロセスの場に立ち戻ることはできないが，小惑星プロセスは探査機によるその場観察で天体スケールでのプロセスの規模や前後関係を調べるという地質学的調査が可能である．

サンプルリターンの優位性はそれだけではない．太陽系の始原水や始原有機物の科学をおこなうにあたって，地球上で発見される始原物質試料の場合，地球上での汚染や揮発成分の損失が起こりうる，水や有機物に関して，完全な始原情報を得ることは難しい．また，水や有機物を多く含む始原物質ほど強度が低く，大気圏突入時に燃え尽きるというバイアスがかかっている可能性がある(実際，宇宙塵には超炭素質物質などが発見されているが，隕石としては存在しない)．また，地球上で発見される試料の場合，そもそもどのような天体のどの部分から来たものであるのか知ることができないという大きな欠点がある．

初期太陽系を結節点に分子雲，銀河へと時間を遡り，また地球や海，生命と進化を辿るのに最適だと考えられる小惑星は，炭素質コンドライトとの関連が示唆され，地球の揮発性元素の供給源であった可能性もあるC型小惑星である．炭素質コンドライトはイトカワのようなS型小惑星を起源とする普通コンドライトとは異なり，小惑星での大規模な熱変成を受けておらず，小惑星以前の太陽系の歴史がよく保存されている．普通コンドライトの場合，熱変成を受けているものが多く，また熱変成の程度をリモートセンシングで判別することは困難であるため，初期太陽系以前の情報をもつ試料のサンプルリターン計画を立てることは難しい．その点で，C型小惑星はより始源的物質を回収できる見込みが高い天体である．また，炭素質コンドライトはメインベルト小惑星の大半を占めるC型小惑星起源と考えられているにも関わらず，地上に落下する隕石のなかでも3%程度しか存在せず，稀少な存在である．これは軌道もしくはサンプリングバイアスのためと考えられるが，地上の隕石コレクションの内，初期太陽系の歴史を概観できる試料は実は少ない．宇宙塵には始源的物質がよりよく保存されている場合が多いが(プレソーラー粒子量や有機物量など)，その小さなサイズのためにどのような天体でどのようなイベントを経験したのかについて理解するのが困難である．

「はやぶさ2」計画では，太陽系の誕生・初期進化，地球の海や生命の材料物質の最終進化を記憶していくことが期待されるC型小惑星からの初めてのサンプルリターンをおこなう．リモートセンシング機器，小型ランダーを用いた天体スケール(km)から表層粒子スケール(cm–mm)での構造・物質・熱といった現在の情報に，採取試料(< 5 mm)の詳細分析をリンクさせ，時空間スケールを大きく拡張した情報を得る．地上での汚染や大気圏突入によるサンプリングバイアスのない真のC型小惑星試料を地質情報とともに採取する初めての機会であり，これまでの隕石分析とは一線を画し，対象小惑星(1999 JU_3)そのものの形成と現在までの進化を理解し，初期太陽系で物質がどのように進化し，地球や海，生命の材料となったのかに関する物質科学的制約を与えることをめざす

3.「はやぶさ2」リターンサンプルが語るのは

「はやぶさ2」計画では，C型小惑星1999 JU_3のリモートセンシング観測，表面リターンサンプルの地上分析から，1)微惑星から小惑星に至るまでの熱変成とそれに伴う物質進化の紐解き，2)衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き，3)小惑星での鉱物・水・有機物相互作用による有機物複雑進化過程の探索，4)原始太陽系円盤内での高温物質から揮発性物質までの物質混合・循環の解明　をめざす．リターンサンプル分析では，これらの4つの目標の下に，銀河・分子雲，初期太陽系円盤，微惑星，メインベルト小惑星，近地球小惑星といった進化ステージごとの物質進化を追うことを目標とする．銀河物質や初期太陽系円盤物質を保存しつつ，かつ，母天体での変成・変質作用，軌道変化による表面変質などさまざまな物質進化過程を経た物質が混在していることが予想される近地球C型小惑星からのリターンサンプルだからこそ，我々に多くの情報を語ってくれるはずである．

リターンサンプルは我々の予想もしないことを語り始めるかもしれない．それはもちろん大歓迎であるが，まずは以下に挙げるような項目について，話をじっくりと聴きたいと考える(表1)．

3.1 銀河，分子雲の化学進化 — 太陽系の化学的初期条件

(1)太陽系始源物質にはプレソーラー粒子とよばれる太陽系形成以前に進化末期の恒星周囲で形成された微粒子が一部含まれる．プレソーラー粒子は，太陽系の平均的同位体組成とは極端に異なる同位体組成をもつことが特徴である．これまでの地球外物質の分析研究により，始原隕石に比べ，宇宙塵により多くのプレ

表1：「はやぶさ2」リターンサンプルでめざす科学

45.68億年前		~45.64億年前		10^7-10^6年前 現在
銀河・分子雲	**円盤**	**微惑星 (母天体)**	**メインベルト小惑星**	**近地球型小惑星**
恒星内元素合成 **星周ダスト形成** **銀河化学進化(年代)** プレソーラー粒子 **分子雲有機物進化** 分子雲有機物 D, ^{15}N 濃集, 構造	**円盤高温過程・年代** CAI, コンドリュール, メタル, O同位体 **母天体形成範囲・過程** **円盤内物質循環** バルク組成, O同位体, 金属元素同位体, 組織 **円盤有機物進化** 構造・組成・同位体	**水質変成・年代・条件** 含水鉱物, 組織, Mn-Cr 年代, O同位体, 組成 **熱変成・年代・条件** 共存鉱物, 組織, 温度, Al-Mg, Pb-Pb年代 **有機物多様化** バルク組成, 官能基存在度, アミノ酸 Lee, CHON 同位体	**衝撃変成** 溶融脈, 高圧鉱物, K-Ar 年代 **ラブルパイル形成年代** GCR生成核種 **小惑星内部構造** 試料バルク密度	**宇宙風化・年代** 宇宙風化層, 粒子表面, SW希ガス **小惑星表面地質活動** 複数表面の宇宙風化度, 粒子形状 **表面熱変成** 変成度+SCR, GCR年代 **軌道進化年代** SCR生成核種 (^{10}Be, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{41}Ca,^{53}Mn, ^{81}Kr..) 相対存在度
母天体サイズ・母天体プロセス・年代 **円盤内物質進化 (移動，微惑星形成)・年代** 上記項目に関する回収試料内／採取地点内のバリエーション				
物質進化過程の普遍性・特殊性 OSIRIS-REx, MarcoPolo-R 回収試料・リモセン観測との比較，隕石・IDPとの比較				

ソーラー粒子が含まれていることが知られている．強度の小さい炭素質コンドライトは地球落下時の破壊によって，地上での回収にバイアスがある可能性を考えると，1999 JU_3からの回収試料にプレソーラー粒子が宇宙塵レベルの存在度で含まれる可能性はある．この場合，プレソーラー粒子の量や質でこれまでの地球外試料を凌駕する可能性がある．2020年代にはプレソーラー粒子から年代情報を引き出す分析技術が確立されていることも期待されることもあり [7]，1999 JU_3回収試料においてもプレソーラー粒子研究を初期分析のターゲットとし，恒星内元素合成，銀河化学進化，星間空間物質進化など，銀河の化学進化ならびに太陽系の化学的初期条件の解明に向けた貢献をめざす．

(2)分子雲や初期太陽系円盤外縁部に起源をもつと考えられる重水素や^{15}Nに富んだ有機物に関しても同様の期待があり，超炭素質宇宙塵同様な有機物に富んだ試料が回収された場合には，低温起源有機物含有量も高い可能性がある．太陽系最初期の低温環境の物理化学条件を解明するための試料が手に入ることが期待される．

3.2 初期太陽系円盤物質進化

(1)始原隕石コンドライトにはバルク化学組成，鉄の酸化還元状態，酸素同位体化学的多様性があり，化学的に分類されている．一部の隕石には化学グループの異なる岩片が入っていることが知られているが，小惑星規模で化学的多様性があるかどうかはわかっていない．複数地点からの回収試料のバルク元素組成，同位体組成を調べることで，小惑星の化学的バリエーションの有無が明らかになる．スターダストサンプルリターン計画で指摘された初期太陽系円盤での物質混合と合わせて，初期太陽系で化学的多様性をもつ惑星材料物質がどのように集積したのかを考える上での重要な知見となる．

(2)始原的コンドライトの特徴的構成物質は，初期太陽系円盤で高温を経験した物質(CAI，コンドリュール)である．回収試料中の高温物質の分析より，それらの形成条件を推定する他，Pb-Pb，Al-Mgなどの同位体系を用いた年代測定法によって，年代を決定する．回収試料が熱変成度の低い場合には高温物質に記憶される年代は，母天体形成以前にそれらが形成された年代であるため，1999 JU_3の形成年代の制約となる．

(3)現在までの惑星物質科学では未解明であるが，初期太陽系円盤での有機物進化過程を読み解くことも目標となる．原始惑星系円盤赤外分光観測によって，温度の高い(～650 K) C_2H_2など有機物の高温分解生成物と考えられる分子が見つかっている．円盤条件での有機物の構造変化，組成変化，同位体変化を読み解き，バルク組成や高温物質とは異なる物理化学条件での円盤進化を明らかにする．

3.3 微惑星での熱変成，水質変成，鉱物–水–有機物相互作用による有機物の多様化

(1)形成直後の微惑星においては，短寿命放射性核

種の壊変熱などによって天体の加熱が起こる．温度が上がり(> 800 K程度)，水が抜けてしまう場合，もしくは元々微惑星に水がほとんど存在しない場合には，熱の影響が鉱物組成や種の変化(熱変成)として記憶され，温度が上がらず(< 500 K程度)，水が系に存在する場合には，水が促進する化学反応が起こり，水の痕跡が含水鉱物として残る(水質変成)．回収試料の岩石学的，鉱物学的観察により，熱変成，水質変成の程度を調べる．Pb-Pb, Al-Mg, Mn-Cr年代測定によって，変成プロセスが起きた年代も明らかにする．

(2)これまでに知られている炭素質コンドライトの水質変成年代はCAI形成から400万年程度である [8]. 1999 JU_3からの回収試料にも水質変成の証拠があり，CAI形成から100万年以上後の年代が出た場合，1999 JU_3にはイトカワ同様により大きな母小惑星が存在し，内部で水質変成を受けた後に破壊，再集積を経験したということが示唆される．水質変成を受けたCMコンドライトには角礫岩化したものが多いこともこのシナリオと調和的である．母小惑星が存在した場合には，表面複数地点のサンプリングによって，母小惑星の異なる深さでの水質変成を受けた試料の回収が期待でき，母小惑星の構造・熱史の復元も可能になる．このような復元は隕石試料の分析からは不可能である．

(3)有機物が見つかった場合には，バルク組成や官能基の存在度と水質変成や熱変成の程度との相関を調べる．生命材料進化の最終進化の場として注目する分析対象のひとつは，不溶性有機物(隕石中有機物の70%以上を占める)を加水分解して得られるアミノ酸の左手過剰の程度および含水鉱物存在度・水質変成程度との相関である．

(4)プレソーラー粒子，低温起源有機物は初期太陽系最初期高温イベントや母天体熱変成プロセス，水質変成を生き残った物質であるため，それらの残存率はリモートセンシングデータや回収試料の分析結果とあわせることで，初期太陽系，微惑星で起きた熱や水が関わるイベントの程度を測る指標となる．

3.4 メインベルト小惑星としての歴史

(1)微惑星形成後, 数千万年の後には熱源もなくなり，微惑星はその後，45億年あまり メインベルト小惑星として過ごし，この間に起こる主たる地質学プロセスは衝突である [9]. 衝突による衝撃変成は結晶構造のひずみや溶融脈や高圧鉱物の存在として確認されるため，岩石学的，鉱物学的観察で判断可能である．溶融脈がある場合には，脈のK-Ar年代測定などで衝突年代の決定もおこなう．また，不溶性有機物のC-XANES(エックス線吸収端近傍構造)スペクトルから有機物中の結合情報が得られるが，衝撃変成でスペクトルが変化する可能性も指摘されており，有機物からも衝突に関する情報を抽出する．これらの情報は探査機によるクレーター解析などと統合され，メインベルト小惑星としての衝突史を明らかにする．

(2)回収試料が巨大岩盤起源である場合，表面滞在期間が充分に長いことが予想され，ラブルパイル天体形成以降，銀河宇宙線が継続して照射されている可能性が高い．試料中の銀河宇宙線生成核種(^{3}He, ^{21}Neなど)量から銀河宇宙線照射年代を求めることで，ラブルパイル形成年代への制約(下限値)を与えることができる．

(3)ラブルパイル天体であるかどうかの判定には小惑星内部の空隙率も判断基準となる．天体質量および体積から空隙率を求めるために回収試料のバルク密度を求める．

3.5 近地球小惑星表面での物質進化 ― 小惑星地質学・太陽系天体力学

(1)イトカワサンプルの分析で，小惑星は現在においても表面は地質活動が続いていることが新たに発見された [10, 11]. 1999 JU_3回収試料に対しても，宇宙風化プロセス(鉱物表面風化層)や宇宙風化年代(太陽風希ガス)を決定し，また，岩盤以外の地点からの採取試料中の銀河宇宙線生成核種量からも粒子の表面滞在期間を求め，C型小惑星での宇宙風化プロセスを初めて明らかにする． 粒子表面構造や粒子形状を含め，宇宙環境と小惑星表面との相互作用を明らかにする．

(2)1999 JU_3表面から数cm深さまでの試料は(表面滞在時間にもよるが)太陽光照射による熱変成を被っている可能性がある．回収試料の熱変成度(含水鉱物の真空中加熱による脱水など)，宇宙風化度，太陽風・銀河宇宙線照射年代，試料回収地点(赤道／極(自転軸との関係)，レゴリス／岩盤)などから近地球小惑星としての熱変成を総合的に評価する．

(3)近地球小惑星は力学的には1000万年程度の寿命と考えられている．回収試料から近地球小惑星への軌

道進化がいつ起こったかについての制約を試みる．太陽宇宙線(Solar Cosmic Ray: SCR)フラックスはメインベルトと地球近傍軌道では異なる．SCR生成短寿命核種はその寿命と生成率とのバランスで定常状態に達するが，SCRフラックスが変化した際に定常状態まで到達する時間は核種ごとに異なる．SCR生成短寿命核種(^{10}Be, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{41}Ca, ^{53}Mn, ^{81}Krなど)の相対存在度を求め，定常状態への移行状態を調べ，軌道進化が起きた時期を推定する(ただし，試料深さなどの仮定も必要となるため，厳密に求めることは難しい)．

4. 天体表面複数地点から試料をもちかえる「はやぶさ2」

「はやぶさ2」ではターゲット小惑星 1999 JU_3の表面複数地点から，異なる環境で進化した(元天体の異なる深さで進化した可能性)試料の採取をおこなう．前節に述べた銀河・分子雲，円盤，微惑星，メインベルト小惑星，近地球小惑星の各段階を記憶する試料という観点からは，

A)銀河・分子雲，円盤：熱変成・水質変成を受けていないサンプル

B)微惑星：熱変成・水質変成の進んだサンプル

C)小惑星，近地球小惑星：天体表層サンプル

がおおまかには望ましい．それぞれをサンプリングできるのが理想である．熱変成を受けていないかどうかの判断は容易ではないが(鉱物組成の非平衡性を調べる必要あり)，水質変成の証拠は分光で判断可能．水質変成は低温で起こるため，熱変成による高温を経験していないという点で，含水鉱物存在地点から A)，B)を記憶する試料が採取される可能性が高い．また，表層サンプリングをおこなうことにより，C)の記録(特に近地球小惑星表面での宇宙風化)は残されている．したがって，含水鉱物の特徴(0.7 μm，3 μm吸収[12])が確認できるレゴリス状表面が採取地点のひとつの候補である．他の候補としては，水質変成の証拠がみえないか弱い地点である．これらの領域は熱変成を受けている可能性があるが，不溶性有機物含有量(IOM)が多い(0.55 μm吸収)地点などからは CRコンドライト的試料が得られる可能性もある．表面に物質の多様性が認められない場合，岩盤からのサンプリングが候補となる．この場合，小惑星表面の宇宙線照射年代からラブルパイル形成年代の制約が可能となる．また，三回を予定する試料採取の三回目の候補は，衝突装置(SCI)[13] で掘削する地下試料であり，表面プロセスの影響が最小限の試料が得られることが期待される．

回収試料の最低必要量は，局所分析技術や微小量試料分析技術の進展により(2020年までにはさらなる進展も望める上に，それを見越した技術開発も分析研究者はおこなっている(例えば [7, 11, 14, 15]))，微小試料からでも情報を引き出すことは可能になっているが，天体の典型的特徴・平均的特徴が含まれるために，重量として100 mg程度の試料をすることが望まれる(サイズは数mm程度の試料まで得られることが望ましい)．複数地点で，これだけの量のサンプル採取を実現するために，「はやぶさ2」サンプラーでは弾丸発射型の「はやぶさ」サンプラーを踏襲しつつ，いくつかの改良を加える(図2)．(1)天体表面3箇所でのサン

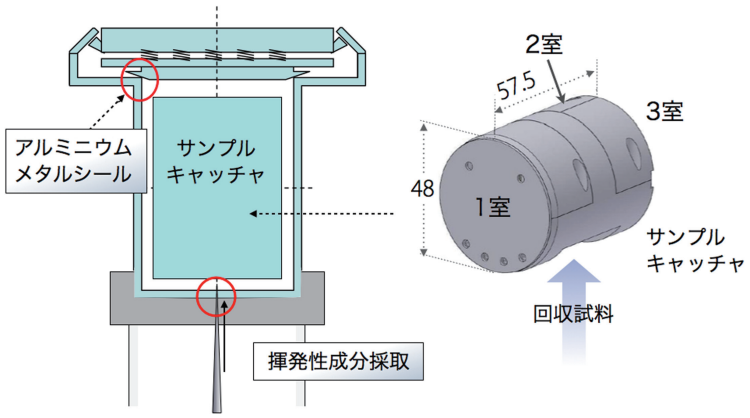

図2：「はやぶさ2」サンプルコンテナ(左)，サンプルキャッチャ (右)の模式図

プル採取をおこない(最大約5 mm)，それらを個別に格納する，(2)バックアップ手段として，サンプラーホーン先端部に爪を付け，表面粒子を持ち上げ，サンプリングする，(3)サンプルコンテナを密封する(地球大気下，1週間で1 Pa以下の大気混入)，(4)サンプルコンテナ開封前に揮発性成分を回収する，(5)サンプルを格納したサンプルキャッチャの開封時の作業性を高める，(6)地上物質の汚染を最小限化するための事前洗浄とともに汚染可能性のある物質を事前にモニターする　ことを実現する．なお，回収試料の分析のための最低必要量は0.1 gであるが，サンプルキャッチャには10 g以上の試料を格納することは可能であり，また，地上試験などで一回の着陸ごとにgオーダーでの回収を可能とする条件の探索もおこなっており，より多量の試料回収もめざす．

このようなサンプラーの特性に応じ，また試料ハンドリングに必要な技術，分析手法を考慮し，キュレーション，初期分析で取り扱う試料は，採取地点ごとの特徴を残す粗粒粒子(0.1 mm以上)，コンテナ内の試料格納室間で混合の可能性のある細粒粒子(0.1 mm以下)，揮発性物質 の3つに区分するのが望ましいと考える．細粒粒子は試料格納室間の隙間などから混合の可能性があるが，天体表層の平均的情報を得，また宇宙風化の記憶を残す試料として重要な意味をもつ．

キュレーション活動においては，細粒粒子については，「はやぶさ」回収試料のキュレーションで得た知見 [16] がおおいに役立つことになるが，「はやぶさ2」で回収が期待されるgオーダーの試料の重量の大半はmmサイズの有機物を含む可能性のある岩石試料であるため，それらのカタログ化のための作業項目や汚染管理，将来に向けての保管などについて，入念な準備が必要となる．

また，リターンサンプルの一部について，一定期間，元素・同位体分析(非破壊分析を含む)，鉱物・組織観察(非破壊分析を含む)，ガス分析，有機物分析などを実施し，ミッションの科学目標の達成をめざす．その際，小惑星のリモートセンシングから得られる天体全体および試料回収地域の地質情報と比較・検討し，天体の歴史を紐解き，初期太陽系の物質進化を描く視点が重要となると考えている．

5. 太陽系大航海時代の船「はやぶさ2」

21世紀に入り，スターダスト，ジェネシス，はやぶさと相次いだサンプルリターン．2020年代は太陽系大航海時代がさらに本格化することが期待される．「はやぶさ2」に続き，2010年代半ばに打ち上げ，近地球B型小惑星Bennuからの試料回収をめざすのがNASAのOSIRIS-REx計画である [17]．また，近地球C型小惑星2008 EV_5からのサンプルリターンをめざすMarcoPolo-RがESA Cosmic Vision 2015–2025の中型ミッションの最終候補となっている [18]．いずれのミッションもC型もしくはそれに類似した小惑星からのサンプルリターンをめざし，その根底となるサイエンスは「はやぶさ2」との共通点が多いが，OSIRIS-REx，MarcoPolo-Rともに「はやぶさ2」とは異なるサンプリング戦略を採択し，天体表面の一箇所から「はやぶさ2」より多量のサンプルを持ち帰る計画である．「はやぶさ2」は試料量ではそれらのミッションに敵わないが，「はやぶさ」のサンプリング技術を確実なものとし，かつ「はやぶさ」の実績を踏襲し，天体表層の複数地点でのサンプリングをおこない，新たな工夫を用いて，揮発性物質の損失や汚染のないよう密封し，サンプルリターンを持ち帰る．複数地点での試料回収，コンテナの密封という点は独自のもので，他のミッションと相補的である．それぞれのリターンサンプルのもつ意味をはっきりと位置づけ，国際協力体制をつくり，試料分析をおこなうことで，C型小惑星の多様性，普遍性を明らかにしていく．

本格化する太陽系大航海時代の幕開けを担う船「はやぶさ2」[19] がもちかえるC型小惑星を楽しみにしておいていただきたい．

(つづく)

謝 辞

渡邊誠一郎プロジェクトサイエンティストには原稿を確認いただき，有意義なコメントをいただきました．本稿はサンプラー理学PI，初期分析PIとしての立場だけでなく，太陽系の進化に興味をもつ惑星物質研究者としての私見も加えて書かせていただきましたが，「はやぶさ2」サンプラーの開発や分析項目の何年にも

渡る検討のなかで，チームのメンバーはもちろんのこと，実に多くの方々の協力や激励をいただいています．ありがとうございます．

参考文献

[1] 渡邊誠一郎，はやぶさ2プロジェクトチーム，2013，遊・星・人 22(1)，23.
[2] 松田准一，圦本尚義編，2008，宇宙・惑星化学 (地球化学講座 2) (培風館).
[3] 藪田ひかる，スターダスト1次分析有機物チーム，2007，遊・星・人 16(4)，299.
[4] 癸生川陽子，2013，遊・星・人 22(1)，14.
[5] 高野淑識，大河内直彦，2010，遊・星・人 19(4)，254.
[6] 藪田ひかる，2010，遊・星・人 19(1)，28.
[7] 江端新吾，2010，遊・星・人 19(4)，295.
[8] 藤谷渉ほか，2012，遊・星・人 21(4)，350.
[9] 木村眞，2011，遊・星・人 20(2)，132.
[10] 野口高明ほか，2013，遊・星・人 22(2)，78.
[11] 馬上謙一ほか，2013，遊・星・人 22(2)，86.
[12] 廣井孝弘，杉田精司，2010，遊・星・人 19(1)，36.
[13] 荒川政彦ほか，2013，遊・星・人 22(3)，152.
[14] 牛久保孝行，2010，遊・星・人 19(4)，287.
[15] 奈良岡浩，2013，遊・星・人 22(2)，94.
[16] 矢田達ほか，2013，遊・星・人 22(2)，68.
[17] http://osiris-rex.lpl.arizona.edu/
[18] https://www.oca.eu/MarcoPolo-R/
[19] 國中均，2013，遊・星・人 22(2)，109.

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その21 ～あかつき（PLANET-C）の広報活動～

大月 祥子[1]，あかつきプロジェクトチーム

（**要旨**）「あかつき（PLANET-C）」プロジェクトでは，理学系研究者が中心となって積極的に広報活動を行なっている．プロジェクト立ち上げの頃から現在に至るまでの10年以上にわたり，ミッションの歩みと時代の変化に合わせたさまざまな形の活動に取り組んできた．

1. はじめに

「あかつき（PLANET-C）」プロジェクトチームでは，金星探査計画への広い理解を得るため，プロジェクト立ち上げ当初より広報活動に積極的に取り組んできた．2010年の打上げが近づくと，他のミッションとの連携が活発化し，発信の手段も多様化した．10年を超えるプロジェクトの広報活動において打上げ前後の特筆すべき変化として，一般の方からの応援を直接受けるようになったことがある．プロジェクト側からの情報発信にだけに留まらぬ，応援を起点とした「交流」が生じている．本稿では，「あかつき」に関わる広報の中でも特にプロジェクトが中心となって進めてきた活動について報告する．

2. 初期からの取り組み

プロジェクトでは初期の頃より社会教育関係者をメンバーに受け入れ，長年にわたり広報・教育アウトリーチ活動に取り組んできた．

現在の最新情報の発信はtwitterに移行しているが，2003年に開設したプロジェクトサイトは今年度で10周年を迎えた．プロジェクトメンバーによる解説記事や，総合試験の様子など日々のミッションの歩みをレポートした「Planet-Cニュース」などを掲載している．また，「JAXA」名義や「宇宙科学研究所」名義ではなく「金星探査機 あかつき」という一つのプロジェクトとして，学会・各種イベントへ展示ブースを出してきた．このようなイベントへの出展や，『遊星人』をはじめとする学会誌などでの特集記事を通じ，一般からアマチュア天文家・理科教員，研究者等へ幅広くアピールしてきた．

科学館・プラネタリウムとの連携として，講演会・観望会への積極的に講師を派遣し，赤外線カメラを用いた演示実験等も実施している．2008年以降は日本プラネタリウム協議会実行委員との意見交換も行い，社会教育関係者対象としたPLANET-Cの開発状況や金星の科学についての見学会・勉強会も2度開催した．このような繋がりがもととなり，2010年に『日本天文協議会「あかつき」と「金星」キャンペーン・ワーキンググループ』が発足した．日本公開天文台協会・国立天文台・JAXAなどに所属するワーキンググループメンバーによって多くの社会教育施設に呼びかけが行われ，2010年12月上旬には「金星キャンペーン　あかつきの金星を見よう！」（キャンペーンサイト：http://akatsukikun.net/）が企画・実施された．周知の通り12月7日の軌道投入運用は失敗したが，全国各地15ヶ所の科学館・プラネタリウム等で講演会や金星観望会が開催され，「あかつき」をきっかけにたくさんの方に金星に親しんでもらえたことは光栄なことである．また，「あかつき」に関するプラネタリウム番組（相模原市立博物館・2010年度製作「相模原から金星へ　～

1. 専修大学
oh@isc.senshu-u.ac.jp

金星探査機あかつきの挑戦～」，五藤光学研究所・2010年度製作「灼熱のビーナス－あかつき 金星へ－」，山梨県立科学館・2003年度製作『ヴィーナスの素顔－灼熱の星「金星」から生命の星「地球」を見る』）も製作された．

3. 打上げに向けての広報

打上げが近づくと，PLANET-Cの広報は新たな局面を迎えた．2009年11月末には機体公開があり新聞やテレビなど多くのメディアに取り上げられたが，その時，既にPLANET-Cではなく「あかつき」として報道されていたことはご記憶にあるだろうか．

宇宙研の人工衛星・探査機は伝統的に無事に打ち上がってから命名されてきた．そんな中でPLANET-Cは打上げの半年以上前の2009年10月23日に名称が発表されている．これは打上げに向けての怒涛の広報の前に名称を公開することで，打上げとその後の運用を通じて一貫して「あかつき」という名前で親しんでもらいたいとう意図があった．例えば，これはもう一つの打上げ前の重要な広報である「メッセージキャンペーン」にも影響する．「PLANET-Cにメッセージを載せた」と応募者の記憶に残っていても，打ち上げ後の報道では全て「あかつき」の呼称になるため，（こちらとしては寂しいことだが）自分がメッセージを載せた探査機だと気づかないかもしれない．更に，「あかつき」にはもうひとつの名前がある．PLANET-Cが正式なプロジェクトとして始まる前，ワーキンググループを立ち上げた頃からの衛星名として Venus Climate Orbiter（略称：VCO）がある．金星気象衛星という探査機としての本質を表すこの名前は，惑星大気のコミュニティに広く認知され，特に海外の研究者にはPLANET-CよりもVCOの方が長く親しまれてきた．これまでも2つの名前を持ってきた経験上，認知をされる名前は一貫している方が良いという考えから，事前の名称公開を決断した．

「あかつき」という名前そのものを決めることについても，プロジェクト内で決める案と公募することで1つの広報キャンペーンとして活用する案があった．何度も議論されたが，最終的に「探査機とその目的について最もよく知っている自分たちで，最も相応しいと思える名前をつけよう」という方針となった．理学系メンバーだけでなく，工学系メンバー，メーカーの方々も含め広く名称案を出し合い，数十の候補の中から相談によって「あかつき」という名前を決定した．「みょうじょう」「はやて」「ひばり」「めがみ（女神）」「ふうが（風雅）」などさまざまな候補があった中，誰にも反対されず受け入れられた名前が「あかつき」だったと記憶している．

既に少し触れたが，この時期のもう一つの大きな広報活動は「メッセージキャンペーン」であった．応募者の名前を探査機に載せるこの種のキャンペーンは，1998年に打ち上がった火星探査機「のぞみ」の際に始まった．「あなたの名前を火星へ！」キャンペーンは新聞の小さな広告記事で募集され，ハガキでの応募に限られていたにもかかわらず2ヶ月で27万人の署名が集まったという．2003年打上げの「はやぶさ」の「星の王子さまに会いに行きませんか」ミリオンキャンペーンでは国内外から88万人の名前が，2007年打上げの「かぐや」の『セレーネ「月に願いを！」』キャンペーンでは41万人の名前とメッセージが集まり，探査機に搭載された．

「あかつき」のメッセージキャンペーンでは「お届けします！あなたのメッセージ，暁の金星へ」と題し，メッセージと名前を募集した．世界天文年2009日本委員会の協力の下，インターネットからの個人応募の他，数十人以上の団体を対象に「寄せ書き」の応募を受け付けた．ネット経由の応募はそのままテキスト形式でアルミプレートに印刷されたが，学校や企業，自治体，科学館，イベントなどで作成された「寄せ書き」形式の団体応募については肉筆・イラストをそのまま縮小コピーしたものを印刷した．寄せ書きの協力館は，北は北海道，南は鹿児島まで全国各地の19館に及んだ．また，インターネット上の有志たちの呼びかけにより集まった1万4000人の「初音ミク」ファンの方々からのメッセージも団体枠として，イラストとともに3枚のプレートにデザインされている．キャンペーンは2009年10月23日～2010年1月10日にわたって展開され，最終的には26万人もの応募があった．時にこの数字は，他の探査機のものと比べられることもある．しかし，実際に目を通していると，その数十万ものメッセージや名前が自分たちの探査機に寄せられたのだという事実に感動するばかりだ．26万人の思いを印刷した約90枚のアルミプレート（図1）は，金星を目指

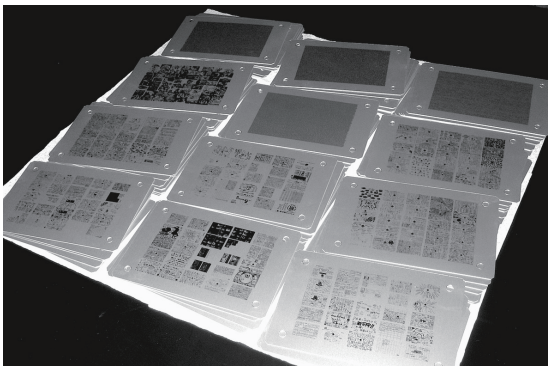

図1：応募いただいたメッセージと名前が印刷されたアルミプレート．

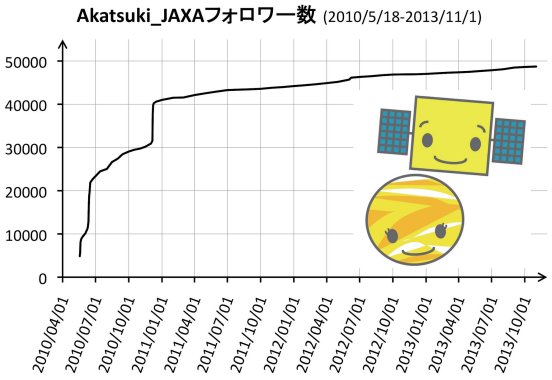

図2：「あかつき」チームtwitter (Akatsuki_JAXA) のフォロワー数の推移．2010/5/21 打上げ，2010/6/13「はやぶさ」地球帰還，2010/12/7 金星軌道投入運用の前後で1万人程度ずつ増加した．2011年以降は緩やかな変化になったが，2012/6/6 金星日面通過に関連するツイートを行なった時期には数日で約500人の増加が見られた．グラフ中のイラストは「あかつきくん」（右上）と「きんせいちゃん」（左下）．

して旅を続ける「あかつき」にとって心強い同行者になっている．

4. 他のプロジェクトとの連携

「あかつき」と「イカロス」がH-IIAロケット17号機で打上げられた2010年は，「はやぶさ」の帰還，「みちびき」の打上げ，そして「あかつき」の金星軌道投入運用と，大きな出来事が続いた．2010年4月当初，既に「はやぶさ」「イカロス」「みちびき」の各チームは，twitterという利用者間でコミュニケーションが可能なミニブログを用いて，新たな層への広報活動を開始していた．2010年5月，「あかつき」チームも遅ればせながらtwitterでの情報発信を始め，他プロジェクトとの連携が活発化した．この流れがこれまではあまり宇宙に興味をもつことがなかった大人たちに「手を伸ばす（outreach）」きっかけになり，「あかつき」の広報活動にとって大きな変化点になった．

4つのプロジェクトに共通している点は，探査機が顔を持つ可愛らしいイラストがあることである．PLANET-Cプロジェクトには2008年冬からマスコットキャラクターとして「プラCくん（現・あかつきくん）」と「きんせいちゃん」がいたが，「はやぶさ君」「イカロス君」「みちびきさん」との相乗効果によってtwitter上での関心を得，フォロワー数も数万人に達した（図2）．即時に多数に伝えることができる特性を活かしてタイムリーな情報を発信したり，twitter上の交流を通じて，140文字という制限の中でミッションについて簡単な説明しあったりすることで，探査機からの情報が日常生活の一部として目に入る状況が生まれた．結果として探査機に愛着を感じ，日常的に応援の声をかけてくれる新たなファン層に繋がった．ファンの方々からのリクエストと「はやぶさ」「イカロス」チームからの声掛けもあり，2010年のJAXA相模原キャンパス特別公開に合わせ，あかつきくん・きんせいちゃんをモチーフとしたグッズ（ストラップ，缶バッジ，マグカップなど）も製作・販売された．また，2011年1月～3月には「はやぶさ君」「イカロス君」「みちびきさん」「あかつきくん」がそれぞれのミッションについてお話しする「JAXA ぼくらの宇宙大冒険」というラジオ番組が放送された．この番組は現在でも，JAXAのPodcast配信用コンテンツとして公開されている．

5. 応援と交流

以前より，講演会やメッセージキャンペーンなど目に見える応援を受け，交流を持つ機会はたびたびあったが，特に打上げの直前の頃から「形」として残る応援が急増した．打上げ時には特設サイトやtwitterに2000件を超える応援メッセージが寄せられた他，その後の日々の運用時にも（現在に至るまで継続して）運用室宛に手紙やイラスト，手作りの品などが届いている（図3）．

さまざまな形の温かな応援に感謝し，2010年12月7

図3：「あかつき」プロジェクト宛に届いた手紙やプレゼントなどの一部.

日には「金星観望会」と「軌道投入運用パブリック・ビューイング」を企画した．金星観望会は午前5時30分～7時という早朝の開催予定だったが，残念ながら前日夕方の段階で天候不良が予想されたために中止の告知が出された．にも関わらず，出勤・登校前の方々約100人が相模原キャンパスに集まってくださった．6時過ぎに雲の切れ間から金星が覗いた時は歓声が上がった(らしい)．管制室の様子を中継したパブリック・ビューイングは，結果的に状況確認が必要となった段階で打ち切りとなったが，実施にあたってプロジェクト内外の多くの人たちに尽力いただいた．広報活動としてはさまざまなケースへの対応について考慮不足であったため，再投入運用の際に同様の企画は難しいかもしれないが，朝の観望会に引き続き，平日の午前中にもかかわらずたくさんの方々が見守ってくださったことは事実として書き残しておきたい．また，当日のtwitterでは，タイムラインを遡れなくなるほど多数のメッセージが寄せられ，その大半は温かな応援の言葉であった．その後，JAXA-iクロージングイベントの一環として企画された「千のあかつき」キャンペーンでは，インターネットを通じて参加者の輪が広がり，海外を含む各地から4000を超える「あかつき」および「あかつきくん」のペーパークラフトを贈っていただいた．

このように，打上げ以降はこれまでのプロジェクトからの情報発信に加え，それに対する一般の方々からの主体的な反応が私たちのもとに届くようになった．一方からの発信だけではない「交流」とも呼べるようなやりとりが生じた．

6. あかつきトークライブ

今の「あかつき」は太陽を周回しながら再会合に向けて飛行を続けている．2011年秋に酸化剤投棄や姿勢制御スラスタを使った軌道調整も終え，プレスリリースになるようなニュースはない状態である．そこで現在の広報活動として，プロジェクトの動きが激しい時には手が回らず実現できなかった企画を実施している．

「あかつきトークライブ」は2012年8月に相模原市立博物館の協力を得て始まった．2ヶ月に一回のペースで2012年度内に4回開催したところ，幸いにも好評を博し，2013年度も継続開催することができている．前年度と同様に偶数月の開催で，2013年度末には計10回に達する．もちろん今までも「あかつき」に関する講演会は多くあったが，ほとんどは「あかつき」全体の特徴や科学目的を紹介するものである．それに対し，このトークライブでは「あかつき」関係者を毎回一人講師として，その講師が自分の専門について掘り下げて話すという点を特徴としている．例えばこれまでのテーマとしては，工学系メンバーであれば「探査機の電源」「探査機の軌道」「探査機の通信」「探査機と熱」など，理学系メンバーであれば「惑星の気象」「赤外線で温度を測る」「金星の天気と季節」などがある．「あかつき」は理学ミッションであるため，講演会等に出るのは理学系メンバーが中心だが，「あかつきトークライブ」では工学系メンバーの話も聞けることが”売り”となっている．さらに，講演の後に，講演内容に関連する実習時間(1時間程度)を設けており，この「大人も参加できる実習」がもう一つの売りである．実習内容は，「金星雲画像のパラパラ漫画作り」「赤外線カメラの演示実験」「パラボラの作図」など，なに

かしら体験をしてもらえるものを毎回用意している．参加者は小学生から80代までの幅広い年齢層が50～100人程度で，すべての参加者に同じように分かってもらうことは難しいが，それぞれに楽しんだり新しいことを学んだりしつつ，「あかつき」に親しんでもらえることを願っている．

7. おわりに

「あかつき」の広報活動を通して学んだことの一つに，科学館やプラネタリウムなどのような社会教育施設を通じての教育・広報活動の強さがある．ネットを通じた情報発信ももちろん重要であるが，社会教育施設のイベントでは，科学全般が好きな人たち，小さな子どもたちやシニア世代などネットからの情報が届きにくい層に親しんでもらえたと感じる．また，文字や写真では「見る」で終わってしまうことも，その場での話や実験なら「体験」になることを実感した．一方で，開催地や開催日時による物理的制限が大きく，一回のイベントに参加してもらえる人数は数十人程度となる．大きな会場での講演でも数百人が限度だろう．どんな場所からでも本人の興味さえあれば平等に情報に到達できる点はネットの良さであると再認識した．

もう一つ，研究者の立場で情報発信することの大切さも改めて学んだ．この記事の中で触れている「あかつき（PLANET-C）」の広報活動は，打上げの時期を挟んでいることもあり，プロジェクトの力だけでなくJAXA広報，宇宙研広報，各地の科学館・プラネタリウム，科学グッズ制作会社などをはじめとして，たくさんの人たちの厚意・協力があってこそ成り立っている．「餅は餅屋」という言葉がある通りで，広報・教育に関する戦略や技術・伝える話力など，その道のプロの力はやはり素晴らしい．プロの力を知り，他のプロジェクトの広報や教育アウトリーチ活動を知り，至らぬ点がたくさん見えてくると，全てを任せる方が良いものになるのではないかとも思えた．しかし，多くの場を経験するうちに，プロジェクトの進行の様子や金星の科学の面白さは，研究者の立場で参加しているからこそ実感を持って発信できるのだということもわかってきた．表現や見せ方は協力者にサポートしてもらえば良いが，「面白い」「楽しい」を伝えることは本当にそう思っている人の役割であると思う．情報発信の手段が多様化しているためすべてにおいて万全にとはいかないが，プロジェクトの状況（広報に割ける時間・マンパワー，予算など）に合わせて，今後も「金星探査機あかつき」プロジェクトチームとして研究者の立場からの発信を続けていきたい．

謝 辞

あかつきの広報活動はプロジェクト関係者だけの力ではなく，プロジェクト外の多くの人たちの協力を得て進めてくることができました．プロジェクト立ち上げの頃から現在に至るまで，さまざまな形で協力してくださった全ての方々に感謝申し上げます．また，2010年12月7日早朝の金星観望会やあかつきトークライブのような形のイベントを提案し，実現に導き，開催の度にボランティアとして力を貸してくれる「星空公団（http://www.kodan.jp/）」小野間史樹氏およびメンバーの皆さんには特にお礼申し上げます．

←目次へ

研究会開催報告「衛星系研究会：衛星観測から探る衛星形成環境」

谷川 享行[1]，奥住 聡[2]，木村 淳[3]，倉本 圭[4]，大槻 圭史[5]

昨年「衛星系成小研究会」という研究会を開催したが，その第2回にあたる研究会を2013年8月7－9日の日程で，定山渓温泉渓流荘（札幌市）で行った．まず本研究会の趣旨を（昨年の報告書と若干重複するが，改めて）簡単に説明しておく．衛星（系）を対象とした研究といっても，ざっと思い浮かぶだけでも，衛星形成過程，表面地質，内部構造，固有磁場，磁気圏，大気，化学，生命の起源，地上観測，探査など，様々である．この幅広いテーマ・手法をそれぞれを研究している人は（国内だけでも）それなりにいるが，もったいないことに，それぞれが相互に交流する機会がそれほど多くない（と少なくとも世話人は感じていた）．そこで研究会を立ち上げようという話が世話人の中で持ち上がり，昨年の第1回研究会開催に至った．今のところ，国内だけでもそれぞれを研究している人がいるもののその人口は適度に少ないため，幅広いバックグラウンドを持ちつつ共通の興味を持った人たちと知り合いになるには，いいタイミングであるように思われる．

と，昨年は割とのんきに研究会を開催したが，同時に昨年，木星氷衛星探査機JUICE（JUpiter ICy moons Explorer）計画が欧州宇宙機関（ESA）の主導のもとで始動し，日本チームもその開発に携わることから，国内でも氷衛星探査に関わる研究が盛んになって来るであろう．というわけで，今年のテーマは「衛星観測から探る衛星形成環境」とした．そこで，このテーマに関わる仕事でとても活躍されている，東京大学大学院

1. 北海道大学低温科学研究所
2. 東京工業大学理工学研究科
3. 東京工業大学地球生命研究所
4. 北海道大学大学院理学研究科
5. 神戸大学大学院理学研究科
tanigawa@pop.lowtem.hokudai.ac.jp

図1：研究会中の様子．

新領域創成科学研究科の関根康人さん，情報通信研究機構の笠井康子さんのお二人をお招きしてご講演頂いた．関根さんは，実験，フィールドワークから，探査提案，業界の将来構想まで何でもこなし，若手のエースとして幅広い世代から頼りにされていることは，惑星科学会員ならご存じの通りであろう．今回は「氷衛星の化学情報を読み解く」という話題に絞って話をして頂いた．土星の衛星であるエンセラダスのプリュームから，エンセラダス内部の状態のみならず，衛星形成母体である周惑星円盤までの関係性を指摘し，土星の形成時期・周惑星温度に対する制約を実証的に与えられる，という興味深いお話をして頂いた．笠井さんは，JUICEに搭載される観測機器の一つであるSWI（サブミリ波分光計）の日本側PIとして活躍されており，今回「サブミリ波衛星による氷衛星観測」というテーマでお話し頂いた．SWIが行う重要な観測のひとつに，水氷のD/H比やH_2Oのオルソパラ比の測定があり，原始木星系円盤での衛星集積環境について重要な制約が得られるものと期待される．講演では，

SMILESやODINなど宇宙からの地球大気観測で培われたサブミリ波観測技術やそれを氷衛星観測に適用する際の課題とともに，まとめてご紹介頂いた．なお，その他の個々の発表についてのコメントはここでは控えるが，衛星形成に関わる幅広いテーマについてじっくり聞くことが出来た(後述のプログラム参照)．ちなみに，昨年は第1回ということもあり参加者が集まらない不安があったので，衛星研究に関わる幅広い人に声をかけ，結果として発表者のほとんどがこちらから声をかけさせてもらったが，今年は二人の招待講演者の集客力のおかげか，いくつもの他の研究会と日程が重複していたにも関わらず，個別の声がけをほとんどせずとも昨年とほぼ同じ規模の参加人数となった．

図2：全体写真．会場の渓流荘玄関前にて．

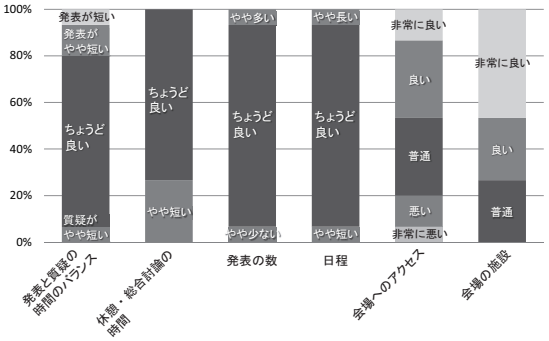

図3：参加者を対象としたアンケートの結果1(5 択)．

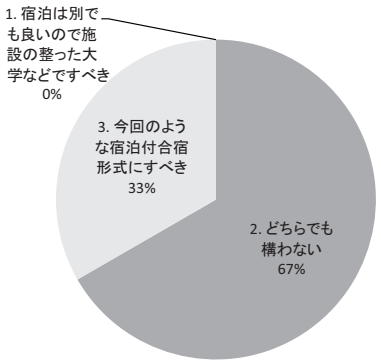

図4：参加者を対象としたアンケートの結果2：研究会のスタイルについて(3択)．

本研究会を来年度以降のどのように発展させていくかを考えるための一つの材料として，参加者の皆さんにご協力頂きアンケートを実施したので，今回の研究会に対する自己評価も兼ねてここでご紹介したい．参加者23名のうちの15名から回答を得た．まず，図3を見てもらいたい．質問項目は，研究会の形式，運営方法，会場の施設などについてで5択として回答してもらったものである．全体的には深刻な不満はないものの，休憩・総合討論の時間について，短いという意見がやや多かった．これは，世話人の中で前回すでに反省項目として挙げられており，その反省を踏まえ休憩・議論の時間を少し長目に設定したが，まだ足りていなかった．実際，世話人一同もその自覚はある．特に今回は総合討論の時間に衛星形成研究の現状と課題を整理するつもりでいたが，時間不足により十分な討論を行うことが出来ずに終わってしまったのは残念であった．次回は少し大胆に休憩・議論の時間を長く設けるような構成にすべきかもしれない．一方，図3で評価が高かったのは，会場の施設であった(平均4.2点)．この高評価の理由までは今回のアンケートからは分からないが，渓流荘の宿泊施設としての評価に加え，温泉の存在もポイントが高かったのかもしれない．

次に，研究会の形式についての質問に対する回答を図4に示す．本研究会は，札幌市街地から外れた定山渓で，ネット環境も良くない中で2泊の合宿形式で行った．そのため，何かと便利でネット環境も整った大学での開催を希望する声が結構あるのではないかと想像していたが，その回答はゼロだった．まあそういう希望の人はそもそも参加していない，というバイアスはかかっているが，少なくとも参加して頂いた皆さんには世話人の考えている合宿形式の意義について，少しは共有してもらっていることを感じられる結果となった．次回についての問いには，約3/4は参加したいとの回答も得た(図5)．ちなみに，以上の個々の項目

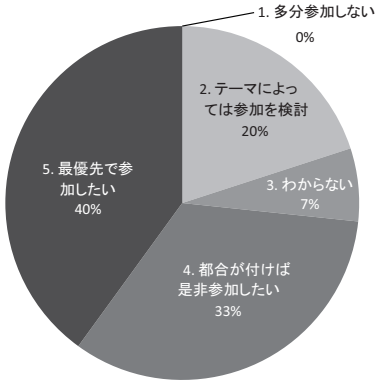

図5：参加者を対象としたアンケートの結果3：次回の参加希望について(5択)．

の点数とは独立に全体的な満足度を問うてみたところ，5点満点で平均4.7という高評価を頂いた．これは世話人にとって次回への励みとなる結果である．

その他，印象に残ったこととして，参加者の一人から「『大人の夏の学校』みたいでいいですね」という感想を口頭で頂いた．これは正に，普段交流する機会の少ないちょっとだけ遠い分野の人同士の交流を深めたい，という世話人の意図をずばり表現しており，かつその意図が少しは実現されているという実感を得ることも出来た．

研究会タイトルには陽に「第2回」とは付けなかったが，出来れば来年以降も年に1回程度のペースで続けていきたいと考えている．研究会のスタイルは，世話人らは今後も今回のような合宿形式で，じっくりと話を聞ける機会をもうけつつ相互交流を促進できる場にしたいと考えている．諸般の事情で実際にどうなるか未定ではあるが，少なくとも今回参加して頂いた皆さんからのアンケートからは合宿形式は一定の支持を得ているようなので，次回もその方向で検討したい．研究会を継続していくことで，世話人も含めた参加者個々人が知識・人脈の幅を広め，衛星分野の研究の活発化に貢献できればと考えている．

最後に，よく準備されたレビュー講演をして頂いた，笠井さん，関根さんをはじめ，すべての発表者の方々，および参加して会を盛り上げて頂いたすべての参加者の皆様に感謝したい．また，研究会の準備(買い出しや荷物運びなど)を積極的に手伝って頂いた低温研の皆さんにも感謝したい．参加申込にはCPSサーバの会議開催ツールを使わせて頂いた．

……プログラム[1]……

■8/7

15：50－18：00　第1セッション

（はじめに）

・木村　淳：ガリレオ衛星の内部構造と表層物質の理解の現状

・高遠徳尚：木星の小衛星のスペクトル型からみたヒルダ群トロヤ群との関係

・平田直之：土星の小型衛星の表層進化

18：00－　夕食

21：00－　分科会

■8/8

07：30－09：00　朝食

09：00－12：00　第2セッション

・関根康人：氷衛星の化学情報を読み解く：エンセラダス・プリュームのシリカと熱水反応の示唆

・羽馬哲也：氷でおきる化学反応

・三上　峻：集積期のタイタンの原始大気の構造及び表層環境の推定

12：00－　昼食

14：00－18：00　第3セッション

・笠井康子：サブミリ波衛星による氷衛星観測

（議論・休憩）

・谷川享行：衛星系形成過程のレビューと最近の話題

・藤井悠里：周惑星円盤のガス降着メカニズムについて

（議論）

18：00　夕食

21：00　分科会

■8/9

07：30－09：00　朝食

09：00－12：00　第4セッション

・佐藤貴央：系外巨大ガス惑星周りのハビタブルムーンの形成とその安定性

・斉藤正也：高軌道傾斜角を持つ三体系の階層安定性

（休憩）

・金川和弘：巨大ガス惑星軌道付近の原始惑星系円盤構造

（総合討論）

12：00　会場発

13：00　北大着，解散

1. 講演資料はhttps://www.cps-jp.org/~satellite/で公開している．

←目次へ

2013年度　惑星科学フロンティアセミナー参加報告

木内 真人[1]

9月17－20日に北海道ニセコいこいの村にて2013年惑星科学惑星科学フロンティアセミナーが開催されました．今年が8回目の開催で，「ニュートン」編集長の水谷仁氏を招待して「惑星内部構造」「衝突と破壊」というテーマで，二日間の集中講義形式で講演をして頂きました．

ここでは，惑星科学会から参加費補助を受けセミナーに参加させて頂いた者として，講義の内容やセミナー全体を通しての雰囲気などを報告いたします．

講演の全体の流れは以下のようなものでした．

1. **惑星内部構造論**
   - ・現在の標準モデルへの不満
   - ・1960年代初頭の地球内部構造論
   - ・水谷氏の博士論文紹介
   - ・将来の惑星内部構造論
2. **岩石力学のスケーリング則**
   - ・界面導電現象
   - ・超真空中の岩石強度
   - ・岩石の破壊過程
3. **衝突現象のスケーリング則**
   - ・高速度衝突による圧力
   - ・衝突破壊による破片サイズ分布・破片速度
   - ・クレーターサイズのスケーリング則
4. **世界で最初の学会について**

今回の講演は，水谷先生が東京大学大学院生時代（1964年～）から名古屋大学時代の間（～1987年）に行われた研究内容について主に紹介されるといった内容でした．その理由としては，その後の宇宙科学研究所時代から現在までの活動は今回参加している方々にはよく知られているだろうから，というものでしたが，自分たちのように水谷先生のこれまでの業績を詳しく知らない世代にとっては，その後のお話も聞いてみたかったと思います．

ここからは講義のやや詳しい内容を紹介します，まず初日の前半は惑星の内部構造についてのお話でした．講義は，現在の地球モデルではPREMモデルが主に用いられているということへの水谷先生の不服から始まりました．このモデルでは相転移層の厚さが0となっていますが，現実には相転移には圧力・温度の幅があるので相転移層もある程度の深さ幅を持つはずです．ここで水谷先生はご自身の博士論文を紹介されました．その内容は，地球の自由振動のデータと状態方程式を使うことで，より詳細な地球内部構造を推定したというものです．このモデルは観測データに近づくように

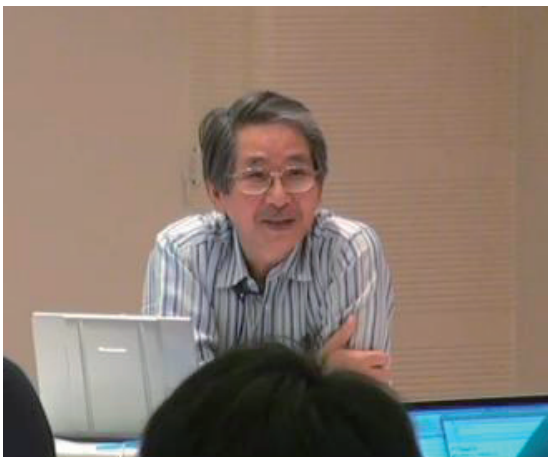

図1：講師の水谷仁氏．

1. 神戸大学大学院理学研究科
100s410s@stu.kobe-u.ac.jp

合わせたもので，PREMと比べて相転移層に深さの幅が見られます．このように，過去のご自身の研究と現在主流とされているモデルを比較した上で，内部構造論に関するこれからの課題についても述べられていました．この講義の中で個人的に印象に残った水谷先生の言葉は，これまでの研究活動の中で博士論文が最も力を注げたもので，非常に特別なものになっている，というものです．理由は，一つのテーマに対して最も長い時間取り組めたからと仰っていましたが，この言葉はこれから博士論文に取り組む(取り組んでいる)自分たち学生にとっては心に残るものがあったのではないでしょうか．また学生時代のお話で，当時の指導教員である竹内均先生が話をする中でどんなことでも知っていたということに対して，学生だった水谷先生が対抗心を燃やしていたと仰っていたことも印象に残りました．

初日の後半は，岩石力学のスケーリング則についてのお話でした．講義は，界面導電現象という現象についての話から始まりました．界面導電現象とは，界面を形成している2相(液体／固体，液体／液体)に，界面に沿って相対運動させると2相間に電位差が生じるというものです．水谷先生がこの現象に興味を持ったきっかけは，松代群発地震(1965－1970)の際に観測された発光現象が，上記の現象が原因であるのではないかと考えたことによるそうです(地震前に強まった圧力が岩石の界面導電現象を引き起こし，電位を発生させた？)．これらのことが解明されれば将来的な地震予知につながるのでは，といった内容で非常に興味深いものでした．しかし，この現象を調べるうえで実験装置を開発し測定結果を用いて計算したところ，発光現象が起こるほどの電位は発生しないという結果になりました．ただこの実験から，発生する電位が岩石の破壊強度に影響を与えることがわかったそうです．これは地下水の岩石への浸透が，岩石の力学的性質に影響を与えるということに繋がります．その後の講義は，超真空下での岩石破壊実験から岩石の破壊強度の水蒸気圧依存性や歪速度依存性などのスケーリング則を得たという内容から，岩石破壊の統一理論へと広がっていきました．この理論は，岩石破壊は無数の小さなクラックの進展によるもので，クラックの進展は応力腐食現象として説明できるというものです．そして最後に，これらの岩石の破壊現象の性質と実際の地震現象を結びつける研究が今後行われるべきだと締めくくられました．

次に二日目ですが，この日の講義は主に衝突現象のスケーリング則についてのお話でした．まず最初の話は，水谷先生が博士1年生のときに月の海の年齢を推定した際，クレーター直径に対して重力が反比例すると仮定したことにより年代の見積もりを誤ったというものでした(現在では直径は重力の－1/6乗もしくは－1/4乗に比例すると考えられている)．その後，コロラド大学にいた1976年ごろからクレーターのスケーリング則について調べはじめ，それまでの論文は限られた条件下の実験による経験則であり物理的意味に触れたものはなかったことから，より理論的なスケーリング則を作ることを考えられました．そのために，高速度衝突による衝撃圧力と衝撃波の減衰のモデル計算からLate-Stage Effective Energyというパラメータを導きました．もしこのパラメータが同じであれば，結果的に同じ現象が起こるという概念となっています．この概念を用いたスケーリングとHolsappleのスケーリングを比較すると，Holsappleのスケーリングは実験データに合致するパラメータを探し出したものであるのに対し，Mizutanスケーリングは物理的意味が明確になっています．ここで水谷先生は，外国人のスケーリングをありがたがらずに，もっと自国の研究者の優秀なスケーリング(Mizutaniスケーリング)を使ってほしいと少し不満を述べられていました．その後Mizutaniスケーリングを用いた衝突破壊現象として破片のサイズ分布や破片速度についての説明が行われ，クレーターサイズのスケーリング則へと話は移っていきました．ここでは，自身が行われたクレーター形成実験と先行研究の結果から，クレーターのサイズもLate-Stage Effective Energyで統一的に表されることを示し，重力スケーリングと強度スケーリングをそれぞれ含めたクレーターサイズのスケーリング則を提案されました．続いてクレーターサイズに及ぼす重力の効果を考察したところ，クレーター直径は重力の－1/6乗に比例すると見積もられています．この結果によって，博士1年生のときの誤り(直径は重力に反比例するという推論)を直すことができた，という話をされてこの講義は締めくくられました．

ご自身の研究内容についての話はここまででお終いで，二日目の後半は世界で最初に開かれた学会につい

←目次へ

てのお話という，トリビアともいえる内容の講義となりました．15世紀後半から16世紀半ばのフランスの神学者で数学・物理の研究をしていたメルセンヌという人がいたそうで，この人はヨーロッパの学者たちの交流の中心となり，後のフランス科学院の前身ともいえる集まりを開いていたそうです．また，当時の学者たちが熱心に研究していたというサイクロイド曲線というものについても紹介がありました．この話の肝は，科学者の集まりは有益であることを最初に示したメルセンヌを例にとって，我々も学会やセミナーで活発な意見交換をして学問を楽しむべきだというものでした．この講義の内容は，さすがニュートンの編集長だなと感じさせるものでした．

以上，長々と講義の内容を書き連ねましたが，水谷先生の講義の流れとお話の雰囲気が伝われば幸いです．二日間の講義を聴いて，水谷先生は非常に深い知識と経験が蓄積されている，まるで達人のような方だと感じました．また同時に，聴衆を話に聴きいらせてしまう不思議な魅力を兼ね備えた方だとも感じました．聴衆に対して，「自分は君らの生まれる前から地球惑星科学をやっている」と投げかけられた言葉がとても印象的でした．

講義全体の雰囲気にも触れておくと，常に質問が飛び交い，活発な議論が展開されるという模様でした．自分から見ると普段は貫録のある方々が，水谷先生に対しては何か子供のような雰囲気で質問を投げかけているようで，それだけを見ても水谷先生は凄い方なんだなと感じました．時間的には二日間という比較的短い講義でしたが，非常に多くのことを学べました．また夜には分科会が開かれており，毎晩熱い議論が繰り広げられていたそうです(自分が参加した夜は手品を披露する方や，食べ物でピラミッドを造ることを生きがいにしている方の発表だったのですが…)．

宿泊先であるニセコいこいの村は，北海道という環境も伴ってとても過ごしやすい環境でした．温泉は入り放題で食事は充実，また休憩時間は周辺の自然を満喫できる環境ということで，精神安定的にも安心な良い環境だったと思います．自分としては初めてのフロンティアセミナー参加だったのですが，同じ宿泊施設に数日間泊まり，普段は長い時間会えない方々と十分交流できる本当に良い機会であると感じました．

最後に，フロンティアセミナーを企画・運営してくださった世話人の方々，運営を手伝われた方々，そして長時間の講義をしてくださった水谷仁氏に感謝申し上げます．また惑星科学会の援助でこのような貴重な機会を頂けたことに感謝いたします．

「ALMAを利用した太陽系天体観測セミナー」開催報告

佐川 英夫[1]，中川 広務[2]，前澤 裕之[3]

1. はじめに：開催の背景

南米チリのアタカマ高地(標高5000 m)に建設中のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)が初期科学運用を開始してから二年が経つ．干渉計を構成する電波望遠鏡(アンテナ)が最終的な本格運用のおよそ4分の1の台数という状況でのスタートではあったが，その段階においてすら，ALMAの観測感度は既存のサブミリ波干渉計(ハワイSMA)の20倍以上を達成していた．その後ALMA施設の建設も着実な発展を見せており，それにともなって，ALMAの観測性能は既存の電波天文学の常識を覆す域に達しつつある．

ALMAの秀でた観測性能を最大限に活用していくため，また，異分野の研究者でもALMAを利用できるように，国立天文台チリ観測所ではALMAワークショップの公募を毎年行っている．本研究会「ALMA初期科学運用における太陽系天体観測」もその活動の一環であり，昨年度より年二回のペースで研究会を開催している．本研究会では，ALMAを利用することで太陽系惑星科学にどういった新規サイエンスが拓けるのかという視点で，異なる研究フィールド(惑星大気研究，固体表層環境研究，プラズマ圏研究，太陽系形成理論研究など)に跨る惑星科学研究者間での情報交換を行うことを会の趣旨とした．また，応募予定の観測提案書の完成度を如何に高めていくかといった具体的な議論も行っている．以下では今年4月および10月に開催された研究会に関して，講演内容の紹介を行う．

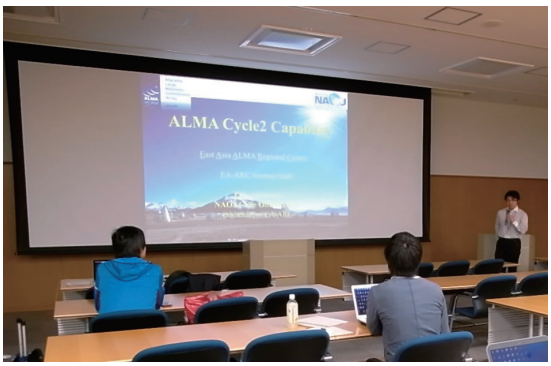

図1：研究会の様子．

2. 講演内容の紹介

表1に今年度の研究会アジェンダを示した．開催会場の情報通信研究機構を中継し，TV会議接続を利用して遠隔地(東北大学や大阪府立大学，神戸大学，福岡大学など)からも複数の参加者があった．

2.1 セッション1

第一回，第二回の研究会どちらも，国立天文台のALMA東アジア地域センター(EA-ARC)からALMAの観測性能に精通している関係者に研究会への参加を依頼した．実際のALMAの運用状況や観測性能に加え，電波干渉計の観測原理の概要に関しても講演があった．とくに後者の説明は，干渉計観測には馴染みが無いが潜在的にALMAを利用する可能性が在るという人達

1. 情報通信研究機構
2. 東北大学
3. 大阪府立大学
sagawa@nict.go.jp

表1：「ALMA初期科学運用における太陽系天体観測」平成25年度会合内容. 第一回と第二回の会合プログラムをセッション毎にまとめ，整理したものを示す.

開催日：第一回 4月22日，第二回 10月28日

セッション1 [ALMAステータスレポート]

西合 一矢，秋山 永治(国立天文台チリ観測所EA-ARC)

- Cycle-0, Cycle-1 におけるALMA運用実施状況
- Cycle-1における観測提案の統計
- Cycle-2におけるALMA観測性能，ACAの紹介

セッション2 [Cycle-0, Cycle-1での観測]

- Cycle-1で採択された太陽系天体観測の紹介およびデータアーカイブの利用
  佐川 英夫(情報通信研究機構)
- Cycle-0で取得されたデータ解析の紹介：近傍銀河観測プロジェクト 中島 拓(名古屋大学)

セッション3 [Cycle-2 への観測提案に向けて]

- 惑星大気GCM 研究から期待される地上観測の展開 黒田 剛史(東北大学)
- 太陽系天体の電波観測への期待 ～氷衛星のサイエンス～ 関根 康人(東京大学)
- 火星大気の上下結合過程が大気散逸に及ぼす影響 中川 広務(東北大学)，ほか
- エンセラダスプリューム：カッシーニ探査による知見とALMAでの観測可能性検討
  関根 康人(東京大学)，兒玉 賢哉(東京大学)
- 木星衛星における酸素同位体比観測に関するブレインストーミング
  佐川 英夫(情報通信研究機構)，関根 康人(東京大学)

セッション4 [総合議論]

にとって非常に重要である．先ずはALMAの運用状況や観測提案書審査に関する報告が行われた(西合氏)．ALMA Early Science Cycle-0およびCycle-1という過去二度の観測提案募集に際しては，世界中の研究者からそれぞれ1000件前後もの観測提案が応募され，その中から優先度が高いと評価された観測提案が実施されている．観測提案は，観測代表者の所属に従って，欧州，北米，東アジア，そしてチリという地域別の窓口に応募される．興味深いのは，どの地域からどれだけの観測提案が出され，そのうち何件が“Highest Priority”として採択されたのかといった，観測提案の審査に関する統計情報がかなり詳しく公開されている点である．これにより，地域枠ごとでの採択率の差なども見ることが出来る．東アジア枠は，欧州や北米枠と比較して競争倍率において有利な状況となっている．

秋山氏からはALMAの次期観測サイクルであるCycle-2の観測提案募集に関して詳細な説明があった．Cycle-2は2014年6月から2015年10月までのおよそ1年半におよぶ観測実施期間となる(観測提案の募集締め切りは日本時間で2013年12月6日)．前回までの観測サイクルからはALMAの観測性能としても更なる性能のバージョンアップがあり，特に二つの観測周波数帯(バンド4：125–163 GHz，バンド8：385–500 GHz)が新たに実現されたことは本稿でも特記しておきたい．これにより84 GHzから720 GHzまで，広い周波数帯が観測に利用できることとなる．高い方二つの観測周波数バンドを除けば，口径12 mのアンテナ34台を最大で1.5 kmの基線長に達する大規模配列上に配置することが出来る．300 GHz帯での観測を例にとると，その最高空間分解能は0.12秒角となる．

Cycle-2における科学運用時間は2000時間程度と想定されている．この中には，Cycle-1で採択されたにも関わらず期間内に観測が実施できず，Cycle-2に移行されてくる提案も含まれる予定である．

2.2 セッション2

冒頭にも述べたが，ALMAは既にCycle-0およびCycle-1という初期科学運用を実施している．それらの観測サイクルでどういった太陽系天体の観測提案が採択されたのかに関して紹介が行われた（佐川）．現在までに観測提案が採択されている太陽系天体は，金星（C-0, 1），土星（C-0），イオ（C-0, 1），タイタン（C-0, 1），海王星（C-1），彗星Elenin（C-0），彗星Pan-STARRS（C-1）に限られている（天体名の後ろのC-0,1はそれぞれCycle-0, -1での採択を示す）．こうした観測データが観測提案者に専有される期間は，データが観測提案者に配布されてから一年間であり，その後はALMAデータアーカイブを通して一般の利用者に公開されている．その公開データには，観測生データに加えて，ALMA地域センターで観測天体画像の復元までデータ解析処理を行ったサイエンスデータも公開されている．つまり，電波干渉計のデータ処理（キャリブレーションやデコンボルーション）の経験が無い利用者でも，ある一定のレベルに達した電波画像を直ぐに取得することが出来る仕組みになっている．こうしたアーカイブを積極的に利用していきたい．

Cycle-0で観測された土星データに関しては本稿執筆時の段階で既にデータアーカイブで公開されており，それを見ればALMAによる太陽系惑星観測の質を実感することが出来る．アーカイブデータには土星大気中のCOの観測結果も含まれており，土星ディスクの周縁部分にCOのスペクトルが高感度で観測されている．

中島氏からはCycle-0での近傍銀河観測プロジェクトの実データ解析例が報告され，ALMAでの観測実施からデータ取得，そして画像復元のデータ解析までの流れが具体的に紹介された．印象的であったのは，一つのALMA観測提案から既に8本ものジャーナル論文が準備されつつあることである．これには，ALMAデータの威力もさることながら，データ解析を行う研究体制を上手く機能させることの重要性を認識させられた．折角ALMAに観測提案が採択されて観測が実行されても，一年後にはデータが一般公開されるので，データ解析および論文化を短期間に進められるように予めよく準備しておくことが重要であろう．

2.3 セッション3

このセッションでは，ALMAに期待される太陽系惑星科学の話題が講演されている．サブミリ波帯観測の特徴でもある大気微量成分の観測や高い周波数分解能を活かした温度・風速分布情報の導出を通して惑星の大気循環を理解しようという講演（黒田氏）や，探査機による惑星プラズマ圏の観測にALMAによる地上観測を連携させて，超高層大気の上下間結合を観測的に制約していくという講演（中川）が行われた．本稿では，関根氏らから提供されたエンセラダス観測の話題に関して紹介をしたい．

土星衛星エンセラダスの南極付近から噴出するプリュームの組成を明らかにすることは，太陽系の形成を理解するうえでも，また，太陽系におけるハビタビリティを議論するうえでも非常に重要な研究課題である．エンセラダスプリュームの組成は，近年カッシーニ探査機によるサンプリング計測によって調べられてはいるが，計測測器の質量分解能の問題やサンプリング時の大きな相対速度によってサンプルが熱分解しているなど，問題点を抱えているのも事実である[1]．そこで，プリュームの組成をALMAからリモートセンシングできないだろうかというのが関根氏らの提案であった．Cycle-2におけるALMAの最高空間分解能は0.1秒角前後に達する．この分解能は，地球から観た場合のエンセラダスプリュームの広がり（～0.05秒角）とそこまで大きくは掛け離れていない．逆に言えば，ALMA以外の地上観測施設を利用してのエンセラダスプリューム観測は限り無く難しいとも言える．ミリ波・サブミリ波帯には，プリュームのソースであるエンセラダス内部海の情報を制約するために重要と考えられているHCN, CO, NH_3, CH_3OHなどのラインが多数存在する．果たしてCycle-2におけるALMAの観測感度で上記分子が検出できるのか？兒玉氏からはこの点に関する初期検討の結果が紹介された．プリューム内の分子の存在量や温度，そしてALMAの空間分解能に対するプリュームの空間分布（深宇宙やエンセラダス本体の放射も同時に観ることになる）など，いくつかの仮定を置いたうえでの見積もりではあるが，HCNに関

しては十分に現実的な観測積分時間で有意な信号が得られることが示された．今後，より現実的な感度計算が行われるが，地上からエンセラダスのプリュームを観測できる（かもしれない）というのは，まさにALMAならではのサイエンスではないかと感じられた．

2.4 セッション4

総合議論の場では，参加者からの様々な視点で，ALMAを利用した太陽系科学に関する議論が行われた．主な話題を以下に紹介する．

- ALMAとのシナジー観測も見据え，東北大学惑星研究グループなどが現在ハワイハレアカラに建設中の赤外望遠鏡を利用した他波長間観測の展開や，大阪府立大学（前澤）などが野辺山で開発運用を行っている惑星中層大気監視専用10 mミリ波望遠鏡SPARTによる長期モニタリングとALMAによるスナップショット的観測を連携させるなどといった観測アプローチも検討されており，期待がかかる．
- 数値モデリングや理論研究者との共同研究によって，ALMAを利用した新規観測テーマを見いだしていきたい．また，日本が今後行っていく太陽系探査ミッションにALMA観測も効果的に関連させられるであろう．例えば，ALMAで木星やガリレオ衛星を観測することは，木星圏探査ミッションJUICEの開発にも大きく貢献する．

3. 結びと謝辞

以上，二度の研究会の開催内容を駆け足で報告した．冒頭で述べた，「異なる研究分野に跨る惑星研究者でALMA時代の太陽系惑星観測を議論していく」という会合趣旨は達成できたと思われる．こうした試みが成功したのは，太陽系惑星科学に対してALMAが高い有効性を保持しているからに他ならない．この研究会開催（あるいは本記事）を通して，これまで以上に多くの惑星科学研究者にALMAへの新たな関心を持って貰うことが出来れば幸いである．現時点ではCycle-0, -1 のALMA太陽系観測データを利用したジャーナル論文は出版されていないが，それも時間の問題だと思われる．どういった成果が出てくるのか，大きな期待を持って待ちたい．

最後になるが，旅費援助を含めて研究会開催のサポートをして頂いた国立天文台，同チリ観測所およびEA-ARCの方々，そして，研究会を盛り上げてくれた参加者の方々に研究会世話人として謝辞を述べたい．

参考文献

[1] 関根康人, ほか, 2012, 遊星人 21, 229.

はやぶさシンポジウム2013開催報告

安部 正真[1]

2013年10月16日から18日にかけて，JAXA相模原キャンパスにて，国際シンポジウムが開催されました．はやぶさに関する国際シンポジウムはこれまで，2004年と2006年に開催されており，それぞれ，探査機が小惑星に到着前，探査機が小惑星での近傍観測終了後のタイミングで実施されており，今回は探査機が小惑星帰還後はじめての開催となりました．

1回目が主に地上観測のデータや地上実験や理論的研究から，小惑星イトカワがどのような天体なのかを推定し，2回目が主に小惑星滞在中のリモートセンシング観測のデータから，小惑星イトカワがこれまでの我々の見方とどうかわったのかが議論されましたが，今回はさらに帰還サンプルの分析が進み，他の研究の進展とともに，はやぶさサンプルが何をもたらしたのかを議論する場となりました．

今回のシンポジウムの正式名称は，第1回宇宙物質科学シンポジウムとしました．これは，単にはやぶさに関する議論をするためだけのシンポジウムと位置付けず，「サンプルを持ち帰って詳細分析することは，より広い範囲の惑星科学にどれだけのインパクトを与えるのか」といったことを関係者がそろって考える場としたためです．

アメリカでは，アポロ11号のサンプルが持ち帰られた後，1970年に第1回の月科学会議(Lunar Science Conference)が開かれており，現在は月惑星科学会議(LPSC: Lunar and Planetary Science Conference)としてアメリカ最大の惑星科学の会議になっています．日本でもLPSCより歴史の長い月惑星シンポジウムがISASで毎年開催されていますが，国内シンポジウムで海外からの参加はあまりありません．他にも多くの国際シンポジウムが国内で開催されてきており，改めてJAXAが国際シンポジウムを開催する必要性は別途考える必要はありますが，はやぶさサンプルという科学的に貴重なものを手にしている我々が，海外研究者も含めて議論する場を提供することの重要性を意識して開催が決まりました．合わせて，科学組織委員会を立ち上げ，招待講演のテーマ選定や講演者の推薦，プログラム検討などの準備を進めました．

本シンポジウムの参加者は，約90名でその3分の1が海外研究機関所属の研究者でした．講演数は全63件で11カ国から研究者の発表がありました．講演の中心は初期分析の結果のレビューと，第1回国際公募研究の成果報告が主で，初期分析に関する講演7件，国際公募研究に関する講演17件でしたが，それ以外に，新しい枠組みで行われる分析研究に関する講演7件，リターンサンプル研究に関わる，探査，観測，実験，理論的研究の講演は多数という構成で，丸3日，朝から夕方遅くまで，ISASの一番大きな会議場がほぼ満席状態が続きました．

講演の個々の紹介は，ここでは割愛しますが，プログラムのセッション名のみ記すと，

【初日】

Opening
Hayabusa Mission Summary
Science from the Sample Return Mission – 1
Curation and Technique for Sample Return – 1

【2日目】

Category3 Analysis
Composition
Consortium Study

1. 宇宙航空研究開発機構
abe@planeta.sci.isas.jaxa.jp

図1：シンポジウム2日目終了後の集合写真.

Micro-structure Analysis by TEM
Thermal History of Itokawa Parent Body
Observation and Simulations for Asteroid Study

【3日目】

Isotopes and Noble Gasses
Topic on Salts
Curation and Technique for Sample Return – 2
Science from the Sample Return Mission – 2
Mineralogy
Meteorites and Asteroids

という感じで，物質分析の講演と探査，観測，実験，理論の講演がうまく混じりあうプログラム構成になりました．

はやぶさサンプルの国際公募研究の成果については，まだ半分程度が分析進行中ということで，分析フローの中の最初の段階である非破壊分析の成果のみを示したり，これから得られる成果の意義について語る講演もありましたが，はやぶさが持ち帰ったサンプルの多様性についての講演や，イトカワ表層で微粒子に刻まれた情報から，小惑星の活動史や，イトカワ形成前の情報に迫る研究成果も発表され，各自が論文投稿前の情報を惜しみなく披露していました．特に海外研究者を中心としたコンソーシアム研究は，海外版初期分析のように，1粒のイトカワ粒子をまさにしゃぶりつくすように，様々な分析手法を駆使して，イトカワの歴史を紐解こうとするものでした．

今回のシンポジウムの特徴は，こういった太陽系物質科学研究者だけでなく，地上観測や，実験，理論分野の研究者も多く参加したことです．そのため，分析研究者の講演に対して，他の分野の研究者が疑問に思っていることをぶつけたり，その逆に分析研究者が，他の分野の研究者に意見を求めたりする場が数多くありました．観測研究を主とする研究者の一人からは，「イトカワの持ち帰ったサンプルの分析結果を初めて直接聞くことができた．おかげで，これまで信じることができなかったことが，信じられるようになった．新しい研究の動機付けにもなった」というのがありました．これは宇宙風化研究に関する感想ですが，リターンサンプル研究は，地上観測やリモートセンシング観測と物質分析研究を結びつけるきっかけとなっています．まさにこの研究者の持った印象は，シンポジウム開催の狙いの一つでもあり，それがかなったとすれば，主催者としては非常にうれしい限りです．

もう一つ，気づいたこととして，本シンポジウムでは研究者の声として，「ありがとうはやぶさ」という言葉が多く聞かれました．はやぶさ帰還直後は，「おかえりはやぶさ」だった研究者の挨拶が，このシンポジウムでは「ありがとうはやぶさ」に変わっていたのです．これははやぶさのもたらしたものの意味を研究者が素直に理解してくれていることを物語っていると感じています．

書評

地球と宇宙の化学事典

日本地球化学会【編集】 朝倉書店
2012年9月刊行 全479ページ 定価12,000円
ISBN978−4−254−16057−4

関根 康人[1]

「地球と宇宙の化学事典」は「読み物」です.

広大な宇宙の中の地球という惑星に我々が誕生するまで,そしてたった今この地球上で起きている森羅万象の不思議を,化学という切り口でひとつひとつ丁寧に解説してくれる事典の登場である.

化学という切り口で,というとやや抽象的かもしれない.言い換えれば,宇宙における元素の起源と進化,原始太陽系で地球という惑星が形成する際の物質の分配や挙動,さらには地球システムにおける物質の存在形態や循環過程をひっくるめた,宇宙と地球における「物質」,「元素」にまつわる解説書ということになるだろうか.

「事典」と銘打ってはいるが,私の感想ではこれは完全に「読み物」である.本書は10の章によって構成されている.具体的に書けば,

1. 地球史,2. 古環境,3. 海洋,4. 海洋以外の水,5. 地表・大気,6. 地殻,7. マントル・コア,8. 資源・エネルギー,9. 地球外物質,10. 環境(人間活動)

である.この章の中に小項目があり,各小項目を異なる執筆者が担当している.最も小項目の多い章は,惑星科学に関連の深い「9. 地球外物質」であり,実に59項目にも及ぶ.各小項目の執筆者には,本学会でおなじみの面々も並んでいる.各章には編集担当がおり,彼らによって小項目の選択や並びが決定されている.つまり,小項目の前後関係や選択に,編集担当の明確な思惑が潜んでおり,それが「読み物」としての本書と無機質に語句が並ぶだけの「事典」とを,本質的に異なるものにしていて面白い.

インターネット全盛の昨今,項目を調べるだけであれば,とりあえずGoogle先生に聞いてみるのが手っ取り早かろう.しかし,インターネットの場合,出所の明らかでない危うい情報だというばかりでなく,その項目に関する情報のみ得られれば,それでお終いである.

その点,本書を使えば,その項目が地球や惑星の全体像の中に占める意味も必然的に理解できる.例えば,「9. 地球外物質」の中の小項目「超新星」を調べたとしよう.すると,その前後のページには「恒星の進化」,「銀河の化学進化」が並んでいる.さらに,その隣の項目には,「原始惑星系円盤」,「分子雲」がならび,「超新星」を調べただけの読者は,恒星の誕生から惑星形成,元素合成と星の爆発,さらに分子雲から新たな恒星の誕生という,「宇宙における物質の輪廻」を勉強できる仕組みになっている.研究が細分化してしまい,地球や太陽系の全体像をとらえることが困難な現代において,この仕組みは真に意義深い.

そしてもう一点,私は本書が「読み物」であると感じる点がある.それは,全項目数302に対して,その執筆者が193名であるということが示すように,各項目の最先端の研究者が執筆を分担していることにある.すなわち,各小項目に書かれている情報は,いかにも事典然とした基礎的な内容に留まらず,それに取り組む第一線の研究者ならではの最先端の話題や将来展望までが含まれており,私はしばしば現場の臨場感をビリビリ感じたほどである.

例を挙げれば,小項目「白金族元素」では,周期表における白金族元素の定義に始まり,ゴールドシュミットによる元素の分類と惑星の分化過程における挙動,

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

さらには，より最近の話題である試料中のサブミクロンサイズのマイクロナゲットの存在や，標準試料の問題や最先端の放射光施設を使った微小非破壊分析への期待までがギュッと１ページに詰まっている．

本書は，内容からいって，一般向けというよりは大学院生向け，あるいは知識を持った研究者向けの本である．使い方は人それぞれ，項目をつまみ食いするもよし，章のフルコースをまるごと堪能するもよし．価格的に，大学院生が個人的に購入するのは厳しかろうが，研究室単位で部屋に一冊あって困ることはないだろう．

本書は，その編集を日本地球化学会と明記している通り，2008年の編集委員会の発足に始まり，４年余りをかけて初版刊行に至った，学会全体をあげての力作である．最後に，編集や執筆に長年携われた方々に敬意を表すると共に，惑星科学会からは何か出すのかしらんと思わないでもない，とやぶ蛇にならない程度に付け加えておく．

←目次へ

JSPS Information

◇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

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2013年12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.jpgu.org/meeting/

編集後記

チェリャビンスクイベントのみならず，天体衝突リスクやスペースガードまで含めた特集として「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」を提案し，ゲストエディターを務めさせていただきました．各論文の著者の貢献，編集部のご尽力に感謝いたします．

現地時間の2013年2月15日未明，ロシアの片隅，ウラル地方に位置するチェリャビンスク市およびその近郊に大音響が鳴り響いた．この大音響をもたらしたチェリャビンスク隕石火球は，交通事情等から彼の地では非常に普及しているらしい車載カメラにより多数の映像記録が残された．大音響の原因の衝撃波についても核実験探知の為に全世界にCTBTOが展開中の微気圧観測網で明瞭に記録され，また爆発点直下付近でのカップリングにより励起された地動(主としてレイリー波)も，数千キロの範囲まで伝播したことが広帯域地震観測網の記録により判明している．これらのデータから，100年に1度程度の規模の隕石落下であったことがわかってきている．

かなりの規模の人的被害も伴った今回のチェリャビンスク隕石火球が一つの契機となり，これまで各国独自に進められていた地球への天体衝突リスクへの対応を，国連が主導して進める構想が承認されるなど，一般社会に与えたインパクトも大きなものがある．チェリャビンスクイベントは，まさに「地球への天体衝突は考えておかねばならないリスクなのだ」ということを知らしめる目覚めの号砲でもあったと言えるかもしれない．

（石原 吉明）

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],
石原 吉明 [特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」ゲスト・エディター],
生駒 大洋, 上椙 真之, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇気, 倉本 圭, 小久保 英一郎, 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

2013年12月25日発行

日本惑星科学会誌　遊・星・人　第22巻　第4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.