# 研究会参加報告 「MISASA V "Comprehensive Exploration of the Solar system"」

嶌生 有理<sup>1</sup>

#### 1. はじめに

衝突現象は小惑星進化において重要な役割を担う. 破壊と再集積によりがれき小惑星が形成されるだけで ない、テクトニクスの無い小惑星における元素再分配 は、衝突による物質の機械的混合による、その一方で、 小惑星試料を回収する、サンプルリターンミッション においても、衝突現象は注目されている. はやぶさに おいて、衝突銃による試料回収が計画され、はやぶさ 2ではさらに、衝突機による新鮮表面の暴露が予定さ れている. 著者は、小惑星の表面に最も豊富であるカ ンラン石の衝突進化に着眼し、微量元素及び同位体の 解析をすすめている. 以上に述べたように、小惑星の 物質進化、衝突現象、そしてサンプルリターンミッシ ョンは綿密に関係している. 三朝にて衝突および物質 分析をハイブリッドさせた研究手法の確立をめざす著 者[1]は、これらが網羅された国際シンポジウム Misasa V(表1、図1d、e)にホストとして携わる機会 を得た、ここでは、講演を概説するとともに、その舞 台裏について記述する.

### 2. シンポジウム背景

21世紀の地質学は地球を越え、小惑星、彗星、火星そしてその衛星へとフロンティアを広げている。隕石研究に、系統的なサンプリングによる試料解析とリモートセンシングによる観測を組み合わせることで、太陽系の起源・進化・ダイナミクスに関する学問的展

開が加速することが期待される。ただし、その期待と 裏腹に複合領域及び複数国家にまたがる相互関係の構築は、研究者の苦手とするところである。複眼的視点 による総合分析により、物質進化における本質的プロセスを演繹することを標榜する岡山大学地球物質科学研究センター(ISEI)は、ディシプリン、プロジェクト及び人の交流に基づく学問発展を志し、国際シンポジウム Misasa V を鳥取県三朝町にて開催した。

ISEI は、2005年以降の過去10年間に戦略的な国際シンポジウムを4回開催してきた。 Misasa V はその一連のシリーズの延長にあり、多様なデシプリンを持つ国内外の研究者による学術交流の場となった。とりわけ、Misasa V においては、地球惑星物質総合解析に基づく最新の研究結果(チェリャビンスク隕石ほか)を核として、国内外の探査ミッション(はやぶさ2、OSIRIS-REx、Mars 2020など)や試料キュレーションに関わる世界トップクラスの研究者が三朝に集い、解析と探査の両面から最新の科学研究の成果ならびに将来の研究計画についての実質的な議論が行なわれた。

# 3. Analysis of rocks delivered by geologist ... or space mission

シンポジウム初日は、中村栄三センター長(岡山大学)の開会の挨拶から始まった(図1a). その挨拶では地球化学、地質学、物質科学、サンプルリターンミッション、生物学の融合を目指した本シンポジウム開催の経緯を概説し、分野の垣根を越えた議論と意見交換の重要性が強調された。そして、ISEI分析地球化学部門が国際的な共同研究拠点として作り上げてきた「シームレス地球惑星化学解析システム「CASTEM」[2]」のアドバンテージを、イトカワ微粒子およびチェ

Day 1	Analysis of rocks delivered by geologist or space mission	
14:05-14:30	中村栄三 (岡山大学地球物質科学研究センター長)	Introduction to comprehensive material analyses: The sensitivity to a process by multi disciplinary analyses
14.30_15.00	國由特 (ISAS/IA XA)	Havahusa 2: Ovarvijav of IAXA's mission to asteroid
14.30-13.00	图十名 (ISAS/SAAA)	Trayabusa 2. Overview of JAAA s Illission to asteroid
15:00-15:30	波邊諏一即(名百屋大字)	Science objectives of Hayabusa-2, a C-type asteroid sample-return mission
15:40–16:40	Dante Lauretta (アリゾナ大学)	OSIRIS-REx: Over view of NASA's mission to another asteroid
16:40-17:20	Ian Franchi (オープン大学)	Sampling the most primitive materials. D-type asteroids and the proposed marcopolo-2d mission
17:20-17:50	藤本正樹 (ISAS/JAXA)	Frequency matters: ISAS's strategy for small but edgy planetary exploration
Day 2	Pieces of asteroid and comet, and their connections	
08:50-09:30	Boris Shustov (ロシア科学アカデミー宇宙研究所)	Search for dangerous asteroids: Activities in Russia
09:30-10:10	Jeremie Lasue (トゥールーズ第3大学)	Rosetta: Similarity and differences of comet landscapes to asteroids
10:10-10:50	Scott Messenger (JSC/NASA)	Connections and distinctions between cometary and asteroidal materials
10.50-11.10	Victor Grokhovskiv (ウラル連邦大学)	Structure properties and fracture of Chelyahinsk meteorite body with different lithology
11.10_11.30	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	Goological record preserved in the Chelvahinsk meteorites. Shock induced process and hydrous alteration
11.30–11.50	イ 変気(5.11/1・15.57/1・1・15.77・/ ) 大 田	Commelves sive mass-halance on the Chelvahinsk meteorite. Clues to decode the moreose
11:50-12:10	( TIR では II ( TIR で TI	Chronology of gatastrophic impact on the Chelvahinsk meteorite. Recent mocess
	Pieces of larger hodies — Mare and Moon	
14.00	Trucks of integer bounds trials and proof	TAKA ME COOLUMN COOLUM
14:00-14:40	Kenneth Williford (JPL/NASA)	NASA Mars 2020 Kover mission: Science introduction and sample return considerations
14:40–15:10	Eric Lewin (グルノーフル大学)	Curiosity: Geochemistry of martian atmosphere
15:10-15:40	Leonid Ksanfomality (ロシア科学アカデミー宇宙研究所)	On comparison of some properties of the nucleus of the comets 67p/ Churumov-Gerasimenko and 1P/Halley
15:50-16:20	James Darling (ポーツマス大学)	Untangling detailed geological and shock histories of planetary materials: New developments and opportunities
16:20-16:50	関根康人(東京大学)	Enceladus' ongoing hydrothermal activity
16:50-17:20	田中智(ISAS/JAXA)	The Japanese lunar penetrator: Technical readiness and its applications to the future planetary Exploration
17:20-17:50	Mikhail Gerasimov (ロシア科学アカデミー宇宙研究所)	Russian missions to polar Moon: The importance of in situ preanalysis of the volatiles composition
		in lunar soil samples before their delivery to the Earth
17:50-18:10	新井達之(東京工業大学)	Formation of primordial continents on the Moon and the Hadean earth
Day 3	Further Solar exploration with theorist, geologist, and perspectives	
08:50-09:20	<b>귏崎俊一(理化学研究所)</b>	The tandem formation of planetesimals in the accretion disk around a protostar: The CAIN
		(Chondrite Accumulation In Nebula) model
09:20-10:20	丸山茂徳(東京工業大学)	A way to establish astrobiology
10:30-12:00	Steven Squyres (コーネル大学)	The future of planetary sample return: Multi-national opportunities, and lessons learned from
		eleven years on Mars
12:00-12:05	常田佐久(宇宙科学研究所長)	Comments from Director-General of ISAS/JAXA
	Depository for References of Extraterrestrial and Analytical Material	
13:00-13:25	山口亮 (国立極地研究所)	curation and research of antarctic meteorites at the National Institute of Polar Research, Japan (NIPR)
13:25-13:50	安部正真 (ISAS/JAXA)	Extraterrestrial sample curation center in JAXA: Hayabusa and Hayabusa 2
13:50-14:15	橘省吾 (北海道大学)	Hayabusa2: Returned sample analysis in 2021
14:15-14:55	中村圭子 (JSC/NASA)	Curation and analysis of astromaterials returned by NASA's missions
14:55-15:10	山本幸生 (ISAS/JAXA)	Experience of Planetary Data Archive and its Application to Materials Analyses
15:10-15:30	国広卓也(岡山大学地球物質科学研究センター)	Comprehensive curation that ties your and my dream, stones and material analyses
		-Concept of DREAM and status on 2015



図1:シンポジウムの様子. (a)中村栄三センター長, (b) Steven Squyres先生, (c)中村圭子先生, (d)口頭発表会場, (e)ポスター発表会場, (f) 懇親会での中村圭子先生ご一家, (g)エクスカーション足立美術館での集合写真, (h)送別会で蕎麦打ちの手伝いをする著者(YS). 蕎麦打ちも二次イオン質量分析も修行の身である.

リャビンスク隕石の研究成果を例に力強く講演した. CASTEMは、1つの物質試料に対して20を越える湿式および表面分析装置を組み合わせた、連続的かつ多角的な分析によって、79元素、9同位体、9年代学の実現を可能にする.

続いて、国内外の小惑星サンプルリターン計画の現状について講演が行なわれた。C型小惑星を目標とするはやぶさ2(2014年12月打ち上げ)の運用状況について、國中均先生(ISAS/JAXA、はやぶさ2プロジェクトマネージャー(シンポジウム当時))が講演を行ない、寄付金という形で表われている国民の関心の高さ

に海外研究者から驚きと感嘆の声が聞かれた。引き続き、渡邊誠一郎先生(名古屋大学、はやぶさ2プロジェクトサイエンティスト)が講演し、はやぶさ2の4つの科学目標(初期太陽系での物質混合過程の特徴づけ、微惑星での鉱物 - 水 - 有機物の反応過程、初期太陽系での物質進化、天体ダイナミクス)について報告した。B型小惑星に向かう予定のOSIRIS-REx(2016年打ち上げ予定)については、Dante Lauretta先生(アリゾナ大学、OSIRIS-RExミッションP.I.)から運用計画の詳細が紹介された。サンプル採取のみならず、レーダーによるYarkovsky効果の高精度測定による天体

ダイナミクスの解明が期待されるとあって、講演直後には多くの質問が寄せられ、会場は大いに湧いた。D型小惑星を探査候補とするESA主導のMarcopolo-2d (2025年打ち上げ予定)については、Ian Franchi先生(オープン大学)が科学目標と運用計画について講演した。小惑星帯外縁に存在するD型小惑星はTNO起源と考えられ、サンプルリターンによって小惑星と彗星核、惑星間塵(IDP)の関連性が解明されると期待される。藤本正樹先生(ISAS/JAXA)はISAS/JAXAの宇宙探査方針について、ミッション提案過程の概説と、ミッション規模に応じた打ち上げ機の利用(H-IIa、イプシロンロケット、国際協力による海外ペイロード利用)について講演した。

懇親会(図1f)で山陰の幸を味わった後に、牛骨ラーメンを探求した。本シンポジウムのために製作したガイドを元に、三種の牛骨ラーメンが吟味された。

### 4. Pieces of asteroid and comet, and their connections

翌日は、太陽系小天体である小惑星と彗星に関する 講演から始まった. Boris Shustov先生(ロシア科学ア カデミー宇宙研究所)はロシアにおけるスペースガー ド活動について、2013年のチェリャビンスク隕石の 落下を受け、市民による防御観測網の必要性と、ラグ ランジュ点(L1)の宇宙望遠鏡による近地球小惑星検 出の試みを紹介した. Jeremie Lasue先生(トゥール ーズ第3大学)は、昨夏、本格的な観測を開始した Rosetta による67P Churyumov-Gerasimenko彗星の 観測成果について講演した。複雑な地形やジェット噴 出孔など、始めて見る彗星核の詳細な素顔や、着陸機 Philaeが困難に陥りながらも懸命に調査を続けている 状況が報告されると、会場からは多数の質問と賞賛の 声が寄せられた. 着陸機と探査機間のレーダーによる 内部構造探査は彗星核の起源と進化に重要な制約を与 えると期待され、その成果を待ち遠しく感じた. Scott Messenger 先生(JSC/NASA)は地球帰還試料の 分析結果に基づく彗星と小惑星の連続性について. 隕 石中のプレソーラーグレインや彗星由来のIDPにお ける珪酸塩鉱物の発見から、従来の熱い星雲モデルや 彗星核の形成モデルが覆され、太陽系内での物質混合 過程が明らかになった経緯を概説した. 多様なIDP の分析は我々に惑星物質の始源的情報を与えるものの. その多数は素性不明の「転石」として回収されるという問題点を指摘した. Victor Grokhovskiy先生(ウラル連邦大学)はチェリャビンスク隕石の物性と化学分析について講演した. 引き続き、ISEIにおけるチェリャビンスク隕石の総合分析結果について、辻森樹・太田努・田中亮吏が連続して報告した. リングウッダイトやワズレアイトといった衝撃変成鉱物の発見の他、全岩分析・局所分析を駆使したマスバランスによるリチウムリザーバーの発見や100 Ma以内という若い衝突溶融年代などが報告された.

# 5. Pieces of larger bodies — Mars and Moon

午後には火星や月などに焦点を当てた講演が行なわ れ、話題は太陽系の起源から生命の起源、アストロバ イオロジーへと移っていった. Kenneth Williford先 生(JPL/NASA, Mars 2020 D.P.S.) は次期火星サンプ ルリターン探査 Mars 2020の科学目標と運用計画につ いて講演し、火星ローバーによるその場分析とサンプ リング方法、および回収コンテナの打ち上げと母船に よる帰還計画を紹介した、続いて、Éric Lewin先生 (グルノーブル大学)は火星ローバー Curiosity のその 場分析について講演し、ChemCamとLIBSによる化 学分析の運用方法とその成果を紹介した. Leonid Ksanfomality 先生(ロシア科学アカデミー宇宙研究 所)は67P Churumov-Gerasimenkoと1P Halleyのガ ス・ダスト放出と物性の比較について話題提供した. James Darling先生(ポーツマス大学)は惑星物質の地 質学的衝突史の解明に向けた隕石の年代測定, 鉱物学 的記載、イメージング、微小構造解析、同位体分析を 組み合わせた総合的分析手法について講演した. 関根 康人先生(東京大学)は熱水系を模擬した室内実験から、 土星リング系で観測されたプリューム起源のシリカナ ノ粒子がエンセラダスにおける現在活動中の熱水活動 起源であることを示した。田中智先生(ISAS/IAXA) は壇上にて月ペネトレータの実物を披露し、その開発 史と将来探査への展望について講演した。 著者は学生 時代、名古屋大学の廊下に鎮座していたペネトレータ 模型機を思い出し感慨に浸った. Mikhail Gerasimov 先生(ロシア科学アカデミー宇宙研究所)はロシアによ る一連の月探査計画と月極域サンプルリターン計画. および揮発性元素のその場測定の重要性について報告

した. 新井達之さん(東京工業大学)は月の冥王代原初 大陸の形成ついて, 月マグマオーシャンの結晶分化に よる斜長岩地殻の形成過程について講演した.

この日の夜も、盛大な懇親会が開催された。岡山大学山本進一研究担当理事、文部科学省研究開発局局長、鳥取県知事代理からの挨拶に引き続き、三朝町長の発声で乾杯が行なわれた。ISEI田中による三線演奏は、海外からの参加者たちを大いに楽しませた。初日の牛骨ラーメン研究会が好評であったせいか、牛骨ラーメンを食べたいというリクエストが多く、この日はラーメン王の佐々木晶先生も参加してのラーメンツアーが実施された。

### Further Solar exploration with theorist, geologist, and perspectives

最終日は、地球惑星科学、そして惑星探査の将来に ついて講演が行なわれた. 戎崎俊一先生(理化学研究 所)は、周原始星集積円盤における内縁乱流域-不活 性領域境界での岩石微惑星形成と、不活性領域-外側 乱流域境界での氷微惑星形成という2領域微惑星形成 モデルについて講演した. 続いて. 丸山茂徳先生(東 京工業大学(シンポジウム当時))は、アストロバイオ ロジーの確立に向けた講演を行ない、惑星形成、惑星 物質の起源と進化,原始大陸進化,さらに生命の起源 と進化について包括的な描像を示した. 生命が持続可 能な惑星の条件が示されると、会場からは矢継ぎ早に 質問が上がり、白熱した議論が展開された. そして、 11年間の火星探査から学ばれた教訓を基に、惑星サ ンプルリターンの将来についてSteven Squyres 先生 (コーネル大学、Chairman of the NASA Advisory Council) が基調講演を行なった(図1b). NASAミッ ションの選考過程や、月や彗星核へのサンプルリター ン計画や有人小惑星サンプルリターン計画、火星ロー バーミッションについて講演した. 多様な物質の測定 に大きく貢献したローバーの機動力の重要性や. 非常 にストレスの溜まる運用チームの選考やトレーニング 方法など、探査ミッションの困難と素晴しさを熱く語 った. なかでも, 太陽電池をダストに覆われ, 絶対絶 命の火星ローバーを一陣の"lucky wind"が吹き飛ば し息を吹き返したという逸話は、人事を尽した時にこ そ幸運が訪れるという教訓が込められていた. この逸 話を聞き、著者自身も死ぬ気で精進せねばならないと 気が引き締まる思いを感じた.常田佐久先生(宇宙科学研究所長)は水星探査計画「BepiColombo」や金星探査機「あかつき」など、ISAS/JAXA におけるミッション状況について講演した. 芯の通った語り口は、日本独自の探査のあり方を示しているように感じられた.

## 7. Depository for References of Extraterrestrial and Analytical Material

最後のセッションでは、各研究機関における、隕石 試料/サンプルリターン試料の取扱い(キュレーショ ン体制)について議論された。山口亮先生(国立極地研 究所)は、南極における隕石回収及びそのキュレーシ ョンについて紹介した. 横一列に並ぶスノーモービル による隕石回収は効率的で、小惑星サンプルリターン を補完する点を強調した. 安部正真先生(ISAS/ IAXA)は、帰還したはやぶさカプセルからの試料回 収方法とJAXAキュレーション施設での初期分析成 果, さらにはやぶさ2回収試料に向けた運用計画につ いて講演した. 続いて. 橘省吾先生(北海道大学)はは やぶさ2による回収試料の分析計画について、帰還ま での準備計画と回収試料(粗粒、細粒、ガス)ごとの分 析手法, 初期分析と二次分析計画について講演した. 中村圭子先生(ISC/NASA)は、NASAにおけるアポ 口時代から始まる月惑星物質のキュレーションについ て講演した(図1c). 窓の無いキュレーション施設を 「インベーダーから防御するため」と語るなど、ユー モアを交えたその語り口は会場を魅了した. アポロの 月試料、南極隕石、IDPなどのキュレーション状況、 はやぶさ2とOSIRIS-RExのキュレーション計画につ いて紹介するとともに、キュレーションにおける若い 研究者育成の必要性を強調した.

帰還物質のキュレーションと同等に重要となるのが、探査データや試料デポジトリの管理システムである。 山本幸生先生(ISAS/JAXA)は惑星探査データアーカイブの現状と物質科学への応用について講演し、データの公開性とその公開指針および国際的なデータフォーマット制定の必要性を強調した。国広卓也は三朝にて開発する地球惑星試料デポジトリ「DREAM¹」の現状と、データベースソフトウェア Medusa [3] を紹介し、試料が研究機関及び分析装置のまたぐことを可能とするシステム構築の必要性を、サンプルリターン・コミ

<sup>%1.</sup> http://dream.misasa.okayama-u.ac.jp/



#### Make stones out of the nature

図2: キリコちゃん(Medusaイメージキャラクター). 二次元バーコードはDREAMへのリンク.

ュニティに対して提案した. Medusaソフトウェアのイメージキャラクター[キリコちゃん(図2)]は聴衆を魅了した.

閉会の挨拶として、Dante Lauretta 先生は本シンポジウムを通じて国際的な協力関係が構築されたことの重要性を強調した。そして、Steven Squyres 先生は本シンポジウムで出会った国際的な若い学生たちこそが次世代の探査ミッションを牽引していくということを強調し、会場からは喝采が巻き起こった。

シンポジウム後にはISEIにおいてラボツアーが行なわれた. ツアーはクリーンルームの設計思想の解説から始まり,湿式分析に必要な空調や酸処理などの設備,複数の表面電離型質量分析装置(TIMS)や異なるタイプの誘導結合プラズマ質量分析装置(ICPMS)などの分析装置,安定同位体および希ガス分析装置,電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)や二次イオン質量分析装置(SIMS)などの表面分析装置,DREAMによる試料追尾システムが紹介された. 見学者からは矢継ぎ早に質問が聞かれ,その鋭い質問に著者は回答に窮することもあり,著者自身の意識を高める必要性を痛感した.

翌日のエクスカーションでは、松江城、堀川遊覧と 足立美術館を案内した(図1g). その後の三度目の懇 親会では、挽きたて・打ちたて・茹でたての三たて蕎 麦打ちが国広(倉吉蕎麦鳥²)により披露された(図1h). 水廻しをダスト集積に見たて、微惑星形成が議論が展 開された、著者は見習い中である。

#### 8. おわりに

著者はシンポジウムの起案、計画、及び運営を身近に見た、前回のMisasa IVにはゲストとして参加したこともあり、ホスピタリティについて強く意識することとなった。三朝は交通の便が悪いため、送迎は周到に計画された、ゲストは著者の拙い英語に応じてくれが、語学力というより会話力に欠ける自分を認識することとなった。日々先輩にいわれていることであるが、地元山陰や日本文化などへの理解について、努力を継続しようと考える。

著者は、シンポジウムの少し前、衝突実験の結果発表のため宇宙研に滞在した際、来日中の中村圭子先生にご挨拶する機会を得た。三朝に圭子先生ご夫妻がいらした際には、同じ小さい子を持つ旧知の親同士の関係で三朝をご案内することができた。一度のご挨拶で気持ちが通じることを実感し、人及び研究交流に対して積極的になろうと考えた。

人及び研究交流を進めたい気持ちから、国内の研究者の方々に、ハガキにて参加をお誘いした。丁寧なお返事を頂くこともあり、気持ちの交換をうれしくも感じた。研究交流の他、温泉を楽しんだとの声をいただきほっとした。

2020年以降、はやぶさ2やOSIRIS-RExによる回収 試料が地球に帰還し、惑星地質学はさらにフロンティアを広げることになる。帰還に先んじ、小惑星における衝突による物質進化についての研究をここ三朝で進めようと思う。総合分析に基づいた物質科学に、衝突研究の切り口を加えることで、岡山大学ISEIは小惑星にとどまらない、惑星物質分析における国際的な共同利用拠点として実質的な役割を果たすことになるだろう。共同利用及び共同研究のために、そして次回国際シンポジウムの開催に際して、よりいっそうの国内外の研究者にここ三朝にご参集いただきたいと思う。

### 参考文献

- [1] 嶌生有理, 2013, 遊星人 22, 116.
- [2] 中村栄三ら、2012、表面科学 33、681.
- [3] Yachi, Y. et al., 2013, Geostand. Geoanal. Res., doi:10.1111/j.1751-908X.2013.00205.x.