日本惑星科学会誌　遊・星・人

第24巻　第1号

目　次

巻頭言　倉本　圭……3

特集「広報・アウトリーチ」

火星共同観測が目指したもの　時政 典孝……4

「キッズはやぶさ教室」の実践 ～「はやぶさ」人気の実態・要因の分析結果からのアプローチ～……11
高橋 典嗣，山田 遥子

回転ピクセルスワッピング法を使ったクレーター年代学……20
山本 聡，松永 恒雄，中村 良介，関根 康人，平田 成，山口 靖

高速度衝突現象と水谷スケーリング　岡本 尚也，水谷 仁……33

系外惑星「遠い世界の物語」その5 ～重力マイクロレンズ法を用いた氷境界外側の系外惑星探査～……40
鈴木大介，住貴宏，MOAコラボレーション

火の鳥「はやぶさ」未来編 その８ ～ ONC地形観測から探る小惑星の力学進化～……48
諸田 智克，杉田 精司，澤田 弘崇，本田 理恵，亀田 真吾，山田 学，本田 親寿，その他2名

「始原天体・スペースガード研究会」開催報告……54
奥村 真一郎，高橋 典嗣，中村 良介，伊藤 孝士，吉川 真，渡部 潤一，その他3名

はやぶさ2014シンポジウム開催報告　安部 正真……58

第31回Grain Formation Workshop報告……60
本田 充彦，左近 樹，木村 勇気，三浦 均，下西 隆，瀧川 晶，田中 今日子，上塚 貴史

「第二回iSALE勉強会」参加報告　末次 竜……63

「天体の衝突物理の解明(X)～日本の衝突研究の未来～」参加報告　桑原 秀治……65

「第３回地球生命研究所(ELSI)国際シンポジウム」開催報告……69
木村 淳，玄田 英典，藤井 友香，木賀 大介，青野 真士，北台 紀夫

火星科学研究会開催報告　高橋 芳幸，倉本 圭……75

訂正：惑星科学アウトリーチとしてのジオパークの可能性　中串 孝志……78

JSPS Information……79

表紙デザイン：BROOKS

Contents

Preface K. Kuramoto 3

Special issue : Public relations and outreach

What the Mars Cooperative Observation aimed at N. Tokimasa 4

Practice of the "Kids HAYABUSA Classroom" — "Hayabusa Spacecraft" Approach from the Analysis Results of the Popular Reality and Factor — N. Takahashi and H. Yamada 11

Cratering age using Rotational Pixel Swapping Method S. Yamamoto, T. Matsunaga, R. Nakamura, Y. Sekine, and 2 authors 20

High-velocity Impact Phenomena and Mizutani Scaling T. Okamoto and H. Mizutani 33

Tales of distant exoplanet worlds (5) —The Search for Extrasolar Planets beyond the Snow Line by Using Gravitational Microlensing— D. Suzuki, T. Sumi, and MOA collaboration 40

Phoenix "Hayabusa" : A tale of the future (8) —Morphological observation by ONC and dynamical and collisional evolution of NEAs— T. Morota, S. Sugita, H. Sawada, R. Honda, S. Kameda, and 5 authors 48

Report of Workshop on "Small Primitive Bodies and Space Guard" S. Okumura, N. Takahashi, R. Nakamura, T. Ito, M. Yoshikawa, and 4 authors 54

Report of The 2nd Symposium of Solar System Materials M. Abe 58

Report on the 31st Grain Formation Workshop M. Honda, I. Sakon, Y. Kimura, H. Miura, T. Shimonishi, and 3 authors 60

Report of the 2nd iSALE shock physics code workshop in Hokkaido, Japan R. Suetsugu 63

A report of the 10th workshop on impact physics H. Kuwahara 65

A report on the 3rd ELSI international symposium J. Kimura, H. Genda, Y. Fujii, D. Kiga, M. Aono, and N. Kitadai 69

Report of Workshop on Mars Science Y. O. Takahashi and K. Kuramoto 75

Corrigendum: Geoparks as fields for outreach of planetary science T. Nakakushi 78

JSPS Information 79

巻頭言

私の出身学科は地球物理だが，そこで地球科学が地震学や気象学などに細分されていることを学んだ．それぞれの体系に感心する一方，相互の接点が希薄なことを残念に感じたものである．この当時まだ歴史の浅かった惑星科学は，分野の垣根を取り払い，地球を含めた惑星を総合的に理解しようとする姿勢が鮮明で，まぶしく感じられた．これが，私が研究分野として惑星科学を志望した一番の理由である．だが最近，いろいろな場面で惑星科学も細分化が進んでいることを実感することが多くなった．知識が増え，人が増えた科学分野が必然的にたどる途であることは否めない．とはいえ，惑星や太陽系の成り立ちを総合的に解明することが，この学問の中心テーマであり，また存在意義の核心でもある．研究者が少人数しかいない時代にはあまり気にせずに済んだが，個別のテーマの追及と理解の総合体系の更新を密接にフィードバックさせることが，今後ますます重要になると思われる．そのための舞台装置の一つとして，本誌ならびに本会を活用頂きたい．

倉本　圭（第13期日本惑星科学会会長）

←目次へ

特集「広報・アウトリーチ」

火星共同観測が目指したもの

時政 典孝[1]

（**要旨**）1998年7月，日本で初めての惑星探査機Planet-B「のぞみ」が火星へ向けて打ち上げられた．のぞみに搭載されたMIC（Mars Imaging Camera：可視光撮像装置）による科学観測を補う地上からの支援観測と，のぞみから得られる様々な情報の交換と公開を目的として，探査計画が本格化した1997年に共同観測を発足した．共同観測のメンバーは，MICによる科学観測をめざす研究者と，公開天文台職員やアマチュア天文家である．発足以来，火星が地球へ接近した1997年，1999年，2001年，2003年の4期間にわたって，火星の共同観測を実施した．ミッションは，のぞみを火星周回軌道にのせられなかったが，4期間の共同観測の実施によって，メンバーの間で観測技術や火星の科学について議論が交わされた．また，研究者が，市民の「知りたい」という要望に触れる機会を作ることができた．公開天文台職員やアマチュア天文家は，市民へ，のぞみの科学目的や，火星画像を公開することができた．

1. はじめに

1990年代の初めは，日本の天文科学教育の転換期であった．その最も大きな要素の1つは「情報の公開」である．これを後押しするいくつかの事項が発展した．それは，

1：急速なインターネットの一般普及
2：科学研究情報の一般公開の必要性
3：天文教育普及施設の増加

である．インターネットが急速に普及し，家庭のパソコンで，最新の科学情報を個人のニーズで選択し閲覧できるようになった．社会教育に携わる私たちは，いかにこのツールを使って，どのような情報を発信するのかを模索するとともに，回答を出すことが急務となっていた．

従来は，科学研究は科学者にのみ情報が交換されるもので，研究結果こそ公開されていたものの，それを市民へ詳しく解説したり，観測の方法や技術を公開したりすることは無かった．それが，1990年代ごろから，科学研究を行うには，市民の理解を得て，結果を分かりやすく伝える義務が生じる，と考える世の中へと変わっていった．

1990年代には，プラネタリウム館や公開天文台，科学館が，社会教育や生涯教育の場として，多くの自治体に建設された．これらの施設には，市民が好奇心を持って訪れ，展示や実物を見ることで，新しい科学研究の成果へ期待を寄せた．

研究者は得られた科学成果の情報公開を行う．市民はこれを受けて科学の内容を理解し，更なる研究発展を望む．こうした循環型の科学，市民参加型の科学とも言うべき風潮が起こり始めた時代であったと考える．そんな情勢の中で，私は，科学者と教育者が，連携を取って情報公開を行う必要性を感じていた．

2. 火星観測との出会い

1992年から兵庫県立西はりま天文台公園（現：兵庫県立大西はりま天文台）で研究員として務めていた私

1. 佐用町総務課（元兵庫県立西はりま天文台公園研究員）
solartoki@gmail.com

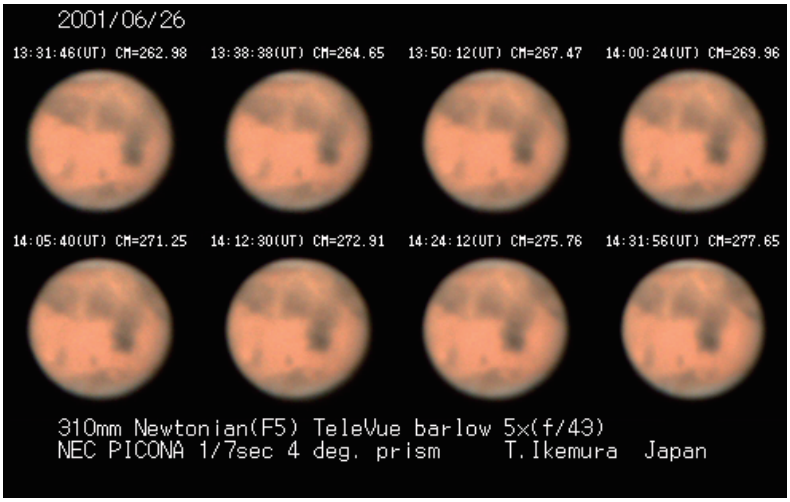

図1：地上からの火星像：池村俊彦氏撮影

は，太陽観測研究の師としてお世話になった久保田諄氏とともに，観測と解析を進めていた．研究の基礎データとなる観測は，年に1, 2回程度，京都大学附属飛騨天文台で行った．当時，飛騨天文台では，太陽観測の他に65センチ屈折望遠鏡で惑星観測と，60センチ反射望遠鏡で宇宙の観測も行われていた．太陽観測者は，昼間の観測を終え，天文台の食堂で夕食をとるが，夜の観測者は夕飯をとって観測を始める．夕食を囲んでそれぞれの分野の研究の話題に花が咲くのだが，その場で，火星の地上観測から火星の気象を研究する京都大学の赤羽徳英氏と出会った．

私は，公開天文台の業務として，火星が地球へ接近するたびに，いかに良い画像を得るか試行錯誤していたので，赤羽氏に火星の観測の方法を教わった．また，赤羽氏は，良像から分かる火星面上のさまざまな気象現象や，未だ解決されていない，火星面上の現象について惜しみなく語った．

私はその話を聞き，火星観測に興味を抱いた．太陽観測で訪れていた飛騨天文台だが，観測は昼間なので，夜間は休みを取る．そこで，明け方に行われた赤羽さんの火星観測を見学し，その手法を目で確かめた．

西はりま天文台には，当時主力だったカセグレン式60センチ反射望遠鏡があった．シーイングの影響や光量，また観測機器の装着の上で，惑星観測にはこの上ない望遠鏡だ．しかし，なかなか備品購入の希望が通らない天文台公園会計であったため，専用のカメラは準備できない．やむなく既存のカメラや拡大光学系を流用して惑星観測の準備をした．貧弱な拡大光学系のアタッチメントに対して，重いカメラを使ったため，どうしてもカメラが傾いてしまう．カメラをビニールヒモで望遠鏡側へ引っ張る工夫をした．

初めて観測したのは1997年の2月，火星は．その年の春に中接近を控えていた．まだ視直径の小さかった火星に望遠鏡を向けたが，冬のシーイングの悪い空にも影響され，火星表面の模様は分からなかった．3月になると視直径が大きくなり，シーイングも落ち着いて模様が分かるようになってきた．そして観測テーマとなる雲や霧も観測できた．火星の山や盆地の地形も，火星儀の説明通り画像で分かる．たいへん嬉しい成果に，火星を観望に訪れたお客様への語りかけに力が入る．正しい知識を伝えられる．何より，それが見えてどう楽しいのかを伝えられる．

3. 関心の高い惑星

私の研究テーマの太陽観測が，西はりま天文台の望遠鏡では，専門的な観測が行えなかったため，私は何か自前の設備で研究できるテーマは無いか模索していた．私の関心は，赤羽氏から見聞きした火星観測に傾いた．

私たちは，天文学で得られた天文の知識を，一般のかたがたへ伝えるために，話をしたり，記事にしたりして紹介する．太陽系外の恒星や星雲・銀河などは，一般のかたにその世界観や構造を話さないと，理解し

てもらえないことが多い．一方で，惑星は，ほとんどのかたが太陽系の構造を知識として持っていて，火星，木星と切り出しても理解が早い．

地球と同じ太陽を巡る惑星．探査機が近づいて未知の美しい世界を見せてくれ，そして謎も多い．地球環境を語るにも，比較惑星学を通じて話すと，過酷な宇宙空間にあって，いかに地球の環境が大切なものなのかを語ることもできる．一般のかたは，こうした身近な惑星に，好奇心が駆り立てられるのだろう．公開天文台で研究観測し，成果を上げてそれを普及したり，第一線の科学者から入る科学情報を伝えたりするのに，これほど魅力的な天体は無い．

4. 日本初の惑星探査の魅力

火星観測を始め，赤羽氏と情報交換するうち，興味深い話を聞いた．日本で初めての惑星探査機を火星に向けて送り出すというのだ．この話を聞いて，私は「市民へ火星に関心を持ってもらうチャンスだ」と沸き立った．これまで，アメリカを台頭にロシアが惑星観測を行ってきたが，それを日本が初めて実行するのだ．「初」というのは，聞こえが良い．しかも火星へ向かうとなると，地球の環境に近い火星のさまざまな気象現象が，日本の探査機によって明かされる．そんな夢のようなことが起これば，きっと多くの方が火星のことを知りたがるに違いない，と考えたのだ．さらに，この探査機は，一部の火星表面だけでなく，火星全球や衛星の観測も行えるよう，長い楕円軌道で火星を回ることが特徴であった．火星に近づけば火星の細部が見えるが，全体は見えない．「それを地上からの望遠鏡観測で補おう」と赤羽氏は考えていた．

飛騨天文台に観測滞在したときの夕食で，赤羽氏からその話を持ちかけられた．赤羽氏の考えは，西はりま天文台を中心に数箇所の天文台で観測してほしい，という内容であった．しかし，私は，情報公開による天文学の普及へ，この観測を取り入れることを思い立った．のぞみの科学観測を全国の社会教育施設，アマチュア天文家，科学者が一体となってサポートできないかと考えたのである．

5. 火星観測の呼びかけ

1990年代初めは，多くの公開天文台が建設ラッシュとなっていた．40cm，50cmの口径の望遠鏡をパソコンで制御し，デジタルのカメラで撮影ができる．みな，「オリジナルのすばらしい天体画像をお届けする」と詠っていた．そこで働く所員，研究員は，その目的を達成すべく，さまざまな研究テーマや，観測から何ができるかを模索していた．私は，のぞみの支援観測を，「公開天文台の観測テーマとして最高のチャンスだ」と考えた．国内に林立する望遠鏡で観測できることは，天候によるデータの欠損を補うことができる．また，公開天文台のスタッフとアマチュア天文家，科学者の3者をつなぐことができれば，たくさんのメリットが生まれる．それは，

1：公開天文台スタッフ，アマチュア観測家の観測技術のスキルアップと火星研究の知識向上
2：３者交流による観測網の拡大
3：第一線の火星研究を市民へ情報提供できる

である．

私は赤羽氏と相談し，図2のような，観測と情報公開と人のつながりを計画し，1996年に愛知県東栄町で開催された，天体観測施設の会で呼びかけた．計画の名は「火星共同観測」とした．

また同年11月には火星共同観測をはじめるにあたっての研究会を開催した．火星観測のための観測方法，何を観測するのか，火星面に起こる気象現象を，関心のある方とともに学んだ．

さらに，研究会で話し合われた内容を編集しプリントして，火星共同観測のマニュアルを制作し，関心のある方へ配布した．

こうした火星観測の呼びかけに，全国各地の公開天文台職員やアマチュア観測家，火星研究者が参加を表明し，1997年の火星の地球接近へ向けた共同観測の取り組みが始まった．

2001年までの共同観測では観測者へ画像提供を求めてきたが，2003年の火星大接近では，別の教育普及活動である「火星観測週間」が動いており，私はその活動の中で，多くのアマチュア観測家と情報交換ができるようになった．そして，アマチュアの惑星観測グループである月惑星研究会の協力により，海外の観

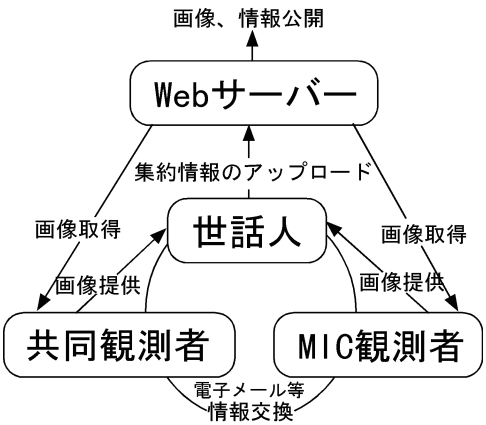

図2：火星共同観測の連絡と情報公開の体系.

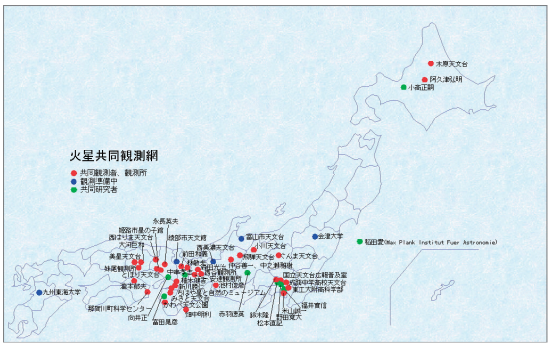

図3：2003年の火星共同観測参加者の国内配置.

測者も加わって画像が提供されるようになった．火星は24時間39分で自転しているので，日本とヨーロッパでは同じ日に見える火星面経度が約180度異なるのだ．海外の観測者の協力によって，日本が昼間の時間帯でも火星の画像が入手できるようになった．

6. 共同観測の目的

これまで共同観測を行うに至った経緯の中で話した火星共同観測の目的を，まとめると．

(a) ＭＩＣとの共同観測

火星探査機「のぞみ」の観測装置の1つ，MIC（Mars Imaging Camera：可視光撮像装置）は，火星の周回軌道上で，楕円軌道を活かしたさまざまな観測計画が提案された．しかしその反面，カメラを自由に向けられないため，常に火星表面の観測を行えない．これでは火星全面画像を得られても，その撮像前後に起こっている火星表面の気象現象を把握できない．また，MICによる火星表面の撮像では，高精細な画像は得られるものの，周囲の様子がわからない．これらMICのウィークポイントを補うべく，研究観測の支援を目的とした地上望遠鏡の可視光撮像による共同観測を行う．

(b) 複数観測地によるデータ補完

複数地点からの観測によって，悪天候で観測が欠如する割合を少なくすることができ，時間変動する火星の気象を把握することができる．

(c) 火星観測と惑星科学のスタディー

惑星科学研究者の参加によって，火星面現象の科学的質疑議論を行ったり，観測経験豊かなアマチュア天文家の参加によって，観測技術や観測手法の情報交換を行ったりすることができる．公開天文台スタッフには，惑星の科学や観測に精通する者が少なく，火星の地上観測についてさまざまな経験を積むことができる．

(d) 火星の情報の普及と画像の公開

得られる火星画像や火星探査機「のぞみ」の情報を公開することで，市民のふくらむ関心に効果的に応えることができる．社会教育施設では，情報をいち早く提供することに期待が込められており，有意義な活動を行うことができると考える．

これらを目的として，参加した観測者が情報の交換を行った．

7. 観測方法

なるべく多くの共同観測参加と火星画像の提供が望めるよう，観測方法にはなるべく制限を設けず，さまざまな方法を提示している．

・ＣＣＤカメラによる観測
・デジタルカメラによる観測
・写真観測
・ビデオカメラによる観測
・スケッチ観測
・スペクトル観測
・偏光観測

スケッチ観測は，熟練したアマチュア観測家には，シーイングの良い瞬間を書き込めるので，その日の火星面気象現象を細かく捉えられる手法で，異常現象があれば最も早く察知できる．しかし，昨今の画像を重ね合わせて数学的手法で精細な画像を得る手法におさ

れ，スケッチの観測者は減っている．偏光観測は高い精度の偏光度が要求され，研究者が行うような観測であるが，手法として紹介し関心あるかたの参考とした．

観測期間は，約2年ごとの火星の地球接近のうち，火星の視直径が10秒角以上となる期間とした．この数字へ科学的な根拠は無いが，地球から火星面の模様が分かりやすくなる見かけの大きさが，この大きさである．

8. 観測のテーマ

火星の研究者ではない共同観測者には，火星の表面画像を得る設備と技術があっても，何を撮影し，それがどのような成果につながるのかはわからない．それを学んでいくのが共同観測の目的の1つである．また，どのような成果につながるのかがわからなければ，観測意欲の向上と維持は難しい．そこで，観測テーマは，赤羽氏からいくつかの案が示された．

・火星低緯度帯を取り巻く雲の帯

北半球の晩春から盛夏の低緯度帯に形成される雲の帯が消滅する時期を観測からとらえる．

・タルシスの昼雲

タルシス3山やオリンポス山に発生する昼雲の発生時期を探る．

・タルシス地方の雲

北半球が春から夏を迎える頃，タルシス地方に，朝雲，夕雲，昼雲が見られる．高度の低いこの雲の日変化の観測から雲の気象学的性質，光学的性質を調べることができる．

・北極雲

初秋から早春まで北極地方を覆う北極雲の成長の様子から，どのように発達して北極地方を覆うのかを解明する．

・南半球中緯度帯盆地の雲

南半球が冬の季節，中緯度帯の盆地(特にヘラス)に出現する雲が消滅する時期をとらえる．南極雲の出現成長との関係を探る．

・南極冠

火星の南半球が春を迎えると南極雲が薄くなり，極冠が見えてくる．そのときの明るさと色の変化を観測し，極冠の出現日を決定する．

シルチスメイジャーのブルークリアリング

450 nm以下の短波長では火星面のコントラストが極端に低く，極冠以外の模様は識別できない．しかし，時には短波長でも模様を識別できることがある．短波長の青色で地面の模様が見えることから，この現象をブルークリアリングと呼び，衝の頃に多く観測される．なぜこの現象が起こるのかを探る．

・ローカルな反射能の観測

まだ正確に測定されていない火星面上の反射能を測定する．火星の暗い模様の反射能は季節変化をするので，各季節の反射能を求めておく必要がある．それには長期にわたる観測が要求される．

・極冠の反射能の測定

極冠の反射能も未だ正確に求まっていない．そのため測定された反射能は，カタログとなるだけでなく探査機による観測のキャリブレーションを行う上で貴重なものとなる．

・雲の発達

黄雲や白雲の明るさの時間変化の測定から，雲の発達の様子を推定できる．光電測光でも各波長(少なくとも赤，緑，青)で観測する事が大切である．また，撮像観測と同時に行うと，火星全体の様子から特定の地点の観測を論じることができる．

・火星全体の明るさ

地球から見た火星の明るさの変化には衝効果がある．衝前後の10度以内の期間を観測できれば，衝効果に季節変化があるか否か，それは地面の反射能の変化によるのか，または大気中の雲の影響によるものなのかなど，衝効果を議論するのに十分な資料が得られる．

9. 情報の公開と連携方法

共同観測者をつなぐ手段として，インターネットを活用した．共同観測発足当時はホームページもまだ珍しい時代で，西はりま天文台公園に独自のウェブサーバーが無かった．そのため，姫路工業大学(現兵庫県立大学)のウェブサーバーを間借りして，火星共同観測のホームページを開設した．

私は，集めた画像と火星面の現象のレポートを手作業で制作し，ウェブページに掲載した．それは，現在の「ソーシャルネットワーキングサービス」と全く同じ形態である．

共同観測者同士の連絡は，電子メールのメーリング

リストを使った．その体系図が，図2である．

10. 活動・観測実績

当初火星探査機「のぞみ」の火星到着は1999年であったが，トラブルにより2004年に延期となった．火星共同観測は，4回の火星接近を共同で観測することとなった．期間中，撮影するカメラの技術革新が大きく，2003年の共同観測のときには，火星映像の重ね合わせによる高精細な火星像の作成が主流となり，見えてくる火星表面の現象がよりわかりやすくなった．

1996年
・全国天体施設の会で共同観測の紹介
・共同観測メンバーの募集開始
・11/14　火星共同観測研究会開催・同集録発行
1997年
・共同観測実施　1/26-5/20　45件
・姫路工業大学のWebサーバーにて画像公開開始
・1997年共同観測の結果（西はりま年報）
1998年
・1997年共同観測の結果を全国天体施設の会で発表
1999年
・観測ハンドブック作成，共同観測Webページ作成・公開
・共同観測実施　2/25-7/20　59件
・共同観測Webページレイアウト変更
2001年
・共同観測の実施　4/1-9/30　88件
2003年
・Apr.12-13　ワークショップ「火星大接近で何を探るか」開催
・共同観測　5/8-12/10
・地球惑星関連学会合同大会にて共同観測の紹介
2004年
・のぞみとの連携観測（中止）

11. 活動の評価

火星共同観測の実施による成果が，当初の計画と大きく異なったのは，やはり「のぞみ」が火星周回軌道にのらなかったことにある．長期間となった共同観測の期間中に，観測者の関心は，当初の公開天文台発展

図4：火星共同観測の情報を公開，交換するホームページ．観測者からメールで預かった画像とコメントを，即時手作業でウェブサーバーへデータをあげて公開した．

期とは変わっていった．それは，各天文台におかれた課題が明確になり，それぞれの運営方針に邁進せざるを得ず，惑星観測から関心が離れたことは否めない．しかし，惑星観測の技術や，火星に関する情報交換が魅力で参加者が減ることは無く，2000年に入ってからのアマチュア観測家の参入で，共同観測者40人，観測施設30カ所と多くの支持を得た．

インターネットを活用した情報交換では，研究者とアマチュア天文家が，火星表面で起こる現象について熱く議論したり，使用するフィルター特性など，観測技術の情報交換を行ったりして，目的としていた共同観測者同士のコミュニケーションがはかられた．

市民へ公開した画像や情報は，アクセス数の解析を行っていないので，定量的な評価はできない．しかし，火星画像を市民向けにまとめたサイトは他に無いものなので，関心を寄せる市民の要望に答えられたことと考える．

観測の研究成果については，中串氏が2004年にまとめた「2003 Mars Report from Cooperative Observation Networks. I. Pre-Opposition」で詳しく述べられている．ダストストームの発生やブルークリアリングの確認などを観測した．

12. さいごに

私は，のぞみ打ち上げ前に行われた，撮像カメラMICの担当者会議に出席し，地上からのバックアップ観測計画として，火星共同観測を紹介した．その会議で，「市民の期待を担ったミッションとして次第に近づく火星画像を撮影し公開してほしい．」と意見したことを覚えている．火星周回軌道投入まで，電源を装置に入れない方針であったので，この意見はかなわなかった．しかし，地球を離れたのぞみが試験として撮影した地球の画像，月の裏側の画像，そして向かうべき火星が小さな点となって写っている画像は，早々にマスメディアに公開された．社会教育現場でも自由に使えるよう，カメラのＰＩであった向井正氏に相談し使ってきた．当時の宇宙科学研究所の広報を担当する事務のかたには，研究結果が出る前の画像公開という異例のお願いをし迷惑をかけたこともあった．しばらく前になるが，小惑星探査をした「はやぶさ」の画像公開や，現在の画像公開の事情からすると，当時は厳しいものがあった．海外では既に広く公開されている時代であったので，日本でも市民に対してもっとアピールできないかと思った．現在は，多くの場合で公開が始まっており，社会教育に携わる私だけでなく，研究を応援する多くの市民を満足させている．

私は，科学者と教育者，教育者と市民をつなぐコーディネーターとして火星共同観測を行ってきた．一つ一つのコミュニティーをつなぐことで，コミュニティー単体の活動が盛んになるし，市民の期待に応えられることを実感した．

惑星の科学は，市民に身近で分かりやすく，科学研究の推進に理解は深い．それだけに，市民へよりわかりやすく最新の科学を伝え，市民とともになぞの解明を進める姿勢が望まれる．

特集「広報・アウトリーチ」

「キッズはやぶさ教室」の実践 ～「はやぶさ」人気の実態・要因の分析結果からのアプローチ～

高橋 典嗣[1,2]，山田 遥子[1,2]

（**要旨**）2011年6月12日に都内で「はやぶさ地球帰還1周年記念講演会」を開催し，参加者を対象に「はやぶさの人気の実態と要因」についての調査を実施した．その結果，「はやぶさ」の偉業は男女差に関係なく，また就学前の幼児と70歳以上の高齢者を除いた幅広い年齢層で受容されていることが明らかになった．「はやぶさ」人気を「はやぶさ2」へ繋げ，科学の魅力をより発進していくには，幼児と高齢者を対象とした教育普及活動の取り込みが不可欠であると考えられる．そこで，年齢の低い幼児を対象とした「キッズはやぶさ教室」を開催した．

1. はやぶさ人気の背景

日本の小惑星探査機「はやぶさ」は，2003年5月9日に内之浦から打ち上げられ，2005年9月12日に小惑星イトカワに到着，約3ヶ月の探査を終え，2010年6月13日に採集したサンプルを地球に持って帰還した．この約7年間に及ぶ「はやぶさプロジェクトチーム」関係者の努力により，幾多の苦難を克服し，サンプルリターンの目的は達成された．この快挙は，日本人の心に深く刻まれ，最後まで諦めなかった研究者の努力が賞賛され，帰還後1年間に累計51万人が全国各地で開催されたカプセル展示や「はやぶさ」に関する行事に集まった．「はやぶさ人気」は帰還後にますます高まっていった[1, 2].

「はやぶさ」人気の背景となる要因を簡単にまとめると，理学的成果，工学的成果，社会的反響の3点が挙げられる．理学的成果は，4つのカメラ（AMICA，LIDAR，NIRS，XRS）により表面の詳細な様子が撮像され，正確な形状，体積，密度が求められ，表面は普通コンドライトであることがわかったこと．また内部が同様物質で構成されているとすると，密度の違いから空洞を伴う内部構造が推定された．さらに採取した表面物質の分析が進むことにより新たな知見が期待されるなどが挙げられる．工学的成果では日本独自の方式により開発されたマイクロ波を用いる推進方式であるイオンエンジンの開発，イトカワへのタッチダウン技術，サンプル採取技術，カプセルの地球帰還システムなどを挙げることができる．

これらの成果に加え，打ち上げから地球帰還までの運用中に起きたトラブルを克服したこと，探査機本体は燃え尽きたが切り離されたカプセルがオーストラリアの砂漠に降下し目的を達成したことなどの研究過程がメディア報道を通して広く社会一般の知るところとなったことが，社会的反響を拡大した．

探査機「はやぶさ」の旅を応援する歌が作曲されたり，プラネタリウム番組「HAYABUSA －BACK TO THE EARTH－」が各地で上映されることにより，研究目的や苦難の状況が逐次印象深く一般の目に触れる事となった．さらに帰還後に多数の関連書籍の刊行及び映画化されたことからも，社会の関心の的となっていたことがうかがえる．作品を通して「はやぶさ像」は，日本人の生死観[3]，あきらめない勇気，望郷などの日本人の心に深く刻まれ，「はやぶさ」地球帰還後に「はやぶさ」の人気は益々過熱し，社会に広く受容さることになった．

1. 日本スペースガード協会
2. 明星大学教育学部
takahasn@ge.meisei-u.ac.jp

図1：「はやぶさ帰還１周年記念講演会」終了後の懇親会にて（スタッフ一同）.

「はやぶさ」についてのアンケート調査

アンケートにご協力をお願いします。裏面も忘れずにご回答ください。
お帰りの際に、出口で回収させていただきます。

【1】次の質問の答えに○をしてください。

●あなたの性別は何ですか。
（1）男性　（2）女性

基礎データ

●あなたの年代を教えてください。
（1）10才未満　（2）10代　（3）20代
（4）30代　（5）40代　（6）50代
（7）60代　（8）70代　（9）80代
（10）90才以上

●あなたの職業（所属）は何ですか。
（1）小学生　（2）中学生　（3）高校生
（4）専門学校生
（5）大学生（理工系、医療系、文系、社会系、経済系、法律系、芸術系）
（6）社会人（会社員、公務員、自営業、教員、研究者、主婦）
（7）その他（　　）

●今回の講演会を最初に何で知りましたか。
（1）ホームページ　（2）ツイッター
（3）メール　（4）知人の紹介
（5）チラシ　（6）学校　（7）新聞
（8）雑誌　（9）その他（　　）

●学校時代、理科は好きでしたか。
（1）大好きだった。
（2）少し好きだった。
（3）どちらともいえない。
（4）少し苦手だった。
（5）大嫌いだった。

●天文・宇宙に興味関心がありますか。
（1）「はやぶさ」を知る前から天文・宇宙に強い興味関心があった。
（2）「はやぶさ」を知る前から天文・宇宙に少し興味関心があった。
（3）「はやぶさ」により天文・宇宙に強い興味関心が持てるようになった。
（4）「はやぶさ」により天文・宇宙に少し興味関心が持てるようになった。
（5）「はやぶさ」には関心があるが天文・宇宙には興味関心がない。
（6）「はやぶさ」や天文・宇宙には興味関心がない。

●これまでに「はやぶさ」に関するイベントに参加したことがありますか。
（1）今回がはじめて　（2）今回が2回目
（3）今回が3回目　（4）4回～10回くらい
（5）11回以上

●これまでに「Hayabusa Back To The Earth」のプラネタリウム映画をみましたか。
（1）今回がはじめて　（2）今回が2回目
（3）今回が3回目　（4）4回～10回くらい
（5）11回以上

●「はやぶさ」について、いつごろから気になるようになりましたか。
（1）「はやぶさ」の小惑星探査の計画が発表されたころから。
（2）「はやぶさ」が打ち上げられてから。
（3）「はやぶさ」がイトカワに到着したころから。
（4）「はやぶさ」のプラネタリウム番組を見てから。
（5）「はやぶさ」が地球に帰還してから。
（6）「はやぶさ」のカプセル展示を見学してから。
（7）いまも特に気になっていない。

●今日の講演会の内容で、最も良かったのは何ですか。
（1）オープニング曲
（2）細田先生の解説
（3）吉川先生の講演
（4）パネルディスカッション
（5）上坂監督の講演
（6）映画の上映
（7）川口先生の講演
（8）エンディング曲

【2】「はやぶさ」に関する次の項目について、あなたはどのように評価しますか。当てはまる 1～5 の番号に○をしてください。

評価

1　全く評価していない。
2　あまり評価していない。
3　どちらともいえない
4　少し素晴らしいと評価している。
5　特に素晴らしいと評価している。

（1）イトカワ（小惑星）について明らかにした科学的なことがら。
1　2　3　4　5

（2）イトカワから持ち帰ったサンプル。
1　2　3　4　5

（3）イオンエンジン。
1　2　3　4　5

（4）太陽系の探査技術（宇宙工学）。
1　2　3　4　5

（5）川口先生と「やぶさプロジェクトチーム」の努力。
1　2　3　4　5

（6）プロジェクトを推進する思考法。
1　2　3　4　5

（7）苦難に最後まで希望をすてずにあきらめなかったこと。
1　2　3　4　5

（8）地球帰還の目的を達成したこと。
1　2　3　4　5

【3】「はやぶさ」の快挙の意義について、どう思いますか。当てはまる 1～5 の番号に○をしてください。

意義

1　全くそう思わない。
2　そう思わない。
3　どちらともいえない
4　そう思う。
5　強くそう思う。

（1）「はやぶさ」の快挙は科学の発展に貢献したと思う。
1　2　3　4　5

（2）「はやぶさ」の快挙は社会に役立ったと思う。
1　2　3　4　5

（3）「はやぶさ」の快挙は理科教育に役立ったと思う。
1　2　3　4　5

（4）「はやぶさ」の快挙は日本人の心に夢と希望を与えたと思う。
1　2　3　4　5

（5）「はやぶさ」の快挙は子どもたちに科学への夢を与えたと思う。
1　2　3　4　5

（6）「はやぶさ」の快挙は経済に役立ったと思う。
1　2　3　4　5

（7）「はやぶさ」の快挙は日本の科学技術の素晴らしさを世界に示したと思う。
1　2　3　4　5

【4】「はやぶさ」の快挙により、あなたはどのような影響を受けましたか。当てはまる 1～5 の番号に○をしてください。

影響

1　全く影響を受けていない。
2　あまり影響を受けていない。
3　どちらともいえない。
4　少し影響を受けた。
5　強く影響を受けた。

（1）勇気づけられた。
1　2　3　4　5

（2）希望を持てた。
1　2　3　4　5

（3）ロマンチックになれた。
1　2　3　4　5

（4）自信が持てるようになった。
1　2　3　4　5

（5）宇宙を身近に感じることができた。
1　2　3　4　5

（6）科学技術の重要性を実感した。
1　2　3　4　5

【5】「はやぶさ」の成功から、今後の日本の宇宙開発に期待することは何ですか。当てはまる 1～5 の番号に○をしてください。

期待

1　全くそう思わない。
2　そう思わない。
3　どちらともいえない
4　そう思う。
5　強くそう思う。

（1）太陽系探査の起源を探るための太陽系探査の推進。
1　2　3　4　5

（2）生命の起源物質を探るための太陽系探査の推進。
1　2　3　4　5

（3）宇宙探査のための技術の向上。
1　2　3　4　5

（4）他の小惑星へのサンプルリターンの実施。
1　2　3　4　5

（5）人類の活動場所を広げるための有人による探査。
1　2　3　4　5

【6】次のことについてお聞かせください。

●あなたが「はやぶさ」を応援する理由は何ですか。
（　　）

●探査機「はやぶさ」が社会に根付いたとすると、その理由は何だと思いますか。
（　　）

●今日の講演会について、気づいたこと、ご意見、ご要望がありましたらご記入ください。
（　　）

以上です。ご協力ありがとうございました。

展開により出口で提出いただけなかった方は、大変恐縮ですが１週間以内に下記へファクスまたは郵送にてご回答いただけると幸いです。ご協力をお願いいたします。

日本スペースガード協会
FAX　：03－6416－0990
送付先：〒151-0073 東京都渋谷区笹塚 1-60-7 2階

はやぶさ地球帰還１周年記念講演会・日本スペースガード協会

はやぶさ地球帰還１周年記念講演会・日本スペースガード協会

図2：質問紙.

このような「はやぶさ」人気は，従来の科学研究過程ではあまり例がない現象である.

2.「はやぶさ」人気の実態と要因調査

日本スペースガード協会では「はやぶさ」帰還から１年目にあたる2011年6月12日に，「はやぶさ地球帰還１周年記念講演会」を都内で開催した（図1）．講演会には，就学前の幼児や小学生から80代まで751名が参加した．ネット中継には約8000件を超えるアクセスがあった．講演会の参加者から「はやぶさ」人気の実態，要因等の動向を調査することにした[4, 5].

調査の目的は，どのように「はやぶさ」が社会に根付き，人々の共感を得て受容されたか，その素過程を

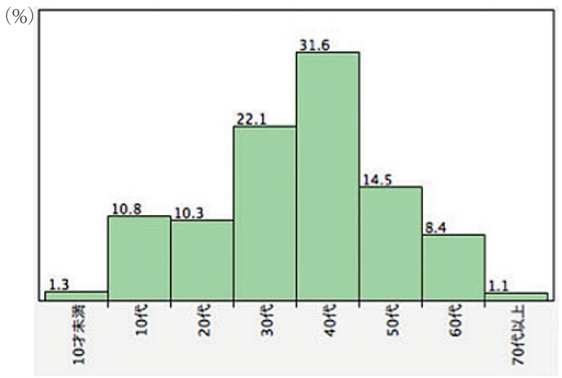

図3：年齢分布.

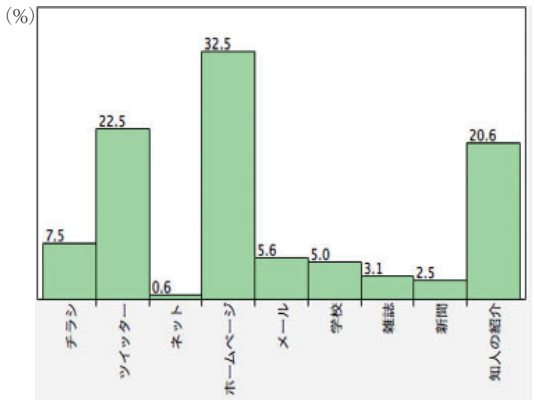

図4：情報源.

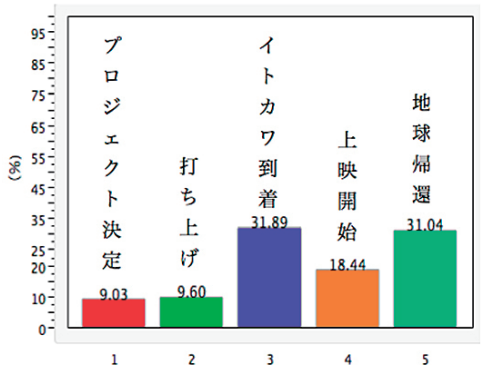

図5：「はやぶさ」を意識しはじめた時期.

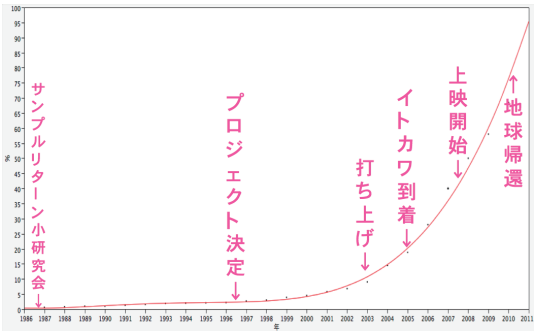

図6：「はやぶさ」人気曲線.

分析することである．これにより，これからの科学教育，科学を普及させるための方法，理科離れ解消の手立てが見つかることが期待される．

調査は，講演会終了後に図2の質問紙を配布し，自記記入式により，その場で回収した．回収した388名を被験者として分析を行った．

調査内容は，実態調査(基礎データ)と要因調査とからなる．実態調査項目は，性別，年齢，情報源，理科の好き嫌い，はやぶさイベント参加回数とした．要因調査項目は，評価，意義，影響，期待で構成した．

3.「はやぶさ」人気の実態

被験者の実態は，次のような結果となった．

3.1　人気を支える性別と年齢層

参加者は，男子174名，女子208名で，若干女性の参加者が多いが，「はやぶさ」人気は，性差に関係ない．また参加者の年齢分布は，図3のように40代を頂点とした正規分布となっている．年齢の広がりも10代から80代まで幅広い．

3.2　情報源

参加者の情報源は，図4のようにホームページ，ツイッター，メール，ネットなどのインターネットによる電子情報源が60.2%を占めていた．それ以外では，知人からの紹介が20.6%，チラシ7.5%となっていた．電子媒体を利用している層が，「はやぶさ」人気を支えていることになる．

3.3　理科好きで構成される「はやぶさ」人気

理科の好き嫌いを5段階で評価すると大変好きが58.8%，少し好き32.3%で，理科好きは91.1%を占めていた．「はやぶさ」人気を支えている人々は，子ども時代に理科好きであった大人の集団であることがわかる．

3.4 リピーター支える熱狂的な人気

「はやぶさ」のイベントに初めて参加した人は，35.3％，4回以上が37.4％であった．また11回以上の熱狂的な「はやぶさ」ファンが8.6％を占めていた．リピーターが64.7％を占めていた．

3.5 「はやぶさ」人気曲線

参加者が「はやぶさ」について意識しはじめた時期は図5のように，「計画当初」，「打ち上げ」がそれぞれ9％，「イトカワ到着」，「はやぶさ帰還」がそれぞれ約30％で，この時期に急に増加した．また，プラネタリウムによる寄与率は18％であるので，大きく貢献していることがわかる．はやぶさ計画の出発点を1986年に開催された「サンプルリターン小研究会」を起点とし，各段階の寄与率を累計すると「はやぶさ」人気は図6のように推移している．活動が継続されれば，人気は1年間で150％増加していくことが期待される．

4.「はやぶさ」人気の要因

「はやぶさ」人気の要因については，評価(8項目)，意義(7項目)，影響(6項目)，期待(5項目)の各項目について，5点法で回答を得た．「強くそう思う」を5点，「そう思う」を4点，「どちらともいえない」を3点，「そう思わない」を2点，「全くそう思わない」を1点，とした．

4.1 相関

各調査項目の中で，「川口先生とプロジェクトの努力」との相関について紹介する．評価項目では「太陽系の探査技術(宇宙工学)」「プロジェクトを推進する思考法」「最後まで希望をすてずに諦めなかったこと」「地球帰還を達成したこと」で高い相関が見られた．意義項目では「科学の発展に貢献した」「日本の科学技術の素晴らしさを世界に示した」で高い相関が見られた．影響では「科学技術の重要性を実感した」で高い相関が見られた．しかし，期待項目で，高い相関を示す項目はなかった．

4.2 男女差・熱い想いを寄せる女子

男女の平均値(M)，標準偏差(SD)を求め，分散分析を行った結果，次の項目の男女差に有意な差が見られた(表1)．評価項目では，太陽系の探査技術(F(1, 369)=4.56, p<.05)，川口先生とプロジェクトの努力(F(1, 371)=7.80, p<.01)，プロジェクトを推進する思考力(F(1, 369)=11.93, p<.01)，苦難に希望をすてず最後まで諦めなかったこと(F(1, 371)=4.14, p<.05)の4項目であった．

意義項目では，社会に役立った(F(1, 372)=7.81, p<.01)，理科教育に役立った(F(1, 375)=6.35, p<.01)，日本人の心に夢と希望を与えた(F(1, 373)=8.66, p<.01)，子どもたちに科学への夢を与えた(F(1, 376)=4.18, p<.05)，経済に役立った(F(1, 368)=21.75, p<.01)，日本の科学技術の素晴らしさを世界

表1：性差の平均値，標準偏差分散分析結果．

	n	M	SD	F	p
【1】基礎データ					
●学校時代、理科は好きでしたか。					
女	207	3.90	1.14	39.35	0.01**
男	174	4.54	0.77		
●天文・宇宙に興味関心がありますか。					
女	201	2.03	0.96	39.34	0.01**
男	173	1.49	0.79		
●「はやぶさ」について、いつごろから気になるようになりましたか。					
女	199	2.52	1.41	F= 22.77	0.01**
男	174	3.20	1.32		
【2】「はやぶさ」の評価					
(4) 太陽系の探査技術（宇宙工学）。					
女	202	4.75	0.55	4.56	0.05*
男	169	4.62	0.65		
(5) 川口先生と「やぶさプロジェクトチーム」の努力。					
女	203	4.92	0.38	7.80	0.01**
男	170	4.7	0.61		
(6) プロジェクトを推進する思考法。					
女	201	4.81	0.51	11.93	0.01**
男	170	4.61	0.61		
(7) 苦難に最後まで希望をすてずにあきらめなかったこと。					
女	204	4.91	0.40	4.14	0.05*
男	169	4.80	0.61		
【3】「はやぶさ」快挙の意義					
(2) 「はやぶさ」の快挙は社会に役立ったと思う。					
女	201	4.59	0.67	7.81	0.01**
男	173	4.39	0.75		
(3) 「はやぶさ」の快挙は理科教育に役立ったと思う。					
女	205	4.69	0.59	6.35	0.01**
男	172	4.52	0.71		
(4) 「はやぶさ」の快挙は日本人の心に夢と希望を与えたと思う。					
女	203	4.82	0.49	8.66	0.01**
男	172	4.63	0.75		
(5) 「はやぶさ」の快挙は子どもたちに科学への夢を与えたと思う。					
女	205	4.77	0.53	4.18	0.05*
男	173	4.64	0.71		
(6) 「はやぶさ」の快挙は経済に役立ったと思う。					
女	199	4.22	0.86	21.75	0.01**
男	171	3.80	0.87		
(7) 「はやぶさ」の快挙は日本の科学技術の素晴らしさを世界に示したと思う。					
女	204	4.833	0.51	8.30	0.01**
男	172	4.651	0.71		
【5】「はやぶさ」の成功から、今後の日本の宇宙開発に期待することは何ですか。					
(4) 他の小惑星へのサンプルリターンの実施。					
女	203	4.71	0.55	4.07	0.05*
男	170	4.58	0.71		

に示した(F(1，374)=8.30，p<.01)の6項目であった．

期待項目では，他の小惑星へのサンプルリターンの実施(F(1，373)=4.07，p<.05)の1項目であった．

各項目で，女性は男性より熱い想いを寄せていたことが明らかになった．しかし，影響の項目で差異が認められないことから，女性は冷静で,生活に引きずることはないと推察できる．

4.3　年齢差・無関心な高齢者と幼児

参加者の年齢を10代未満から10年ごとに区切り，70代以上に8区分し，それぞれの平均値(M)，標準偏差(SD)を求め，分散分析を行った．その結果，評価項目では，イトカワについて(F(7，362)=2.44，p<.02)，イオンエンジン(F(7，360)=2.75，p<.01)，太陽系の探査技術(F(7，360)=3.22，p<.01)，川口先生とプロジェクトの努力(F(7，360)=3.22，p<.01)，プロジェクトを推進する思考力(F(7，370)=2.46，p<.02)，苦難に希望をすてず最後まで諦めなかったこと(F(7，361)=3.21，p<.01)，地球帰還の目的を達成(F(7，364)=4.34，p<.001)の7項目で有意な差がみられた．各項目における平均値の差をHSD検定による多重比較を行うと，LSDは，p<.05 で各項目ともに

50代＞10代＝20代＝30代＝40代＝60代＞10代未満＞70代以上

の順番を示した．これより10代未満と70代以上に評価されていないことがわかった．

4.4　リピーターが支える「はやぶさ人気」

「はやぶさ」に関するイベントの参加が「はじめて」と11回以上参加の「熱狂的ファン」とに分けて集計し，平均値，標準偏差を求め，分散分析を行った．その結果，「熱狂的ファン」は，イトカワ到着頃から興味を持ち，学生時代に「理科好き」であったことがわかった．

また熱狂的ファンは，影響項目の「自信を持てるようになった」で有意な差がみられた(F(1,155)=4.34，p<.05)．それ以外の評価項目，意義項目，影響項目に差異が見られなかったことから，「はやぶさ」の受容は，「はじめて」の参加者からリピーターまで，幅広く受容されていると推察できる．

4.5 理科の好き嫌いに関係しない

「理科大好き」，「理科苦手」，「特に理科が苦手」と

表2：理科の好き嫌いの平均値，標準偏差分散分析結果．

	n	M	SD	F	p
［1］基礎データ					
●「はやぶさ」について、いつごろから気になるようになりましたか。					
特に理科が苦手	10	1.70	1.06	19.85	0.01**
理科が苦手	24	1.75	1.03		
理科大好き	184	3.27	1.35		
［3］「はやぶさ」の快挙の意義					
（2）「はやぶさ」の快挙は社会に役立ったと思う。					
特に理科が苦手	9	5.00	0.00	5.7735	0.01**
理科が苦手	24	4.83	0.38		
理科大好き	184	4.47	0.69		

に分けて集計し，平均値，標準偏差を求め，分散分析を行った(表2)．その結果，「はやぶさ」に興味を持った時期に違いがみられた．「理科大好き」はイトカワ到着頃から，「理科苦手」はプラネタリウムを見てからであった．

意義項目の社会に役立ったでは，(F(2，214)=5.77，p<.01)で有意な差がみられ，理科が苦手ほど「社会に役立った」と考える傾向がある．それ以外の評価項目，意義項目，影響項目に差異が見られなかったことから，「はやぶさ」の受容は，理科の好き嫌いに関係していない．理科嫌いであっても，「はやぶさ」の偉業に触れる機会があれば，受容されると推察される．

5. 分析結果からの提言

分析結果から次のことが明らかになった．

・女性は，男性より熱い想いを寄せている．
・10代未満と70代以上の層に評価されていない．
・「はじめて」の参加者にもリピーターにも受容される．
・理科嫌いであっても，「はやぶさ」の偉業に触れる機会があれば，受容される．

以上の調査分析結果を踏まえて，「はやぶさ2」を支援する教育普及活動の一つとして，就学前の幼児を対象とした教育プログラムを開発し，実践することにした[6,7]．

6.「キッズはやぶさ教室」の教材開発

6.1　開発のねらい

幼児期に豊富な科学体験が将来の理科好きの素地となるばかりでなく，科学に関する興味，関心，理解につながると考えられる．そこで，幼児に体験を伴う活

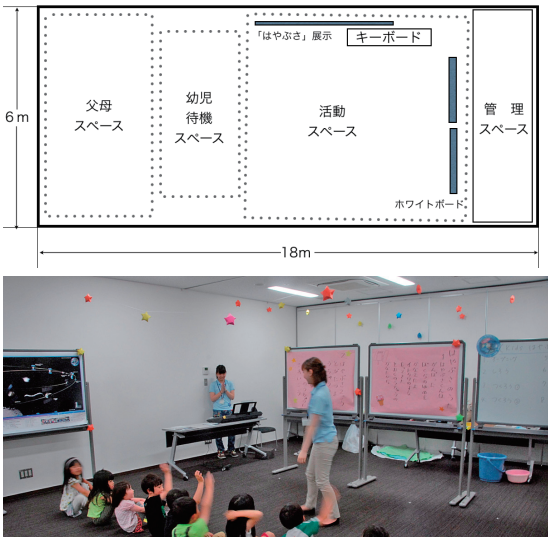

図7：「キッズはやぶさ教室」の活動空間.

図8：主な教材.
左：作詞・作曲した「はやぶさのうた」，右：絵本の一部.

動の中で「はやぶさ」の偉業に触れることにより，科学は身近なもので，親しめる対象であることを実感してもらうことを目標とし，教材開発を行った.

6.2 活動空間（教室）の創出

約100m^2（横18 m×横6 m）の部屋（教室）を図7のように活動スペース，幼児スペース，保護者スペース，管理スペースの4つに区切った．活動スペースには，キーボード，ホワイトボードを設置し，活動場面ごとにホワイトボードの掲示物を取り替えた．このため，物品は管理スペースに予め準備しておき，場面を切り替える時には，幼児を待機スペースに着席させ，速やかに物品を移動した.

活動空間全体は，宇宙を身近に感じることができるようなスペースを創出するため，教室の壁には「はやぶさ」のポスターや絵を，天井には星のオーナメントを取り付けた.

6.3 プログラムの概要と教材の構成

活動は，幼児の興味や集中力が持続するように，歌唱，読み聞かせ，運動などを取り入れた6つの学習活動，工作活動などで構成した．「はやぶさ」の理解と「はやぶさ2」の応援，そして科学への興味関心を高められるように，表3のようなプログラムとし．各活動時間は10分から15分で，全体の活動時間は90分とした.

活動を支援するための教材として，図8のような「楽譜」「絵本」などを作成した.

7.「キッズはやぶさ教室」の実践

7.1 実践の概要

2013年6月9日（日） 13：30～15：10（100分）に相模原市（市民・大学交流センター「ユニコムプラザさがみはら」）において，幼児12名（8家族），父母10名，合計22名を対象に「キッズはやぶさ教室」を開催した.

7.2 実践内容と指導

(1) 歌唱（導入）

歌唱指導では，学習内容を歌いながら学び，踊りながら表現することで，「はやぶさ」の偉業の定着を図ることをねらいとした．作曲は，幼児の声域を考慮し，メロディーやリズムを楽しめるようにし，短い曲で同じリズムが繰り返されるようにした．作詞は，幼児期

表3：「キッズはやぶさ教室」プログラム.

時 間	活 動 場 面	内 容	行 動
13：30-13：35	はじめに	小惑星探査機はやぶさの説明	
13：35-13：50	①うたおう	はやぶさの歌	歌唱
13：50-14：05	②しろう	はやぶさの絵本の読み聞かせ	学習
14：05-14：15	③つくろう1	1999JU3 の作成	工作
14：15-14：25	④つくろう2	自分だけのロケット作り	工作
14：25-14：35	休憩		
14：35-14：50	⑤うちゅうにいこう	サンプルリターン体験 ロケット発射からサンプルリターン	運動
14：50-15：05	⑥おうえんしよう	「はやぶさ2」応援	応援・共感
15：05-15：10	おわりに	活動のまとめ	

図9：読み聞かせ(「はやぶさ絵本」の朗読と絵本の一場面の劇を披露した).

図10：探査天体の工作.
紙粘土で1999JU_3(地球接近小惑星)の模型を製作.

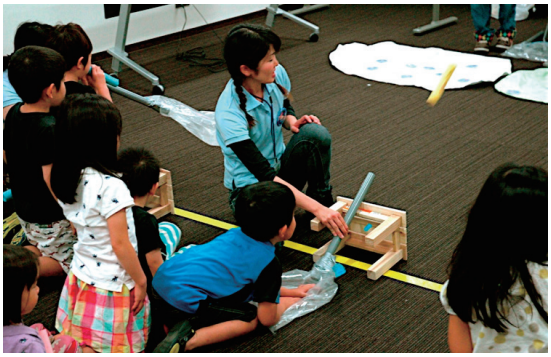

図11：ロケット発射.

の体験内容で構成し，「はやぶさ」の科学的意味が伝わり，印象に残るようにした.

最初の導入として作詞作曲した「はやぶさの歌」の歌唱指導を行うことにより，初対面の参加幼児の緊張感をほぐし，リラックスして活動に積極的に取り組む意欲を持たせるとともに，歌いながら「はやぶさ」とは何か，科学技術の偉業を理解させることができた.

歌唱指導としては，歌詞に振り付けをつけ，指導者が確かな音程で歌うこと，歌いながら体を動かし，情緒を味わい，楽しませるように幼児のペースに合わせて指導を行った．ひらがなとカタカナで歌詞を書いた模造紙をホワイトボードに貼り，文字が読める幼児はその字を追いながら，読めない幼児は指導者の声をよく聞きながら歌った.

活動の最後には，全員がピアノの伴奏に合わせて歌い，リズム・メロディーに合わせて歌詞に合った振り付けをしながら踊ることができた.

(2) 読み聞かせ・劇(知識の受容)

読み聞かせでは，絵とストーリー，体を動かした劇の取り組みにより，目・耳・運動から「はやぶさ」の成果と「はやぶさ2」の太陽系探査の意義の理解を図ることをねらいとした.

絵本の執筆では，幼児の読字力と絵本の理解力を考慮し，場面ごとの理解だけでなく，ストーリー全体の理解が図れる展開とした.

絵本の読み聞かせは図9のように椅子に座った指導者を取り囲むように幼児を座らせた．指導では，声に抑揚をつけ，文字が読めない幼児にもわかるようにした．内容の理解を深めるため，物語の中の一場面を指導者が演技した．また，一場面の演劇の鑑賞や技術面に関してのクイズを行うことで内容の確認と定着を図った.

絵本は，お土産として最後に幼児に配布した.

(3) 工作１(探査天体の作成)

工作活動として，「はやぶさ2」の探査候補の小惑星1999JU_3の製作を行った(図10)．「はやぶさ2」の探査天体を工作し，手の平にのせることにより，ミッションをより身近に感じ，探査への期待を膨らませることをねらいとした.

様々な色の紙粘土を用意し，幼児が選んだ色の紙粘土で1999JU_3の模型を見ながら工作，天体表面に指でクレータの穴をあけた．天体の形や表面の模様を表現することは，幼児自身が天体を考えた結果に基づいて生じた仮説を具体化したモデルで，科学的な思考を働かせた.

予め用意した「はやぶさ2」の模型を乗せて完成した.

(4) 工作２(ロケット製作)

「はやぶさ2」を宇宙空間に打ち上げるためのロケット製作を行った．ロケットのデザインを工夫することで，開発に伴う技術の向上につながる過程の素地を育

て，宇宙探査への夢を膨らませることをねらいとした．円柱の筒をあらかじめ指導者が準備しておき，幼児はシールとペンを使ってロケットボディーにデザインし，自分だけのオリジナルのロケットを製作した．最後に先端の衛星搭載部分に「はやぶさ2」を搭載して完成させた．

⑸ 探査体験（運動）

運動活動として，表3のつくろう2で製作したロケットを発射台に取り付け，実際に飛ばした（図11）．この活動ではサンプルリターンを疑似体験してもらうことをねらいとした．

ロケットの発射台は，袋にためた空気を幼児が袋を押すことでロケットが飛び出す仕組みになっている．ロケットは教室の床に描いた探査天体を目標にして一人ずつ順番に飛ばし，到着すると天体の上に置かれた缶バッチとロケットを持ってスタート地点に戻ることができる．ゲーム感覚で探査機の宇宙の旅とサンプルリターンを体験する活動である．幼児の運動能力，体重，身長などの個人差は見られたが，幾度か繰り返すことで飛距離を伸ばし，全員が目標天体に見立てた小惑星（模造紙）の上に着陸させることができ，サンプルリターンを成功させることができた．幼児は，目標に向かって努力することで，目的は達成できることを運動を通して学んだ．

発射台を担当する指導者はヘルメットをかぶり，臨場感を演出した．表3の「うちゅうにいこう」で使用したロケット，サンプルの缶バッチ，工作で製作した1999JU$_3$と「はやぶさ2」の模型は，幼児のお土産とした（図12）．

図12：終了（作成した教具）．
1999JU$_3$模型，はやぶさ2模型（ペーパークラフト），ロケット，回収したサンプル（缶バッチ）を持ち帰る参加者．

図13：応援メッセージ．

⑹ まとめの活動（応援）

最後の活動として，「はやぶさ2」を応援するためのメッセージとして，手形を押す活動を行った．絵の具を手に塗り，事前に用意しておいた台紙に一人一回手形を押し，名前を書き込んだ．指導者は，手に絵の具をつける，手形を押す，手を洗う，の3つに分け，教室を汚さないように細心の注意を払った．

完成した全員の手形は，「はやぶさ2」の回収カプセルに搭載するためにJAXAに送付した（図13）．手形は，「はやぶさ2」と宇宙を旅し，2020年に帰還することになる．それまで「はやぶさ2」を応援することを約束し，活動は終了した．

8. おわりに

社会現象となった「はやぶさ」人気は，男女の差，理科の好き嫌い，文系理系に関わらず，世代を超えて多くの日本人の心に深く響き，受容された．例外として高齢者，幼児の層が挙げられた．

今回の調査では，これらの層が「はやぶさ」を受け入れなかった原因を言及するには至っていない．

しかし，これらの層を取り込むことが可能かどうかを検証するため，幼児層を対象とした教育プログラムを開発，実践した．これが，「キッズはやぶさ教室」である．

参加した幼児は，「はやぶさ」をテーマにした学習，工作，運動活動により科学的な考え方や思考を体験したことで「はやぶさ2を応援したい」，「科学は面白い」と感動していた．

「はやぶさ」の感動を共感する手法を開発すれば，幼児同様に高齢者，研究者層を取り込むことができると考えられる．「はやぶさ2」応援のための教育活動は，「はやぶさ」の教育活動に多くの人々が集まったように，科学の魅力を知らせる扉となって，科学を楽しく伝え，理科離れ解消の有力な処方箋[8]となると考えている．

謝 辞

はやぶさ地球帰還１周年記念講演会では，川口淳一郎氏，吉川真氏，上坂浩光氏にご講演いただき，講演参加者にはアンケート調査にご協力いただきました．講演者と参加者の皆様にお礼申し上げます．またデータ入力作業では，明星大学教育学部教科専門（理科）コースの鈴木愛理さん，庄司涼君が担当してくれました．キッズはやぶさ教室の開催では，準備と当日の指導を岸茜（川口市立科学館）氏，水上詩乃（たけのこ保育園）氏，西山碧（明星大学教育学部子ども臨床コース）さんにお手伝いいただきました．これらの諸氏に感謝致します．

参考・引用文献

[1] 川口淳一郎，2010，はやぶさ，そうまでして君は，宝島社．
[2] 吉川真，2011，ASTEROID (JSGA) 20(2)，35．
[3] 田部一志，2011，ASTEROID (JSGA) 20(2)，45．
[4] 高橋典嗣 他，2011，日本科学教育学会年会論文集 35，281．
[5] 高橋典嗣，吉川真，2012，スペースガード研究 (JSGA) 4，34．
[6] 高橋典嗣 他，2013，日本天文学会2013年春季年会Y13a．
[7] 高橋典嗣,山田遥子，2014，天文教育（天文教育普及研究会）25，20．
[8] Takahashi，N.，2008，Studies on humanities and social sciences of Chiba University 17，215．

←目次へ

回転ピクセルスワッピング法を使ったクレーター年代学

山本 聡[1]，松永 恒雄[1]，中村 良介[2]，関根 康人[3]，
平田 成[4]，山口 靖[5]

2014年9月17日受領，2014年11月29日受理.

（**要旨**）本論文では，かぐや地形カメラで取得されたデジタル地形モデル（DTM）を使った，回転ピクセルスワッピング法を基にした衝突クレーター自動検出手法の開発を行った．この手法は，DTMから斜面勾配と斜面方位を計算し，それらの空間分布の回転対称性に着目して，クレーター形状を自動検出するものである．大きな特徴としては(1) 欠損クレーターや複数個重なったクレーター集団であっても高い精度で検出できること，(2) ノイズ除去等の前処理が不要であること，(3) 従来のクレーター自動識別法と比べて100倍以上の高速処理が可能であることが挙げられる．また，本手法を月面上の海・高地領域に対して適用し，実際にモデル年代を算出したところ，クレーター手動カウンティングによるモデル年代結果と調和的な結果が得られた．

1. はじめに

衛星データを利用した惑星科学研究の一つに，クレーター年代学が挙げられる．これは画像上の衝突クレーターのサイズ毎の個数分布を測定し，その分布の大小から各表面の年代を推定するものである．一方，最近のリモートセンシング技術の向上により，惑星・衛星探査による大量の画像データの取得が行われている．これらの大量データを基にした，より詳細かつ広範囲の領域に対するクレーター年代学研究を行う上では，衝突クレーターの検出・測定時において，手動カウンティングではなくプログラムによる自動検出手法が重要となる．

これまで，衝突クレーターの自動検出に関する様々な手法が提案されてきた（過去の自動検出研究についての文献は，[1-4]などで引用されているものを見て頂きたい）．一方で，従来の手法は，実際のクレーター年代学への適用に耐える精度がない，または精度検証が十分行われていないものが多い．また処理を行う前に人為作業による様々な前処理を必要とする場合や，処理速度に膨大な時間がかかるといった問題もある．そのため，大量データへの応用という意味では，これらの自動検出手法はまだ実用段階にあるとは言えないのが現状である．実際，過去に行われてきたクレーター年代学を使った月科学研究の多くは，手動カウンティングによるものが主である[5,6].

我々は最近，ピクセルスワッピング法[7]を基にした，新しい円形パターン検出アルゴリズムの開発を行った（回転ピクセルスワッピング法; Rotational Pixel Swapping = RPSWと呼ぶ）[4]．この方法では，従来の自動検出手法で使用されてきたアルゴリズム（例えば，ハフ変換やパターンマッチング法など）とは異なり，円形パターンを検出するにあたって，画像のもつ様々な情報（例えばスペクトル情報，地形情報など）の水平空間方向の回転対称性に着目する．このRPSWの特徴として，様々な構造が複雑に重なっている場合であっても，個別の円形パターンを独立かつ同時に検出できること，ノイズ除去などの前処理が不要であること，また従来の衝突クレーター自動検出手法と比べて，桁違いでの高速処理を行えることが挙げられる[4]．そこで本研究では，RPSWを月周回衛星「かぐや」搭載

1. 国立環境研究所
2. 産業技術総合研究所
3. 東京大学
4. 会津大学
5. 名古屋大学
yamachan@gfd-dennou.org

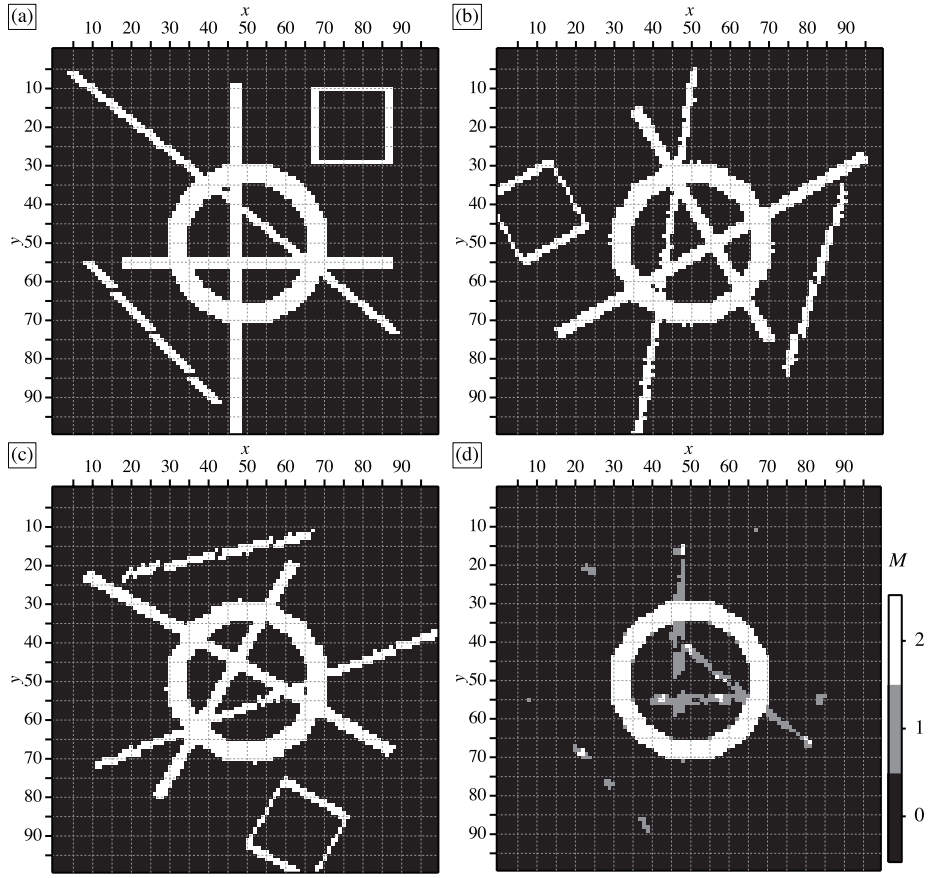

図1：1：(a)白黒画像の人工パターン(画像サイズL×L=100×100ピクセル)．値0を黒，値1を白とした．(b)画像(a)を反時計回りに120度させた画像．(c)画像(a)を反時計回りに240度回転させた画像．(d)画像(a)と(b)の論理積$M_{\phi=120}(x,y)$と(a)と(c)の論理積$M_{\phi=240}(x,y)$を足し合わせた抽出画像．いくつか円形パターン以外のノイズ成分が見られるが，これは回転画像を2枚(N=2)しか使用していないことによる．Nを増加させることで，円形パターンのみをより強調することが出来る．

の地形カメラ(Terrain Camera=TC) [8]で取得された，デジタル地形モデル(Digital Terrain Model=DTM)へ応用し，クレーター年代学を視野に入れた新しい自動クレーター検出手法の開発を行った．

2. 回転ピクセルスワッピング法(RPSW)

まず最初に，RPSWがどのようなアルゴリズムで円形パターンを検出するかについて，図1(a)の白黒画像$A(x, y)$を使って説明する．図1(a)の中には，円形パターンと4本の直線パターンおよび四角パターンが見られる．この画像に対して，画像の中心点(x_n=50, y_n=50)に対して反時計回りに回転角ϕ=120°およびϕ=240°で画像回転処理を行ったものを図1(b)および(c)に示す(それぞれの画像の座標(x, y)の階調値を$B_{x_n, y_n, \phi=120}(x, y)$，$B_{x_n, y_n, \phi=240}(x, y)$とする)．次に$\phi$毎の$M_\phi(x, y) = A(x, y) \cdot B_{x_n, y_n, \phi}(x, y)$を計算し，$M_{\phi=120}(x, y)$と$M_{\phi=240}(x, y)$の足し算を行った結果を図1(d)に示す．図1(d)を見ると，回転対称パターン(Rotational symmetric pattern=RSP)，つまり円形パターンのみが強調され，その他の非回転対称パターン(non-RSP)は強度が弱められたり消去されているのが分かる．このようにRPSWは画像データの持つ回転対称性に着目し，円形パターンを抽出するものである．

図1の例では，予め画像の中心(50, 50)にRSPの中心点(Center of RSP = CRSP)が位置することが分かっていたので，ここを中心に回転処理を行った．一方，画像中のどこにCRSPがあるのかを知るには，次の回転対称性関数$R(x, y)$を用いる．$R(x, y)$は次のように定義される[4]:

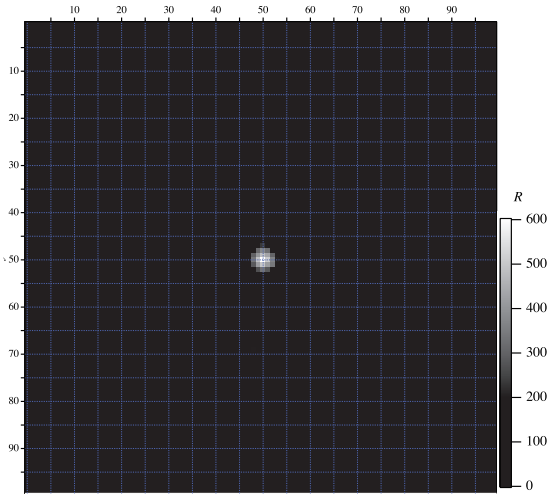

図2：図1(a)に対する回転対称性関数$R(x,y)$．N=2および$\Delta\phi$=120°とした場合．

$$R(x,y)=\sum_{i}\sum_{j}\prod_{k=0}^{N}B_{x,y,\phi=k\cdot\Delta\phi}(i,j) \qquad \cdots\cdots (1)$$

ここで$\Delta\phi$は増分回転角，Nは回転画像の総数である(k=0は元画像に相当する)．ある点(x, y)がCRSPの近傍に位置する場合，R値は大きな値となるが，CRSPから離れている場合はR値は小さくなる．つまりR値の大きさからCRSPの位置を知ることが出来る．図1(a)に対して計算した$R(x, y)$を図2に示す(N=2，$\Delta\phi$=120°とした)．この図において，R値の最大値はR(50, 50)=602であり，図1(a)の円形パターンのCRSPと一致する．また円形パターンが幅を持っていることから，(50, 50)から少し離れた位置であっても，高いR値(R=300～500)を持っている．一方(50, 50)から数ピクセル離れるとR値は急激に減少し，画像のほとんどの場所でR=0となる．

RPSWの実行において，一番計算時間がかかるのがこの$R(x, y)$の計算である．そこでRPSWでは，計算時間の短縮のために，いくつか工夫を行う．まず，回転画像の計算においては，各点(x, y)に対して個別に$B_{\phi}(x, y)$を作成しない．代わりに予め$A(x, y)$の中心(図1の例では(50,50))で$\Delta\phi$ずつ回転させたN個の回転画像を作成し，実際の計算においてはそれぞれR値を求めたい場所(x, y)へ画像を水平移動させる．またR値の計算も以下の限られた範囲(i, j)のみ行うとする：

$$l_{\min}<\sqrt{(i-x)^2+(j-y)^2}<l_{\max} \qquad \cdots\cdots (2)$$

ここで$l_{\min}$および$l_{\max}$を局所RPSW最小半径および最大半径と呼ぶ．$l_{\min}$と$l_{\max}$の導入は，計算時間の短縮だけが目的ではなく，探したい円形パターンのサイズを限定する目的としても用いられる(次章ではこれを使って，検出するサイズ範囲を複数に分けた多段階処理を行っている)．さらに，$R(x, y)$の計算において，全てのピクセルについて計算するのではなく，sピクセルごとに計算を行うことで，計算時間の短縮を行う(sを捜索ステップと呼ぶ)．例えば，s=1の場合は全画素を計算するが，s=2では一つおきに計算する．

回転角によっては，$B_{\phi}(x, y)$の多くのピクセルが$A(x, y)$の外側に対応する場合が生じる．この場合，$A(x, y)$の外の領域は値を全て0として演算する．なお，Nを大きく設定すると計算時間が長くなるが，その代わり回転対称性の高いものだけを選別抽出する．逆にNを小さくすると計算時間が短くなる分，回転対称性が低いものも同時に検出される可能性が高くなる(つまり，楕円形状のものや欠損円などを検出したい場合は，Nを小さくしておくことで対応できる)．

次に，計算された$R(x, y)$からCRSPの位置についてリストアップを行う．複数のCRSPを同時検出するために，まず最初に$R(x, y)$の中の最大値$R_{\max}$を探し出し，R値が$f\cdot R_{\max}$以上のものを全てCRSPとして検出する(fは0～1の範囲で与えられる閾値分率)．

以上がRPSWによる円形パターン検出のアルゴリズムである．RPSWで使用される変数を表1にまとめた．その他のRPSWに関する細かい計算手法の説明や，パラメータに対する挙動については[4]で詳しく議論されているので，興味ある読者の方々にはそちらを見てもらいたい．

ところで，自動検出した結果を使ってクレーター年代学を行うには，検出されたCRSPに対してRSPの大きさ(つまりクレーター径)を決定する必要がある．し

表1：RPSWで使用されるパラメータ[4].

変　数	定　義
Nと$\Delta\phi$	回転画像の総数と増分回転角
$l_{\max}$と$l_{\min}$	局所 RPSW 最大半径と最小半径
s	捜索ステップ
f	閾値分率

かし，[4]ではRSPの二値化画像を抽出することに主眼が置かれており，RSPのサイズ決定までは行っていない．RSPのサイズを測定するには，例えば各CRSPの近傍に対してハフ変換[9]を適用しRSPの半径決定を行うなどが考えられる[4]．一方，本研究ではDTMデータの高度および斜面勾配を使って，クレーターのリム径を直接測定する方法を用いた(次章で具体的に説明を行う)．

3. RPSWのDTMへの応用：DTMを使ったクレーター自動検出

上で紹介したRPSWでは，二値化データにおける円形パターンの回転対称性に着目した方法であった．一方次の方法では，DTMデータの斜面勾配分布の回転対称性に着目して，クレーター検出を行う．以下ではこの手法をRPSD法(RPSW for DTM)と呼ぶ．

3.1　基本概念

これまでもDTMデータを使ったクレーター検出手法は提案されてきた．例えば，[2,3]ではDTMデータからエッジ検出などいくつかの前処理を行い，DTMの持つ3次元情報データを一旦2次元データの白黒画像に変換し，その画像に対してハフ変換を適用することでクレーターを検出する．一方，ここで提案するRPSD法では，DTMデータの持つ高度および斜面勾配の情報そのものから直接クレーター検出を行う．

RPSD法の具体的な説明を行う前に，まず最初に基本概念について説明する．ちょっとばかり想像していただきたい．あなたは今おわん型のクレーターの中央にまっすぐに立って，ある水平方向を観測しているとする(クレーターの直径や深さは観測者より十分大きいとする)．今観測者の視線方向には，斜面勾配が10°～40°くらいのクレーター内壁が位置すると考えられる．また，その斜面のなす法線ベクトルの水平成分の方位角(斜面方位と呼ぶ)は，クレーターの中心つまり，観測者の方向を向いていると予想される．さて，今観測者が右に90°回ったとする．その場合，観測されるクレーター内壁の斜面勾配と斜面方位は，最初に観測したものと同じであることが予想される．つまり90°の回転に対して斜面勾配と斜面方位は「回転対称性」を示す，と考えることが出来る．このことは回転角度や回転方向(時計回りか反時計回り)によらずで成り立つであろう．逆にいうと，任意角度の回転を行った時に，斜面勾配と斜面方位の「回転対称性」が観測された時，観測者の立っている場所がクレーターの中心に位置していると予想することができる．一方，実際のクレーター形状は完全なおわん型ではなく，また局所的には斜面が凸凹している可能性もある．そこで，斜面勾配と斜面方位の対称性に対して，ある程度の「遊び」を許容する．その代わり複数の回転角に対して対称性を同時に調べ，クレーターの壁面のうちどれくらいの領域が「回転対称性をもっているか」を調べることで，「回転対称性の度合い」を定量化する．この回転対称性の度合いが高い場所を探し出すことで，クレーターを見つけ出そうというのがRPSD法の基本概念である．

3.2　RPSD法の定式化

上で説明した概念を定式化してみよう．まず，大きさ$L \times L$のDTMデータ$T(x, y)$を使って，斜面勾配マップ$S_0(x, y)$と斜面方位マップ$F_0(x, y)$を計算する．これらの計算においては微分フィルタの一つであるSobelフィルターを用いた:

$$S_x = \frac{T(x+1,y-1)+2T(x+1,y)+T(x+1,y+1)}{8} - \frac{T(x-1,y-1)+2T(x-1,y)+T(x-1,y+1)}{8} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$S_y = \frac{T(x-1,y+1)+2T(x,y+1)+T(x+1,y+1)}{8} - \frac{T(x-1,y-1)+2T(x,y-1)+T(x+1,y-1)}{8} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$S_0(x,y) = \arctan\sqrt{S_x^2+S_y^2} \quad \cdots\cdots (5)$$

$$F_0(x,y) = \begin{cases} \arctan\dfrac{S_y}{S_x} & (S_x > 0) \\ \operatorname{sgn} S_y \cdot \left(\pi - \arctan\left|\dfrac{S_y}{S_x}\right|\right) & (S_x < 0) \\ \operatorname{sgn} S_y \cdot \dfrac{\pi}{2} & (S_x = 0) \end{cases} \quad \cdots (6)$$

次に，$S_0(x, y)$と$F_0(x, y)$について，ある点(x_n, y_n)を中心としてϕだけ回転した画像をそれぞれ$S_{x_n,y_n,\phi}(x, y)$，$F_{x_n,y_n,\phi}(x, y)$とする(回転処理の手順などは2章で述べたRPSWと同じである)．これらの画像を使って，次の抽出マップ$H_{x_n,y_n}(x, y)$を計算する：

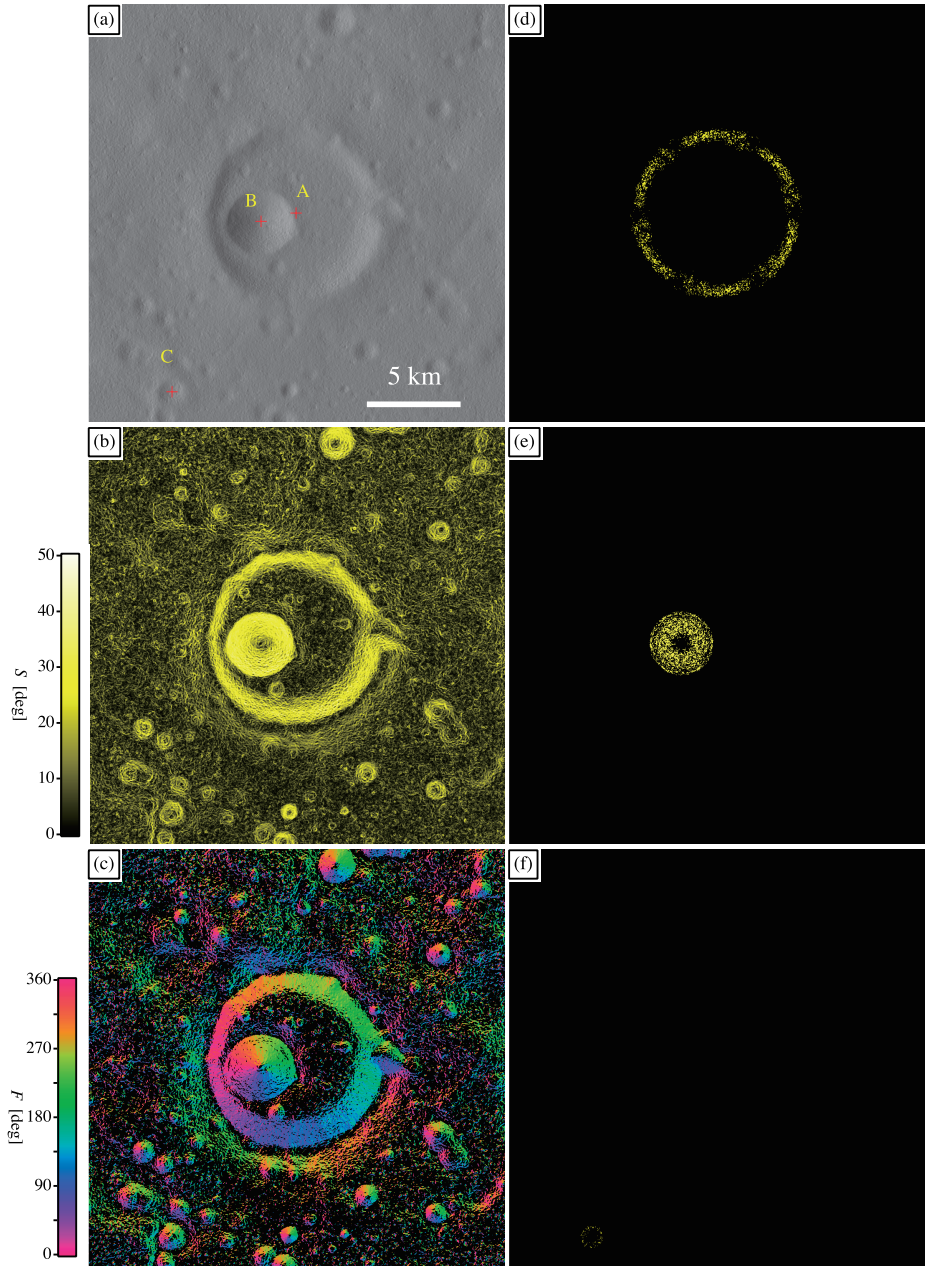

図3：(a)DTMデータを基にした形状イメージ．(b)斜面勾配マップ$S_o(x,y)$．(c)斜面勾配がθ_L=10°～ θ_U=33°にあるものについて傾斜方位マップ$F_o(x,y)$を色分けしたもの．斜面方位は図の右方向を0度とし反時計回りで定義(大雑把に，赤，青，緑，黄がそれぞれ画像上の右，上，左，下向きに対応)．黒色は斜面勾配が対象外の領域(つまり$U(x,y)$=0)．(d)(a)のA点を中心として計算した抽出マップ$H(x,y)$．ω=30°，$\Delta\phi$=60°およびN=5とした．$H(x,y)$の値1を黄，値 0 を黒で示している．(e)B点で$H(x,y)$を計算した場合．(f)C点で$H(x,y)$を計算した場合．

$$H_{x_n,y_n}(x,y)=\prod_{k=0}^{N}U_{x_n,y_n,\phi=k\cdot\Delta\phi}(x,y)\cdot V_{x_n,y_n,\phi=k\cdot\Delta\phi}(x,y) \quad \cdots (7)$$

$$U_{x_n,y_n,\phi}(x,y)=\begin{cases}1 & (\theta_L\le S_{x_n,y_n,\phi}(x,y)\le\theta_U)\\ 0 & (S_{x_n,y_n,\phi}(x,y)<\theta_L\vee S_{x_n,y_n,\phi}(x,y)>\theta_U)\end{cases} \quad (8)$$

$$V_{x_n,y_n,\phi}(x,y)=\begin{cases}1 & (\left|F_o(x,y)-F_{x_n,y_n,\phi}(x,y)\right|\le\omega)\\ 0 & (\left|F_o(x,y)-F_{x_n,y_n,\phi}(x,y)\right|>\omega)\end{cases} \quad \cdots\cdots (9)$$

$U_{x_n,y_n,\phi}(\boldsymbol{x,y})$は$S_{x_n,y_n,\phi}(\boldsymbol{x,y})$から，斜面勾配が$\theta_L$～$\theta_U$の範囲にあるピクセルだけを抽出したものであり，$V_{x_n,y_n,\phi}(\boldsymbol{x,y})$は斜面方位について回転角$\phi$に対して回転対称となっているピクセルだけを抽出したものである（ωは斜面方位に対する遊び角．つまり，この範囲内の角度差は同じとみなす閾値）．$H_{x_n,y_n}(\boldsymbol{x,y})$は，RPSWで言えば図1(d)に相当し，斜面勾配がθ_Lからθ_Uにあり，かつ斜面方位がN個の回転角に対して回転対称条件を満たすピクセルだけを抽出したマップである．

図3(a)にDTMデータによる地形マップの例を示す．中央に直径7 km程度のクレーターがあり，そのクレーターの内部や周辺には2～3 km以下の多数のクレーターが分布している．図3(b)は図3(a)から求めた$S_o(\boldsymbol{x,y})$である．さらに図3(c)は$S_o(\boldsymbol{x,y})$の値がθ_L=10°からθ_U=33°にあるピクセルに対して，$F_o(\boldsymbol{x,y})$の値ごとに色分けをしたものである（大雑把に言うと，赤，青，緑，黄がそれぞれ画像上の右，上，左，下向きに対応．また斜面勾配がθ_Lとθ_Uの範囲外のピクセルは黒色とした）．この図より，クレーターの内壁部分に対応する部分において，赤→青→緑→黄と一定の周期変化のパターンを示すことがわかる．本手法では，この一定周期変化パターンの回転対称性に着目する．

図3(d)は，図3(a)のA点を中心にして$H(\boldsymbol{x,y})$を計算した結果である（ω=30°，$\Delta\phi$=60°およびN=5）．この図より図3(a)で見られる最大クレーターの内壁部分に対応する部分のみが抽出されているのがわかる．一方，周辺にあった小さなクレーター構造はいずれも消えている（H値は0）．また，別の位置（例えばB点やC点）で$H(\boldsymbol{x,y})$を計算すると，図1(d)で検出されていたパターンが消え，B点やC点に位置するクレーターの壁面のみが検出されている（図3(e)および図3(f)）．このように各クレーターの中心で$H(\boldsymbol{x,y})$の計算を行うと，そこを中心とするクレーターの壁面部分のみが検出される．

ここで強調しておきたいのは，図3(d)～(f)の$H(\boldsymbol{x,y})$の計算の前後において，ノイズ除去処理など特別な処理を行っていないことである．それにも関わらず，各抽出マップにおいてA，B，C点を中心としたクレーターの内壁だけが抽出され，他の構造やノイズなどは全て除去されている．他の構造（ノイズ成分）は，式(7)－(9)の演算においては非回転対称とみなされ，H値が0となってしまうからである．このように，大小様々なサイズのクレーターが多数分布し，またノイズ成分が複雑に重なっている場合であっても，なんら特別な処理を必要とせず，対象クレーターだけを個別に分離して検出することが可能である．

画像のどこにクレーター中心があるかについて調べるために，各$(\boldsymbol{x,y})$について次の回転対称性関数$R(\boldsymbol{x,y})$を計算する：

$$R(x,y)=\sum_i\sum_j H_{x,y}(i,j) \quad \cdots\cdots (10)$$

この$R(\boldsymbol{x,y})$の計算においても，RPSWの処理方法と同様に，s，l_{min}およびl_{max}を使用することで計算時間の短縮をはかる．また，全ての画素値に対して$R(\boldsymbol{x,y})$を計算した後は，R値の高いものから閾値分率fを使ってCRSPをリストアップする．

なおこの方法では，クレーター（凹構造）だけでなく丘や山（凸構造）も検出する可能性があるが，斜面方位と中心点の関係から排除することできる．ただし，今回は$R(\boldsymbol{x,y})$の計算段階で凹構造と凸構造を区分せず，次章のクレーター径を決定する段階で排除するということにした．これは$R(\boldsymbol{x,y})$の計算後に判別するほうが計算時間の節約になるからである．

3.3　クレーター径の決定

次に，各CRSPに対してクレーター径を求めるために，DTMデータを使って，以下のようにクレーターリムの位置決めを行った．まずCRSPからある同径方向への高度プロファイル$P(n)$を求める（nはCRSPからのピクセル数）．そして$P(n+1)$と$P(n-1)$の差分から斜面勾配プロファイル$Q(n)$を計算する．次に，ノイズの影響を低減するために，$P(n)$と$Q(n)$についてそれぞれ前後1ピクセルの範囲（つまり合計3ピクセ

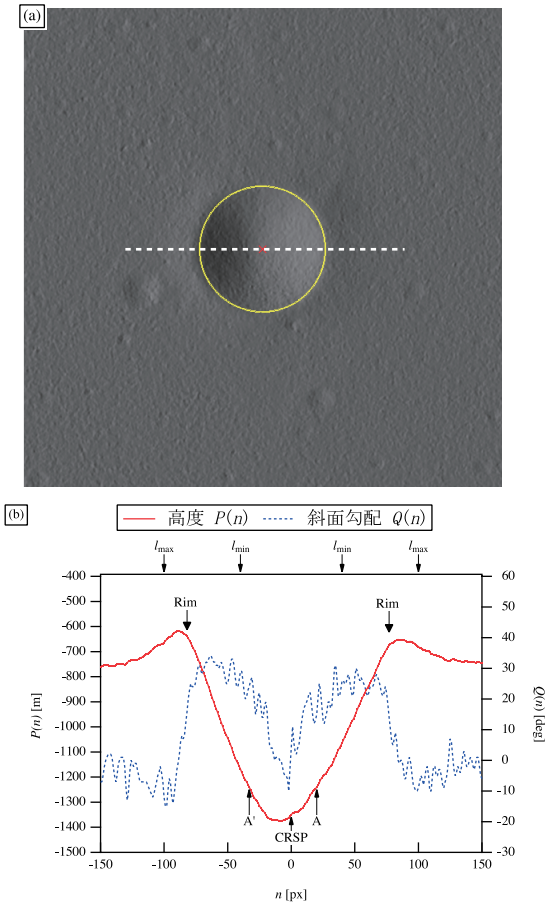

図4：(a)DTMデータを基にした形状イメージ．*x*印がCRSP．黄色丸が決定されたリム径．(b)(a)の白点線に沿った高度*P*(*n*)(赤実線)と斜面勾配*Q*(*n*)(青点線)．CRSP，リムと判定された場所(Rim)およびP_{min}に相当する場所(AとA')を矢印で示す．また，この例で使用したl_{max}，l_{min}に相当するCRSPからの位置を上軸に示した．この例でのQ_{max}は34°(*n*が負の領域)および31°(*n*が正の領域)であった．

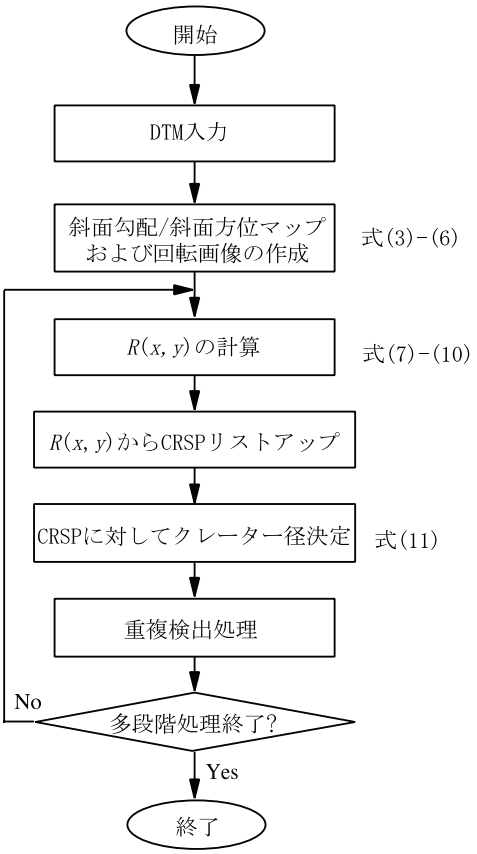

図5：RPSD法のフローチャート．

ル)で移動平均をとった．$P(n)$と$Q(n)$についての例を図4に示す．図4(b)のn=0がCRSPに相当するが，この例で示されているように，必ずしも高度の一番深い位置がCRSPとなるわけではない．この図の$Q(n)$を見ると，クレーター内壁部分では斜面勾配が約20°以上になっているが，リム付近で0°付近まで急激に減少する．本手法では，この斜面勾配が激減する場所をリムと定義する．

まず最初に，n>0方向においてCRSPからDTM上での実距離がl_{min}に相当する位置を計算し，そこでの斜面勾配$Q(n)$を最大斜面勾配Q_{max}とする．そこからnを順次増加させ，その過程で$Q(n)>Q_{max}$となったら$Q_{max}=Q(n)$とする．このQ_{max}を使って次の両条件を満たすまでnを増加させる：

$$P(n) > P(n=0) + P_{min}$$
$$Q(n) < Q_{max} - \sigma \ \vee \ Q(n) < 0 \qquad \cdots\cdots (11)$$

ここでσは斜面勾配閾値，P_{min}は最小深さ閾値である．つまり，CRSPの高度からP_{min}より高く，なおかつクレーター壁面の最大勾配Q_{max}からσだけ勾配が緩くなる，または$Q(n)$<0°になる最初の場所をリムとみなす．nの負側についても，CRSPからnを減少させな

がら同様の計算を行う．σの値は，典型的安息角の半分程度と仮定しσ=15°とした（σ=30°とした場合でも，次章で議論するクレーター年代学の結果に大きな影響を与えない．σを大きくした場合でも$Q(n)$<0°の条件を満たせばリムと判断されるため，大抵の場合リム径に大きな差が生じないからである．またσの違いによっていくつかのクレーターのリム径が変わった場合であっても，クレーター年代学は統計的処理に基づいているため，年代決定への影響が小さいからである）．最小深さについては$P_{\min}=0.05\cdot l_{\max}$と仮定した．リムを探す為のプロファイルの捜索方向については，処理時間の短縮化を重視してx方向およびy方向の二方向のみとし，それぞれ4箇所で決定されたリムのCRSPからの平均距離をクレーター半径とした．図4(a)の黄線がこの方法で決定されたリム径である．なおプロファイルの端（例えば1.5·$l_{\max}$に相当する位置）に至っても，式(11)の条件を満たさない場合はそのCRSPをクレーター候補リストから除外するとした（これにより凸構造は排除される）．

ところでRPSD法では，一つのクレーター地形に対して複数のCRSPが検出される（図2で見たように，高いR値を持つ領域はある程度広がった分布を示す）．この重複検出を防ぐために，R値の高い順に各CRSPに対するクレーター径の決定を行い，そのリム半径の内側に既にクレーター径が決定されたCRSPが存在する場合は重複検出とみなし，後から検出されたCRSPを候補リストから削除するとした（この手法を重複検出処理と呼ぶ）．

3.4　多段階処理による高速化

様々なs，$l_{\max}$と$l_{\min}$を組み合わせ，RPSD法の処理を多段階のスケールに分けることで，処理の高速化を行える．以下に例を示そう．$L\times L$=1000×1000ピクセルのDTMデータに対して，一回の処理で半径1～200ピクセルのクレーターを検出する場合，s=1，$l_{\max}$=200，$l_{\min}$=0の条件における計算時間T_0は

$$T_0=T_{\mathrm{all}}\left(\frac{l_{\max}}{sL}\right)^2=\frac{T_{\mathrm{all}}}{25} \qquad \cdots\cdots\cdots (12)$$

となる．ここでT_{all}は$l_{\max}$=L，$l_{\min}$=0，s=1として処理した場合にかかる計算時間である．一方，ある程度大きなサイズを検出する場合，sはある程度大きくても構わない．というのは[4]では，RPSWを使って円環パターンを検出する場合，sが円環の幅に相当するピクセル以下であれば，sによらず円環パターンを検出できることが示されている．このことから，例えば検出したい最大クレーターサイズの1/10程度の大きさのsを使って，クレーターの中心の位置を大雑把に捉え，その後のリム径決定時の段階で改めて正確なクレーター中心を推定すればよいわけである．この場合大幅な時間短縮を図ることが出来る．例えば，s=10，$l_{\max}$=200，$l_{\min}$=20で処理を行うと，計算時間T_1は

$$T_1=T_{\mathrm{all}}\frac{l_{\max}^2-l_{\min}^2}{(sL)^2}\approx\frac{T_{\mathrm{all}}}{2500} \qquad \cdots\cdots\cdots (13)$$

となり，T_0の約1/100で済む．一方，小さな構造を検出する場合はsを細かくする必要があるが，この場合は$l_{\max}$を小さくすることができるため計算時間が短くなる．例えば，s=1，$l_{\max}$=20，$l_{\min}$=0 とすれば計算時間T_2は

$$T_2=T_{\mathrm{all}}\left(\frac{l_{\max}}{sL}\right)^2=\frac{T_{\mathrm{all}}}{2500} \qquad \cdots\cdots\cdots (14)$$

となり，T_0の1/100で済む計算となる．つまり，2段階に分けて処理を行うと，全計算時間は$T_1+T_2=T_{\mathrm{all}}/1250$となり，正味の計算時間は$T_0$と比べて1/50になる．このように複数に分けて処理（多段階処理）を行うことで，大幅な計算時間の短縮が可能となる．次章の計算では，3段階の処理を行っている．なお，多段階処理では，同一クレーターが異なる段階で複数検出される可能性があるが，リム決定時の重複検出処理の段階で排除されるので問題ない（ただし，多段階処理自体を大きなスケールから小さいスケールの流れで行うという制約条件が付加される）．

3.5　RPSD法のまとめ

以上3.2～3.4章までの処理がRPSD法のアルゴリズムの流れである．図5にRPSD法のフローチャートを示す．ここで再び強調しておきたいのは，このアルゴリズムにおいては，従来の円検出手法で用いられてきた前処理および後処理（ノイズ処理，細線化処理など[2,3]）が一切使用されていないことである．

図3(a)に対してRPSD法を適用した例を図6に示す．この図より，大小様々なサイズのクレーターを同時検

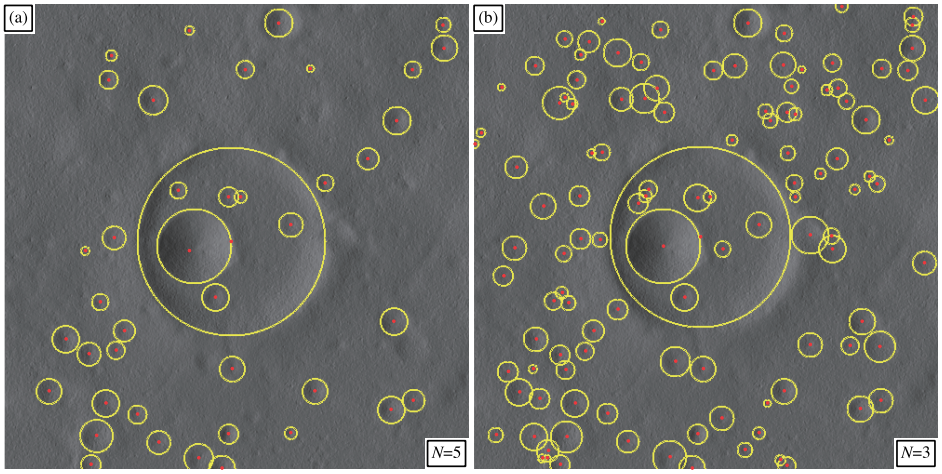

図6：図3(a)に対してRPSD 法を適用した例．CRSPを赤点，検出リムを黄色丸で示す．(a)N=5($\Delta\phi$=60°)の条件の検出結果．全部で42クレーターを検出．(b)N=3($\Delta\phi$=90°)の条件の検出結果．117クレーターを検出．Nを小さくすると回転対称性の厳密性が下がるため，より多くの(ただし不規則形状の)凹み構造がクレーターとして検出される．

出しているのがわかる．一方で，N=5の場合(図6(a))，幾つかの凹み構造が検出されていない．これは，これらの形状が不規則であることからN=5の条件では回転対称とみなされなかったことによる．実際，回転対称性の条件を緩めると，これらの凹み構造が検出される(例えば図6(b)のN=3の場合)．つまりNを小さくすると回転対称性の厳密性が下がるため，より多くの(ただし不規則形状の)凹み構造がクレーターとして検出される．このように，RPSD法では，どの程度の形状までを対象クレーターとみなすかを，N値を使って定量的にコントロールすることが可能である．

4. 結果：クレーター年代学への応用

4.1 海領域への応用例

諸田ら[5,6]は，TCの画像データを使って，手動カウンティングから月の様々な領域に対してモデル年代決定を行っている．そこで，同領域に対してRPSD法を適用し，それを基にしたモデル年代の結果と[5,6]の手動カウンティングの結果の比較を行う．まずターゲット領域として雨の海の西部にある溶岩流ユニット

表2：図7および図8で使用したパラメータ．

		図 7			図 8		
処理段階		1	2	3	1	2	3
対象勾配範囲 θ_L, θ_U		10°～33°			10°～33°		
$N(\Delta\phi)$		5 (60°)			5 (60°)		
ω		30°			30°		
局所 RPSW 半径	l_{max}	80	40	20	200	60	25
[ピクセル]	l_{min}	40	20	1	60	25	1
s [ピクセル]		10	4	2	10	4	3
f		0.01			0.01		

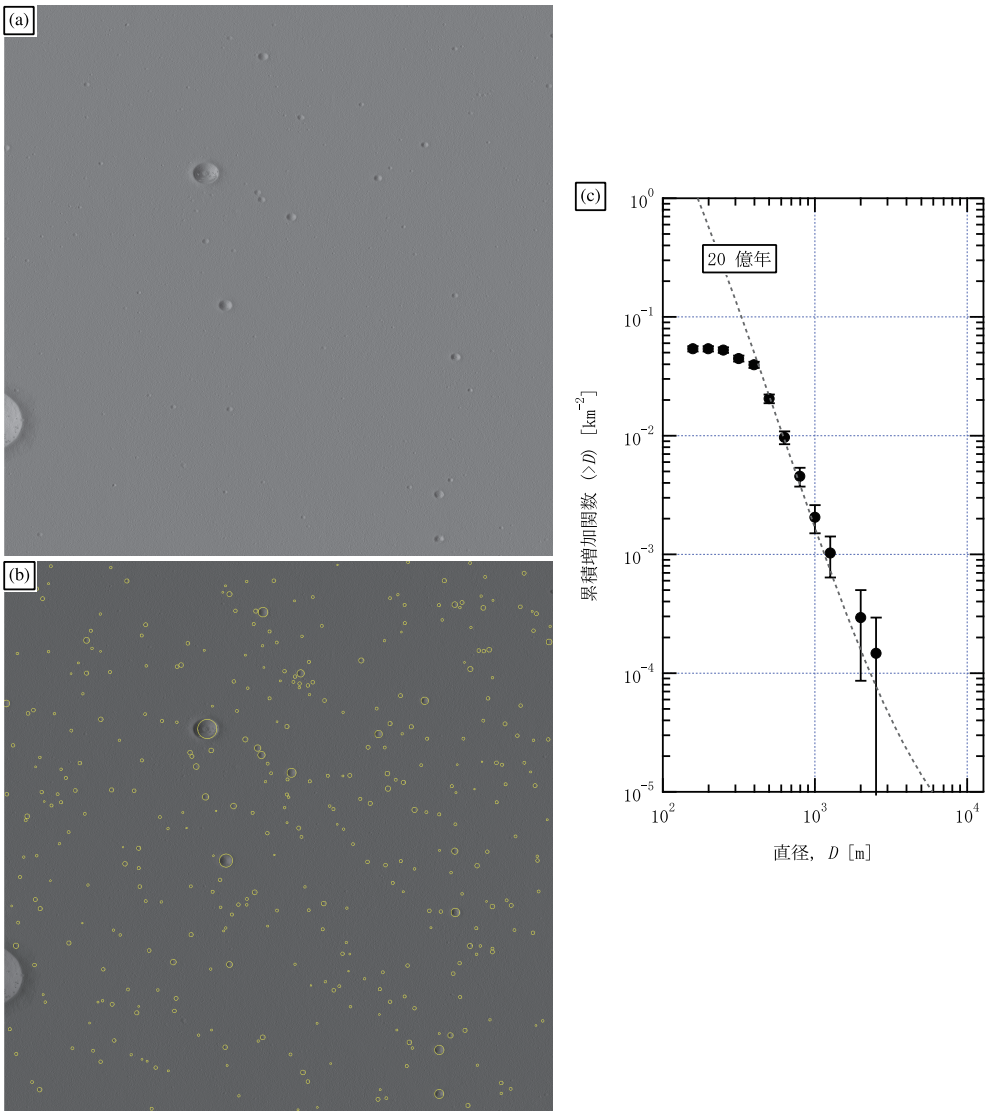

図7：(a)雨の海西部の溶岩流に対するDTM画像(DTM_MAP_02_N36E336N33E339SC.dtm;[5,6]のunit I28に相当)．(b)RPSD法を適用した結果．(c)クレーターサイズ分布．また20億年でのモデル年代([6]のModel Aによる場合)を破線で示している．

([5]の図2)のDTMデータを使用する(図7(a))．JAXAで公開されているDTMデータは1画像あたり$L \times L$=12,288 × 12,288ピクセル(月面上で約3°×3°に相当)であるが，今回RPSD法を適用するに当たって，$L \times L$=4,096 × 4,096ピクセルにリサンプリングしたもの使う(空間分解能で22 m/ピクセルに相当)．RPSD法で使用したパラメータを表2にまとめた．またモデル年代の推定を行う際に使用するクレーター年代学のモデルおよびパラメータは[6]のModel Aに準ずるとした．なお，[5,6]では二次クレーターと思われる物について目視判断で排除を行っているが，ここでは二次クレーターを除くということは行っていない(二次クレーター問題については5章で述べる)．一方で，今回のRPSD法では比較的回転対称性の厳密性が高い条件(N=5)で処理を行っているので，ある程度不規則形状は排除されると考えられる．

図7(b)にRPSD法による検出結果を示す．この図では369個のクレーターが検出されている(黄色丸が

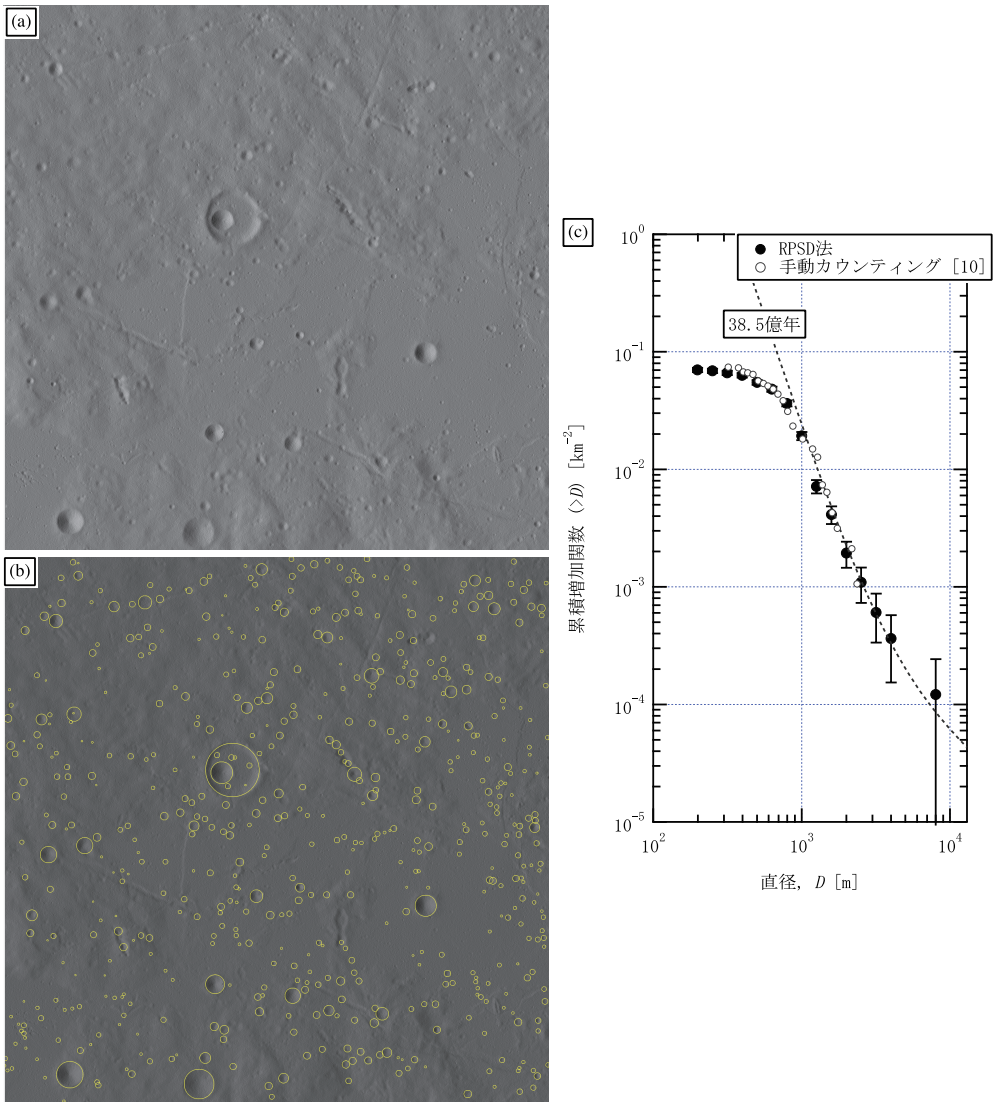

図8：(a)熱の入江の高地領域に対するDTM 画像(DTM_MAP_02_N06E351N03E354SC.dtm)．(b)RPSD法を適用した結果．(c)クレーターサイズ分布．比較のために手動カウンティングによる結果[10]も示した．38.5億年によるモデル年代([6]のModel Aによる場合)を破線で示している．

検出されたクレーターリム)．概ね，画像から識別できるクレーターはほぼ網羅しているようにみえる．図7(c)に369個のクレーターのサイズ分布を示す．この図をみると約300 m以下のサイズで分布の折れ曲がりが観測される．これはRPSD法による検出限界に起因すると考えられる．一方，TCの画像を使った手動カウンティング[5,6]の結果においては，この折れ曲がりはもう少し小さいサイズ(～200 m)で起こっている．つまりRPSD法による識別限界サイズは，手動カウンティングによる解析と比べて若干大きい．画像を使った識別では，識別限界は水平方向の空間分解能だけに依存する．一方RPSD法はクレーター内壁の斜面を利用しているため，ある程度深さ方向の変化が必要である．そのため，画像認識による水平方向の識別限界よりもある程度大きなサイズでなければ，回転対称性を識別できなかったと考えられる．

一方で，図7(c)の折れ曲がりより大きなサイズ領域に対して，モデル年代を求めると20.4億年となった．

この結果は，手動カウンティングによる[5,6]の結果（20.1億年）と概ねよい一致を示すものである．つまり，折れ曲がりが起こるサイズよりも大きなクレーターであれば，RPSD法で得られるモデル年代は，手動カウンティングによる結果と調和的であるということが分かった．

4.2 高地領域への応用例

次に高地領域への適用を行った．[10]では熱の入江の高地領域に分布する鉄/クロムに富むスピネルを含む火砕堆積物の解明研究が行われているが，その中で高地領域に対して手動カウンティングによるモデル年代決定が行われている．そこでこの領域を含むDTMデータを使って，RPSD法からクレーター自動検出を試みた．結果を図8に示す．図8(b)では，578個のクレーターが検出されている．この領域はクレーター形状以外に不規則な谷や山構造などが見られるが，クレーターと誤判断されることなく，クレーター形状のものだけをうまく検出できている．図8(c)に578個のクレーターのサイズ分布を示す．また，比較のために，手動カウンティングによって求められたクレーターのサイズ分布[10]についても示した．両者は完全に同じ場所に対してカウンティングを行ったものではないが，手動カウンティングによる結果とRPSD法による結果は，概ね誤差の範囲内で一致する．またRPSD法の結果に対してモデル年代を求めたところ，38.1億年であった．一方[10]による高地領域に対するモデル年代は38.5億年であった．つまり，RPSD法の結果は手動カウンティングによる結果と調和的である．なお，この熱の入江の高地領域は雨の海盆地形成に伴う放出堆積物起源であると考えられているが[10]，38.1億年という結果は雨の海盆地の形成年代の推定値（38.5億年[11]）ともよい一致を示すものである．

4.3 処理時間について

上記の例における計算時間は図7で320秒，図8で352秒であった（計算環境はMac OS X 10.9，2.93-GHz 6-Core Intel Xenon，C++プログラム Xcode version 5.0.2）．これと同条件で，月面の緯度±60度内の全領域に対するDTMデータに適用したとすると，総計算時間は約18日および20日と見積もられる．一方，[2]で提案されているハフ変換を使った，DTMデータからのクレーター検出手法の場合，同条件における総計算時間は27年と見積もられている．このことから，RPSD法は従来の手法と比べて，約500～600倍程速い．

この計算時間の差はどの効果によるものかを知るために，以下の様に特徴的時間の見積もりを行った．まず画素点数$m=L\times L$の画像に対して本手法を適用する場合，$m^2\cdot N$に比例した計算時間が必要である（厳密にいえば，計算時間は$m^2\cdot N$に対する単純な比例関係ではないが，ここではオーダ見積りとして比例関係を仮定した）．一方，RPSDで導入されている高速パラメータである，s，$l_{\max}$，$l_{\min}$を使った場合の特徴的時間T_{rpsd}は

$$T_{\mathrm{rpsd}}\propto m\left(\frac{l_{\max}}{L}\right)^2\cdot m\left(\frac{1}{s}\right)^2\cdot N=m\left(\frac{l_{\max}}{s}\right)^2\cdot N \quad \cdots (15)$$

となる（$l_{\min}=0$とした）．一方，ハフ変換[9]の場合，各画素点それぞれに対して位相空間上への変換が必要であるため，計算時間はm^2に比例する．ただし値を持たない画素については位相空間上への変換を行う必要が無いため，例えば値がゼロでない点（ノイズも含む）がm/βピクセル程度しかない場合，特徴的時間T_{hough}は

$$T_{\mathrm{hough}}\propto\frac{m^2}{\beta} \quad \cdots\cdots (16)$$

となる．式(15)と式(16)より，特徴的時間の比ηは

$$\eta=\frac{T_{\mathrm{rpsd}}}{T_{\mathrm{hough}}}\propto\frac{\beta N}{m}\left(\frac{l_{\max}}{s}\right)^2 \quad \cdots\cdots (17)$$

となる．例えば$\beta=100$を仮定し，$m=4096\times4096$，$l_{\max}=20$，$s=1$，$N=5$の場合は$\eta\sim0.01$となり，これはRPSD法の方が二桁程度速いことを意味する．重要なポイントは，本手法では高速パラメータを導入したことによりT_{rpsd}はmに比例するのに対して，T_{hough}はmの二乗に比例することである．そのため，取り扱う画像サイズmが大きくなればなるほどηがさらに小さくなる．つまり，従来の方法と比べて桁違いでの高速処理を可能としているのは，高速パラメータ変数によるところが大きいと考えられる．

5. まとめと今後の展開

本研究ではDTMデータを使ったRPSD法により，クレーター自動検出およびクレーター年代学の自動化プログラムの開発を行った．また月面上の海および高地領域に対して適用したところ，自動検出によるモデル年代の結果は，手動カウンティングによる結果と調和的であることが示された．

RPSD法の大きな利点を3つ上げると以下である．

(1) 回転対称性に着目した手法により，欠損クレーターや複数個重なったクレーター集団であっても高い精度で検出ができること．

(2) この手法を適用するに際して，ノイズ除去，細線化処理などの特別な前処理を必要とせず，直接DTMデータを使って処理が出来ること．

(3) 従来の自動検出手法と比べて数100倍以上の高速処理が可能であること．

また，従来行われてきた手動カウンティングでは，検出結果が作業者の熟練度に依存するという問題があった[1]．一方RPSD法では，使用されるパラメータを使って，検出条件を全て定量化できる．つまり，RPSD法は，クレーター年代学使った惑星科学研究の再現性の検証においても重要になると期待される．

一方，いくつか改善されなければならない問題もある．一番大きな問題は，やはり二次クレーター問題をどうするかである．二次クレーターとは，大きな衝突クレーターが形成された時の放出物が地表面へ再落下することで形成される付随的な衝突クレーターであり，クレーター年代測定の解析においてはカウント対象から外す必要がある[12]．手動カウンティングにおいては，連なったクレーター構造や不規則形状のクレーターを二次クレーターとして目視判別する方法が用いられている[5,6]．一方，全自動化を考える場合は，最初にRPSD法を使って二次クレーターも含む全クレーター候補を検出し，定量化された数値データに対して，これまで行われきた二次クレーター自動判別手法(例えば，階層凝縮型クラスタリングやボロノイ図を利用した手法[13])を適用するといったことが一つの解決策になるかもしれない．

また極域などのようにマッチングの精度が悪い，または影領域でマッチングが行なえないなどの理由で，DTMの品質がよくない(有効な標高値を得ることができない領域が広い)場合は，RPSD法による検知精度が落ちる可能性もあるので注意が必要である．極域への取り扱いや，二次クレーター問題への対処も含め，今後さらなる改良を進めていくつもりである．最後に，このプログラムのソースコードは，関連するコミュニティーに向けて公開する予定である．

参考文献

[1] 沢辺頼子ら, 2004, 遊星人 13, 87.
[2] 原田直人ら, 2008, 遊星人 17, 69.
[3] Salamuniccar, G. and Loncaric, S. 2010, IEEE TGRS 48, 5, 2317.
[4] Yamamoto, S. et al., 2015, IEEE TGRS 53, 2, 710.
[5] 諸田智克, 2011, 遊星人 20, 324.
[6] Morota, T. et al., 2011, EPSL 302, 255.
[7] Iisaka, J. and Sakurai-Amano, T. 2000, in The Proc. Asian Conf. Remote Sens., Singapore, Paper OMPOO-13.
[8] Haruyama, J. et al., 2008, EPS 60, 243.
[9] Hough P. V. C., Patent 3069654, Dec. 18, 1962.
[10] 山本聡ら, 2013, 遊星人 22,186.
[11] Stoffler, D. et al., 2006, in New Views of the Moon (eds Jolliff, B.L. et al.), 60, 519 (Themineralogical Society of America).
[12] Melosh, H. J., 1989, Impact cratering (New York: Oxford Univ.).
[13] 木下達生ら, 2013, 日本惑星科学会 秋季講演会予稿集, O11-12.

←目次へ

高速度衝突現象と水谷スケーリング

岡本 尚也[1]，水谷 仁[2]

2014年12月4日受領，2015年1月20日受理.

（**要旨**）本稿は著者の1人（水谷）が2013年フロンティアセミナーで行った高速度衝突現象と水谷スケーリングについての講義を岡本がまとめたものである．講義は水谷自身の研究を振り返り当時の状況を交え，クレーターの科学がどのように歩んできたのかを語ったものである．ここで記述することは20年以上前の研究であることに注意する必要があるが，水谷がクレーター研究を行ったきっかけ，衝突物理，衝突破壊の水谷スケーリングについて，本人がどのように考えてきたかという思考プロセスに沿って記述する．なお以下の記述のなかで，「私」とあるのは水谷のことで，この講義録にセミナーの臨場感をもたらすために使った便法である．

1. 背景

1.1 月の孔の大きさと月のクロノロジー

私が惑星科学らしきものについて最初の論文を書いたのは，イギリスの天文学者Kopalの総合報告を読んでからとのことである．その総合報告の中でKopalは月の表面にある孔は小惑星がぶつかってできたものだと考えた．小惑星軌道にある天体が月に衝突する確率を計算した結果を元に，月の海が40億年前に形成されたことが述べられ，クレーターの数から地質が更新された年代の推定が可能であることが載っていた．この内容を受けて，竹内均氏と私は共著の論文として1966年に岩波「科学」に2ページの短い記事を投稿した[1]．タイトルは「月の孔の大きさと月のクロノロジー」である．月の孔と表記したのは，まだクレーターという言葉が一般的には認知されてなかったためである．

これが日本でクレータリングクロノロジーを扱った一番最初の論文だったであろう．Kopalの言うことが正しければ，月の高地にあるクレーターの数は月の海より20倍も多いので，高地の年齢が45億年以上よりはるかに古いものになってしまう．「科学」の論文ではその矛盾を解決しようとしたものだった．その時に竹内氏と私が考えたのは月では重力が地球の6分の1だから，月のクレーターサイズは同じ衝突条件では地球の6倍になるのではないかということだった．そうすれば，月の高地の年齢が40億年となり（月の海が2億年になる）地球・月系の歴史と矛盾しなくなる．このようなことがきっかけで1976年にコロラド大学へ行ったころから，クレータースケーリング則に関する論文をたくさん読むようになった．しかし，どれを読んでも私が感心するようなものはなかった．ほとんどの論文は限られた条件下の実験による経験則であり，その式の物理的意味に介入しているものはなかったのが理由である．以下にその例を挙げる．

1.2 実験的な経験式，数値的な経験式の例

その当時最も有名だったのはGaultという人で，クレーター科学の一番最初の偉い人であった．彼は高速度衝突の実験からクレーターの半径Rは衝突体のエネルギーWの0.37乗に比例するという下式の結果を得た[2].

1. 神戸大学大学院理学研究科
2. 株式会社ニュートンプレス/宇宙科学研究所名誉教授
tokamoto@stu.kobe-u.ac.jp

$$R[\mathrm{cm}] = 0.75 \times 10^{-3} \rho_{\mathrm{p}}{}^{1/6} \rho_{\mathrm{t}}{}^{-1/2} W^{0.37}[\mathrm{erg}] \qquad (1)$$

ここでρ_{p}は衝突体の密度，ρ_{t}は標的密度を表す．しかし，1/6乗や－1/2乗，0.37乗とは一体どういう理由でそうなっているのかは示されていなかった．実験値を説明するのはいいが，物理メカニズムも分からずに実験範囲外にこの式を適用するということは恐ろしい．というのも式の成り立っている範囲がわからないからである．次元も両辺で合っておらず，納得のいくようなものではなかった．

また，様々な衝突条件で圧力伝播がどうなるかを数値実験で調べたものがあった[3]．衝突直後の圧力の波形は異なっているが，時間が経過して衝突点から離れた位置においては圧力の波形が似てくる衝突条件の組み合わせがあることを見つけた．すなわち，弾丸の大きさL_{p}，速度vとしたときに，

$$L_{\mathrm{p}} v^{\alpha}, \quad \alpha = 0.58, \qquad (2)$$

といった値が一定でありさえすれば，最終的な波形の結果は同じになることを発見した．これを彼らはlate-stage equivalenceと呼んだ．この経験的法則を解釈するためにDienesとWalshは圧力の減衰について以下のように考えた．

$$P(r) \propto v^2 \left(\frac{r}{L_{\mathrm{p}}}\right)^{-2/\alpha} \propto \left(\frac{r}{v^{\alpha} L_{\mathrm{p}}}\right)^{-2/\alpha}. \qquad (3)$$

これによれば，Pは$r^{-3.45}$に比例して減衰することになる．一方，数値計算の結果では圧力は距離の－3乗に近い値で減衰しており，－3.45とは違う値であった．つまり説明と結果は矛盾しており，私には理解しがたいものであった．

1.3 クレーターの科学

このようにわからないことはたくさんあったが，データはたくさん存在していた．それをまとめて本にしようと考えた私は，「クレーターの科学」という本を1980年に出版した[4]．これは衝突業界におけるバイブル的な本であるMeloshの“Impact Cratering”[5]刊行に先駆けること9年である．日本では非常に早い時期にクレーターのサイエンスというものを紹介したことになる．

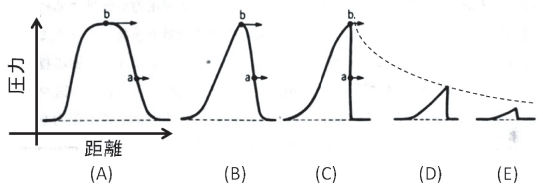

図1：衝撃波伝播の様子の模式図．（A）から（E）にかけて時間の経過とともにどのように衝撃波の形と振幅が変化するかを示している．（「現代の太陽科学（上）」第13章惑星をこわす[7]に基づく）．

2. 高速度衝突の物理

月のような大きな物体に小惑星のような小さな物体がぶつかるようなことを考える．物体の音速よりも速い衝突速度でぶつかると，衝撃波が発生して非常に高い圧力になる．接触面の近傍では特に高い圧力となりそこから物質が飛びだす．高い圧力は物体内に広がっていき，物質を飛ばしながら最終的にはクレーターができると考えられる．

直径L_{p}，密度$\rho_{0\mathrm{p}}$の弾丸が衝突速度vで，破壊強度Y，密度$\rho_{0\mathrm{t}}$の標的に衝突することを考える．標的の代表的な長さをL_{t}とする．数値計算の結果から，L_{p}よりも少し大きい直径を持つ高い圧力帯ができることがわかっている．これをIsobaric core（等圧核）とよぶ．Isobaric coreの中は均等な圧力になっていて，球状の高圧帯となっている．このIsobraic coreの直径dは$d = \eta L_{\mathrm{p}}$では1－3程度である．

図1は衝撃波の伝播の様子の模式図である．はじめに衝撃パルスの高い圧力が発生し，山の上部が平らである波形を持つ．この平らになっている部分がIsobraic coreである．時間とともにIsobaric coreが外側に広がり，平らだった山が次第に尖ってくる．これは（A）におけるa点が右に進行する速度よりも，b点の進行する速度の方が大きいので，（C）においてb点がa点に追いついてしまうからである．最終的に三角波のようになって，大きさも小さくなり減衰する．この減衰が距離の－α乗に比例すると考える．

2.1 高速度衝突による初期発生圧力

衝突体がぶつかったときの衝撃波がどのように伝播するかを考える前に，まずは最初に発生する衝撃圧を考える．ここで必要となるのはランキン－ユゴニオの

式と呼ばれる3つの方程式である．

$$U\rho_{0i} = (U_i - u_i)\rho_i, \tag{4}$$

$$P_i = \rho_{0i} U_i u_i, \tag{5}$$

$$E_i = \frac{1}{2} P_i \left(\frac{1}{\rho_{0i}} - \frac{1}{\rho_i} \right). \tag{6}$$

ここで ρ_i は衝撃をうけている領域の密度，ρ_{0i} はもとの衝撃をうけていない状態の物質の密度，E_i は衝撃による内部エネルギーの増加を表す．これらは，衝突前後の質量保存則，運動量保存則，エネルギー保存則を解くことで得られ，標的内部に伝わる衝撃波と弾丸内部に伝わる衝撃波のそれぞれについて成り立つ（添え字 i は弾丸p・標的t を表し，i =p または t）．衝撃波の境界面が接しているため，弾丸側の圧力 P_p と標的側の圧力 P_t は等しい．衝突速度 v と弾丸の粒子速度 u_p を用いると弾丸側の接触面の速度は，実験室系において $v - u_p$ である．また，標的側では粒子速度 u_t である．弾丸と標的は接触しているのでこれらは等しいことが条件である．よって，

$$P = P_t = P_p, \tag{7}$$

$$u_t + u_p = v. \tag{8}$$

衝撃波の速度 U_i は，その物質の音速 C_{0i} と粒子速度 u_i, と物質定数 s_i を用いて以下のように書ける．

$$U_i = C_{0i} + s_i u_i. \tag{9}$$

これは衝撃波速度と粒子速度を結びつける一種の状態方程式である．経験式であるが非常に多くの物質で成り立っていることが実験的に示されている．ここで，物質の圧縮の度合いを示す δ_i を，

$$\delta_i = \frac{\rho_i - \rho_{0i}}{\rho_i}, \tag{10}$$

と導入したならば，式(4)より衝撃波速度と粒子速度の関係は簡単に以下で表せる．

$$U_i = u_i / \delta_i. \tag{11}$$

これと式(5)，式(8)を用いれば，粒子速度 u_t は

$$u_t = \frac{v}{1 + \left(\frac{\rho_{0t}\delta_p}{\rho_{0p}\delta_t} \right)^{1/2}}. \tag{12}$$

また式(9)を用いれば，

$$P \simeq \frac{\rho_{0i} C_{0i}^2 \delta_i}{(1 - s_i \delta_i)^2} \tag{13}$$

となる．

初期発生圧力 P_0 は衝突速度 v を用いて以下のように書ける．

$$P_0 = \frac{1}{2} \xi \rho_{0t} C_{0t}^2 \left(1 + \frac{1}{2} s_t \xi \frac{v}{C_{0t}} \right) \left(\frac{v}{C_{0t}} \right). \tag{14}$$

ここで

$$\xi = \frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_{0t}\delta_p}{\rho_{0p}\delta_t} \right)^{1/2}}. \tag{15}$$

衝撃圧 P_0 が物質の非圧縮率 K_i より小さい場合，$\delta_i \simeq P_0/K_i = P_0/(\rho_{0i} C_{0i}^2)$ であるので，ξ は近似すると以下となる．

$$\xi \approx \frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_{0t} C_{0t}}{\rho_{0p} C_{0p}} \right)}. \tag{16}$$

標的と弾丸の音響インピーダンス（密度×音速）の比と関係した量になっていることがわかる．標的と弾丸が同一物質の場合は，$\xi = 1$ となり，標的物質の音響インピーダンス[1]が弾丸物質よりも大きい場合には $\xi < 1$，逆の場合は $\xi > 1$ となる．多くの場合は音響インピーダンスの比は大きくないので，厳密な議論をしない限りは $\xi = 1$ と考えてもよい．

発生圧力 P_0 は以下のように規格化することで，衝突速度 v の1次式と2次式の和で表される．

$$\frac{P_0}{\rho_{0t} C_{0t}^2 / s_t} = \left(\frac{v}{2C_{0t}/s_t\xi} \right) + \left(\frac{v}{2C_{0t}/s_t\xi} \right)^2. \tag{17}$$

分母は物質定数となっている．衝突速度が小さい（音速より小さい）ところでは2次式の方が目立たなくなり，圧力は衝突速度の1次式になる．衝突速度が音速より非常に速い場合は衝突速度の2乗に近くなる．興味の対象となるこの規格化速度 $X = v/(2C_{0t}/s_t\xi)$ の範囲は $0.1 < X < 10$ の間である．そこでそのような範囲で式(17)を近似できるような式を作ると以下のようになる．

$$P_0 \simeq \frac{2\rho_0 C_{0t}^2}{s_t} \left(\frac{v}{2C_{0t}/s_t\xi} \right)^a. \tag{18}$$

1. 物質の堅さの程度と考えてよい．

aはおよそ1.75という値をとる[2].

2.2 衝撃圧力の減衰

衝撃圧はisobaric coreから球状に広がって減衰していく.

$$P = P_0(r/L_\mathrm{p})^{-b} \tag{19}$$

核爆発の実験結果を見ると，$b = 3$に近い結果を示している．ここでは$b = 3$と仮定してみる.

$$\begin{aligned} P(r) &= P_0(r/L_\mathrm{p})^{-3} \\ &= P_0 {L_\mathrm{p}}^3/r^3 \end{aligned} \tag{20}$$

ここで，Iを以下で定義する.

$$I = P_0 {L_\mathrm{p}}^3. \tag{21}$$

$P(r)$はこのIの値が同じであれば等しくなり，同じ現象が起こると予想される．Iはエネルギーの次元を持つので，late-stage effective energyと命名された．P_0に式(18)を用い，Iを近似的に書きなおしてみると,

$$I \propto v^a {L_\mathrm{p}}^3 = \left(L_\mathrm{p} v^{\frac{a}{3}}\right)^3. \tag{22}$$

ここで，近似的にa=1.75であったので$a/3$=0.58となる．これはDienes and Walshが数値実験で発見した式(2)での $\alpha = 0.58$と同じ値である．つまり彼らがlate-stage equivalenceと呼んだ経験則は，理論的にはこのような物理メカニズムからやってくるものだと分かった．結局，高速度衝突による高圧力発生を記述する式(14)，その圧力の減衰を記述する式(19)を使えば，以下で述べるように，様々な高速度衝突現象をスケーリングすることが可能になる．これらのスケーリング則をまとめて，ここでは水谷スケーリングと呼ぶ(例えば，文献[6-8] を見よ)．すぐ後で述べるHolsappleらのスケーリングが単純に経験的なものであるのに比べ，水谷スケーリングは高速度衝突現象について物理学に基づいた発見的な手がかりを与えるものである.

2.3 Holsapple のスケーリング則

Holsappleは無次元量を組み合わせることで実験データをまとめ，スケーリング則を構築した(e.g. [9-11])．このHolsappleのスケーリング則が惑星科学者の間で幅広く使用されている．彼はCoupling Parameter(カップリングパラメーター)，Cが衝突に際して重要なパラメーターであると述べている.

$$C = L_\mathrm{p} \nu^\mu {\rho_{0\mathrm{p}}}^\nu. \tag{23}$$

μ , ν はスケーリングパラメーターで物質に依存し，実験データから決められる．これは水谷スケーリングでは,

$$C = L_\mathrm{p}[v/(C_{0\mathrm{t}}/s_\mathrm{t}\xi)]^{a/b}, \tag{24}$$

に相当する．水谷スケーリングではCは発生圧力が衝突速度の1乗と2乗の間のベキ乗によるという近似を使っている．つまり弾丸や標的の音速の数倍といった衝突速度の場合はベキ乗則が成り立つことは理論的には保証している(具体的にはおよそ$0.5 < v/(2C_{0\mathrm{t}}/s_\mathrm{t}\xi) < 10$の範囲[8])．しかし，これを非常な高速域ではそのまま使ってはならないことを水谷スケーリングは主張している．一方Holsappleは適用範囲を掲げず，この式をあらゆるところで成り立つかのように示している．多くの人はみなHolsappleのスケーリングを使用しているが，彼のスケーリング則は物理的な意味は述べられていない．しかし水谷スケーリングは物理的な意味を明確にしており，成り立つ条件もはっきりさせている．ただし，どうしてたくさんの人に使われていないスケーリング則なのかというと，水谷スケーリングには音速C_tやs_tやξといった物性定数が入っている．これらの値があらかじめ分かっていなければならず，これを測るにはひと手間かかる．すなわち使いにくい式であることは確かである．Holsappleのスケーリングのように密度$\rho_{0\mathrm{p}}$と速度vだと扱いやすい．扱いやすいが，ものの性質が入っていなくて圧力が決まるということはおかしいことであろう．物性情報が入っているのが水谷スケーリングだが，扱いづらいからなかなか多くの人には使われないのであろう．しかし，論理的な観点からは水谷スケーリングの方が優れていると私は考える.

3. 衝突破壊現象

小惑星同士が衝突したときに，どのような条件で小惑星が破壊されるかという条件を考える.

2. 右辺はじめにでてくる係数2とaは最小二乗法で決定された定数．$0.5 < \mathrm{X} < 10$ の速度範囲ではaは1.6–1.8となる[8].

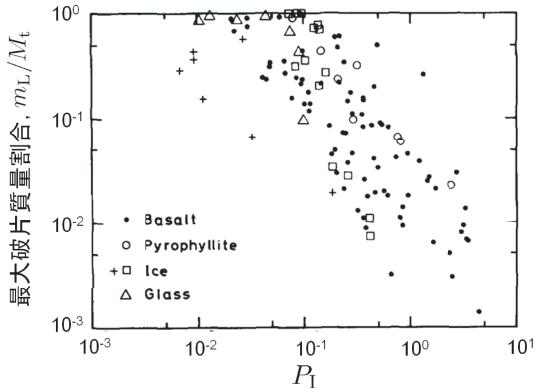

図2：最大破片質量割合と無次元衝突応力の関係．（[8]に基づく．）

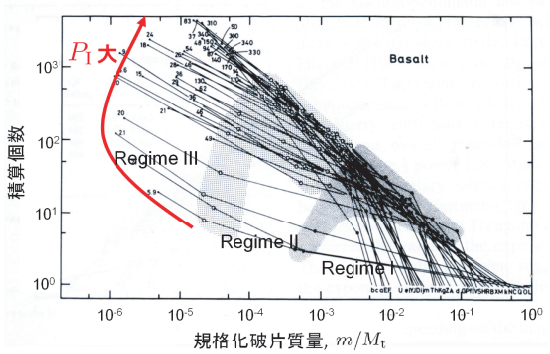

図3：玄武岩標的を用いた衝突実験で生成される破片のサイズ分布．横軸は破片の質量mを元の標的の質量M_tで規格化したもの，縦軸はmより質量の大きな破片の累積数を表す．ハッチの領域はRegime IとRegime II，Regime II とRegime IIIの境界の範囲に対応する．（[8] に基づく．）

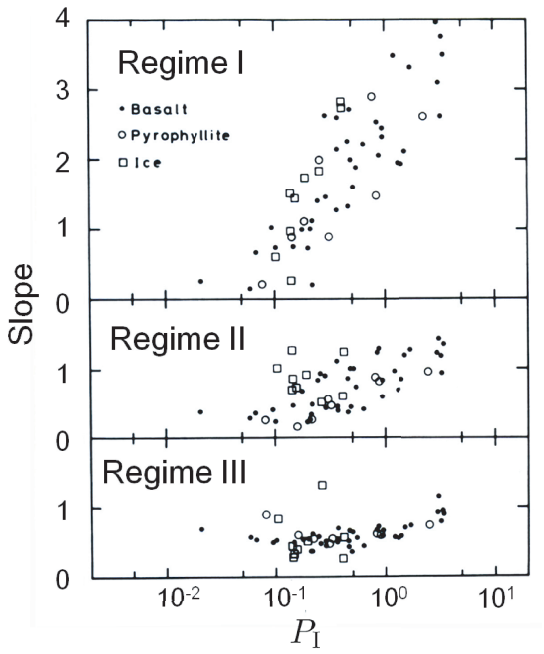

図4：それぞれのRegimeのサイズ分布の傾きと無次元衝突応力の関係．縦軸のSlopeはそれぞれのRegimeで式(29)から求まる傾きの値を表す．（[8]に基づく．）

3.1　無次元衝突応力，P_I

圧力は衝突点からの距離の3乗に反比例して伝播すると考える．衝突点と反対側$r = L_t$での圧力は，

$$P(L_t) = P_0(L_p/L_t)^3. \qquad (25)$$

この圧力が標的の破壊強度Yよりも大きい場合に，標的はカタストロフィックに破壊されるとする．

$$\frac{P_0(L_p/L_t)^3}{Y} \gg 1. \qquad (26)$$

この左辺の大きさが標的に与えるダメージを表す量だと考え，これを無次元衝突応力(Non Dimensional Impact Stress, NDIS)，P_Iと定義する．

$$P_I \equiv \frac{P(L_t)}{Y} = P_0\frac{{L_p}^3}{Y{L_t}^3}. \qquad (27)$$

P_Iは無次元数である．

3.2　衝突破壊による破片

衝突によって生成された最大破片の質量m_Lを元の標的の質量M_tで割った値(最大破片質量割合)が破壊の程度を表す1つの指標となる．これは弾丸の初期運動エネルギーを標的の質量で割ったエネルギー密度(標的の単位質量あたりに分配されるエネルギー)で整理されることが多い．エネルギー密度が小さい場合は，標的は破壊されず最大破片質量割合は1をとる一方，エネルギー密度が次第に大きくなると，標的は破壊され最大破片質量割合も小さくなる．破壊される領域では，最大破片質量とエネルギー密度にはベキ乗則の関係があることが知られており，標的物質によって破壊されるのに必要なエネルギー密度は異なっている．図2は最大破片質量割合を無次元衝突応力P_Iを用いて整理したグラフである．衝突速度(ここでは10 m s^{-1} – 3 km s^{-1})や標的物質の違いによらずプロット点はほぼ同じような場所に位置している．すなわちP_Iを用いれば，標的物質の違いによらず最大破片の質量を予

測できるということがわかった．ここに示されているデータを用いて，以下の経験式が得られた[3]．

$$\frac{m_L}{M_t} = 10^{-1.627\pm0.061} P_I^{-0.936\pm0.068} \quad (28)$$

次に衝突破壊で得られる破片のサイズ分布を見る．図3は破片のサイズ分布のグラフである．曲線一本一本がそれぞれの実験結果であり，P_I値の異なる実験の結果を一緒にプロットしている．矢印の向きに進むほどP_Iの値が大きな実験結果である．破片の小さな領域では，どの実験でもP_Iによらず曲線は平行になっており傾きはほぼ等しい．この領域をRegime IIIと名づける．この領域は小惑星の大きさや月のクレーターの大きさのサイズ分布と似ている．破片の大きな領域の曲線はP_Iによって異なる．この領域はRegime Iと名づける．激しい衝突，すなわちP_Iが大きい場合は，曲線の傾きは急になる．穏やかな衝突，すなわちP_Iが小さい場合は標的はほとんど壊れずm_L=M_tは1に近く，次いで小さな破片がわずかにできるといったゆるやかな曲線となる．

破片のサイズ分布はベキ乗則に従っていると仮定する．

$$N(>m) = C_3 m^{-\gamma} \quad (29)$$

ここでNは破片質量mよりも重い破片の積算個数を表す．破片の大きな領域(Regime I)と破片の小さな領域(Regime III)とその中間領域(Regime II)での曲線の傾きγをそれぞれ求め，P_Iとの関係を見たのが図4である．Regime IIIではγの値は0.67(=2/3)に近い一定の値をとっている．Regime IではP_Iが大きくなるにつれγも大きくなり両者に関連性が見られる．中間の領域(Regime II)ではデータはばらついている．領域によっては傾きγはP_Iの関数で表せられるので，P_Iを知ればサイズ分布も予測できるのではないかということが示唆された．

次に，破片の速度について見る．ここでは反対点での破片の速度v_a(Antipodal Velocity)を考える．Rinehart(1975) [12]によると飛び出す破片の速度は以下となる．

3. 図2の+ マークはやや他のものに比べずれている．これはこの標的が異方性を持っていることに起因しているのかもしれない．この場合本解析を適用するのは不適当であり，経験式を出す際にはこのデータ点は除外している．

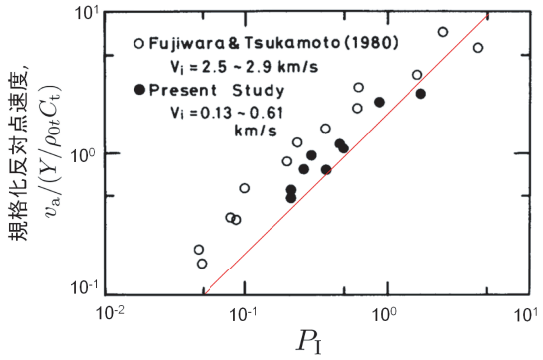

図5：規格化反対点速度と無次元衝突応力P_Iの関係．白丸のプロットは衝突速度が2.5–2.9 km s^{-1}の実験結果であるのに対し，黒丸のプロットは衝突速度が0.13–0.61 km s^{-1} の実験結果である．実線は傾き1を示す線を表す．([8]に基づく．)

$$v_a = \frac{1}{2\rho_{0t}L_1}\int_0^{2L_1/C_t} \sigma(t)dt \quad (30)$$

ここでL_1は破片の厚さ，$\sigma(t)$は時間の関数で応力を表す．一般的に，$\sigma(t)$を推定することは難しいため右辺は積分不可能である．衝突の場所から最も遠い標的の場所での応力の振幅を$P(L_t)$とすると，$\sigma(t)$は波形を表す関数を$f(t)$とすれば$P(L_t)$ $f(t)$と表せる．よって上式は以下で書きかえられる．

$$v_a = P(L_t)\overline{f}/\rho_{0t}C_t$$
$$\overline{f} = \frac{C_t}{2L_1}\int_0^{2L_1/C_t} f(t)dt \quad (31)$$

これより，

$$v_a \propto YP(L_t)/\rho_{0t}C_tY = (Y/\rho_{0t}C_t)P_I,$$
$$v_a/(Y/\rho_{0t}C_t) \propto P_I. \quad (32)$$

このように速度をV^*=$Y/\rho_{0t}C_t$で規格化すれば，P_Iが再び登場し，P_Iは破片の飛び出す速度と関連する重要なパラメーターであることが分かった．これを実験的に確かめたものが図5である．反対点の破片速度を規格化した$v_a/(Y/\rho_{0t}C_t)$とP_Iには比例関係が見られ，理論と矛盾はなかった．

以上のように無次元衝突応力，P_Iは衝突破壊を考える上で有用なパラメーターであることがわかった．こういったことから，高速の物体が惑星表面にぶつかったときにどのような破壊現象が誘発されるかを予測する枠組みができたのではないかと私は考えている．

謝 辞

本原稿を仕上げる際に有益な助言をいただいた中村昭子氏に感謝いたします．また本原稿執筆の貴重な機会を与えてくださった千秋博紀氏に厚くお礼申しあげます．

参考文献

[1] 竹内均, 水谷仁, 1966, 科学 36, 392.
[2] Gault, D. E., 1973, The Moon 6, 32.
[3] Dienes, J. K. and Walsh, J. M., 1970, Theory of impact: Some general principles and the method of Eulerian codes. In: Kinslov, K. (Ed.), High-Velocity Impact Phenomena, 45 (New York: Academic Press).
[4] 水谷仁，1980，クレーターの科学，（東京大学出版会）.
[5] Melosh, H. J., 1989, Impact Cratering: A Geologic Process, (Oxford Monographs on Geology and Geophysics).
[6] Mizutani, H. et al., 1983, J. Geophys. Res. (Proc. 13th Lunar Planet. Sci. Conf. Part2) 88, A835.
[7] 水谷仁，藤原顕，1984，第13章　惑星をこわす，In：長谷川博一，大林辰蔵（編）　現代の太陽系科学（上），（東京大学出版会）.
[8] Mizutani, H. et al., 1990, Icarus 87, 307.
[9] Holsapple, K. A., 1981, EOS Trans. AGU 62, 944.
[10] Holsapple, K. A., 1983, Lunar Planet. Sci. XIV, 319.
[11] Holsapple, K. A. and Schmidt, R. M., 1987, J. Geophys. Res. 92, 6350.
[12] Rinehart, J. S., 1975, Stress Transients in Solids (Hyper Dynamics).

←目次へ

系外惑星「遠い世界の物語」その 5 ～重力マイクロレンズ法を用いた氷境界外側の系外惑星探査～

鈴木 大介[1]，住 貴宏[2]，MOAコラボレーション

（**要旨**）重力マイクロレンズ法は，氷境界の数倍外側に位置する惑星を検出する事ができ，地球質量程度の惑星にまで感度がある．この手法によって30個以上の惑星が発見され，それらは他の観測手法では検出が難しい惑星である．また，重力マイクロレンズ法でのみ検出可能な浮遊惑星も検出され，それらの数量まで見積もられている．日本，ニュージーランドが主体の国際共同研究グループ，MOAはこれまでの惑星検出に多くの貢献をしてきた．本稿では，重力マイクロレンズ法の原理，MOAの日々の観測について説明する．また，惑星が発見されたときのエピソードを交えて，これまでの重要な発見を紹介する．

1. 重力マイクロレンズ法とは

1.1 はじめに

重力マイクロレンズ法とは，重力マイクロレンズ現象を利用した太陽系外惑星の検出方法である．系外惑星の発見から今年で20年となるが，系外惑星の分野はめざましい発展を続けていて，分野外の人に知られる機会は確実に増えてきているはずである．しかし，重力マイクロレンズという言葉にあまり馴染みがない読者もいるかもしれない．というのも，これまでに見つかっている系外惑星のほとんどが視線速度法，トランジット法によって発見されていること，また，重力マイクロレンズのコミュニティーが他の観測手法のそれと比べて，世界的に見てもやや小さい，といったことが理由として考えられる．しかし，後述するように重力マイクロレンズ法によっていくつもの重要な発見がされており，今後の発展も期待されている．今回は，重力マイクロレンズ法をより多くの人に知ってもらうためにも，丁寧に説明したい．

重力マイクロレンズ（以下，マイクロレンズとする）法の特徴の一つとして，他の手法では現在検出することが難しい，中心星から数AU付近において地球質量程度の軽い惑星まで発見できることが挙げられる．その原理については次節で説明するが，比較のために他の系外惑星検出手法について簡単にふれておく．近年のケプラー宇宙望遠鏡の大活躍によりトランジット法による惑星発見数は飛躍的に増え，地球半径よりも小さい惑星も発見されている．しかし，これらの惑星のほとんどは水星軌道よりも内側を回るような中心星近傍の惑星である．トランジット法で地球軌道よりも外側を回るような惑星を検出することは原理的に難しい．また，最初の系外惑星発見をもたらした視線速度法も，中心星近傍の重たい惑星に感度が最も高い．視線速度法でこれまでに見つかった惑星も中心星近傍を回るものが多いが，長期間の観測を続けることで長周期惑星を検出することが可能である．一方，日本のグループが大きな成果を上げている直接撮像法による惑星探査では，惑星からの微弱な光を直接捉える際，相対的にとても明るい中心星の光が邪魔となる．したがって直接撮像法では，この影響がなるべく少ない，中心星から数10 AU以上離れた軌道を回る巨大ガス惑星が検出可能である．将来的には，より中心星とのコントラストが高い，より内側のより小さな惑星を捉えると期待されるが，現状ではまだ難しい．このように，トランジット法，視線速度法では手の届かない，また，直接撮像法でも観測が困難なより内側の軌道を持つ惑星

1. ノートルダム大学物理学専攻
2. 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻
dsuzuki@nd.edu

に対して，ちょうどマイクロレンズ法は感度があり，相補的であると言える．

また，マイクロレンズ法で最も感度が高い軌道長半径は，ちょうど氷境界の数倍外側に相当する．氷境界（または，雪線）とは，宇宙空間で氷が昇華する温度境界のことで，太陽型星の場合2.7 AU付近である．氷境界のすぐ外側は，木星のような巨大ガス惑星が形成される領域だと考えられている．一般的な惑星形成モデルであるコア集積モデルによると，巨大ガス惑星が形成されるには，原始惑星系円盤内のガスが散逸してしまう前に，惑星の質量がガスを集められるだけの重さである10地球質量程度になる必要がある．原始惑星系円盤中の氷境界以遠では，氷ダストが増えることで円盤の表面密度が4～5倍になり，惑星が成長しやすい．あまりにも円盤の外側だと，惑星が成長した際にすでにガスが散逸しまっていると予想される．したがって，巨大ガス惑星は氷境界のすぐ外側で形成されやすく，ちょうどマイクロレンズ法で感度がある領域に対応する．惑星は形成時に軌道移動することが考えられるが，惑星形成後に氷境界のすぐ外側において，どの程度の重さの惑星がどのくらい残っているかを観測的に調べることは，惑星形成理論の観点からも非常に重要な課題である．

これまでに，マイクロレンズ法によって30個以上の惑星が発見されている．これらの発見に大きく貢献しているサーベイ観測グループとして，ポーランドのチームであるOptical Gravitational Lensing Experiment（OGLE）と，日本とニュージーランドが主体の国際共同研究グループであるMicrolensing Observations in Astrophysics（MOA，モア※1）がある．日本では名古屋大学と大阪大学が中心となってニュージーランドのMOA-II望遠鏡を用いた研究活動を進めている．本稿では，1.2，1.3節ではマイクロレンズ現象及びそれを用いた系外惑星探査法について説明し，1.4節ではMOAの日々の観測についてふれる．2節では代表的な発見された惑星，マイクロレンズ法でのみ検出可能な浮遊惑星や，最近の統計的解析結果を紹介し，3節では今後の展望についてまとめる．

※1. MOAは，かつてニュージーランドに存在した最大級の鳥moaにちなんで名付けられた．

1.2　重力マイクロレンズ現象

マイクロレンズ現象は，重力の影響によって光の経路が曲げられるという一般相対性理論に基づいている．夜空に見える星は，実は天球面上を少しずつだが動いている．観測者がある遠方の星（背景星）を見ている時に，偶然別の星がその視線上の手前に来たとしよう．はるか遠方の背景星からの光が，この手前にいる星の近くを通る際に，重力の影響で曲げられてしまう．背景星，手前の星と観測者が一直線上に並んでいるとすれば，ある角度で曲がった背景星からの光は全て観測者に届く．つまり観測者から見ると，手前の星の周りにグルッとリング状の背景星の像が見えるはずである．あたかも手前の星がレンズの役割をしているようなので，これをレンズ星と呼ぶ．また，このリング状の像はアインシュタインリングと呼ばれるが，天球面上での半径が数百“マイクロ”秒角なので，リングを望遠鏡で分解して見ることはできない．その代わり像が出来たことによって背景星の見かけの面積が広がり，観測者に届く光が増えるため背景星が明るくなったように見える．これがマイクロレンズ現象である．観測者から見て背景星とレンズ星が離れれば，リング状の像は二つの円弧状の像に分裂し，それによって像の面積は小さくなり，観測者から見ると背景星の増光が弱くなって見える（図1）．背景星とレンズ星はそれぞれある速度を持って動いているので，背景星の明るさの時間変化（光度曲線）は，左右対称の釣り鐘型の曲線を描く．

今述べたように，マイクロレンズ現象が起きるためには，観測者，レンズ星，背景星がほぼ一直線に並ぶ必要がある．星の数ほどたくさんある星だが，マイクロレンズ現象が起きるほど星と星が重なる確率は非常に低い．単純に確率の問題なので，背景星，レンズ星となる星が多いほど確率は上がる．従って，星の分布密度が高い銀河中心方向を観測すればマイクロレンズ現象が最も見つかりやすいのだが，それでもある背景星がマイクロレンズ現象を起こす確率は，10^5年に一回程度である．しかし，10^7個くらいの星を観測し続ければ，一年に100個ほどのマイクロレンズイベントを期待できる．実際に，MOAは銀河中心方向を観測することで，年間約600個のマイクロレンズイベントを検出している．銀河中心方向のマイクロレンズイベントでは，背景星はバルジ（銀河中心）の星（典型的に

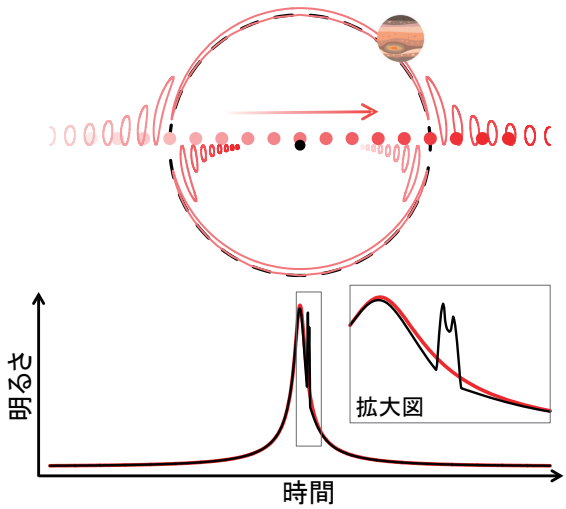

図1：観測者から見たマイクロレンズ現象の概念図と，対応する光度曲線（下図）．上図において，中心の黒丸がレンズ星で，そのすぐ近くを赤丸で描かれた背景星が色が濃くなる方へ（左から右へ）移動する際，赤線で描かれた背景星の二つの像も動いて行く．黒破線の大きい円はアインシュタインリングを示す．このときの光度曲線が赤色で描かれている．また，上図のように惑星が存在した場合の光度曲線を黒色で示す．ただし，背景星と惑星の大きさは，アインシュタインリングに対して大きめに描かれている．

は地球から8kpc，ただし1pc ≃ 3.26光年），レンズ天体はバルジの星（約6kpc）もしくは，銀河ディスクの星（1〜5kpc）となる．また，背景星が増光される期間は，数十日となる．

1.3 重力マイクロレンズ法による系外惑星探査

(1) 原理

さて，このマイクロレンズ現象を用いた具体的な系外惑星探査が提案されたのは，1991年※2のことである[1]．その原理は以下のようである．マイクロレンズ現象が起きると天球面上では，図1のように背景星の像がレンズ星の周囲にできる．もし，レンズ星が惑星を保持していてその惑星が背景星の像の位置にいるとすれば，惑星の重力によって，その像がさらに歪められることになる．その結果，観測される光度曲線には，左右対称の釣り鐘型の曲線からの“ずれ”（アノマリー）が生じる（図1の拡大図）．このアノマリーを精度よく観測することがレンズ星に付随する惑星の発見となる．背景星，レンズ星，観測者が一直線からずれると，背景星の像の面積は次第に小さくなっていく．したがって，像の面積が最も大きいとき，つまり像がアインシュタインリングとなっているときに，惑星の位置と背景星の像が重なる可能性が最も高い．それゆえマイクロレンズ法では，レンズ星を回っている惑星のうち，天球面上に射影したときにアインシュタインリングの半径付近に位置する惑星に最も感度が高く，典型的なアインシュタインリングの半径は約2.5 AUである．

光度曲線のアノマリー部分の形は，惑星の質量と位置によって異なる．特に重要なのがアノマリーの継続時間である．マイクロレンズ現象の増光期間は，レンズ天体の質量の平方根に比例する．したがって，レンズ天体に付随する惑星によるアノマリーの継続期間は，木星質量の惑星だと数日，地球質量の惑星だと数時間程度となってしまう．さらに，惑星の位置を予測することはできないので，ほとんどのマイクロレンズイベントでは，いつアノマリーが起きるかを予測できない．したがって，マイクロレンズ法で惑星を発見するためには，まずたくさんの星の中から，マイクロレンズ現象を起こしている星を見つけ出し，そのマイクロレンズイベントを少なくとも数十分に一回の頻度でモニターし続ける必要がある．この要件を満たすには，広視野かつ高頻度で銀河中心方向を観測する必要がある．マイクロレンズを起こしたレンズ星が別の背景星を再び増光させることはほぼない※3．同様に，アノマリーも終わってしまうと，二度と観測されることはない．それゆえ，次節で説明するようにアノマリーを見逃さないよう熱心な観測が行われている．

(2) 観測ストラテジー

マイクロレンズ法を用いた系外惑星探査が始まった当初，広視野かつ高頻度で観測できる望遠鏡はなかった．そのため，まずやや視野の広い望遠鏡を用いたサーベイ観測によりマイクロレンズイベントを検出し，めぼしいイベントを小口径の望遠鏡を用いて高頻度で観測する，というストラテジーがとられた[2]．特に前者はサーベイグループ，後者はフォローアップグループと呼ばれている．ここでめぼしいイベントとは，マイクロレンズ現象による増光が特に明るくなるイベント，高増光率イベントのことである．めぼしい理由

※2. 当時，マイクロレンズイベントはまだ検出されていなかった．

※3. 背景星が連星の場合はそれぞれの星が増光することがある．

は二つあり，一つ目は，明るくなるので（イベントによっては*I*-bandで10等くらいまで），世界中の小口径の望遠鏡でも観測できるからである．二つ目の理由は，高増光率イベントでは，増光のピーク付近でアノマリーが起きる期待値が高く，なおかつ，増光のピーク時刻を予測できるからである．高増光率イベントにおける増光のピーク時刻付近では，図1のように背景星の像はほぼアインシュタインリングのようになっていて惑星を検出しやすい．また，増光のピークの時刻は，ピークを迎える前の光度曲線をモデルフィッティングすることにより，予測できる．

このようにして，高増光率イベントを狙った“サーベイ＋追観測”の連携により，マイクロレンズ法でこれまでに発見された惑星の半分くらいを見つけてきた．また，高増光率イベントでなくても，アノマリーが検出された場合は，サーベイ，もしくはフォローアップグループが互いにメールでアラートを出し合い，観測頻度をあげるなどして協力し合うことで，アノマリーを精度よく観測し惑星を発見してきた．

実際には，マイクロレンズのシーズンのピークである5～8月にかけては，数百イベントが同時に進行中である．惑星が見つかるのと同じ原理で，レンズ星の伴星によるアノマリーも観測される．アノマリーが検出された直後は，惑星か連星もしくは，褐色矮星質量（13～80木星質量）の伴星によるアノマリーなのか判別が難しい．したがって，どのイベントが重要でどのイベントを優先させるかといった内容のメールが，この時期は毎晩飛び交う．

2006年にMOA-II望遠鏡が広視野高頻度観測を始め，2011年にはOGLEの望遠鏡もグレードアップし高頻度サーベイを始めた．また，イスラエルのチームWiseも2011年からサーベイ観測を開始した．これによりほぼ24時間連続のサーベイ観測が可能となり，今まで検出できていなかった増光率が低いイベントにおけるアノマリーをサーベイグループのみで捉えることが可能となってきた．依然として，フォローアップグループによる追観測は重要であるが，現在，マイクロレンズ法による観測ストラテジーは“サーベイ＋追観測”から“サーベイ中心”へと，次の段階へシフトする時期にある．

(3) 観測から何がわかるか

惑星イベントの光度曲線をモデルフィッティングすることによって，増光期間，中心星と惑星との質量比，中心星と惑星の距離をアインシュタイン半径で規格化した値がわかる．増光期間は，レンズ星（厳密には中心星と惑星）の質量，地球からレンズ星までの距離，天球面上をレンズ星と背景星が離れていく速度（レンズ－背景星の相対固有速度）の関数であり，三つのパラメーターが縮退している．つまり，ほとんどのマイクロレンズイベントでは，中心星の質量，したがって惑星の質量を直接求めることができない．このような場合は尤もらしい値を推定するのだが，2.1節で説明するような特殊なマイクロレンズイベントにおいては上記の縮退が解けて，中心星，惑星の質量などを直接求めることができる．

他の系外惑星検出法と比べ大きく異なる点として，惑星が回っている中心星（マイクロレンズ法ではレンズ星）を直接観測することが難しいことがあげられる．というのは，レンズ星が遠いため※4，M型星のような暗い星であることが多いため，また，レンズ星が背景星とほとんど重なっているためである．さらに，銀河中心方向は星が非常に密集しているため（図2），地上望遠鏡から見ると，背景星，レンズ星はマイクロレンズ現象と関係ない星とも重なって見える．

そのため，重要なイベントでは，すばる望遠鏡などの大型地上望遠鏡のAdaptive Optics（AO）観測やハッブル宇宙望遠鏡を用いて，図2のように「背景星＋レンズ星」を他の星と空間的に分解し，光度曲線のモデルフィッティングから求まった背景星のフラックスを引くことでレンズ星からのフラックスを得る，といった手法がとられる．

また，地球から見て背景星とレンズ星は天球面上を1年間で1～10ミリ秒角ずつ離れて行く．したがって，10年くらい前のイベントを高空間分解することで，背景星とレンズ星をも分離して観測することが期待でき，今後このようなイベントが増えてくる．

このようにレンズ星からのフラックスを観測することで，中心星，惑星の質量，中心星－惑星間距離[5]を決定，もしくはこれらの推定値に強い制限を与えることが可能である．

※4. 遠いと言われているケプラー宇宙望遠鏡で見つかった惑星系までは500pcほどである．マイクロレンズ惑星までの距離は1～6kpc.

※5. 離心率がわからないことが多いため軌道長半径は推定値となる．

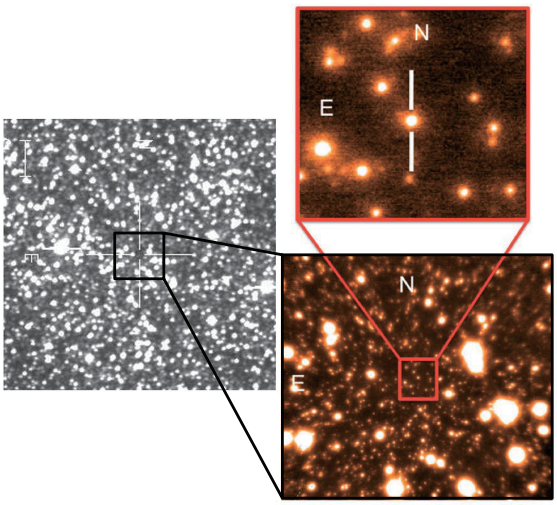

図2：マイクロレンズイベントMOA-2011-BLG-293が発生した付近の画像．右下がイベント発生の翌年にKeck望遠鏡のAOを用いて高空間分解撮像されたもので，その拡大が右上（3秒角×3秒角）である．右上の画像で中央に映っている星が背景星とレンズ星が重なったものである．左は，MOA-II望遠鏡でイベント発生前に撮られた画像※6だが，背景星もレンズ星も暗いため映っていない．[3] の図を一部改訂．

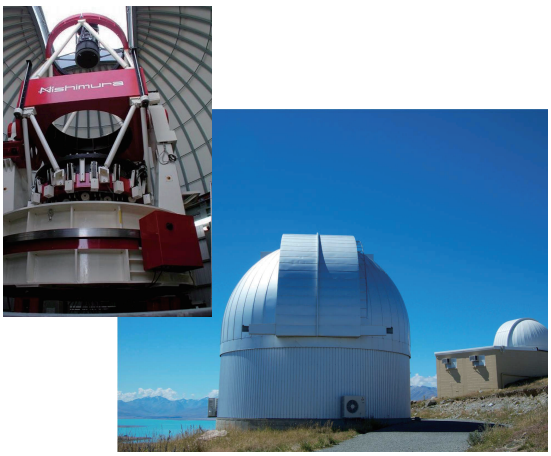

図3：マウントジョン天文台の様子．中央のドームがMOA-II望遠鏡（左写真）のもので，右の小さなドームには61cm望遠鏡がある．天文台の後ろにはテカポ湖が見えている．

1.4 MOAの日々の観測

MOAグループは，ニュージーランド南島のマウントジョン天文台にてマイクロレンズ探査専用のMOA-II望遠鏡を用いて※7，毎晩銀河中心方向を観測している（図3）．口径は1.8 m，視野は2.2平方度あり，マイクロレンズ観測を行っている望遠鏡では最大の視野を持ち，ニュージーランド最大の望遠鏡でもある．実際には銀河中心は可視では見えないので，中心から少しずれた，目で見ても最も明るい領域である約50平方度を観測している．最も高頻度の領域は15分に一度観測される．

また，マウントジョン天文台は南極を除けば世界最南端の天文台であり，銀河中心が見える南天の観測に適している．緯度が高いということは，銀河中心方向がよく見える南半球の冬の夜が長いことを意味する．特に7月前後は観測時間だけでも12時間以上となる．観測中はマイクロレンズイベント候補から新しいイベントを探し出したり，既にマイクロレンズイベントとわかっているものに対しては，アノマリーがないか確認する．重要なイベントがあれば，観測ターゲット，頻度を適宜変更する．不幸にも主焦点カメラのシャッター幕が破れた場合は，予備のシャッター幕への取替え作業も行う※8．もちろん，観測準備，片付けもする必要があるが，マウントジョン天文台には食堂がないので，食事の用意もする必要がある．専属の技術スタッフはいないので，望遠鏡や計算機にトラブルが発生した場合は，全て自ら解決する必要がある．観測シフトは名古屋大学，大阪大学，京都産業大学の大学院生が中心となって組まれており，現地の観測スタッフと合わせて2，3人で1ヶ月間観測を行う．英語環境ということもあり，現地での観測で学生のサバイバル能力が鍛えられると筆者は思う．マウントジョン天文台のすぐ隣にはテカポ湖があり，銀河中心方向が観測できなくなる初夏の景色は素晴らしい．

2. 氷境界外側の惑星たち

マイクロレンズ法で発見された惑星は他の手法では検出することができないユニークな惑星である．以下では，筆者が発見時の観測に関わっているイベントを中心に重要な発見をいくつか紹介する※9．

※6. https://it019909.massey.ac.nz/moa/
※7. 2005年までは同じ場所にある61 cmの望遠鏡を用いてサーベイ観測を行っていた．現在この望遠鏡は主に追観測に使われている．
※8. 2012 年4 月以降，このような惨事は起きていない．
※9. マイクロレンズイベントは，「イベントを発見したグループ名-年-バルジ-通し番号」の名前がつく．レンズ天体には最後にL がつき，レンズ天体に付随する惑星にはb, c... とつく．

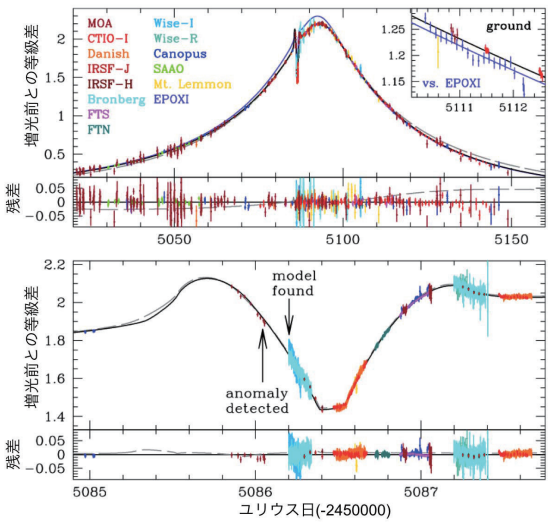

図4：MOA-2009-BLG-266の光度曲線とベストフィットモデル（黒線）．上のパネルは増光率が25%以上の部分を表し，下のパネルは惑星によるアノマリー部分の拡大である．それぞれのパネルの下部には，ベストフィットモデルからの残差を示す．破線はパララックス効果を考慮していない光度曲線モデルを示し，青線は地球から0.1AU離れたEPOXI衛星の位置から観測される光度曲線モデルである．上のパネルの右上には，EPOXI衛星で得られたデータを拡大して示す．[4]の図を一部改訂．

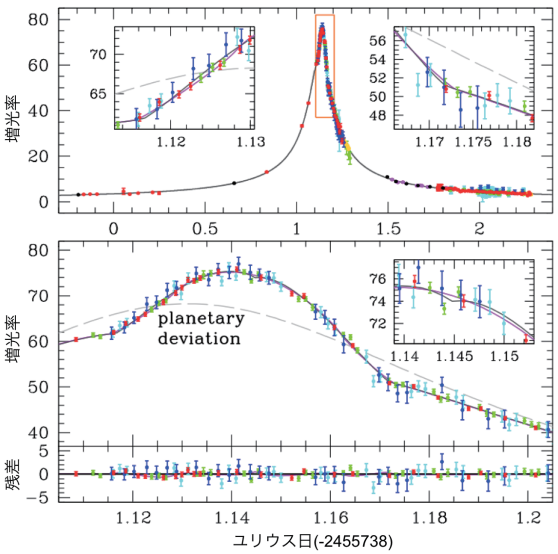

図5：MOA-2011-BLG-262の光度曲線とベストフィットモデル（黒線）．上のパネルの赤枠の拡大が下のパネルである．MOA-II（赤色），B&C望遠鏡（I バンドが緑色，V バンドが水色），Canopus（青色），CTIO（マゼンタ），OGLE（黒色），Faulkes Telescope South（黄色）のデータがプロットされている．破線はアノマリーがなかった場合のモデルを示す．黒線の「浮遊惑星+月」のモデルに対し，「M型星+惑星」のモデルがマゼンタで描かれている．両者のモデルの増光率に差がある部分が拡大されている．[5]の図を一部改訂．

2.1　MOA-2009-BLG-266Lb：巨大ガス惑星コア?

筆者が修士1年の9月に観測中にアノマリーに気づいたイベントである．このイベントでは，アノマリーアラートが出された時には，ニュージーランドではバルジは沈んでしまっていたが，イスラエルと南アフリカの望遠鏡が迅速に追観測を始め，その後もチリ，アリゾナ，ハワイからも追観測が続いたため，アノマリーの全体を観測することに成功した（図4）．また韓国のチームはアノマリー進行中のデータからモデルフィッティングを素早く行い，今後どのようにアノマリーが続くかを予測し，追観測の必要性を議論する上で重要であった．

得られたデータからは，(a)背景星が点光源ではなく，有限の大きさを持つことを考慮したモデルが正しいこと（有限ソース効果），(b)地球の公転を考慮したモデルが正しいこと（パララックス効果），がわかった．マイクロレンズイベントにおいて，(a)と(b)が同時にわかると，増光期間に縮退していた三つのパラメーター（レンズの質量，レンズまでの距離，レンズ-背景星の相対固有速度）を全て決定できる．最終的には，地球からレンズ星までの距離は3kpc，中心星は0.56太陽質量，付随する惑星は10.4 ± 1.7地球質量で，軌道長半径は3.2 AUだとわかった[4]．この惑星は，氷境界の2倍外側に位置し10倍の地球質量を持つということから，巨大ガス惑星になり損ねた巨大ガス惑星コアではないかと示唆されている．中心星から離れた軌道を回る低質量惑星の質量が精度よく求まったケースはこれが初めてである．

2.2　MOA-2011-BLG-262Lb：月かそれとも惑星か

このイベントが検出された夜は曇り空でなかなか観測ができていなかった．そのため筆者と後輩の学生は食事休憩のため観測室を出て宿舎に向かって歩いていたところ，雲の切れ目からうっすらと星が見え隠れしていることに気づき，筆者らは観測室へ急いで戻り，雲越しの観測を始めた．徐々に天候は回復し，急増光し始めたイベントを発見し，新たなマイクロレンズイベントとしてアラートを出した．その直後，ノートル

ダム大学のDavid Bennett氏とオハイオ州立大学のAndrew Gould氏からほぼ同時にこのイベントを集中的に観測するよう要請が来た．高増光率イベントであり，増光期間が短い可能性があったからである．高増光率イベントのピーク付近は惑星に感度が高く，増光期間が短いことは，レンズ星の質量が軽い可能性がある．筆者らは，サチらないように露光時間に注意しながら観測を行い，61cmのB&C望遠鏡でもこのイベントを集中して観測した．不運なことに，その晩はリアルタイムで光度曲線を確認するプログラムがうまく動作しなかったのだが，夜が明け，光度曲線を確認すると，イベントタイムスケールが数日くらいと短く，さらに明らかにアノマリーが見えていた(図5)．ひょっとすると浮遊惑星(中心星を持たない惑星質量天体．次節で説明する．)に月が回っている系の発見かもしれないと喜んだのを覚えている．

重要なイベントであることは確かだったので，翌年Keck望遠鏡のAOを用いて高空間分解撮像観測されたが，決定的なレンズ天体の情報は得られなかった．残念だが結論としては，4木星質量の浮遊惑星から0.13 AUの距離に0.5地球質量の月が付随している系，もしくは，0.1太陽質量の中心星周りを海王星質量程度の惑星が軌道長半径0.95 AUで回っている系のどちらかである，となった[5]．ただし，天球面上でレンズ星と背景星が離れていく速さが，前者と後者のモデルでそれぞれ，20，12ミリ秒角/年なので，将来の高空間分解撮像観測によってモデルの縮退を解ける可能性がある．いずれにせよ，このイベントの発見によってマイクロレンズ法は「浮遊惑星＋月」のような系にも感度があることが示された．

2.3 浮遊惑星

マイクロレンズ法では，何らかの理由で中心星からはぐれてしまった惑星質量天体を発見することができる．これらの低質量天体は浮遊惑星と呼ばれている．そもそも惑星の定義は「恒星の周りを回る」ということなので，このような天体を「惑星」と呼んでいいのかわからないが，英語でもfree-floating planetとかrogue planetと呼ばれている．星形成領域において年齢が若い浮遊惑星候補が以前から撮像され発見されていた．しかし，これらは褐色矮星に近い質量であり，また，それらの統計的な量についての議論はされていなかった．当時の大学院生と住貴宏氏が解析をリードし，MOAの2006-2007年の2年分のデータを全て解析し，増光期間が2日以下のイベントを10例発見した[6]．増光期間が短くても，レンズ-背景星の相対固有速度がとても速いか，レンズ天体までの距離がとても遠い(つまりレンズ天体が背景星に近い)場合が考えられる．しかし，これら10イベントを説明するには木星質量程度の浮遊惑星が恒星の数の約2倍存在するべきだと結論づけ，Nature誌に投稿された．浮遊惑星が惑星形成の途中でその系から放出されたものだと考えると，惑星形成を考える際にはこれらも説明される必要がある．恒星数の2倍ほどある浮遊惑星がどのような過程を経て今に至るのか．包括的な説明は待たれるが，浮遊惑星の量に対するより強い制限，特定の浮遊惑星イベントにおける質量の決定，また，より軽い質量の浮遊惑星イベントを検出することが次の目標である．

2.4 統計的議論

トランジット法，視線速度法で見つかった惑星数と比較すると，マイクロレンズ法で検出された惑星数は少ない．統計量は多いとは言えないが，重要な統計的な解析結果が発表されている．マイクロレンズ法で感度のある，氷境界の約3倍外側付近における惑星の平均的な数は，木星のような惑星(0.3-10木星質量)では0.17個，海王星のような惑星(10-30地球質量)では0.52個だとわかった[7]．これらの数字は，視線速度法から求まった中心星近傍を回る惑星の平均的な数よりも多い．特に土星質量付近では8倍ほど多い[8,9]．もちろん，視線速度法とマイクロレンズ法とでは中心星のスペクトル型や軌道長半径といったパラメーター空間が異なるので，両者の数字が異なることに問題はない．また，軌道長半径の違いを考慮すれば，両者の違いは説明できるとされていた．しかし，マイクロレンズ法から求まった惑星の平均数は，コア集積モデルに基づくシミュレーション結果よりも多いと考えられていて，また，マイクロレンズ法で見つかった惑星系の追観測が難しいことからも，マイクロレンズ法の統計的な結果を疑問視する人が少なくないと筆者は感じている．

ところが最近では，マイクロレンズ法が主に見ているM型星に対する視線速度法の観測データが蓄積され，氷境界外側付近の惑星にまで感度が出てきた[10]．

このことにより，マイクロレンズ法と視線速度法とで，同じパラメーター空間における比較が可能となった．マイクロレンズ法で見つかっている惑星分布を，もし視線速度法で観測したらどの程度惑星が見つかるか，というシミュレーション結果と，M型星周りの長周期惑星に対する視線速度法の観測結果は実際に一致していることが最近わかった．今後視線速度法の軽い惑星に対する感度が高くなれば，マイクロレンズで見つかっているような冷たい海王星が検出されると予測されている[11].

3. 今後の展望

マイクロレンズ観測は“サーベイ＋追観測”から“サーベイ中心”に移行しつつある．広視野高頻度サーベイをしているMOA，OGLE，Wiseに加え，2015年からは韓国のグループKorean Microlensing Telescope Network（KMTNet）が動き出す．彼らは1.6 mの望遠鏡をチリ，オーストラリア，南アフリカに設置し，彼らのグループだけでもマイクロレンズイベントの24時間監視ができる計画であり，年間惑星検出数は今の2倍になると予想されている．

さらに次の段階である“スペースからのサーベイ観測”への準備も始まっている．NASAはマイクロレンズ観測を主目的の一つとしたWide Field Infrared Survey Telescope（WFIRST）を計画している．口径2.4 mの宇宙望遠鏡を用いて，赤外波長で銀河中心方向のマイクロレンズサーベイ観測を行う予定である．これに先立ち，ハッブル宇宙望遠鏡，スピッツァー宇宙望遠鏡を用いたマイクロレンズイベントの観測がすでに行われていて，高空間分解，地上望遠鏡と宇宙望遠鏡との視差などを利用した，レンズ天体の質量決定方法が研究されている．

また，ケプラー宇宙望遠鏡を用いた計画であるK2により，2016年4～6月はケプラー宇宙望遠鏡が銀河中心方向を観測する．もちろん，トランジット惑星の検出も期待されるが，マイクロレンズ観測によっていくつかの惑星イベント，浮遊惑星イベントにおいて質量が決まると期待される．また，他の手法では不可能な浮遊惑星の質量関数が得られると期待される．非常に暗い中心星周りの冷たく暗い惑星を検出するマイクロレンズ法の今後の展望は，明るいのではないだろうか．

謝 辞

本稿を執筆する機会をくださり，注意深く原稿を読んでいただいた成田憲保氏，住貴宏氏に感謝いたします．また，MOAグループの皆様に感謝いたします．この記事の図は[3]，[4]，[5]に掲載されている図を改訂して作成しましたが，AASから転載許可を頂いています．

参考文献

[1] Mao, S. and Paczyński, B., 1991, ApJL 374, L37.
[2] Gould, A. and Loeb, A., 1992, ApJ 396, 104.
[3] Batista, V. et al., 2014, ApJ 780, 54.
[4] Muraki, Y. et al., 2011, ApJ 741, 22.
[5] Bennett, D. P. et al., 2014, ApJ 785, 155.
[6] Sumi, T. et al., 2011, Nature 473, 349.
[7] Cassan, A. et al., 2012, Nature 481, 167.
[8] Cumming, A. et al., 2008, PASP 120, 531.
[9] Gould, A. et al., 2010, ApJ 720, 1073.
[10] Bonfils, X. et al., 2013, A&A 549, A109.
[11] Clanton, C. and Gaudi, B. S., 2014, ApJ 791, 91.

←目次へ

火の鳥「はやぶさ」未来編 その8 ～ONC地形観測から探る小惑星の力学進化～

諸田 智克[1]，杉田 精司[2]，澤田 弘崇[3]，本田 理恵[4]，亀田 真吾[5]，山田 学[6]，本田 親寿[7]，鈴木 秀彦[8]，安藤 滉祐[1]，はやぶさ２ONCチーム

（**要旨**）はやぶさ2に搭載された光学航法カメラ（ONC：Optical Navigation Camera）はその名の通り探査機のナビゲーションの役目を担うカメラであるが，科学観測においても中心的な役割を果たす．本稿では特に小惑星の力学進化過程の復元に向けた，ONC地形観測の戦略について紹介する．

1. 光学航法カメラ（ONC）

はやぶさ2ではC型の地球近傍小惑星1999 JU_3から太陽系初期の記録を保存している始原的な試料を持ち帰り，その精密分析にもとづいて，太陽系形成時の水・有機物－鉱物間の反応，地球にもたらされるまでの物質科学的進化について実証的に迫る．得られる微小スケールの試料から太陽系スケールの情報を読み解くには，試料の物質科学的情報だけでなく，試料採取地点の1999 JU_3における地質学的位置付け，さらには1999 JU_3が太陽系のどこで誕生し，どのような力学進化を辿って現在の姿になったのか，といったマルチスケールの進化過程の理解が重要となってくる．

はやぶさ2に搭載された光学航法カメラ（Optical Navigation Camera，以下ONC）は，望遠直下視であるONC-T，広角直下視のONC-W1，広角側方視のONC-W2の3つの可視カメラからなる（表1）．その名の通り探査機のナビゲーションの役目を担うカメラであるが，試料採取地点の選定や1999 JU_3科学観測においても中心的な役割を果たす．科学観測において特に重要なのはONC-Tであり，フィルタ分光によるマルチバンドデータを取得することによって，小惑星表面の物質科学情報を得る．また，ONC-Tは空間分解能が広角カメラより1桁高く，小惑星の詳細な形状や地形把握にも用いられる．ONC分光観測の詳細な解説は別の機会に譲ることにして，本稿では特に1999 JU_3の力学進化過程の復元に向けた，ONC地形観測の意義と戦略について紹介する．

2. 小天体の力学進化の意義

一般に太陽系形成論では惑星系形成の最初の1億年程の力学的過程が扱われる一方で，現在の太陽系で観測可能な地質学的記録，軌道進化の記録は過去40億年程度であり，理論と実証論の間には未だ大きな時間的ギャップがある．実証的に太陽系の形成・進化を解明するためには，現在の太陽系の観測から過去の太陽系の情報を抽出し，初期状態をいかに復元できるかが鍵である．そのために，惑星からの重力相互作用を受けやすい太陽系小天体の軌道進化の歴史を解明することが圧倒的に重要である．現在のメインベルトの総質量は，現在の太陽系質量を説明するための最小質量モデルである林モデル [1]と比較しても1/10000程度しかない．なぜ太陽系小天体は惑星にまで成長できなかったのであろうか？なぜ，どのように質量枯渇したのであろうか？これらの問題の解明こそが巨大惑星や地球型惑星の形成と軌道進化の歴史を解く鍵である．現

1. 名古屋大学大学院環境学研究科
2. 東京大学大学院理学系研究科
3. 宇宙航空研究開発機構
4. 高知大学自然科学系理学部門
5. 立教大学理学部
6. 千葉工業大学惑星探査研究センター
7. 会津大学先端情報科学研究センター
8. 明治大学理工学部
morota@eps.nagoya-u.ac.jp

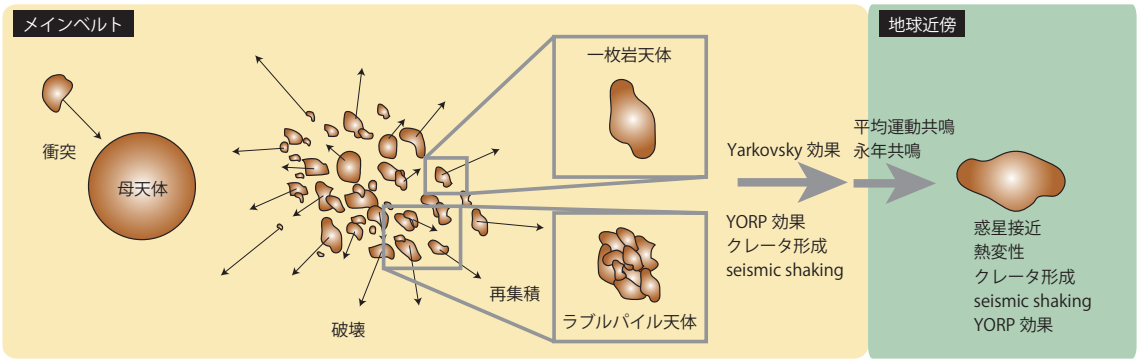

図1：メインベルト小惑星から地球近傍小惑星に至る力学過程.

表1：ONC諸元.

	ONC-T	ONC-W1	ONC-W2
検出器	二次元 Si-CCD（1024×1024 ピクセル）		
視野方向	直下（望遠）	直下（広角）	側方（広角）
視野角	6.35˚ × 6.35˚	65.24˚ × 65.24˚	
焦点距離	100 m ～ ∞	1 m ～ ∞	
空間分解能	1 m/pixel@高度10 km 1cm/pixel@高度100 m	10 m/pixel@高度10 km 1 mm/pixel@高度1 m	
観測波長	390, 480, 550, 700, 860, 950, 589.5 nm, Wide	485 nm ～ 655 nm	

在のメインベルトは，小惑星同士が衝突し，カタストロフィックな破壊やクレータリングなどにより破片が生成され，破片同士が衝突してさらに小さくなる衝突カスケード [2] の状態にあると考えられる．よって，小天体の質量枯渇の過程を解明するには，小天体の衝突破壊の歴史，軌道進化の歴史の復元が重要である．

衝突カスケードの過程で生成された破片はヤルコフスキー効果などによって軌道長半径を変化させる．やがて巨大惑星の平均運動共鳴や永年共鳴の位置にまで移動すると，軌道離心率が増大し内惑星の軌道と交差するようになり，地球近傍小惑星（NEA）となる（図1）．1999 JU_3を例に，このメインベルトでの衝突破壊過程から地球近傍小天体への供給プロセスを実証的に抑えることがONC地形観測の大目標である．特にONCの地形観測によって，1999 JU_3の大規模構造（一枚岩かラブルパイル構造か？），形成年代や最後の表面更新年代，NEAとなってからの年代，衝突環境に関する情報を抽出することができると期待される．次章でONC地形観測の詳細について述べる．

3. ONCによる地形観測

地球近傍小惑星の衝突破壊・軌道進化過程を実証的に抑えるために，はやぶさ2では多角的視点でマルチスケールの形状・地形観測を行う．1999 JU_3の全体形状と運動の計測は，試料採取地点の選定や試料採取の確実性評価などの観測運用計画策定において重要であると同時に，大規模構造（一枚岩かラブルパイル天体か？）の把握や軌道進化推定の高精度化などにおいても基礎情報を与えるものであり，1999 JU_3の素性解明に対する科学的意義も計り知れない．

小惑星表面で観測されるクレータの数密度分布からは，1999 JU_3の形成年代や最後の表面更新年代，NEAとなってからの年代，形成後の衝突イベント史，衝突環境に関する情報を抽出することができると期待される．また，小惑星表面のボルダーのサイズ分布や形状からは，それらが母天体から1999 JU_3を形成した際の衝突破片か，または1999 JU_3上で形成されたクレータ起源かを解明するための手がかりが得られ，

1999 JU_3が母天体からの破片集積によるラブルパイル天体であるか否かを検証するための重要情報となる．

3.1 形状と運動

はやぶさ2ではホームポジション（高度20 kmを予定）での全球マッピングデータから小惑星の全体形状モデルを，中高度（高度5〜3 km），低高度（高度1 km 〜100 m）観測による局所データから一部の領域についての詳細な地形モデルを作成する．はやぶさ2のような，転送データ量が限られており，運用面での制約も多い深宇宙探査機の場合には，精密な天体形状モデル作成に十分なデータを短時間に得ることは容易ではない．そのような制約下であることを考慮し，データの観測条件に比較的左右されにくいシルエット法やステレオ法，画像データのピクセルスケールでのオーダーでの形状復元が可能なShape from Shading 法やPhotometric stereo法などの多角的なアプローチで，各々の利点を生かしながら形状モデルの作成を行う [3].

形状モデルが作成されれば，それから算出される体積と，レーザ高度計（LIDAR）による質量測定を合わせることで平均密度が導出できる．もし1999 JU_3がラブルパイル天体であるならば，高い空隙率をもつと考えられ，その平均密度は小さいと予想される．はやぶさ初号機による同様の観測によって，S型のサブキロメートル小惑星であるイトカワはラブルパイル天体であることがわかった [4]. C 型の1999 JU_3もイトカワと同様にラブルパイルであるかどうかは興味深い問題であり，小惑星の衝突破壊・合体進化を考える上で非常に重要である．ただし，高空隙率を持つことからのみでラブルパイル天体であることを結論付けることはできない．後述のようにボルダーの形状，数密度などのその他の地形学的情報を総合して判断する必要がある．

また，1999 JU_3の密度導出さらには内部の不均一性を反映したローカルな重力の変動を捉えることも目標のひとつであり，全体形状導出はそのために不可欠なステップである．形状モデルから密度一定を仮定して導出した慣性主軸と自転軸のずれから，内部の密度不均一性を導出することができる．

1999 JU_3の運動に関しては，ランデブー中の高精度軌道決定によってヤルコフスキー効果を，精密な形状・自転モデルから YORP 効果を，それぞれ直接検知できる可能性がある．さらにもし非主軸回転が検出されれば，小惑星内部でのエネルギー散逸タイムスケールに制約を与えられる．他にも，SCI衝突による自転の変化を捉えられれば，小惑星の内部構造を制約する重要な情報となる．

3.2 クレータの形状と統計

ホームポジション（高度20 km）におけるONC-Tの空間分解能は2 m/pixelであるため，クレータ識別サイズの下限は経験的に約10 pixel以上であることを考えると，1999 JU_3の全球において直径約20 m以上のクレータの同定が可能と言える．また中高度，低高度観測によって局所的に0.1 m/pixel分解能の観測を行い，1 mサイズのクレータの数密度の情報も得る．

1999 JU_3表面に記録されたクレータ統計から1999 JU_3の形成年代，または最後の表面更新年代を制約できると期待される．小惑星表面のクレータ数密度から年代に関する情報を得るには，クレータ数密度と絶対年代の間の関係（クレータ年代学関数と呼ぶ）を知らなければならない．小惑星におけるクレータ年代学関数は，（1）メインベルトと地球近傍での平均衝突確率，サイズ頻度分布のモデル [5] から単位時間あたりの衝突頻度を算出，（2）クレータスケーリング則 [6] を用いて単位時間あたりに形成されるクレータのサイズ頻度分布を算出，（3）seismic shakingなどのクレータ消去過程の効果を算出することによって構築される [7].

図2は1999 JU_3の形成以後，メインベルトで1000万年経過し，地球近傍小惑星になってから10万年と100万年たったときの1999 JU_3表面のクレータサイズ頻度分布を計算したものである [8]. 一般に，惑星や小惑星表面のクレータ数密度は時間とともに増加するが，あるレベルになると生成されるクレータ数と消去されるクレータ数が等しい平衡状態に達する．小惑星エロスの研究を参考にすると [7]，1999 JU_3で観測が期待される100 m以下の直径範囲のクレータの平衡状態を決めている主な現象はseismic shakingであると考えられる．地球近傍ではメインベルトにおけるより平均衝突速度が3倍ほども高いため（それぞれ，18.5 km/sと5.3 km/s [9, 10]），同一サイズのクレータが作られる場合，メインベルトよりも地球近傍の方がより

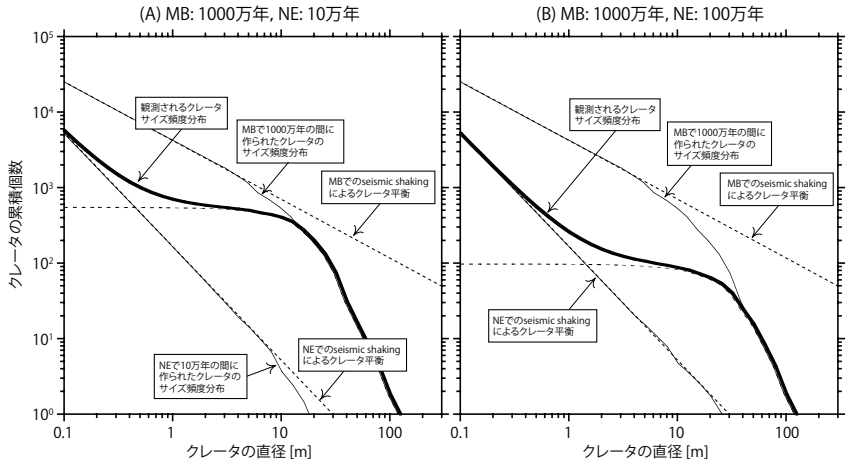

図2：1999 JU_3サイズの地球近傍天体に期待されるクレータサイズ頻度分布[8]．メインベルト（MB）で1000万年間，地球近傍小惑星になってから（A）10万年，（B）100万年経過した場合をそれぞれ示す．衝突率の算出にはメインベルトと地球近傍での衝突確率，サイズ頻度分布のモデルを[5]，クレータサイズの見積もりにはπスケーリング則（dry soil）を[6]，クレータ消去過程にはseismic shakingのモデル [7] を用いた．

大きいクレータをseismic shakingで消去することができる．そのため，平衡状態が起こるクレータ数密度は地球近傍の方がより小さくなる（図2）．

このseismic shakingによる平衡レベルの違いが，複雑なクレータサイズ頻度分布形状をつくる．例えば，メインベルトに1000万年いると，直径約10 m以下のクレータがseismic shakingによる平衡状態に達するが，その後，地球近傍に移るとより小さいクレータ数密度に平衡状態があるために，クレータが形成されるたびにより多くの小さいクレータは消失することになる．その結果として，メインベルトと地球近傍で蓄積されたクレータのサイズ頻度分布に特徴的な折れ曲がりがつくられる（図2）．折れ曲がりが起こるクレータサイズは地球近傍に移動してから経過した時間に依存する．よって，もし実際にこのようなクレータサイズ分布の折れ曲がりが観測されれば，それが起こるクレータサイズから地球近傍小天体になってからの時間を推定できる可能性があり，1999 JU_3の軌道進化や，地球近傍小天体になってからの熱変性の歴史に制約が与えられるかもしれない．

しかし，ここで注意しないといけないのは小惑星のクレータ年代学関数は複数の仮定に基づいたモデルから構成されているため，得られる年代情報には大きな不確定性が含まれる点である．小惑星クレータ年代学モデルの各要素の中でも特に不確定性が高いのはクレータスケーリング則とseismic shakingモデルである．例えば小惑星イトカワの例を挙げると，主に実験にもとづくクレータスケーリング則 [6] と流体数値計算にもとづくクレータスケーリング則 [11] を使った場合でそれぞれ求まる年代は300 − 1800 Myr，25 − 150 Myrとなり，両者でイトカワの形成とその後の衝突史に関わる描像が大きく異なってくる．一方で，はやぶさ2の強みは小型搭載型衝突装置（SCI）による衝突実験を行うことである [12]．既知の衝突条件で形成されたSCI衝突痕のサイズ，形状やレゴリス流動の観測にもとづいて，1999 JU_3表面の物理特性やクレータスケーリング則，seismic shakingモデルを制約することができると期待される．

クレータの形状を用いて，小惑星表面物質の流動具合や微小重力天体上のクレータ形成過程に関する情報が得られる．小惑星イトカワではクレータ地形が明瞭ではなく，エロスやガスプラなどの他の小惑星上の新鮮クレータと比較して深さ－直径比が小さいクレータが多い [13]．この原因として，小惑星の曲率や，低重力環境によりクレータリムが形成されないこと，表面物質の流動により低地を埋めたことなどが考えられている．しかし，イトカワのようなkm以下の直径を持つ小惑星の詳細観測データは他にないため，これらのどの仮説が正しいのか判断は非常に難しい状況である．しかし，小惑星イトカワよりも重力加速度が大きいと

予想される1999 JU_3においてクレータの深さ－直径比を調べれば，km以下の小惑星間のクレータ地形の比較が可能となる．この詳細比較観測から小天体表面でのクレータリムの形成メカニズムに関する知見がえられると期待される．

3.3 ボルダーの形状と統計

1999 JU_3上にどれだけのボルダーが存在しているかは不明である．しかし，中間赤外の地上観測から見積もられる熱慣性はイトカワとエロスの間であることから [14]，イトカワの半分程度のボルダー数密度をもつことは十分に考えられる．ボルダーを用いた科学解析についてもはやぶさ初号機の成果が参考になる．

1999 JU_3上に存在するボルダーの形状やサイズ頻度分布から，その起源や1999 JU_3の大規模構造（一枚岩か，またはラブルパイル天体か）の制約が期待される．例えば，1999 JU_3上のクレータの数密度をもとに，室内実験からえられるクレータイジェクタ破片のサイズ分布からクレータ起源のボルダーの数密度を推定できる．この推定値と観測されたボルダーのサイズ頻度分布を比較することで，母天体の破壊から直接つくられたボルダーと1999 JU_3上でつくられたボルダーの存在割合が推定できる [15]．もし，（観測ボルダー数）>>（クレータ起源のボルダー数）の関係が成り立っていれば，1999 JU_3形成時から多くのボルダーが存在していたことになり，母天体からの破片集積による形成モデルを実証することとなる．

室内実験などにより，衝突破壊で形成された岩石破片の三軸比は$2:\sqrt{2}:1$となることが知られている [16]．1999 JU_3で観測されるボルダーの軸比は，ボルダーが衝突破壊から直接形成されたものであるか否かに関する判断材料の一つとなる [17, 18]．

また，降下観測時などの詳細画像を用いて，ボルダーの丸みからボルダーを構成している岩石タイプを判別する．小惑星イトカワでは丸みのあるものと角張ったものの2種のボルダーが確認された [19]．隕石との比較から，丸みのあるボルダーは角礫岩であると考えられる．小惑星イトカワや1999 JU_3のような微小重力下の小天体上では岩石破片を固着することはできないため，角礫岩は母天体でできたものと考えられる．もし1999 JU_3でも同様な岩石が存在すれば，1999 JU_3母天体表面の衝突史に関する知見を得ることができるかもしれない．

4. 旅立ったはやぶさ2

平成26年12月3日の午前10時，我々，ONCサイエンスチームメンバー数名は鹿児島県熊毛郡南種子町にある恵美之江展望公園に到着した．その目的は「はやぶさ2」を乗せたH-IIAロケット26号機の打ち上げを見守るためである．打ち上げの3時間半前にはすでに多くの見学者の車で駐車場は満車となっていた．駐車場にあった車のナンバープレートを見てみると，大部分が県外ナンバーであり，遠くは関東方面から来た車もあった．平日にもかかわらず，多くの家族連れ，学生集団がその瞬間を待っていた．ロケットの打ち上げという独特な雰囲気に加えて，今回ははやぶさブームからの流れを受け継いだ，一種の「お祭り」である．予定時間に近づくにつれて場の緊張感が高まっていき，打ち上げの15分前には公式サポーターのジバニャン（の着ぐるみ）が現れ，ちびっ子達のテンションも最高潮に達した．そして，日本標準時の平成26年12月3日13時22分04秒，はやぶさ2を乗せたH-IIAロケットが種子島宇宙センターから打ち上げられた．エンジンの点火によって一面明るくなると同時に，大きな歓声があがった．その数分後にはロケットの姿は雲の間に隠れていた．その間，自分が何を思ったか憶えていないが，エンジン点火時の鮮烈な光景と地球の重力に逆らって力強く飛び立ったH-IIAロケットの姿は脳裏に焼き付いている．

この原稿を執筆している2015年1月末時点で打ち上げから約2ヶ月が経とうとしている．これまでに各機器の初期チェックアウトが行われており，総じて順調に進んでいる．1999 JU_3に到着する2018年まで3年以上残されているが，観測データと比較するための理論の整備や観測計画の詳細化，データ解析システムの確立など，それまでに行うべきことはまだまだ沢山ある．万全の状態で1999 JU_3と出会うための準備を我々は進めている．

謝 辞

渡邉誠一郎プロジェクトサイエンティストには本原稿の執筆の機会をいただきました．心より感謝いたし

ます.

参考文献

[1] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, eds. Black & Matthews (Univ. Arizona Press), 1100.
[2] Kobayashi, H. et al., 2010, Icarus 209, 836.
[3] 平田成ほか, 2014, 日本惑星科学会秋季講演会, P1-31.
[4] Abe, M. et al., 2006, Science 312, 1334.
[5] O'Brien, D. P. and Greenberg, R., 2005, Icarus 178, 179.
[6] Holsapple, K. A., 1993, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 21, 333.
[7] Richardson Jr., J. E. et al., 2005, Icarus 179, 325.
[8] 安藤滉祐ほか, 2014, 日本惑星科学会秋季講演会, P1-32.
[9] Bottke, W. F. and Greenberg, R., 1993, Geophys. Res. Lett. 20, 879.
[10] Bottke, W. F. et al., 1994, Icarus 107, 255.
[11] Nolan, M. C. et al., 1996, ApJ 459, 100.
[12] 荒川政彦ほか, 2013, 遊星人 22, 152.
[13] Hirata, N. et al., 2009, Icarus 200, 486.
[14] Müller, T. G. et al., 2010, A&A 525, A145, 6.
[15] Michikami, T. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 13.
[16] Fujiwara, A. et al., 1978, Nature 272, 602.
[17] Nakamura, A. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 7.
[18] Michikami, T. et al., 2010, Icarus 207, 277.
[19] Noguchi, T. et al., 2010, Icarus 206, 319.

←目次へ

「始原天体・スペースガード研究会」開催報告

奥村 真一郎[1]，高橋 典嗣[1]，中村 良介[2]，伊藤 孝士[3]，吉川 真[4]，渡部 潤一[3]，柳沢 俊史[4]，阿部 新助[5]，布施 哲治[6]

1. はじめに

チェリャビンスク隕石の落下以降，世界的に地球接近天体への対応や回避方法の検討が求められている．また，「はやぶさ」によるサンプルリターンの成功により太陽系小天体への関心も高まっている．このような背景のもと，「はやぶさ」「はやぶさ2」によって可能となるサイエンスを視野に入れながら，天体の地球衝突，いわゆる「スペースガード」の問題も含めて議論する場として始原天体研究会と日本スペースガード協会が合同で「はやぶさ2」打ち上げ直前となる昨年11月に標記の研究会を企画した．

日本スペースガード協会では2008年以降毎年，関連する分野の研究グループや関連するテーマの研究会と合同で「スペースガード研究会」と称する研究会を開催している．今回は7回目の開催になるが，「太陽系小天体への再挑戦」というタイトルが付いた5回目の研究会以来2年ぶり，2回目となる始原天体研究会との合同開催である．

本研究会は2014年11月6日，7日の2日間にわたり，国立天文台三鷹キャンパスの大セミナー室にて開催された(図1)．アマチュアの活動家も交えて国内外から60名の参加があり，講演数も口頭発表27件，ポスター発表5件(うち2件は口頭発表と同内容)の申し込みがあり，盛会となった．

1. 日本スペースガード協会
2. 産業技術総合研究所
3. 国立天文台
4. 宇宙航空研究開発機構
5. 日本大学
6. 情報通信研究機構
okumura@spaceguard.or.jp

2. 講演概要

今回の研究会ではサブタイトルを「アジア地域観測ネットワークの構築」と定め，地球接近天体の追跡観測態勢の強化を計るための観測ネットワーク構築を目指し，その第一歩となるような議論の場を設けることを一つの目的とした．国際セッションとしてアジア太平洋地域における小惑星観測ネットワークに関するセッションを設け，ネットワークの構築に先駆けてすでに参加を表明していただいているアジア各国の関連機関に講演をお願いした．旅費の補助ができなかったためネット経由での参加がほとんどであったが，タイからは2名がこの日の研究会のために来日された．

本研究会のもう一つの大きな目的はスペースガード観測の現状を把握し，次期スペースガード望遠鏡の構想を実現させるための議論を進めることである．そのためにスペースガード次期計画に関連したセッションを用意し，開発中・構想中の望遠鏡や観測装置に関する議論の場を設けた．その他のセッションとしては小惑星，流星など始原天体のサイエンスセッション，スペースデブリの観測に関するセッションが設けられた．表1に研究会のプログラムを示す．以下，各セッションにおける講演の内容を簡単に紹介する．

2.1 セッション1(始原天体)

セッション1では様々な専門分野の講演者から始原天体に関する多様な話題の提供があった．月の形成や小惑星の形成を原始惑星の分裂衝突で統一的に説明しようとする非常にユニークな内容の講演(種子)，9月に発見されたばかりの地球近傍小惑星2014RCが地球

図1：研究会の様子.

に接近した際にキャンペーン観測を実施した結果の速報(浦川・花山・高橋 他)，続いて石垣島天文台の紹介と「むりかぶし望遠鏡」による様々な観測への取り組みや太陽系始原天体の観測成果の紹介(花山・石黒・渡部 他)があった．ISSからの流星観測プロジェクト「メテオ」に関する発表(荒井・小林・山田 他)は打ち上げ失敗という不幸な出来事の9日後の講演であったが，予備機の早期打ち上げを目指して努力されている旨の報告が成された．また，防災・減災という観点から小惑星衝突と地球外活動を論じる講演(三浦)と，隕石の地球突入時の燃焼による炭素含有物生成に関して論じる講演があった(三浦)．

2.2 セッション2(スペースガード次期計画)

セッション2ではスペースガード観測の次期計画に関連して，開発中や構想中の望遠鏡，観測装置についての講演とサイト調査に関する講演があった．チェリャビンスク隕石の落下以降，より暗い(小さい)地球接近小惑星の早期発見が求められているが，これに関連して口径3 m級の軽量・広視野望遠鏡により直径10 m以上の地球接近小惑星を地球衝突の三日前までに早期発見しようとする構想の紹介(高橋)，一方で小望遠鏡を多数設置し，画像処理によって高速移動する暗い地球近傍小惑星を検出しようとする計画の提案(柳沢・黒崎・小田・田川)があった．建設中の京大・岡山3.8 m望遠鏡についての講演ではその進捗状況を紹介する中で，高速駆動を実現する軽量化技術などの新しい技術要素が地球接近小惑星やスペースデブリの監視網構築に有効であることが協調されていた(栗田・岡山3.8 m望遠鏡開発メンバー・SEICA開発メンバー)．木曽観測所で開発されている広視野CMOSカメラについては，CCDとくらべて高速読み出しが可能であることから秒単位もしくはそれ以下の時間変動を引き起こす現象の観測への応用が期待され，多くの人が関心を示していた(菊池・酒向・土居 他)．また将来の新望遠鏡設置を見据えたサイト調査の一環として，運輸多目的衛星MTSATの赤外画像を使用し，現地で取得されたスカイモニターの画像を参照することにより衛星画像のデータに修正を加えた夜間晴天率の調査結果の発表があった(坂本)．セッションの最後には，地上と衛星からの宇宙デブリ3次元観測網DEBDAS構想の紹介があり，その地上観測網の構築についての講演があった(山岡・花田・吉川)．

2.3 セッション3(アジア太平洋地域小惑星観測ネットワーク)

セッション3は「Asteroid Observation Network in Asia-Pacific Region」というタイトルのもとで，アジア各国をネット中継して国際セッションという形で開催した．最初の講演で，この小惑星観測ネットワークの目的，ネットワーク構築の現状と将来計画などについての報告があり(Yoshikawa・Watanabe・Takahashi)，続いてタイから来日された2名による講演では，NEOとスペースデブリの観測モニタにも供されることになるロボット望遠鏡を北半球と南半球に設置する計画について紹介があった(Poshyachinda・Kirdkao)．以下はネット中継による各国からの発表が続く．中国からはPurple Mountain Observatory(紫金山天文台)のNear Earth Object Survey Telescopeの紹介と最近の小惑星観測の成果，中国におけるNEO観測ネットワークの現状，将来計画に関する講演があり(Zhao)，続いては韓国から，進行中のKMTNet(Korea Micro-lensing Telescope Network)プロジェクトのために南半球のチリ，南アフリカ，オーストラリアに設置された3台の望遠鏡の，“Deep Ecliptic Patrol of the Southern Sky (DEEP-SOUTH)”プロジェクトへの利用について報告があった(Moon・Choi・Kim)．これら3台の望遠鏡は経度方向に均等に離れた位置にあり，24時間体制で南天の監視が可能となる．台湾からはLulin observatory(鹿林天文台)の紹介と，小惑星と彗星の研究に関連した最近の日本との協力関係についての報告があり(Kinoshita)，

表1：「始原天体・スペースガード研究会」プログラム.

■ はじめに

高橋典嗣（日本スペースガード協会）

■ セッション１＜始原天体＞

- 「マルチインパクト仮説による小惑星帯と隕石の起源」種子彰（SEED SCIENCE Labo）
- 「地球近傍小天体 2014 RC の観測キャンペーン」浦川聖太郎（日本スペースガード協会）
- 「石垣島天文台 105cm むりかぶし望遠鏡による太陽系始原天体の観測」花山秀和（国立天文台）
- 「国際宇宙ステーションからの流星観測プロジェクト「メテオ」」荒井朋子（千葉工業大学）
- 「地球三大災害における小惑星衝突による地球と生命体への影響研究」三浦保範（山口大他）
- 「チェリャビンスク隕石シャワー等における炭素含有物生成」三浦保範（山口大他）

■ セッション２＜スペースガード次期計画＞

- 「次期スペースガード望遠鏡の構想と動向」高橋典嗣（日本スペースガード協会）
- 「小望遠鏡群を利用した地球接近天体早期発見システムの開発」柳沢俊史（JAXA）
- 「岡山光赤外線 3.8m 望遠鏡計画について」栗田光樹夫（京都大学）
- 「木曽広視野 CMOS カメラ Tomoe による太陽系始原天体の探査」菊池勇輝（東京大学）
- 「MTSAT を用いた日本及び周辺地域の晴天率調査」坂本強（日本スペースガード協会）
- 「DEBDAS 地上観測網の構築」山岡均（九州大学）

■ セッション３＜ Asteroid Observation Network in Asia-Pacific Region ＞

- 「Proposal for Asteroid Observation Network in Asia-Pacific Region」Makoto Yoshikawa（JAXA）
- 「Thailand’s Robotic Telescope Network for NEO and Space Debris Observation」Saran Poshyachinda（National Astronomical Research Institute of Thailand）
- 「NEO Survey and alarming of China」Haibin Zhao（Purple Mountain Observatory）
- 「The DEEP-SOUTH: Round-the-clock Physical Characterization of NEOs in the Southern Hemisphere」Hong-Kyu Moon (KASI)
- 「Observing facilities accessible from Taiwan and recent Taiwan-Japan collaborations」Daisuke Kinoshita (National Central University)
- 「Optical Observations and Co lor Survey of Near Earth Asteroids」Chien-Hsien Lin (Space Science Institute, Macau University of Science and Technology, Macau)
- 「Asteroid Observation in Mongolia」Namkhai Tungalag (Research Center of Astronomy and Geophysics, Ulaanbaatar, Mongolia)
- 「Observations of Small Bodies and Space Debris Information System in Indonesia」B. Dermawan (Bosscha Observatory and Astronomy Research Division, Bandung Institute of Technology)
- 「Finding NEOs in the Context of an Agency Grand Challenge」Lindley Johnson (NASA HQ)

■ セッション４＜スペースデブリ＞

- 「暗いストリークを用いた軌道上物体検出手法」田川真（九州大学）
- 「微光な移動天体の追跡方法に関する研究」上津原正彦（統計数理研究所）
- 「美星スペースガードセンターにおける人工物体の光度変化観測」西山広太（日本スペースガード協会）
- 「TDI モードの応用による人工衛星 / スペースデブリの光度短周期時間変動観測 III」奥村真一郎（日本スペースガード協会）
- 「スペースデブリの光学観測およびその回転について」小田寛（宇宙航空研究開発機構）
- 「低軌道デブリの地上光学観測システムの検討」黒崎裕久（宇宙航空研究開発機構）

■ ポスター

- 「オールト雲起源新彗星の力学進化と銀河潮汐力」伊藤孝士（国立天文台）
- 「2014 年ほうおう座流星群予報」齋藤雄大（日本大学理工学部航空宇宙工学科）
- 「小惑星イトカワの地球衝突せば」上原和也（JAEA/JAXA）
- 「マルチインパクト仮説による小惑星帯と隕石の起源」種子彰（SEED SCIENCE Labo）
- 「木曽広視野 CMOS カメラ Tomoe による太陽系始原天体の探査」菊池勇輝（東京大学）

続いてマカオからは，台湾，中国，アメリカの協力により地球近傍小惑星のカラーバリエーションを調べる観測について紹介があった(Lin・Ip)．モンゴルの Research Center of Astronomy and Geophysics からは，ISON プロジェクトの協力により Khureltogoot observatory に導入された広視野望遠鏡での NEO 追跡

観測に関する講演(Tungalag・Schmalz・Voropaev・Molotov)，またインドネシアからはティモール島での新しい観測サイトの構築とアジア太平洋地域観測ネットワークの構築に合わせた小天体・スペースデブリ観測手法の開発についての講演があった(Dermawan・Putra・Hidayat 他)．最後にアメリカから，NEO観測プログラムに関してNASAで進行中の活動内容，特に国連が支持し推し進めようとしている国際的な活動との関連についての話題と将来のNEO観測活動計画についての紹介があった(Johnson・Abell)．

2.4 セッション4(スペースデブリ)

セッション4ではスペースデブリに関連する講演が6件あったが，そのすべてが光学観測の技術的な内容に関係するものであった．最初の2件は微光なデブリを検出するためのアイデアに関する講演である．デブリ観測時には望遠鏡の動きに対して高速移動する物体は観測画像の中で線上に伸びたストリークとして現れるが，画像データをストリークの方向に足し合わせることによりノイズに埋もれて見えなかった物体を検出する手法の提案(田川・柳沢・黒崎 他)と，ベイズ統計的手法により，各画像フレーム上の微光な移動物体の位置や速度を推定・追跡する手法についての検討結果(上津原)についての講演があった．続いて美星スペースガードセンターにおけるデブリ観測に関する講演が2件あり，人工天体の光度変化観測への取り組みの中でデータ処理・データ解析用に開発したソフトウェアの紹介(西山・奥村・高橋・吉川)と，露出をしながら電荷転送を行うTDI方式によるCCD読み出しを応用して測定した0.1秒程度の短時間の光度変動を検出した結果についての報告(奥村・西山・高橋・吉川)があった．最後にJAXA研究開発本部から，JAXA所有のAustralia Remote Observatory(オーストラリア・リモート観測所)にある18cm望遠鏡で直線運動検出法を用いて検出した移動物体のライトカーブに関する報告(小田・黒崎・柳沢・田川)と，多数の光学センサ(小型望遠鏡)を経度方向に離れた2地点に設置することにより低軌道デブリの高精度軌道決定が可能になるシステムについての紹介があった(黒崎・柳沢・小田)．

2.5 ポスター講演

この研究会では口頭セッションに加え，ポスター発表の場も用意した．口頭での発表と同じ内容のポスター発表が2件，ポスターのみの発表が3件あった．ポスターのみの3件の発表内容について以下に紹介する．1件目のポスターは，太陽から距離800 A.U.以遠の領域を飛行する彗星が銀河潮汐力を受けた場合の影響について考察した結果の紹介(伊藤・樋口)，2件目は289P/Blanpain(ブランパン彗星)からの放出ダストについて4次元計算を行い，ほうおう座流星群の予報を行った結果の紹介(齋藤・佐藤・阿部)，3件目は，イトカワクラスの小惑星が地球に衝突した場合のシミュレーション結果と衝突を回避する手段についての考察結果を発表するポスターであった(上原)．

3. まとめ

1日半という短い時間であったが，以上のように太陽系始原天体のサイエンスからスペースガードの次期計画，スペースデブリの観測まで幅広い分野について活発な議論が行われ，チェリャビンスク隕石の落下以降のスペースガードの状況，それを取り巻く情勢についても理解が深まったのではないかと思っている．またアジア各国からもネット経由で多くの発表があり，今後国際的な協力関係を進めてゆく上で非常に有意義な時間となった．アジア太平洋地域小惑星観測ネットワークや次期望遠鏡計画についてはここで十分な議論が出来たわけではないが，これらの計画を実現するための「はじめの一歩」としての有意義な研究会であったと考えている．なお，講演の資料(集録)は後日，「スペースガード研究7」として刊行するとともに，日本スペースガード協会・スペースガード研究センターのウェブ上(http://www.spaceguard.or.jp/RSGC/results.html)でも公開する予定である．

最後に，会場を提供していただいた国立天文台，講演していただいた皆様，そして裏方として雑務を手伝っていただいた明星大学の山田遥子さん，福石美貴子さん，日本スペースガード協会の根本しおみさん，国立天文台の青木真紀子さんにはこの場を借りて深く感謝の意を申し上げたい．

←目次へ

はやぶさ2014シンポジウム開催報告

安部 正真[1]

2014年12月4日から5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．これは昨年10月に開催された第1回宇宙物質科学シンポジウム（はやぶさ2013シンポジウム）に続くものです．

今年のスコープは分光観測による小惑星表面物質推定と数値シミュレーションや理論計算による小惑星の衝突進化とし，招待講演者にPatrick Michel氏，廣井孝弘氏，Thomas Burbine氏，Daniel Scheeres氏をお呼びしました．また科学組織委員会としてRichard Binzel氏，Harold Connolly氏，小島秀康氏，宮本英昭氏にお願いし，プログラム編成や，座長だけでなく，それぞれのご専門の発表をしていただきました（Binzel氏は所用により欠席）．

シンポジウムの日程は，国立極地研究所で開催されている，極域シンポジウムの南極隕石セッションとの連続開催として決めました．これにより，海外からの研究者が1度の来日で関連するシンポジウムの両方に出席できることと，シンポジウム主催者側も招待講演者等の旅費のサポートがしやすいというメリットがありました．実際，本シンポジウムの開催日数が昨年の3日間から1日減って2日としたにも関わらず発表数参加者数ともに前年同様の数（参加者数81名，講演数64件）となりました．

当初はやぶさ2の打ち上げが11月30日と設定され，シンポジウム初日までの間隔が短い状況での開催を覚悟していました．実際には打ち上げ日が2度にわたって変更され，主催者側も出席者側も多少の混乱は有りましたが，無事シンポジウム前日の12月3日に打ち上がり，当シンポジウムについては大きなプログラム変更もなく開催することができました．

初日は，科学組織委員会委員長の藤本正樹氏によるトークから開始され，午前中はロゼッタミッションの最新情報の紹介など，小天体探査ミッションに関わる話題を集め，午後からははやぶさ帰還試料の国際公募研究のうち主に年代測定に関わるトーク，その後招待講演による分光分析研究に関わるトークなどがありました．

夜の懇親会は打ち上げ直後のはやぶさ２運用に関わっていた関係者も加わり盛況でした．はやぶさ２打上記念焼酎や南極の氷などもふるまわれました．

２日目は，はやぶさ帰還試料によって大いに研究の進んだ宇宙風化の話題でセッションが午前に組まれ，午後は隕石サンプルも含めた物質科学研究の話題，小天体のダイナミクスの話題技術開発などの話題が中心となりました．

本シンポジウムの特徴として，海外からの参加が半数近くあり，リターンサンプル研究を軸とした物質科学研究分野の成果が，惑星科学の他分野の研究者と融合する機会にもなっていることが挙げられます．例として，今回のシンポジウムの発表の中で，はやぶさ帰還試料の分析から得られた，試料に刻まれた様々な年代情報に関する分析結果の発表があり，その結果は，理論的や実験的アプローチによる小天体の形成史や形成後の表層進化の研究に大きな制約や情報をもたらすことになっています．また，学生の参加も前回より増え，最新の研究成果に触れることで，自身の研究に対して多いに刺激になっていると思われます．

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

←目次へ

一点反省点を挙げるとすれば，日程が2日間と短くなったにも関わらず，講演数が前年と変わらなかったため，招待講演を含め講演者の講演時間が短く(一人当たり15分)なってしまったことです．参加者の方からももっと長い時間講演したかった，講演を聞きたかったという声が多くありました．こういった声などについては次回のシンポジウム開催の際に反映していきたいと考えています．

来年も同時期にシンポジウムの開催を計画しています．第3回のはやぶさ帰還試料の国際公募研究の募集が始まっていますが，次回もはやぶさ帰還試料の国際公募研究の成果報告だけにとどまらず，幅広い研究分野の研究者が集まるシンポジウムとすべく，スコープの設定や，科学組織委員会の形成をしていきたいと考えていますので，皆様のさらなる参加をお願いいたします．

シンポジウムプログラム(セッション名のみ)

【2014/12/4 Thu.】

Opening
Planetary Missions
Poster Viewing
Chronology
Spectroscopy
Reception Party

【2014/12/5 Fri.】

Space weathering and Regolith
Described for Meteorite and Hayabusa Sample
Dynamics of asteroids
Summary and Wrap-Up
Tour of Curation and Sagamihara Campus

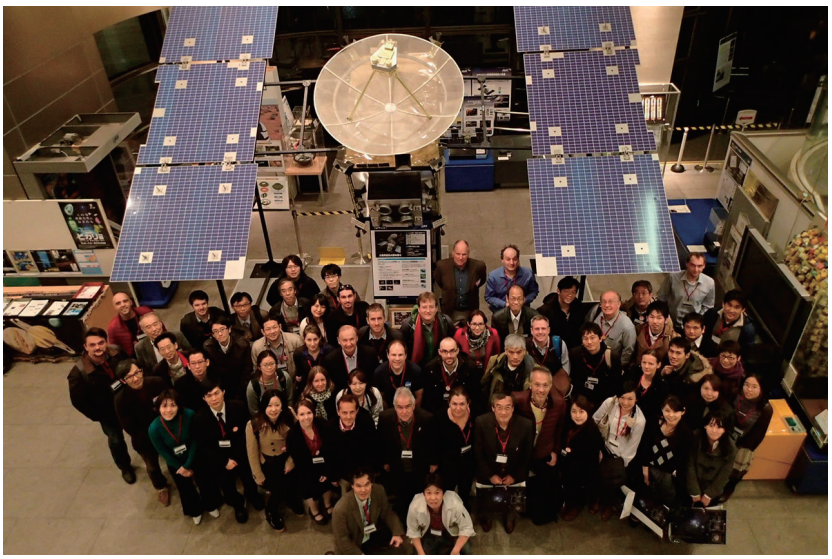

写真1：シンポジウム期間中の集合写真．

←目次へ

第31回 Grain Formation Workshop報告

本田 充彦[1]，左近 樹[2]，木村 勇気[3]，三浦 均[4]，下西 隆[5]，瀧川 晶[6]，田中 今日子[3]，上塚 貴史[7]

2015年1月7日から1月9日にかけて，文部科学省共済組合箱根宿泊所強羅静雲荘にて第31回 Grain Formation Workshopが行われました．本Workshopは宇宙における固体物質をテーマとした研究会であり，理論・実験・観測問わず分野横断的，かつ自由な議論を行う場として1979年以来続けられているアットホームな研究会です．今回は北日本を中心とした荒天のため，山本哲生さんがご参加できませんでしたが，インド等の海外からの研究者を含む20人程度の参加があり，本Workshopの伝統通りのアットホームな雰囲気の下，多くの実りある議論を深めることができました．

固体物質と一口に言っても，本当に多様です．地球型惑星の主要材料のケイ酸塩鉱物を始めとし，低温領域で主要なH_2Oをはじめとした様々な氷，宇宙空間でよく観測される PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)を中心とした炭素質ダスト，そして生命との関係から興味を持たれている有機物．さらには，それらが存在する環境も多岐にわたります． 我々の太陽系天体はもちろん，ダスト形成現場である晩期型巨星や超新星，星間空間，銀河，そして星惑星形成領域．それぞれの研究者・研究分野が多様なバックグラウンドを持つため，それぞれの分野で考えている物質進化描像が，まったく異なることも多く，カルチャーショックを受けることが多々あります．しかし，だからこそ新しい研究の芽があると思っています．

このように多様な分野の集まりのため，一人当たりの発表時間も40分と充分な時間をとりました．おかげで分野外の研究者からも活発な質疑応答もなされました．そのため若干時間超過しがちでしたが，ゆったりとしたプログラム編成のため，大きな問題もなく，大変充実した研究会であったと思います．今回の開催場所である強羅静雲荘には温泉もあり，セッション後の夕食や温泉においてもリラックスした環境の下，若手を中心に夜遅くまで自由な議論が行われました．

懇親会は二日目の夜に，クラシカルな日本の宴会スタイルで行なわれました．今回は参加できなかった大阪産業大学の茅原さんからお送りいただいた高級日本酒も堪能し，海外の研究者の方にも大変楽しんでいただけたと思います．

次回は，2015年の秋ごろに北海道で行なわれる予定です．固体物質をキーワードに，惑星科学から天文・宇宙にわたる分野横断的な研究に興味のある方のご参加を大歓迎いたします．

1. 神奈川大学
2. 東京大学
3. 北海道大学
4. 名古屋市立大学
5. 東北大学
6. 京都大学
7. 東大天文センター
hondamt@kanagawa-u.ac.jp

— Program (oral presentations) —

【7th, January (Wednesday)】

13：00－13：30 registration

13：30－13：40 opening remark

13：40－14：20 Takashi Onaka (University of Tokyo) “Study of interstellar ices based on AKARI observations”

14：20－15：00 Takashi Shimonishi (Tohoku University) “Processing of ices in a massive star-forming region”

図1：研究会会場の様子.

図2：懇親会の様子.

図3：集合写真.

15：00－15：20 coffee break

15：20－16：00 Tamami Mori (University of Tokyo) “Capturing the CO molecular emission of mysterious ejecta in G318. 05+0. 09”

16：00－16：40 Ronin Wu (University of Tokyo) “Physical properties of molecular gas and dust in the star－forming regions”

16：40－17：20 Mitsuhiko Honda (Kanagawa University) “Dust sciences in the protoplanetary disks in the 2020s”

18：00－20：00 Dinner

21：00－22：00 Discussion

【8th, January (Thursday)】

9：00－9：40 Chiyoe Koike (Ritsumeikan University) “The infrared spectra of wustite particles and those properties”

9：40－10：20 Akemi Tamanai (Heidelberg University) “Infrared investigations focused on non－stoichiometric amorphous silicates”

10：20－10：40 Coffee break

10：40－11：20 Aki Takigawa (Kyoto University) “Isotopes, morphologies, crystal structures, and microstructures of circumstellar oxide dust”

11：20－12：00 Yuki Kimura (Hokkaido University) “Nucleation processes of cosmic dust particles：Case of iron”

12：00－13：20 Lunch / Poster

13：20－14：00 Seiji Kimura (The University of Electro－Communications) “Synthesis of nitrogen－bearing carbonaceous material with 220 nm absorption and the structural implication by Raman spectroscopy”

14：00－14：40 Amit Pathak (Tezpur University) “Spectroscopy of Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)”

14：40－15：20 Rupjyoti Gogoi (Tezpur University) “The Dust Content and Radiation Fields of sample of galaxies in the ELAIS－N1 field”

15：20－15：40 Coffee

15：40－16：20 Hitoshi Miura (Nagoya City University) “Evaporation of icy grains in nebular shocks”

16：20－17：00 Kyoko K. Tanaka (Hokkaido University) “Thermal evolution of planetesimals and dust particles by planetesimal bow shocks”

17 : 00 – 17 : 40 Posters;
C. Kaito (Ritsumeikan Univ.), "Characteristic For-mation of Ultrafine $CaCO_3$ Grain Crystal"
I. Sakon (University of Tokyo) "Infrared Properties of Nitroge – Containing Carbonaceous Composite & Dust Exposure Experiment Project using ISS/JEM/ExHAM"
18 : 00 – 20 : 00 Dinner
21 : 00 – 22 : 00 Discussion

【9th, January (Friday)】
9 : 00 – 9 : 40 Mark Hammonds (University of Tokyo) "Interstellar PAHs : Emission band profiles and structural variation"
9 : 40 – 10 : 20 Ryou Ohsawa (IoA, University of Tokyo) "PAH Processing in the HII region : M1 – 78"
10 : 20 – 11 : 00 Takafumi Kamizuka (IoA, University of Tokyo) "MIMIZUKU – The mid – infrared camera and spectrograph on the TAO telescope"
11 : 00 – 11 : 10 Closing remark
11 : 10 – 14 : 00 Lunch/Discussion

←目次へ

「第二回iSALE勉強会」参加報告

末次 竜[1,2]

第二回iSALE勉強会が2014年10月22日に北海道大学低温科学研究所で行われました．この勉強会はShock physics codeであるiSALEを日本の惑星科学コミュニティに広めることとユーザー同士の情報交換を目的に開催されています．本稿では二回目の開催となったiSALE勉強会について報告いたします．

まずiSALEについて簡単に紹介しておきます．iSALEとはimpact-SALEの略称であり，流体計算コードであるSALE(Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)をベースにして作られたShock physics codeです[1]．iSALEには弾性・塑性モデル，破壊モデル，空隙モデルなどが組み込まれており，地球惑星科学分野において重要な天体の衝突現象を扱えるようになっています．またiSALEには計算結果を描画するプログラムが用意されており，結果の可視化も容易に行えます．さらに大きな特徴として，開発メンバーらに必要情報を送りアカウントを作成してもらう必要はありますが，iSALEは無償で公開されているという点が挙げられます．そのため，欧米の多くの研究者にiSALEは利用されています．

日本の惑星科学／衝突研究コミュニティにもiSALEを広める目的で「iSALE users group in Japan」が千葉工業大学の黒澤耕介氏を中心に立ち上げられ，現在34人の研究者，大学院生が参加しています．グループではwikiを運営しiSALEの詳細なインストール方法やデモ計算などの情報をまとめています．iSALEについて興味をもたれた方はwikiページ(https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/)をご覧ください．2014年2月には，勉強会がはじめて開催され，多くの研究者が参加しiSALEの特性や使用方法について学びました[2]．今回の第二回iSALE勉強会は，iSALEを実際に動かすことを目的としたもので，初回の勉強会に比べ，より実践的なものとなりました．

1. 神戸大学自然科学系先端融合研究環
2. 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
suetsugu@buffalo.kobe-u.ac.jp

プログラム

14：00－14：20
黒澤耕介(千葉工大) 趣旨説明とiSALEについての簡単な説明
14：30－17：00
黒澤耕介(千葉工大) iSALE実践
17：00－18：00
iSALEに関する話題提供，計算例の紹介

- **常昱**(東大)「クレーター周辺に堆積するイジェクタの経験最大温度推定～トレーサー粒子を用いた解析～」
- **細野七月**(理研)「iSALEと粒子法コードの比較に向けて」
- **巽瑛理**(東大)「Acoustic fluidizationモデルと最終クレーター形状」
- **黒澤耕介**(千葉工大)「iSALEを用いたSCI衝突計算」

はじめに黒澤氏からiSALEについての簡単な説明が行われました．本稿でも記載したようなiSALEの概要に加え，初期条件の書かれた二つのファイルを変更するだけで，様々な衝突シミュレーションが行えるiSALEの敷居の低さについても強調されていました．調べたいテーマがある場合は，iSALEに用意された

図1：勉強会の様子.

図2：参加者の集合写真.

様々なデモの中から，行いたい計算に近いデモを選び，パラメータを変更するのが最も効率のよい方法とのことでした.

次のiSALE実践ではiSALEで計算を行い計算結果の可視化を行いました．まず黒澤氏に初期条件として入力するパラメータについての詳細な説明をしていただき，実際に初期条件を変更した場合の計算例についても示していただきました．さらにVIMoDというiSALEによる計算結果を可視化するプログラムについて解説していただき，衝突による天体の温度や圧力などの時間変化，トレーサー粒子をプロットする方法などを説明していただきました．私はこの実践編でプロジェクタイルを球状から円筒状に変更することや，計算にトレーサー粒子を導入することなどを行いました．前者は形状パラメータをSPHEROIDからCYLINDERに変更するだけ，後者は入力ファイルにトレーサー粒子に対する記述を数行追加するだけで計算ができてしまい，iSALEがユーザーフレンドリーな設計と言われる所以を実感することができました.

実践編が終わると，iSALEを実際に研究に用いている，もしくはiSALEにまつわる研究を行っている四人の方々に，研究について紹介していただきました．まず東京大学の常昱氏には，衝突速度の違いによるイジェクタが経験した最大温度の違いについて発表していただきました．常氏はトレーサー粒子を研究で使用していることもあり，トレーサー粒子の使用方法についても丁寧に解説してくださいました．理化学研究所の細野七月氏には衝突シミュレーションでもよく用いられているSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)について解説していただきました．従来のSPH法の概要とその問題点，そして改良されたSPH法による問題点の解決について簡潔に説明してくださいました．東京大学の巽瑛理氏には，衝突実験によって得られた複雑クレーターの形成過程について解説していただき，iSALEによる衝突シミュレーションの結果との違いについて説明してくださいました．最後に黒澤氏には12月に打ち上げが成功したはやぶさ2に搭載された小型の衝突装置SCI(Small Carry-on Impactor)を念頭においた半球殻弾丸の衝突シミュレーションについて発表していただき，衝突後のクレーター形成の様子について解説していただきました.

第二回iSALE勉強会は半日という短いものでしたが，その内容は簡単なiSALEの紹介から使用方法，実践，iSALEに関連する研究の紹介と非常に濃いものとなりました．参加者からもiSALEの詳細な内容についての質問が多く飛び交い，この勉強会の勢いを感じました．また私のiSALEについての理解も進みました．最後になりましたが，ここで改めて勉強会を企画してくださった世話人の方々に感謝申しあげます.

参考文献

[1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 103.
[2] 常昱, 2014, 遊星人 23, 156.

←目次へ

「天体の衝突物理の解明(X)～日本の衝突研究の未来～」参加報告

桑原 秀治[1]

1. はじめに

2014年10月22日から25日にかけて北海道大学低温科学研究所にて第10回「天体の衝突物理の解明」研究会(以下，衝突研究会とする)が開かれた．節目となる今年度研究会では“日本の衝突研究の未来”をテーマにこれまで日本の衝突研究を黎明期から牽引してこられた水谷仁氏と藤原顕氏を迎え，ご講演頂いた．招待講演以外では25件の口頭発表と17件のポスター発表があった．講演時間は途中の質疑を含めて招待講演と一般講演についてそれぞれ1時間，30分間の時間配分となっている．本稿では今年度衝突研究会の様子を各講演内容を交えて簡単に紹介していく．詳細については研究会webページにある発表要旨を参考されたい(http://www.impact-res.org/impact14/index.html)．

2. 講演概要

表1に今年度衝突研究会の日程プログラムを示す．以下では招待講演，一般講演の概要についてそれぞれ紹介する．

2.1 招待講演

水谷仁氏は衝突クレーターのサイズを任意の衝突条件と関係付けるスケーリング則の構築に関する仕事を中心にご講演された(講演の様子を図1に示す)．現在，クレータースケーリング則として最もよく引用されているものはπスケーリング則であり[e.g., 1]，これは

図1：水谷氏の招待講演の様子．

クレーターのサイズと衝突条件(例えば，衝突速度，弾丸と標的の密度など)の関数関係を次元解析により表現し，実験値に合うようにパラメータを決定した経験則である．πスケーリング則によるとクレーター体積は弾丸のサイズ，密度，衝突速度に個々に依存するのではなく，それらを結合させた量(以下，結合変数とする)に依存するとあるが，その物理的意味は明示されていない．また，室内実験スケールで構築されたπスケーリング則が果たしてどういった衝突条件，例えば衝突速度範囲で適用可能なのかも不明であった．

こうした問題はπスケーリング則が衝突物理過程に基づいて定式化を行っているわけではないことに由来しており，この点について水谷氏は理論的なスケーリング則(以下，水谷スケーリングとする)を構築された[e.g., 2]．水谷スケーリングによると，結合変数は最大衝撃圧力と衝突点から動径方向の圧力減衰の解析的表現の掛け合わせで表すことができ，結合変数の物理的解釈が明確になった．また，水谷スケーリングは物質強度と衝撃圧力との競合で決まる物質の衝突破壊現象に関するパラメータ表現についても重要な示唆を

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

表1：天体の衝突物理の解明(X)のプログラム.

10 月 22 日(水)
14:00~18:00　iSALE 勉強会

10 月 23 日(木)
13:30 加藤伸祐　(名大)　クレーターを用いた月の最後の火成活動の噴出量の推定
14:00 諸田智克　(名大)　月の衝突盆地放出物の厚さ分布
15:00 杉浦圭祐　(名大)　Tillotson 状態方程式を導入したゴドノフ SPH 法での衝突シミュレーション
15:30 桑原秀治　(東大)　地球型惑星の核-マントル間の塩素分配から探る原始海洋形成の描像
16:00 栗田敬　(東大)　火星における斜め衝突クレーターの形態学
17:00 松榮一真　(神戸大)　粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 II
17:30 山田智哉　(名大)　レゴリス対流による小惑星表面更新のタイムスケールの推定
18:00 紫垣沙央　(神戸大)　コンドリュールの強度測定とコンドライト模擬試料の圧縮実験
18:30-20:00　ポスターセッション

10 月 24 日(金)
9:30　長谷川直　(宇宙研)　2014 年度の宇宙研超高速衝突実験設備の現状
10:00　柳澤正久　(電通大)　高速度衝突現象の高速度撮影と測光観測
10:30　道上達広　(近畿大)　室内衝突実験における玄武岩の破片形状と小天体への応用
11:30　高木靖彦　(愛知東邦大)　玄武岩に形成されたクレーターの三次元形状測定とそれから求められる π スケーリング則
12:00　木内真人　(神戸大)　模擬低重力下における砂標的へのクレーター形成実験 II
12:30　辻堂さやか　(神戸大)　石英砂ターゲットにおけるクレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究
14:15　水谷仁　(ニュートンプレス)　日本における衝突実験,四方山話と水谷スケーリング則
15:15　藤原顕　(関西大)　衝突実験始まりのころ
16:45　高野翔太　(神戸大)　氷地殻を模擬した氷・砂混合物への高速度クレーター形成実験
17:15　黒澤耕介　(千葉工大)　球弾丸斜め衝突時に発生する Jetting の超高速撮像計測
17:45　大野宗佑　(千葉工大)　超高速度衝突で生成する液滴に関する実験的研究
18:15-20:45　懇親会

10 月 25 日(土)
9:30　門野敏彦　(産業医科大)　衝撃波圧力の減衰:数百 GPa から HEL まで
10:00　鈴木絢子　(宇宙研)　曲率のある面への衝突:弾丸密度の影響
10:30　保井みなみ　(神戸大)　石膏球の衝突破壊実験:複数回衝突が衝突破壊条件に与える影響
11:30　中村昭子　(神戸大)　強度支配域での衝突破壊のサイズ依存性
12:00　岡本尚也　(神戸大)　高空隙ターゲットで得られたキャビティサイズスケーリング則の彗星表面への応用
12:30　原田竣也　(神戸大)　多孔質標的への低密度脆性弾丸の衝突
14:30　兵頭拓真　(横浜国立大)　小惑星探査機はやぶさ 2 搭載サンプラーホーン内の粒子挙動に関する研究
15:00　巽瑛理　(東大)　天体表面ブロック層破壊による弾丸減速効果とクレーター則
15:30-16:30 総合討論

【ポスター発表】
鈴木絢子　(宇宙研)　新しい小型ガス銃の開発と現状
金久保隆太　(電通大)　蒸気雲の固体壁への衝突による発光
田口雅子　(名大)　月のアポロ盆地の火成活動:クレータを用いたマグマ噴出量の推定
安藤滉祐　(名大)　1999JU3 の衝突確率とクレーター年代学関数の構築
加藤麻美　(名大)　月面クレータからみた過去 32 億年間の衝突頻度の長期変化
大村知美　(神戸大)　衝突破片層の空隙率
和田浩二　(千葉工大)　粒子系衝突におけるエネルギー散逸
平井隆之　(宇宙研)　非分離型サボを用いた二段式軽ガス銃におけるサブミリプロジェクタイルシングルショット法の開発
岡本千里　(神戸大)　炭素質コンドライトを模擬したガラスビーズ焼結体へのクレータ形成実験
常ユイ　(東大)　チクシュルーブ・クレーター内部掘削試料から抽出した衝撃変成石英のカソードルミネッセンス:衝撃変成と発光スペクトル
黒澤耕介　(千葉工大)　不規則形状弾丸による高空隙率小惑星表面掘削の数値衝突計算
三宅範宗　(千葉工大)　納豆菌ウィルスの衝撃耐性実験
澤田なつ季　(名大)　衝突クレータによって露出した月初期の貫入岩の探索
末次竜　(神戸大)　捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布
芝池諭人　(東工大)　冥王代の天体衝突が大陸地殻に与える影響とジルコン年代分布
細野七月　(理研)　Terrestrial magma ocean origin of the Moon I: Equation of state for liquid
上田翔士　(東工大)　岩石惑星における小天体衝突シミュレーション

図2：藤原氏の招待講演の様子.

図3：衝突研究会参加者の写真.

与える内容となっている.

藤原顕氏は70年代当時の衝突実験をはじめられたいきさつを中心にご講演され，当初は惑星間塵をピエゾ素子を用いて検出する機器開発のためのダスト加速装置製作を行っていたが，京都大学に二段式軽ガス銃が設置されたことをきっかけとして衝突破壊現象に関する実験的研究をはじめられたことをお話し頂いた(講演の様子を図2に示す)．藤原氏の仕事は衝突研究に惑星科学的な視点を持ち込み，小惑星の衝突破壊現象についてはじめて実験的制約を与えた[e.g., 3]．こうした小天体の衝突破壊現象に関する実験的研究は世界中の惑星科学者に広く引用され，現在の日本の衝突研究の大きな柱となっているように思う.

2.2　一般講演

本稿では口頭発表内容についてのみ簡単に紹介する．講演初日は岩石天体の表層進化に関する発表が集中した．月に関する発表ではまず，クレーター年代学により見積もった海の噴出年代とチタン含有量の関連から火成活動を推定し，地形的痕跡との整合性について検証した研究(加藤)が発表された．続いて月の全球的な衝突盆地放出物の厚さ分布推定から最も始原的な初期地殻を露出している箇所を推定した研究(諸田)があり，月北半球裏側でMgに富んだ始原的と見られる地表面組成が観測された理由として衝突盆地放出物の堆積量が薄かった可能性が指摘された.

地球型惑星の衝突に関連した研究発表では，従来法と比較して衝撃波を適切に取り扱える流体数値計算法の開発に関する研究(杉浦)，地球の核－マントル間の塩素分配から核組成や原始海洋形成の描像を推定する研究(桑原)，火星の特徴的な衝突クレーター形状の成因に関する研究(栗田)が発表された．数値計算は惑星スケールでの衝突現象を理解するうえで強力な手法となるが，今後も室内実験との比較による検証が必要であろう．地球表層に存在する塩素は始原天体と比較して同程度の揮発性をもつ元素よりもさらに枯渇している．こうした地球の塩素欠乏は原始海洋の散逸や核への取り込みを反映しているのかもしれない．火星には他の岩石天体と比較して特徴的な形態をもった衝突クレーターが多く見られ，クレーター形成時の火星表層環境を強く反映していると考えられている．火星の複雑クレーターの形態学的特徴の成因についてはいまだ論争中であり，収束する気配は見えていない．本研究会においても講演時間ぎりぎりまで白熱した議論が交わされた.

小惑星上の衝突現象に関する講演では小天体全体を揺らす衝突励起地震の伝播に関する実験的研究(松榮)，またそれによって駆動されるレゴリスの流動化現象と地表面更新に関する実験的研究(山田)，小天体が過去に経験した衝突履歴を探るためのコンドリュールの強度測定に関する研究が発表された(紫垣)．衝突励起地震による固体物質の流動化現象は複雑クレーターの崩壊を駆動するメカニズムとしても考えられており[e.g., 4]，今後もさらなる実験的制約と理論モデルの構築が望まれるであろう.

講演二日目は衝突現象素過程に関する室内実験研究が発表された．まず，日本の衝突実験研究拠点の一つである宇宙研の衝突実験設備の現状に関する発表があり，衝突銃を用いた実験に関連する論文の最近の投稿数などが紹介された(長谷川)．続いて秒速数kmでの

高速度衝突に伴う物質の発光現象に関する発表(柳澤)があった．弾丸の物性と発光特性の関係がより明らかになれば測光観測から衝突体の性質を推定できるようになるかもしれない．衝突破壊現象に関する研究では破壊された玄武岩破片の形状に関する発表(道上)があった．破片形状と衝突破壊の程度の関係を定量的に求めることで小惑星表層のボルダーなどから母天体の衝突破壊の程度を推定する手助けとなるかもしれない．

衝突クレーター形成過程に関する講演では玄武岩標的のスケーリング則構築(高木)，砂標的へのクレータ形成効率の重力依存性（木内)，衝突放出物の速度分布に関するスケーリング則構築(辻堂)，氷と砂混合標的への高速度クレーター形成(高野)に関する実験の研究発表があった．既存のスケーリング則では表現できていない効果を考慮した統一的なスケーリング則を確立するにはさらなる実験的制約が必要そうである．

衝突圧縮過程に関する研究では高速度衝突圧縮時に発生する物質の高速噴射現象に関する実験と理論モデルの構築(黒澤)，また，>10km/sの超高速度衝突により生成する液滴のサイズ分布(大野)について発表があった．高速度カメラなどの計測機器の時間分解能の上昇に伴い，物体が衝突した瞬間から物質が飛散し始めるまでの様子が詳細に撮影され，これまで理論研究が特に先行していた衝突圧縮の描像にはじめて実験的制約が与えられ，衝突現象の物理過程に関する理解がさらに進んだ印象を受けた．

講演最終日は標的の形状や物性の効果に関する衝突実験を中心に講演が続いた．はじめに岩石メルト，蒸気が発生する衝撃圧力条件での衝撃波減衰に関する研究(門野)，曲率をもった標的への衝突実験(鈴木)，事前衝突を受けた標的の衝突破壊実験(保井)についての発表があった．こうした実験は実際の天体衝突問題を考えるうえで重要であるが，複雑な過程を含んでいるために実験結果の解釈に難しさを感じた．続いて強度支配域における衝突破壊強度の天体サイズ依存性に関する実験(中村)，彗星がもつ高い空隙率を考慮した衝突実験(岡本，原田)，はやぶさ2に搭載されているサンプラーホーンの衝突回収模擬実験(兵頭)，弾丸と標的を構成するブロックサイズが近い場合のクレーター掘削効率に関する実験(巽)に関する発表があった．近年の探査によって始原天体表層環境についての知見が増えつつあり，こうした実験の結果を合わせることで始原天体の衝突進化に関する新たな描像が今後明らかになっていくであろう．

3. 最後に

今年度は衝突研究会開催10回目となる節目を迎え，これまで日本の衝突研究界を牽引してこられた水谷仁氏と藤原顕氏から貴重なお話をご講演いただいた．招待講演以外の一般講演も時間配分ぎりぎりまで議論が交わされ，盛況のうちに全日程が終了した．また，ポスター発表においても終始活発な議論を交わす様子が見られ，参加者全員が有意義な時間を過ごせたようである．例年の参加報告でも述べられているように衝突研究会の魅力は議論しやすい雰囲気と研究者間の活発な交流にあると思う．次年度も開催予定であるため，衝突に関連した研究を行っている方や衝突現象に少しでも興味を持たれている方はぜひ参加されることを薦めたい．

謝 辞

研究会を開催するにあたってご尽力くださいました世話人の皆様，北海道大学低温科学研究所の方々に感謝致します．また，本稿執筆の機会は千葉工業大学惑星探査研究センターの黒澤耕介さんより頂きました，感謝致します．

参考文献

[1] Holsapple, K. A. and Schmidt, R. M., 1987, J. Geophys. Res. 92, 6350.
[2] Mizutani et al., 1990, Icarus 87, 307.
[3] Fujiwara, A. and Tsukamoto, A., 1980, Icarus 44, 142.
[4] Melosh, H. J. and Ivanov, A., 1999, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 27, 385.

←目次へ

「第3回地球生命研究所(ELSI)国際シンポジウム」開催報告

木村 淳[1]，玄田 英典[1]，藤井 友香[1]，木賀 大介[1]，青野 真士[1]，北台 紀夫[1]

1. はじめに

2015年1月13日(火)－15日(木)の日程で，「第3回地球生命研究所(Earth-Life Science Institute)国際シンポジウム」を東京工業大学大岡山キャンパスにて開催した．2013年3月，ELSIの開所式を兼ねて開催された第1回シンポジウムでは，ELSIの理念・ミッションとして「地球惑星科学と生命科学の2つの学問を融合し，生命が生まれた地球初期の研究から生命の起源と進化を解き明かす」ことを掲げ，200人超の参加者とともにELSIの目指す科学目標が議論された．昨年3月の第2回シンポジウムでは「Origin & Evolution of the Earth-Life System」をテーマとし，サブテーマを「Origin of Life : Scenarios & Approach」「Water in the Early Solar System」「Where Did Life Emerge? Deep Sea, Surface, or Mars?」「Exploring the Hadean Earth」「Early Evolution of Earthand Life before Oxygen」とする議論を3日間にわたって行った．

第3回となる今回のテーマは「Life in the Universe」である．ELSIは，先に挙げたミッションとともに，そのような「地球生命学」の研究を通じて地球外生命の姿と生命惑星としての地球の特殊性，そして同時に，生命惑星の普遍性を理解しようとしている．この文脈の中で系外惑星や衛星などにおける生命の探索条件を新たに提案しつつ，「生命惑星学」という分野の確立を目指している．こうした視点での現状理解の整理と将来の展望，そして必要とされる学際性や分野融合を企図し，サブテーマを「Planets as Cradles of Life」，「Towards Universal Biology」，「Signs of Life on Other Planets」と据えて3日間にわたる議論を行った．以下，簡単かつ著者陣の視点ではあるが，本シンポジウムの一端を紹介したい．

1. 東京工業大学地球生命研究所(ELSI)
junkim@elsi.jp

2. 講演会概要

表1にシンポジウムのプログラムを示す．本シンポジウムの口頭発表は全て招待講演であり，国内外からの講演募集はポスター発表として行った．3日間それぞれに上に挙げたサブテーマを掲げ，対応する話題の口頭講演とポスター講演を揃えた．また，議論を十分に行いたいという趣旨のもと，基調講演は30分の発表の後に20分の議論時間，一般講演は12分の発表の後に8分の議論時間を設けた．口頭講演の後にその日のサブテーマに対応するポスターセッションとパネルディスカッションを行い，参加者の間で活発な議論が展開された．プログラムでも分かるように多彩な分野から豪華な顔ぶれが揃ったのは文部科学省世界トップレベル研究拠点(WPI)プログラムの採択拠点であるELSIならではであろうと主催者一同自負している．

2.1 Day 1 “Planets as Cradles of Life”

シンポジウム初日は，「生命のゆりかごとしての惑星」というテーマで3つのセッションが組まれ，国内外から9名の研究者が講演を行った．Session 1では，生命を育んだ地球の特殊性および一般性と，生命惑星「地球」がいかにして誕生したのかについて議論が行われた．まず，David Stevenson氏(カルフォルニア工科大学)が基調講演を行い，太陽系の惑星たちが実に様々な特徴を持った惑星であることを指摘した上で，

表1：第3回ELSI国際シンポジウムプログラム.

Day 1 (Tuesday, January 13, 2015) “Planets as Cradles of Life”
08 : 50 − 08 : 55 Welcome Message by Kei Hirose, Director of ELSI
08 : 55 − 09 : 00 Introductory Remarks by Piet Hut, Chair of the Symposium
09 : 00 − 10 : 30 Session 1 :
David J. Stevenson (Caltech), "Planetary Diversity" (keynote speech)
Shigeru Ida (ELSI), "Planet formation and origins of H_2O, C and N on the Earth"
John Hernlund (ELSI), "The potential importance of Mg/Si ratio in terrestrial planet evolution"
11 : 00 − 12 : 30 Session 2 :
Stephen Mojzsis (Univ. of Colorado), "Early Earth vs. Origin of Life" (keynote speech)
Yuichiro Ueno (ELSI), "Carboxylic acids from Hadean and Archean atmosphere"
Hidenori Genda (ELSI), "Splashed Hadean Seawater Hypothesis"
14 : 00 − 15 : 30 Session 3 :
Seiji Sugita (Univ. of Tokyo), "The Early Atmospheres of Terrestrial Planets inferred from Impact Experiments and Asteroid Missions" (keynote speech)
Hikaru Yabuta (Osaka Univ.), "Expansion of Organic Cosmochemistry in the New Era of Small Body Missions"
Tetsuo Irifune (ELSI/GRC), "Chemical compositions of the mantle transition region and the lower mantle of the Earth"
15 : 30 − 17 : 00 Posters with flash talks on "Planets as Cradles of Life"
17 : 00 − 18 : 00 Panel Discussion
18 : 30 − 20 : 00 Public Lecture "Life in the Universe"
Mary Voytek (NASA), "How do we look for life beyond Earth?"
Shigeru Ida (ELSI), "Clues from the Moon for understanding the Earth and its life's origins"
Day 2 (Wednesday, January 14, 2015) “Towards Universal Biology”
09 : 00 − 10 : 30 Session 1 :
Nicholas Hud (Georgia Tech), "A Self-Assembly Approach to Proto-RNA" (keynote speech)
Chrisantha Fernando (Google DeepMind), "Open-Ended Evolution Revisited"
Mary Voytek (NASA), "Towards a Universal Biology"
11 : 00 − 12 : 30 Session 2 :
Paulien Hogeweg (Utrecht Univ.), "Toward a bioinformatic theory of living systems" (keynote speech)
Nicholas Guttenberg (ELSI), "Detecting the signatures of heredity in generative chemistries"
Takashi Ikegami (Univ. of Tokyo), "A study of a boids model at large scale"
14 : 00 − 15 : 30 Session 3 :
Lee Cronin (Univ. of Glasgow), "Engineering the Transition to Evolvable Chemistry : Inorganic Biology" (keynote speech)
Bruce Damer (UC Santa Cruz), "Coupled Phase Cycles : A Testable Origin of Life Scenario for Fluctuating Inland Volcanic Hydrothermal Fields"
Jim Cleaves (ELSI/IAS), "Some Perspectives on the Origin of Life from Organic Chemical Space"
15 : 30 − 17 : 00 Posters with flash talks on "Towards Universal Biology"
17 : 00 − 18 : 00 Panel Discussion
19 : 00 − Symposium Banquet
Day 3 (Thursday, January 15, 2015) “Signs of Life on Other Planets”
09 : 00 − 10 : 10 Session 1 :
Rolf de Groot (European Space Agency), "The ExoMars Programme : searching for traces of life on Mars" (keynote speech)
Bethany L. Ehlmann (Caltech), "The Aqueous Environments of Early Mars : Where are the Biosignatures and Where Should We Be Looking?"
10 : 40 − 11 : 50 Session 2 :
Chris McKay (Ames/NASA), "Search for life on other worlds of our Solar System" (keynote speech)
Takeshi Naganuma (Hiroshima Univ.), "Generation and transportation of molecular oxygen to sub-ice ocean of Europa"
13 : 20 − 15 : 40 Session 3 :
Wesley Traub (JPL/NASA), "Future Prospects for Characterizing Earth-size Exoplanets" (keynote speech)
Tyler Robinson (Ames/NASA), "Strengths and Limitations of Reflected-light Observations of the Pale Blue Dot"
Antigona Segura (UNAM), "Oxygen as a biosignature, the importance of the geological context" (keynote speech)
Yuka Fujii (ELSI), "Color variation of planets"
15 : 40 − 17 : 10 Posters with flash talks on "Signs of Life on Other Planets"
17 : 10 − 18 : 10 Panel Discussion

図1：シンポジウムの集合写真.

図2：口頭講演会場の様子.

星の分類でよく使われるHR図のように系外惑星を単純に分類することは極めて難しいことが述べられた．その後，生命誕生に本当に必要な惑星としての条件は何であるのかについて考察が行われ，地球以外の太陽系の惑星・衛星および系外惑星での生命存在の可能性について議論が行われた．井田茂氏(ELSI)は，惑星形成と生命誕生環境にとって極めて重要なH_2O，C，Nが地球では太陽組成に比べ著しく欠乏していることに着目し，まず従来の惑星形成モデルでは地球に供給されるH_2Oが多すぎる問題を解決する考え方として，cmスケールのpebbleだけが円盤の外側から移動しH_2Oを供給するモデルが紹介された．CとNの欠乏についてはレイトベニヤ仮説による供給過程に可能性があるものの，未解決な問題がいくつか残っていることを指摘した．John Hernlund氏(ELSI)は，生命誕生には表層のどこかで化学的非平衡の状態を保つ必要があるとして，プレート運動による惑星表面の連続的更新と惑星内部の化学進化の関係性について議論を行った．

Session 2では，生命が誕生したと考えられている冥王代の地球表層環境について議論が行われた．最初に基調講演を行ったStephen Mojzsis氏(コロラド大学)は現在唯一，冥王代地球の情報を引き出すことができる冥王代ジルコンのこれまでの分析結果から，冥王代地球の最新の描像が語られた．地球の形成とほぼ同時に地球への水供給が行われたこと，冥王代にも少量の大陸が存在していたこと，地球形成後の隕石爆撃期においても，生命圏は維持可能であること，などが述べられた．続く上野雄一郎氏(ELSI)は，無機物質から生命へ進化する段階で初期地球環境が地球化学的にどのような役割を果たしたのかについて考察をした．また，冥王代地球表層環境を解読する新たな手段として，玄田英典(ELSI)は月サンプルに冥王代地球の原始海洋の情報が記録されているとする仮説を提唱し，その可能性および検証法が議論された．

Session 3では，杉田精司氏(東京大学)が基調講演を行い，地球型惑星の大気形成に関するレビューを行った．特に，隕石衝突による脱ガス大気の化学組成について，最近の実験結果をふまえた発表がなされた．従来考えられていたよりも還元的な大気が衝突脱ガスによって作られることがわかり，生命の前駆物質を生成するのに有利な条件であることが述べられた．また，2014年12月に打ち上げられた「はやぶさ2」の科学目標および現状報告が行われた．薮田ひかる氏(大阪大学)は地球に生命の前駆物質を供給した可能性のある小天体(隕石・彗星)に関するこれまでの研究成果について発表し，将来の小天体探査計画によって有機地球化学という新たな分野が展開されていくことを述べた．入船徹男氏(愛媛大学・ELSI)は，高圧実験によって得られた地球深部，特にマントル遷移層と下部マントルの最新の描像について発表が行われた．パイロライトは，上部マントルやマントル遷移層上部では実験結果と観測された地震波の速度が一致するものの，マントル遷移層下部の条件では一致せず，むしろ沈み込んだスラブの本体であるハルツバージャイトに富む層が調和的だとの結論が示された．

2.2 Day 2 “Towards Universal Biology”

2日目は，現在の地球生命の枠組みを超えたUniversal biologyに取り組む各分野の研究者による講演とパネルディスカッションが行われた．Session 1の基調講演では，Nicholas Hud氏(ジョージア工科大)が，RNA類似化合物の化学合成と特性測定を通じた，

RNAワールドに至るシナリオについて講演を行った．RNAの単量体であるヌクレオチドは，その構造中にそれぞれ異なる合成条件を要する塩基部分と糖部分が存在するために，アミノ酸や脂質分子よりも複雑であることが知られている．同様に，現在のACGUの塩基は，複素環化合物の中で最初の遺伝情報単体として複雑であると氏は注目した．そして，化学進化条件によって容易に合成される複素環化合物のうち2種類からなるペアが共存した際に繊維状の複合体を形成することや，糖と容易に結合することが可能なことを示した．さらに，別のペアによっても同様の現象が生じるという最新の知見も示した．生命の起源において，要求される複数の特性は各個に出現することで漸進的にシステムが遷移していく，という一般則を追求するものとして，氏の一連の研究は興味深い．続いての一般公演ではChrisantha Fernando氏(Google Deep Mind)が，計算機上の人工生命のopen-ended evolutionを達成するための新たなアイディアを紹介した．続いて，NASA Astrobiologyプログラムの Directorを務めるMary Voytek氏が，当該分野の各種研究を網羅的に紹介する中で，地球外の生命を認識するためには生命の定義が重要であることに触れた．さらに，実験進化を含む合成生物学，および計算機実験が，原始類似環境や古サンプル収集のフィールドワークと同様に有用であることが紹介された．

Session 2では，生命システムの起源や進化を理解するための計算機シミュレーションやデータ解析手法に関し，3名の研究者が講演を行った．基調講演者のPaulien Hogeweg氏(ユトレヒト大)は，進化を駆動するために重要な「情報保存(information storage)」と「触媒」の機能を担うRNAに注目し，突然変異による複製エラーが発生し得る環境中で，これらの機能がいかにして分化し，そして維持され得るかを計算機シミュレーションにより探る研究を紹介した．Nicholas Guttenberg氏(ELSI)は，生命システム誕生以前の化学進化の段階における「遺伝(heredity)」，すなわち，化学分子により情報が保存され継承される機構を明らかにしたいとの動機から，こうした遺伝の存在を検知するためのデータ解析手法を提案し，これを多様な化合物を生成する化学モデルに適用した研究を紹介した．池上高志氏(東京大)は，これまで計算機シミュレーションが生命システムの理解に大きなブレイクスルーをもたらすことができなかった理由の一つとして，計算スペックの制約から自由度の小さい系しか扱えなかったことを重視するべきとの立場から，鳥の群れのダイナミクスを再現するシミュレーションモデルにおいて，自由度を数桁大きくすると以前には見られなかった多様なパターンが生じることを紹介し，計算スペックの向上がもたらす「人工生命」研究の将来への期待を述べた．

Session 3では，Session 2に引き続き生命の起源解明に向けた新たな方法論，戦略についての提案が3名の研究者によって行われた．基調講演者のLee Cronin氏(グラスゴー大)は無機システムが発達し生命システムが誕生する過程の実証を目指し，既知の生物進化学にとらわれない新しい進化メカニズムを探る実験的アプローチを紹介した．彼の手法では，化学反応条件に関するパラメタ探索を，反応条件の最適化を計算機によって効率よく行うことで達成している．Bruce Damer氏(カリフォルニア大)は初期地球の熱水噴気孔周辺で生命が誕生する独自のモデルを紹介し，この再現に向けて彼らが行っている実験的取り組みを紹介した．Jim Cleaves氏(ELSI)は生物が利用する有機化合物の種類が実現可能な有機化合物の数に比べて非常に限られている点に注目し，この選択がどのようなメカニズムによってなされたのかを理論的に探る試みを紹介した．このメカニズムの解明によって，地球上の生命がどこで，どのように誕生したのかについての重要なヒントが得られる可能性が期待される．

2.3 Day 3 “Signs of Life on Other Planets”

3日目は地球外天体における生命発生の可能性とその検出方法について取り組む研究者による講演が行われた．火星に焦点を当てたSession 1の基調講演を行ったRolf de Groot氏(ESA)は，ESAが旗艦ミッションに位置付けロシア連邦宇宙局との連携体制で実施するExoMars Programmeと，火星サンプルリターン技術の開発と実証を見据えたMars Robotic Exploration Preparation Programmeの概要を紹介した．ExoMars Programmeは，火星周回機のMars Trace Gas Orbiterと着陸実験モジュールのSchiaparelli EDM landerを2016年に打ち上げるミッションと，ローバーと表面観測用プラットフォームを2018年に打ち上げるミッションとの二本立てである．2016年のミッ

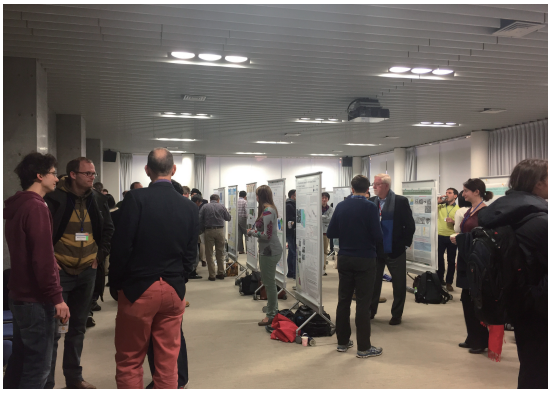
図3：ポスター会場の様子.

図4：Day 4: Symposium @ ELSIの様子.

ションは，火星大気中のメタン等の微量気体の分布と起源を調査することを主目的とし，2016年1月の打ち上げと同年10月の火星到着を見込んでいる．着陸機EDM Landerは突入・降下・着陸実験モジュール(Entry, Descent and Landing Demon-strator Module)という名の通りに技術実証を主眼としつつも，ダストストームの時期に周回機から切り離され降下する間に大気の風向風速や温度圧力などの特徴量を計測し，最終的にMeridiani平原へ着陸，その後も数ヶ月にわたって環境データの取得を行う．2018年のミッションでは，現在または過去の生命の兆候を探ることを主眼とし，レーダーや中性子分光計による地下調査や，掘削サンプルの分析などを行って有機物を詳細に調べる．ExoMars後はMars Robotic Exploration Preparation Programmeが待機していることも紹介され，火星探査を推進する国際的な潮流に対して欧州が主体的な寄与を果たすための一連のミッション群であり，その一環として2024年の打ち上げを見込む衛星フォボスからのサンプルリターン(Phootprint)計画が示された．続いて講演したBethany L. Ehlmann氏(カリフォルニア工科大)は，近年の探査によって火星表面に数多く見つかっている水質変成鉱物，例えばフィロ珪酸塩や炭酸塩，塩化物などに着目し，それらの分布と推定地質年代との照合を通して古火星環境とその変遷を見出すアプローチを紹介した．それによれば，Pre-Noachian/Early Noachianでは氷や地下水の形で水が全球的に広がっていた環境が，Late Noachian/Hesperianでは液体水が表出するなど多様な形で水が存在する環境へと一時的に変化したことなどが示された．

Session 2で基調講演を行ったChris McKay氏(NASA/Ames)は，太陽系に今や数多くの地球外生命圏候補天体が存在する中で特に土星衛星Enceladusとその南極からの氷噴出に焦点を当て，米日協働で検討が進められている氷プルーム物質のサンプルリターン計画「LIFE」の概要を紹介した．また火星におけるPhoenixやCuriosityによる掘削調査にも触れ，地下における熱・放射線環境の見積もりと絡めて生命存在領域の考察が行われた．さらに，炭化水素の湖が存在する土星衛星Titanでは，Huygens着陸プローブが表層付近での水素の欠乏を検出したことに触れ，アセチレンと水素を使ってメタンとエネルギーを得る「メタンベースの生命体」の可能性が示された．長沼毅氏(広島大)は，生命や有機物を構成する炭素(ホルムアルデヒド)がH_2Oから生じる水素(還元力)と酸素(酸化力)を介して還元端であるメタンと酸化端である二酸化炭素の間を巡る「準安定な生命システム」モデルを提示し，地球や金星，火星，そして氷衛星における水の有無とその固液状態，地熱，放射線，光分解環境などの違いがこのシステムをどのように駆動させるかについて議論した．

Session 3では視点を系外惑星に移し，将来的に系外惑星上の生命や居住環境を探る可能性について，基調講演2件と一般講演2件が行われた．まず基調講演1件目のWesley Traub氏(NASA Jet Propulsion Laboratory)は，2020年代中ごろから系外地球型惑星の検出・特徴付けを目指すWFIRST-AFTA/starshadeやEXO-C/Sなどの宇宙探査機計画の見通しを紹介した．Keplerの観測結果から惑星の存在確率を見積もった上で，WFIRST-AFTAでは，現在のところ，数個程

度の地球型惑星ないしスーパーアースの検出が期待され，ハビタブルゾーン内のものも視野に入ってくる見込みが示された．続いてTyler Robinson氏(NASA/Ames)は，酸素やオゾンといったいわゆるバイオマーカーを含む気体分子が惑星の反射光スペクトルに与える影響を，見込まれる観測誤差と共に議論した．また，海を持つ惑星が軌道上の位置によって測光・分光特性を変える(液体表面が持つ反射特性“glint”に起因する)ことを具体的に示し，海の同定方法を議論した．基調講演2件目のAntigona Segura氏(メキシコ国立自治大)の講演では，バイオマーカーとされる酸素やオゾンが光化学反応で(非生物的に)生成され蓄積するシナリオがいくつか指摘された．これらのシナリオの効率には，主星のスペクトル型・二酸化炭素や水素の量・大気圧などに依存するので，これらを同時に制限することが生命活動の存在を正しく推定するために必要であろう．最後に藤井友香(ELSI)が，生命の居住可能性を探る上で重要な表層環境の情報が将来の系外惑星の直接撮像でどこまで得られるかという問題を念頭に置き，太陽系内固体天体に見られる多様な表層の状態と，点源として測光・分光特性との関係を議論した．大陸の存在や火成活動、風化などさまざまな地質学的プロセスが惑星色に影響を及ぼすことが指摘され，惑星色の変動によって地表の活動性や地表の大規模な非一様性についての示唆が得られることが示された．

2.4 ポスターセッション

各日の口頭講演終了後には，それぞれのサブテーマに対応したポスターセッションを設け，セッション冒頭には各自1分間でポスター講演の概要を紹介するFlashtalkを行った(図3)．国内外から3日間合計で55件(Day 1 : 23件，Day 2 : 20件，Day 3 : 12件)のポスター講演が揃い，ELSIと本シンポジウムが包含する幅広い研究分野を反映した様々な議論が交わされるとともに新たな連携研究の提案など多彩なコラボレーションの場となった．

3. さいごに

今回のシンポジウムは，国内外から合計143名の参加者が集まり，大盛況のうちに終えることができた．また，上のプログラムには書かなかったが，シンポジウム後の1月16日(金)には，シンポジウムでの講演やそこで交わされた議論のフォローアップを行うざっくばらんな場を「Day 4“Symposium@ELSI”」と題してELSI棟のラウンジで開催した(図4)．次回，第4回のELSI国際シンポジウムは，2016年1月13日から15日にかけて東京工業大学大岡山キャンパス内で開催予定である．次回のテーマは本稿執筆時では未定だが，ELSIならではの幅広い分野から講演者を招き，盛んな議論と新たなアイディアを掘り起こすような会になることを願っている．従来の会では国内からの参加者が少ない印象があるので，次回にはぜひとも足を運んで頂きELSIのエネルギーを感じていただきたい．

火星科学研究会開催報告

高橋 芳幸[1]，倉本 圭[2]

1. はじめに

2015年1月16日－17日に，惑星科学研究センター(CPS)にて，火星科学研究会が開催された(世話人：中川義次・亀田真吾・倉本圭・杉田精司・高橋芳幸・寺田直樹・はしもとじょーじ・林祥介・藤田和央・宮本英昭・渡邊誠一郎)．これは，2014年10月27日－28日に同じくCPSで開催された月科学研究会[1]の火星版に相当する．火星は，その比較惑星学的な重要性や新規技術の展開の見地から，惑星探査の将来目標の一つである．火星については，他国による探査の実績がある一方で，地球に似た複雑性を有するために多岐の未解決科学課題が存在し，未発掘のものも豊富と考えられる．本研究会は，今後の火星探査において重要と考えられる科学課題や，探査技術の現状と課題について，多方面の研究の成果や展望を持ち寄って議論と洗い出しを行い，将来のイプシロンロケットや中大型機を用いた火星探査計画の科学内容の洗練に資することを目的として開催された．

本研究会の参加者は，CPS会場において16日，17日それぞれ40－50人であった．また，テレビ会議で最大10拠点程度が遠隔から参加しており，多くの参加者で議論が行われた．

2. 研究会プログラム

研究会のプログラムを表1に示す．講演は惑星科学における火星探査の意義，火星科学の現時点での到達点，火星探査に関係する技術の現状と展望とし，火星探査の将来戦略については総合討論の時間枠で議論した．今回の研究会は，限られた時間内で可能な限り幅広い分野の方に話題提供をお願いし，かつ議論の時間を確保する意図の下，講演は招待講演に限り，漏れた視点やアイデアなどは総合討論の場で提起して頂く形式で開催した．

3. 講演および議論

表1に示したプログラムからもわかるように，研究会では理学，工学の両方を含む広い分野の話題について講演と討論が行われた．ここでは著者の印象に強く残った一部の話題について簡単に紹介したい．

講演で語られた火星の科学的な大きなテーマの一つは，やはり生命が存在したことがあるのか，あるいは存在するのか，であった．この問題は，生命が存在し得る表層環境の持続性の問題と密接に関連しており，火星において約40億年前に実現していたと考えられる温暖湿潤な表層環境と，そこから現在の寒冷な表層環境に至る過程の理解もまた重要なテーマと捉えられる．これまでの探査により，かつての火星の表層に液体の水が存在していた時期があったことが強く示唆され，そして現在も地下には，氷の存在を想起させる水素の存在が報告されている．これらの事実は，水の存在の下で生命が存在した/する可能性を想像させるものである．しかしながら，現状では温暖湿潤な古火星環境がどのように現在の寒冷な表層環境に変化したのかも明らかになっておらず，また，今回の研究会ではあまり議論できなかったが温暖湿潤な表層環境を維持するメカニズムも良くわかっていない．さらに，丸山

1. 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
2. 北海道大学大学院理学研究院宇宙理学専攻
yot@gfd-dennou.org

表1：研究会のプログラム．

1月16日（金）	
藤本　正樹（JAXA）	背景：太陽系探査を取り巻く状況と課題，火星科学研究会の趣旨
関根　康人（東大）	太陽系における生命前駆環境の理解と火星
木賀　大介（東工大）	地球生命の「普遍遺伝暗号」と普遍生物学
小郷原一智（滋賀県立大）	火星気象学の課題
大山　　聖（JAXA）	火星飛行探査の検討の現状と将来計画
関　華奈子（名大）	太陽火星圏・大気散逸探査と表層環境進化
近藤　　忠（阪大）	高圧実験から見る火星の内部構造と課題
新谷　昌人（東大）	地震波を用いた火星内部構造探査
松本　晃治（国立天文台）	火星内部構造制約における測地学的観測の寄与
総合討論 1	
1月 17日（土）	
黒川　宏之（名大）	太陽系形成過程の理解のための火星の重要性
千秋　博紀（千葉工大）	集積期の火星熱史
臼井　寛裕（東工大）	火星の水の起源と歴史
丸山　茂徳（東工大）	日本独自の火星探査とは何か?
藤田　和央（JAXA）	火星着陸探査の実現に向けた技術開発計画と現状
石上　玄也（慶応大）	MELOSにおける火星探査ローバの検討開発状況と次世代型ローバの創出に向けて
塩谷　圭吾（JAXA）	火星表層土壌からの生命探査用，蛍光顕微鏡開発
宮本　英昭（東大）	火星で生命を探すための好適地
鈴木宏二郎（東大）	柔軟エアロシェルを用いた新しい大気圏突入探査の可能性について
小澤　宇志（JAXA）	火星探査実現に向けたプラネタリプロテクション技術開発計画
総合討論 2	
倉本　　圭（北海道大）	総合討論オープニング
亀田　真吾（立教大）	観測機器開発の展望（＋プロキオンの事例紹介）
川勝　康弘（JAXA）	DESTINYの技術とその将来火星探査への応用
佐藤　毅彦（JAXA）	火星「複合」探査から学んだこと
並木　則行（国立天文台）	太陽系探査の策定について『来る 10年の月惑星探査』検討と工程表から学んでいる教訓

の講演では，水の存在のみで生命が生まれるわけではないことが強調された．このことは，過去および現在の火星生命の存在の確認には，これまでにない新しいアプローチでの研究と探査が必要になることを示しているのだろう．

他方，火星の将来探査の方向性の議論を念頭に，主に佐藤，並木の話題提供をきっかけとして，コミュニティにおける惑星の理学探査方針のマネージメントに対する議論も行われた．例えば，惑星科学会では「来る10年の月惑星探査」の検討を通して，今後の探査の方向性を議論してきた実績がある．しかし，そのような検討の実務を長期間に渡って主導してきた人達へのコミュニティからの評価が，惑星科学コミュニティでは他分野（例えば物理，天文コミュニティ）に比べて低いのではないかとのコメントがあった．このことは，他分野との比較として，事務的・統括的実務を担うしっかりした組織を持っていないことに起因しているのかもしれないとの意見が出された．今回の研究会の議論を基に今後の火星探査目標の検討を進める際，特にこれを若手研究者の協力も得ながら進めるには，そのようなマネージメントの仕事をどのように評価し，支えていくかをコミュニティで考えていかなければいけないだろう．

最後に，定年を控えた丸山は，自らの東工大でのキャリアを振り返りながら，次に取り組むサイエンスコアを作っていく上で，哲学的な志向の合う「友達」を上手く作っていくことが重要であるとコメントした．例えば惑星探査は，個人の研究者で実現できるものではなく，多種多様な科学目標をあるシナリオ・ストーリーにまとめ上げた上で理学，工学コミュニティ両面

図1：研究会の様子．

の協力の下ではじめて実現できる．今回の研究会を，複数分野にまたがる多くの研究者を含めた議論を通して「友達」を増やし，探査にも繋がるような新たなサイエンスを生み出して推進していくきっかけとしたい．

参考文献

[1] 大竹真紀子ほか，2014，遊星人 23, 396.

←目次へ

訂正：惑星科学アウトリーチとしてのジオパークの可能性

中串 孝志[1]

日本惑星科学会誌『遊・星・人』2014年第23巻第4号に掲載された論文『惑星科学アウトリーチのフィールドとしてのジオパークの可能性』[1] に於きまして，ミスが1ヶ所ありました．以下の通り，お詫びして訂正致します．

331ページ左段上から2〜4行目

（誤）この中で世界ジオパーク認定も受けているのは洞爺湖有珠山・糸魚川・山陰海岸・室戸・隠岐・阿蘇の6地域である．

↓

（正）この中で世界ジオパーク認定も受けているのは洞爺湖有珠山・糸魚川・島原半島・山陰海岸・室戸・隠岐・阿蘇の7地域である．

参考文献

[1] 中串孝志, 2014, 遊星人 23, 330.

1. 和歌山大学観光学部, 和歌山大学宇宙教育研究所
kushio@center.wakayama-u.ac.jp

←目次へ

JSPS Information

◇日本惑星科学会第109回運営委員会議事録
◇日本惑星科学会賛助会員名簿
◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第109回運営委員会議事録

期　　間：2014年12月20日(土)～12月26日(金)
議　　題：第13期役員等の選出
運営委員会委員：
倉本　圭,
渡邊誠一郎, 荒川　政彦, 田近　英一, 中村　昭子, 千秋　博紀, 中本　泰史, 並木　則行,
平田　成, 林　祥介, 井田　茂, 和田　浩二, 春山　純一, 竹広　真一, 諸田　智克, 永原　裕子,
橘　省吾, はしもと じょーじ, 小久保英一郎, 荒井　朋子, 佐々木　晶
欠席者：なし
成立条件：期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす
議決方法：上記期間内にe-mailにより投票
オブザーバー：生駒 大洋
(議題1が認められると運営委員会委員)
小林 直樹
(議題1が認められると運営委員会委員)

報　告

1．役員等選挙結果

日本惑星科学会会長選挙結果

有権者数	651
投票総数	120[有効票120]
投票率	18.4%

順位	得票数	氏　名
1	116	倉本　圭
次	2	井田　茂
2	散票	

以上により，第13期会長として倉本 圭会員が選出された.

日本惑星科学会運営委員選挙結果

有権者数	651
投票総数	1104 (投票者数92×12名 連記)

［有効票962，白票 142］

投票率　14.1%

順位	得票数	氏名
1	44	渡邊誠一郎
2	38	荒川　政彦
3	37	田近　英一
4	36	中村　昭子
5	33	千秋　博紀
6	29	中本　泰史
9	26	並木　則行
9	26	平田　成
9	26	林　祥介
12	25	井田　茂
12	25	和田　浩二
12	25	春山　純一
次点	24	生駒　大洋
次々点	23	小林　直樹

以上により，第13期運営委員として12名の会員が選出された．

2．会長選任による運営委員

上記開票結果および会則第12条3項により以下8名の運営委員が会長によって選出された．

竹広　真一　諸田　智克　永原　裕子　橘　省吾　はしもと じょーじ

小久保英一郎　荒井　朋子　佐々木　晶

3．専門委員会委員長

上記開票結果および会則第12条4項により各専門委員会委員長および部会長が会長によって選出された．

総務専門委員長	諸田　智克
行事部会長	城野　信一
財務専門委員長	竹広　真一
編集専門委員長	和田　浩二
欧文誌専門委員長	生駒　大洋
将来計画専門委員長	橘　省吾
将来惑星探査検討G長	並木　則行
情報化専門委員長	平田　成
対外協力専門委員長	中本　泰史
連合連携専門委員長	永原　裕子

議　題

議題1．会則第12条2項により会長によって副会長が選出されたので承認

副会長　田近 英一，荒川 政彦

満場一致で採択された．

なお，これにともない，生駒 大洋 会員と小林 直樹 会員が運営委員に繰り上げられる．

議題2．会則第12条7項により会長によって選出された各部会委員長の承認

行事部会長　城野　信一

将来惑星探査検討Ｇ長　　並木　則行

行事部会長は満場一致で採択，将来惑星探査検討Ｇ長は可20，否1で採択された．

議題３．会則第12条6項による監事候補者の選出

監事候補者として 山岸 明彦 会員および 松田 佳久 会員が選出された．

詳細

山岸　明彦　　会員 20
松田　佳久　　会員 20
渡部　潤一　　会員 1
中村　正人　　会員 1

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2015年３月25日までに，賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです．社名等を掲載し，敬意と感謝の意を表します．（五十音順）

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

◇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．

2016/06

6/26-7/1　Goldschmidt Conference 2016
(a)横浜国際平和会議場(パシフィコ横浜)，神奈川県横浜市
(b)European Association of Geochemistry, Geochemical Society
(c)http://goldschmidt.info/2016/index

編集後記

前任の諸田さんから編集幹事を引き継ぎました三浦です．思い返せば昨年の連合大会，諸田さんが期待と申し訳なさが入り交じったような笑顔で私に声をかけてきたのを覚えています．それから早8ヶ月．まだまだ先だと思っていたら，あっという間に引き継ぎの時がやってまいりました．かくなる上は覚悟を決めて，しっかりと務めを果たしていく所存です．どうぞよろしくお願いいたします．

さて，前号に引き続き，特集「広報・アウトリーチ」の第二弾をお届けしました．いかがでしたでしょうか？ アウトリーチと言えば，私も最近，初めてサイエンスカフェなるもので話題提供をしました．カフェのようなリラックスした雰囲気の中で科学について語り合うサイエンスカフェの狙いは，「科学を再び文化の中に戻すこと」だそうです．ひとくちにサイエンスカフェといっても規模は様々ですが，私が参加したのは，参加者40名程度の小規模なものでした．しかし，これくらいの規模がちょうどいいのか，はたまた参加者の皆さんの知的好奇心が高いのか，トークの途中でも盛んに質疑応答が飛び交う楽しい会となりました．アウトリーチというと，研究者から国民の皆さんへの一方的な情報開示活動であるという印象を私は持っていたのですが，国民の皆さんからのフィードバックも重要な要素なのですね．どのようにすれば，参加者の皆さんを巻き込んだ双方向イベントを企画することができるのか？ どのようにすれば，科学を文化の中に戻すことができるのか？ 今回の特集記事は，あたかもそのヒントを教えてくれているようです．

ところで，編集幹事の大事な仕事に「編集後記の執筆」なるものがあります．皆さんがたった今読んでいるこれのことです．諸田さんからは何を書いてもよいと言われているのですが，改めてそう言われると何を書いていいやら分かりません．私はいつから自由を持て余してしまうような人間になってしまったのでしょうか．取りあえずは歴代編集幹事の後記を読み返して勉強することから始めて，一人前の編集後記を書けるように頑張りたいと思います．

編集委員
和田 浩二 [編集長]
三浦 均 [編集幹事]
寺薗 淳也 [特集「広報・アウトリーチ」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，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，はしもと じょーじ，本田 親寿，諸田 智克，山本 聡，渡部 潤一

2015年3月25日発行

日本惑星科学会誌　遊・星・人　第24巻　第1号

定　価　一部　1,750円（送料含む）
編集人　和田 浩二（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．