日本惑星科学会誌 遊・星・人

第23巻 第2号

目 次

卷頭言 稲谷 芳文	81
特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」 チェリャビンスク火球の明るさと色の時間変化:Web動画の解析から 柳澤 正久	— …82
始原天体有機物研究の今とこれから Ⅲ. 有機ナノグロビュール 中村 圭子	92
iSALE shock physics code による数値衝突計算 黒澤 耕介,千秋 博紀,和田 浩二,三上 峻,平田 成,鎌田 俊一,石原 吉明,他3名	103
宇宙科学・探査ロードマップと惑星科学 渡邊 誠一郎	111
惑星探査データの保存と公開 ~ PDS4の紹介~ 山本 幸生	116
水谷先生と語る太陽系探査 水谷 仁,山本 哲生,林 祥介, 倉本 圭, 小久保 英一郎, はしもと じょーじ	120
エポックメイキングな隕石たち その3 ~Yamato-74159ポリミクトユークライト~ 山口 亮	130
系外惑星「遠い世界の物語」 その3 ~ 複数惑星系KOI-94から 紐解く惑星の軌道進化~ 平野 照幸…	133
みんなでふたたび木星へ, そして氷衛星へ その2 ~サブミリ波分光計JUICE-SWIの挑戦~ 笠井 康子, 佐川 英夫, 関根 康人, 黒田 剛史, 菊池 健一, 西堀 俊幸, 他1名・1チーム	140
火の鳥「はやぶさ」未来編 その6 ~工学技術としてのはやぶさ2~ 津田 雄一	149
「第一回iSALE勉強会」参加報告 常 昱······	156
「 惑星物質科学のフロンティア」研究集会開催報告 村上 登志男,大澤 崇人,寺田 健太郎	160
第7回月惑星探査データ解析実習会報告 小川 佳子, 出村 裕英, 平田 成, 本田 親寿, 北里 宏平, 他3名・データ解析実習参加者	164
2014年 秋季講演会のお知らせ 中村 智樹	168
JSPS Information	171

表紙デザイン:BROOKS

Contents

Preface	Y. Inatani	81
Special issue : Chelyabinsk superbolide/meteorite fall and Impact	risks	
Brightness and color of the Chelyabinsk bolide derived f a dashboard camera movie	rom M. Yanagisawa	82
The study of organic molecules in small primitive bodiesⅢ. Organic nanoglobulesK. Na	a, now and the future kamura-Messenger	e: 92
Numerical modeling of impact phenomena using iSALE s K. Kurosawa, H. Senshu, K. Wada, T. Mikami, N. Hi	shock physics code rata, and 5 authors	103
Roadmap of space science & exploration and its planetar	ry part S. Watanabe	111
Data archive and publication in planetary explorations —Introduction of PDS4—	Y. Yamamoto	116
A round table talk on solar system exploration with Miz H. Mizutani, T. Yamamoto, Y. Hayashi, E. Kokubo, a	utani-san and G.L. Hashimoto	120
Epoc-making meteorites (3) —Yamato-74159 polymict eu	crite— A. Yamaguchi	130
Tales of distant exoplanet worlds (3) —Uncovering the evolution history of exoplanets via	KOI-94— T. Hirano	133
Let's go to Jupiter again, and further to icy satellites (2) — Challenges of the JUICE-SWI (Sub-millimetre Wave Y. Kasai, H. Sagawa, Y. Sekine, T. Kuroda, K. Kik	Instrument)— uchi, and 3 authors	140
Phoenix "Hayabusa" : A tale of the future (6) —Engineering science aspects of Hayabusa2—	Y. Tsuda	149
Report of the 1st iSALE shock physics code workshop in	Chiba, Japan C. Yu	156
Workshop on "Frontier of planetary material science" T. Murakami, T. Osa	awa, and K. Terada	160
Report of the 7th practical training seminar on the data analy Y. Ogawa, H. Demura, N. Hirata, C. Honda, K. Kita	y <mark>sis in planetary missi</mark> zato, and 4 authors	ons 164
Announcement of JSPS 2014 fall meeting	T. Nakamura	168
JSPS Information		171

卷頭言

ロケット屋の仕事

ロケットの話をします.一回で捨てている今のロケットの課題は,他の乗り物に比べてその コストが高いことで,1kgのモノを地球周回軌道に運ぶのに大体百万円のお金がかかります. 解決策は飛行機のようにどこも捨てないで何回も使うロケットを作って,何千回とか何万回飛 んだらペイするという世界を作ることです.21世紀の間とかの近場の目標は2桁以上のコスト ダウンだと言われていて,そうすればロケットの打ち上げが羽田から切符を買ってヒコーキに 乗るような世界にできると言われています.2桁のダウンとは切符一枚がまあ何百万円という 程度です.

話は飛びますが系外惑星が話題です. その昔ダイダロス計画というのがありました. 隣の恒 星系まで片道50年かけて光速の10%まで加速できる核融合パルスエンジンと言うので行く巨 大ロケットですが,今の我々にこの技術はありません. 米ソが冷戦で月だアポロだと騒ぐ時に 英国惑星協会(BIS)のジョンブル達はこういうことを考えていました. これは無人の片道飛行 なのですが,仮に移住のための有人宇宙船だったら,と50年の道中を考えるに,これをどん なロケットにするべきとか,着くまでに世代が二つ廻るとか,学校や病院はどうするとか,やっ ぱり人工冬眠だ,とか想像力を逞しくして考える課題が多くありそうです.

さて人類のサバイバルの視点で考えると、この先の百年とか千年とかの未来では、なにやら 温暖化とか気候変動とか、さらに先では小惑星の衝突とか、地球に人類が住める環境を脅かす 出来事があるような、ないような、ですが、10億年という単位では、太陽の寿命は必ずやっ てきます。人類絶滅の考察によれば、もっと早くに別の形でやってくるとの論も多くありです が、いずれにせよ、それより前に破局はやってきて、人類が生きながらえるのであれば、地球 脱出、太陽系脱出は必定です。

もっと技術は進むのでしょうが、先ほどの輸送コストを頭に入れて、さてこれがナンボの仕 事になるのか、と考えてみると、全人類が地球周回軌道に出るだけでも、¥10¹⁶の桁で、そこ から先の太陽系脱出は往復で稼ぐというのもなさそうで、それより2桁以上も大きなお金がか かりそうです。一方世界の年間総生産はまあ¥10¹⁵の桁で、総生産の全部をかなりの長期に亘っ てこれに当ててもなかなか大変と言うことで、これはやはり全員は無理だなあ、とか、じゃあ 限られた人をどう選ぶのかとか、とても民主的合意形成はできないなあとか、こんな営みをマ ネージする才覚は人類にはないわなあ、と言うことに行き着きます。が、どうせずいぶん先の 話で、ロケット屋の仕事を超えるので、この辺りから先は誰か他の人に考えてもらいたいと思 います。

稲谷 芳文(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)

^{特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」} チェリャビンスク火球の明るさと色の時間変化: Web動画の解析から

柳澤 正久

2013年9月18日受領, 2014年2月14日受理.

(要旨) チェリャビンスク火球は車載カメラを含む多くのモニターカメラによって撮影され、その画像がインターネット上に公開されている. 我々はその中の一つを解析し、明るさと色の時間変化を調べた. 結果は次の通りである. (a)光エネルギーのほとんどは1~2秒間のフレア(光度が急激に増大する現象)で放射された; (b)フレア以前の放射は黒体放射ではない; (c)フレア時のスペクトルは3500 Kの黒体放射と矛盾しない; (d)3500 Kの黒体放射を仮定すると全波長にわたって単位時間に放射されるエネルギーは最大で1.0×10¹⁵ W であった; (e)全放射エネルギーから推定される衝突エネルギーは1.9×10¹⁵ J(TNT爆薬450 ktonのエネルギーに相当)であった. また, (d)の放射をする黒体の面積は120 km²であり、火球の軌跡に沿った半径1 km、長さ20 kmの円柱の表面からの放射が考えられる.

1. 背景と目的

2013年2月15日3時20分(世界時,地方時では9時 20分)にロシア南西部の都市チェリャビンスク (Chelvabinsk)近郊で観測された火球(チェリャビンス ク火球)では、天体が地上に激突することはなかったが、 高度20~30 kmで爆発が起きた.発生した衝撃波は半 径30~40 kmの範囲にわたって窓ガラスを破り、怪我 で約1500人が手当てを受け、およそ100人が入院した. また、窓枠や壁が壊れるなども含め、チェリャビンス ク州の11の町で7300棟ほどの建物が被害を受けた[1. 2]. 衛星からの光学観測を基にした推定では、爆発規 模はTNT爆薬換算で440 kton (1 kton TNT=4.2× 10¹² J)であった。また、衝突天体の大気圏への突入速 度は19 km s⁻¹であり、質量は11.000 ton、密度を3.6 g cm⁻³とすると直径は18 mとなる[3]. インフラサウ ンド(超低周波音)や地震の計測による推定も, 誤差は 大きいがほぼ同じ爆発規模(220~990 kton TNT)を示 している[4]. 火球は車載カメラを含む多くのモニタ

1. 電気通信大学 yanagi@uec.ac.jp ーカメラによって撮影され、その動画がインターネット上に公開された.これらの解析によれば、衝突天体の軌道はアポロ型小惑星のものであり[5,6],小惑星86039(1999NC43)の軌道との類似性も指摘されている [7].動画の解析による明るさの時間変化も調べられているが[1,4],これについては後で述べる.一方、多くの隕石が回収されたが、これらのタイプはLL5コンドライトであり、チェリャビンスク隕石と命名された [8,9].

チェリャビンスク火球を越える唯一の現象としては, 1908年のツングースカ爆発が有名だが(衝突エネルギ ーが10~30倍)[10],それ以降100年間これに匹敵する 火球は報告されていない.そのため、天体衝突はSF 上の災害と思われがちである.しかし、報告頻度が低 いのは地球上で人口密集地が占める割合が現在ではま だ小さいためである。今後、人口が増え、砂漠の緑化、 太陽光発電所の展開、海上都市の建設[11]など、人類 が地球表面を隈なく利用しそれに依存するとなれば、 天体衝突は、地震や火山と並ぶ現実的な災害となる。 ちなみに、チェリャビンスク火球規模の現象は地球上 で約10年に1回起こると見積もられている[12].



図1: ロシア、カメンスク・ウラリスキー(Kamensk-Uralsky)市から、アレクサンダー・イワノフ(Aleksandr Ivanov)氏が、交差点で停車中に車載カメラで撮影したチェリャビンスク(Chelyabinsk)火球の動画フ レーム[17]. 2013年2月15日3時20分24.2秒、同28.2秒、同32.2秒(世界時)に露光された3枚のフレーム を合成し、見やすくするために明るさとコントラストを調整した。時刻は、画像右下に表示されてい るものに+0.75秒して、光度最大の時刻が衛星観測の結果(2013年2月15日3時20分32.2秒)[4]と一致す るように補正してある.火球は左上から右下に進んでいる.矢印1,2,3で示す聖堂と2本の木は、 Google航空写真で確認でき視野決定に利用された.矢印4で示すヘッドライトは明るさ一定の基準と してカメラ感度の時間変化を知るのに利用した、火球像は飽和しているため、領域A(40×30画素)で 示す雪面で散乱された光を測定した.明るさの絶対値の決定には、領域B(30×30画素)で示す空の明 るさを理論的に求めて基準とした.水平な点線は地平線を表す.

地球に衝突する天体を早期発見する努力[13]が続く 一方で、天体の軌道をずらして地球との衝突を回避す る方法も検討されている[14]. しかし, 軌道変向が技 術的に可能になったとして、それを用いるかどうかは 難しい問題である。ある国への衝突が予想された天体 に対して軌道変向を試みたとする. 十分な効果が得ら れず他国に衝突するかも知れない。 そうなれば人間ど うしによる天体衝突以上の災いに発展する可能性もあ る. 一都市あるいは一国家の大災害となるかも知れな い衝突に対して軌道変向に踏み切るかどうかの判断を 下すには、災害規模をできる限り正確に予想する必要 がある、一時的避難だけで人命を失わずに乗り切れる ケースも多かろう、探査機あるいは地上観測により衝 突天体のサイズや質量、物性が精度良く分かったとし て、地球への衝突で何が起こるのか、より具体的で定 量的な予測が必要となる(発生する津波の予測に関し ては[15]参照).

大気中での爆発で終わる比較的小さな天体の衝突頻 度は、地表にクレーターを作るような大きな天体の衝 突頻度よりも高い.一方、衝突エネルギー(初期運動 エネルギー)が同じ場合、大気中での爆発は、地表に 衝突してクレーターを作る場合よりも大きな被害を与 える可能性がある[16]. ツングースカ爆発では2000 km²の範囲で樹木がなぎ倒され炎上している[10]. 天 体衝突現象は核爆発に似ているが,広島,長崎原爆も 地上ではなく高度500~600 mで炸裂し,熱線と衝撃 波が広い範囲に及び大きな被害を与えた. 衝突による 惑星表面でのクレーター形成だけでなく,大気への衝 突による爆発現象も詳しく研究する必要がある.

大気中での爆発を伴ったチェリャビンスク火球に関 しては、映像にとどまらず、音波、インフラサウンド、 地震など多様なデータが得られた.これは小天体と地 球大気との衝突を研究し知見を深めるための又とない 機会である.その中でも、明るさと色の時間変化は、 大気への突入から爆発までを高い時間分解能で調べる ことのできる貴重な基礎データとなる.インターネッ ト上で公開された多くの車載カメラやモニターカメラ による動画データから有意な情報を引き出す方法を開 発し、更に導出した明るさと色の時間変化から今回の 大火球の素性に迫るのが本研究の目的である.



図2:カメンスク・ウラリスキー市から撮影された動画(640× 360画素)[17]からのフレームの抜粋(上端の640×136画 素).カメラへの入射光量とカメラ出力値の非線形性,お よびカメラ感度の時間変化に関する補正はしていない生画 像である。各フレームには2013年2月15日3時20分の秒(世 界時)を示した、火球が最大光度を示したのは32.2秒である。

2. 動画データ

多くの動画像がインターネット上に公開されている が、そのどれもが解析に適しているわけではない、今 回はアレクサンダー・イワノフ(Aleksandr Ivanov)氏 がチェリャビンスク市の北北東140 kmにあるカメン スク・ウラリスキー(Kamensk-Uralsky)市から車載カ メラで撮影しYouTubeで公開した動画(図1,2)[17] を解析する、この動画の特徴は、交差点での停車中に 火球が記録されたことである、動画のサイズは横縦 640×360画素であり、時間分解能は30 frames s⁻¹で ある、また、イワノフ氏が公開した他の長時間動画か



図3:観測点の位置とカメラの視野(破線)を地図上に示す(縦 横の縮尺は等しい). 長い赤矢印で示す火球の軌跡は YouTubeで公開された15件の動画をもとに決められた[7]. 火球の軌跡上に2秒おきの火球の位置をプロットした.ま た,各プロットの上には高度を,下には時刻(2013年2月15 日3時20分の秒:世界時)を示す.速度は32秒までは19 km s⁻¹で一定,34秒には14 km s⁻¹に落ちる.突入の上下角は, 主に地球が球であるために,20秒から34秒の間に各地点で の水平から測って19°から17°に変化した.

ら天気は快晴であったことが分かる.

アメリカ合衆国の衛星観測データによれば、火球が 最も明るくなった時刻は2013年2月15日3時20分 32.2秒(世界時)である[4].一方,動画上に記録されて いる時刻を用いると、最大光度時刻は31.45秒である. そこで以下では動画の時刻に+0.75秒の補正を加え、 正式時刻とする.

3. 解析方法と結果

3.1 観測地点とカメラの視野

観測地点は、Google地図、航空写真、散策画像と 動画を見比べることによって、±2m程の精度で特定 することができる.標高はこの市の代表値[18]とした. 車の停車位置および図1に矢印1および2、3で示す聖 堂と2本の木の航空写真での位置から水平面内での視 線方向と視野を決定した.また、聖堂の画像上での縦 横比が、図1およびGoogle投稿写真6枚で同一である ことから、これらすべてで画素は正方形である(縦横 の歪みがない)と判断した.そして,鉛直方向の視野 を求めた.カメラは左右で少し傾いているようである が,水平に取り付けられていると近似した.そして, 停車中の対向車の屋根を通りかつ画像の底辺と平行な 直線を地平線とした(図1).これらのパラメータを表 1に示す.また,観測点の位置と視野を,火球の軌跡 の地表への投影と共に図3に示す.

3.2 カメラ感度の非線形性

車載カメラをはじめとする普通のビデオカメラでは 実際の明るさとカメラの出力は比例しない.次式で示 すように,各画素に対応する被写体からの光xは,レ ンズの絞りによる調整を受けた後,画像センサに入射 し,それによる電気信号は前段増幅される(a').次に ガンマ値と呼ばれるパラメータッで変換され,更に 増幅aされて出力信号yとなる.ただし,今回使用す る動画では,真っ暗な領域でy=0だったので,出力 信号のオフセット(x=0でのyの値)は0とした.

$$y = a(a'x)^{\gamma} = aa'^{\gamma} \times x^{\gamma} \tag{1}$$

特殊なカメラでない限り,光の3原色に対応したR (red),G(green),B(blue)のバンドで yの値は共通 であり,また,これを被写体の明るさなどに応じて自 動的に変えることはない.本解析でもそのように仮定 した.一方,a'あるいはaはカメラのオートゲインコ ントロール機能により時々刻々と変化するのが普通で あり,オートカラーバランス機能によって,RGBそ れぞれで別々に変化することも多い.また,a'はオー トアイリスコントロール機能でレンズの絞りが変化す る場合にも変化する.

γの値は次のようにして決定した.車は右折レーン の停止線で止まる前に交差点に接近していく.この間, 別の車が左折レーンで停車している.この車の尾灯の 光度は一定であると仮定する.また,この間映像シー ンに大きな変化はないので,式(1)で*aa*[¬]は一定であ ると考える.そして,γの値を仮定し次式に従って 動画の各フレームの画素値をすべて変換する.

$$y' = y^{1/\gamma} = a^{1/\gamma}a' \times x \tag{2}$$

こうして得られた変換画像で尾灯の明るさを計測し, 尾灯 – カメラ間の距離との関係を調べる.各時点での 車の位置は道路の右側に立っている何本かのポールの 位置を参照して決めることができる.なお,尾灯周辺 の殆どすべての画素で画素値が0なので,バックグラ ウンドの補正はしない. Rバンドについてのみ,また γ が0.25,0.30,0.35,0.45それぞれの場合について 調べたところ,明るさが距離の2乗に逆比例したのは γ = 0.30の場合であった.以下の解析では,この値で の式(2)による変換画像を解析する.

3.3 カメラ感度の時間変化

図1に矢印4で示した反対車線に停車している車の ヘッドライトの光度は一定であると仮定して、カメラ の感度変化(式(2)のa^{1/y}a'に比例する)を導出した.残 念ながら、これ以外のヘッドライトは画素値の飽和が 顕著である.このライトについては、ライトの像を構 成する10~20画素の中で飽和しているのは1画素だけ であり、それも僅かに飽和しているだけのようである. そこでこの画素の飽和の影響は無視した.また、対向 車の前面には火球光は直接当たらないが、更に幸運な ことに、動画を見る限りこのライトの周辺は火球光の 影響(他の物体からの反射光)が特に少ないようである.

ライトに対応する10~20画素について変換された 画素値を合計し、その周辺でバックグラウンドを計測 し補正を行った.こうして得られたライトの明るさの 時間変化を見ると、時刻25.4秒以後、前述の画素値の 飽和はなくなる.また、この時刻まで他の車の排気ガ スによると思われる一時的な減光があるものの、飽和 を無視して求めた明るさはほぼ一定している.そこで、 この時刻までカメラ感度は一定で、かつライトの明る さのは25.4秒での測定値で代表されるとする.そして、 すべての時間にわたって明るさをこの値で規格化する. こうして求めたカメラ感度の時間変化を、RGBのバ ンド毎に $A_{\lambda}(t)$ として図4(b)に示す.ここで添え字 λ は各バンドを表す.

表1:観測地点とカメラの視野



図4: (a) 火球の高度の時間変化[7]. (b) 初期値を1としたカメ ラの感度 $A_{\lambda}(t)$ (RGB各バンドについて太線,破線,細線 で示す). (c) 火球から観測点までの大気の透過率 $\Gamma_{\lambda}(t)$. (d) 単位波長当たりの光度 $S_{\lambda}(t)$ (左側の目盛). 光度は単 位時間当りに全方向に放射されるエネルギーと定義する. 右側の目盛は3500 Kの黒体放射を仮定した場合のGバンド の値(破線)から算出される全波長での光度である. (e) R/ G(太線), R/B(破線), G/B(細線)の光度比から求めた黒 体温度. 光度最大の付近では3000 ~ 4000 Kを示している. 30.1 ~ 30.7秒ではBバンド光度が0であり温度は算出できな い.

3.4 火球からの放射フラックス

火球像は画素値が激しく飽和しているので,図1に 領域Aで示した雪面の明るさを測る.計測領域の画 像上でのサイズは40×30画素である.雪面はRGBす べてでアルベド1(吸収なし)とする.動画を見ると, 火球の移動と共に路面はきらりと光ることがあるが, 雪面ではそのようなことはない.そこで,火球光は雪



図5:日の出時の太陽方向と直角で仰角αの方向(PQ方向)の空の明るさを理論的に求める方法、太陽方向と垂直で観測点を含む地球の断面を示す、灰色の部分は大気である、紙面垂直に手前から射し込む太陽光は、大気による吸収を受けながらA点に達し、そこでレイリー散乱される、散乱光はAP間で再び吸収を受けながら観測点Pに達する、このようにして観測される光をPQ上のすべての点に関して積分することによって空の明るさを計算する。

面で等方散乱されると近似する.

RGB 各バンドについて、この領域での画素値の合 計を、対応する時刻のカメラ感度 $A_{\lambda}(t)$ で割り $C_{\lambda SNOW}$ (t)を得る.また、火球が明るくなる以前の19.7~21.7 秒の $C_{\lambda SNOW}(t)$ を平均して $C_{\lambda SNOW0}$ とする.この時間帯 での、雪面からカメラに向かう光線について放射強度 $I_{\lambda SNOW0}$ [W m⁻² sr⁻¹ nm⁻¹]が分かれば、以後の火球か らの放射フラックス $F_{\lambda}(t)$ [W m⁻² nm⁻¹]は、雪面の単 位面積への入射と、そこからのあらゆる方向への放射 が等しいとして、次の関係式から求まる.ここで、等 方散乱では放射強度が方向によらず一定であることを 使っている.

$$F_{\lambda}(t)\cos\theta(t) = \int \frac{(C_{\lambda \text{SNOW}}(t) - C_{\lambda \text{SNOW}0})}{C_{\lambda \text{SNOW}0}} I_{\lambda \text{SNOW}0}\cos\zeta \, d\Omega$$

$$= \frac{(C_{\lambda \text{SNOW}}(t) - C_{\lambda \text{SNOW}0})}{C_{\lambda \text{SNOW}0}} I_{\lambda \text{SNOW}0} \times \int \cos\zeta \, d\Omega =$$

$$\frac{(C_{\lambda \text{SNOW}}(t) - C_{\lambda \text{SNOW}0})}{C_{\lambda \text{SNOW}0}} I_{\lambda \text{SNOW}0} \times \int_{0}^{\pi/2} (\cos\zeta \cdot 2\pi \sin\zeta) d\zeta =$$

$$= \pi \frac{(C_{\lambda \text{SNOW}}(t) - C_{\lambda \text{SNOW}0})}{C_{\lambda \text{SNOW}0}} I_{\lambda \text{SNOW}0} \qquad (3)$$

ここで $\theta(t)$ は雪面から見た火球の時々刻々の天頂角 であり、 ζ は雪面での天頂角、d Ω は雪面から見た微 小な立体角である.

3.5 青空光(放射フラックス絶対値の基準)

式(3)中の放射強度 $I_{\lambda SNOW0}$ の値は,青空光との比較 で求める.図1のサイズ 30×30 画素の空の領域Bで の画素値の合計をカメラの感度変化の補正を行った後,

	Rバンド	Gバンド	Bバンド	備考
代表波長 [nm]	650	550	450	
太陽光フラックス, $F_{\lambda { m SUN0}} [{ m W} { m m}^{-2} { m nm}^{-1}]$	1.59	1.88	2.00	[21]
大気の透過率, T_{λ}	0.699	0.637	0.527	[21]
吸収断面積, σ_{λ} [m ²]	1.65×10^{-30}	2.08×10^{-30}	2.96×10^{-30}	
レイリー散乱断面積, σ _{Rλ} [m ²]	2.17×10^{-31}	4.24×10^{-31}	9.45×10^{-31}	(注1)
$I_{\lambda \text{SKY}} [\text{W} \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}]$	3.97×10^{-4}	5.65×10^{-4}	5.63×10^{-4}	(注2)

(注1)NaD線(590 nm)での値3.22×10⁻³¹ m² [22]から波長の4乗に逆比例するとして計算.

(注2)計算に使った大気の柱数密度は2.17×10²⁹ m⁻²[20].

火球が明るくなる以前の19.7~21.7秒で平均し $C_{\lambda SKY0}$ を得る.すると $I_{\lambda SNOW0}$ は次式により求まる.

$$I_{\lambda \text{SNOW0}} = \frac{C_{\lambda \text{SNOW0}}/N_{\text{SNOW}}/\cos^4 \vartheta_{\text{SNOW}}}{C_{\lambda \text{SKY0}}/N_{\text{SKY}}/\cos^4 \vartheta_{\text{SKY}}} I_{\lambda \text{SKY0}}$$
(4)

ここで *I*_{ASKY0} はカメラのレンズ位置での,空の領域か らレンズへの光線の放射強度である.*N*_{SNOW} と*N*_{SKY} は 雪面と空のカウント領域の画素数であり,それぞれ 1200,900である.カメラを針孔写真機で近似すると, 一様な明るさの被写体の像は中心で明るく周辺では暗 くなる.この時,像の明るさは入射光とカメラの光軸 がなす角を *8* とすると cos⁴ *8* に比例する[19].*8* _{SNOW} と*9* _{SKY} は図1のA, Bそれぞれの領域からの光線がカ メラの光軸となす角度であり,式(4) ではその補正を 行っている.

式(4)中の $I_{\lambda SKY0}$ はレイリー散乱と大気による吸収 を考慮した次のようなモデルに従って計算する(図5 参照).火球出現時の太陽は,天文計算ソフト・ステ ラナビゲータ第9版で計算すると,丁度地平線上にあ り,太陽方向は空の明るさを計測した領域(図1のB) の方向と直交している.図5においてPQは観測点か らこの領域への半直線を示し,その仰角は $\alpha = 20^{\circ}$ で ある.US Standard Atmosphere 1976 [20]では,高度 86 kmまでを大気モデルを作る際の一つの領域として いる.そこで大気の厚さを86 kmとし,数密度n(z)(zは高度)をこのモデルから得る.紙面に垂直に射し込 む太陽光線は大気上端からA点まで大気による吸収 を受けながら進む.A点での太陽光フラックスは次式 で与えられる.

$$F_{\lambda \text{SUN}}(\mathbf{A}) = F_{\lambda \text{SUN0}} \exp\left\{-\sigma_{\lambda} \int_{\lambda \text{Min}}^{\mathbf{A}} n(z(s)) ds\right\}$$
(5)

ここでsは入射点からの距離で、これに対応するzは

地球を球形として求める. また $F_{\lambda SUN0}$ は大気圏外での 太陽光フラックスであり、 σ_{λ} は大気分子の吸収断面 積である.

A点でのPQ方向の長さがds'でそれに直交する単 位断面積を持つ円柱領域内の大気によって太陽光はレ イリー散乱を受ける.レイリー散乱に関する大気分子 の断面積をσ_{Rλ}とすると,散乱光のカメラ方向への放 射強度は次式で与えられる.

$$dI'_{\lambda}(A) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \Theta) \sigma_{R\lambda} n(A) F_{\lambda SUN}(A) ds' \quad (6)$$

今回の場合, PQは太陽光と直交することから散乱角のは常に90°であり,式(6)は簡単に

$$dI'_{\lambda}(A) = \frac{3}{16\pi} \sigma_{R\lambda} n(A) F_{\lambda SUN}(A) ds'$$
(6)

と書ける.この散乱光はレンズに入射するまでに更に 大気による吸収を受け、入射時の放射強度は

$$dI_{\lambda} = dI'_{\lambda}(A) \exp\left\{-\sigma_{\lambda} \int_{A}^{P} n(z(s')) ds'\right\}$$
(7)

となる. d*I*_λをP点からQ点まで積分すれば*I*_{λSKY0}が 次のように求まる.

$$I_{\lambda SKY0} = \int_{P}^{Q} dI_{\lambda}$$
(8)

式(5)~(8)に表れる積分はdz=100 mとして*s*, *ds*, *s*, *ds*'をzの値毎に算出しながらzについての数値積分として求めた. なお, P点のzは200 mとした.

 $F_{\lambda \text{SUN0}}$ には、RGB各バンドを波長650,550,450 nmの単色光であると近似して、文献値[21]を使う. また、 σ_{λ} も同様に大気透過率 T_{λ} [21]から次式により 求める.

$$T_{\lambda} = \exp\left(-\sigma_{\lambda} \int_{0}^{86 \text{ km}} n(z) dz\right)$$
(9)

一方、 $\sigma_{R\lambda}$ は、NaのD線の波長590 nmでの値[22]から波長の4乗に逆比例するとして計算した. これらの値を、得られた空の明るさの結果と合わせ表2にまとめる.

3.6 火球の光度

観測された火球の明るさからその光度を求めるため には、距離による減衰と大気の吸収を見積もる必要が ある.そのためには火球の軌跡を知らなければならな い.ここでは、火球の始まりから終わりまでの7つの 時点において報告された経度、緯度、高度[7]を時間 で内挿して各時刻における火球の座標を求め、地球を 球形であるとして観測点との距離r(t)を求めた、火球 の光度 $S_{\lambda}(t)$ [W nm⁻¹]は、観測点での火球からのフ ラックスと次の関係にある.

$$F_{\lambda}(t) = S_{\lambda}(t) / (4\pi r(t)^2) \times \Gamma_{\lambda}(t)$$
(10)

$$\Gamma_{\lambda}(t) = \exp\left\{-\sigma_{\lambda} \int_{\mathbf{p}}^{r(t)} n(z(s'')) \mathrm{d}s''\right\}$$
(11)

 $\Gamma_{\lambda}(t)$ は火球から観測点までの大気の透過率を表し, 式(5)~(8)の場合と同様, dz=100 mかつ地球は球形 であるとして数値的に計算した.

 $\Gamma_{\lambda}(t) \geq S_{\lambda}(t)$ を図4(c) と同(d) に示す.光度の時 間変化は別グループによる同様の解析[1, 4] とほぼ一 致している.ただし、これらが示す33.2秒にある小さ な極大が、本結果では見られない.この理由は、カメ ラ感度が下がり過ぎて領域A(図1)内の画素値がすべ て0になったことによる.しかし、この極大値は最大 光度の1/16で継続時間も短いことから、後に述べる 衝突エネルギーの推定には殆ど影響しない.

3.7 火球の色

図4(d)の結果を基に黒体放射を仮定してその温度 $T_{\rm B}$ を計算する.長短2つの波長 λ_{l} 、 λ_{s} での単位波長 当たりの光度の比はプランクの式より次式で与えられ る.

$$S_{\lambda_l}/S_{\lambda_s} = \left[\lambda_s^{5}\left\{\exp\left(\frac{hc}{\lambda_s k T_{\rm B}}\right) - 1\right\}\right] / \left[\lambda_l^{5}\left\{\exp\left(\frac{hc}{\lambda_l k T_{\rm B}}\right) - 1\right\}\right]$$
(12)

ここで、hはプランク定数、cは光速度、kはボルツマ ン定数である。RGBから得られる3つの比のそれぞれ について、 $T_{\rm B}$ を1000 Kから40000 Kまで100 Kステ ップで変化させて光度比を計算し、観測結果に最も近 い比を与える温度を求めた.なお、RGB各バンドを 波長650,550,450 nmの単色光であるとした.結果 を図4(e)に示す.

3.8 誤差の見積もり

誤差の要因として、まずはデータ圧縮の影響が考え られる.カメラのデータを記録する際、またインター ネット上に動画を公開する際に非可逆なデータ圧縮が 行われたはずである.情報量を減らすために画質は劣 化し、ヘッドライト(図1矢印4)のような細かい(空間 周波数の高い)像は特に影響を受け易い.これについ ては明るさの計測にどの程度影響するかは不明である.

前節までで,空(図1領域B)の明るさを理論的に求 めたり,火球光の大気吸収の補正をしたりする際に大 気の吸収断面積を用いた.断面積は典型的な大気の透 過率[21]から求めたが,快晴の場合でもある範囲で変 動するはずである.火球から観測点までの大気の透過 率に関しては,観測点から見た火球の仰角をβとす ると式(9),式(11)より次式を得る(導出の詳細は省く).

 $\frac{\mathrm{d}\Gamma_{\lambda}(t)}{\Gamma_{\lambda}(t)} = \left\{ \int_{\mathrm{P}}^{r(t)} n\big(z(s^{*})\big) \mathrm{d}s^{*} / \int_{0}^{86\,\mathrm{km}} n(z) \mathrm{d}z \right\} \times \frac{\mathrm{d}\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda}} \approx \frac{1}{\sin\beta} \times \frac{\mathrm{d}\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda}}$ (13)

最大光度時には $\beta = 9^{\circ}$ であり、 $1/\sin \beta \approx 6$ となる、実際の天頂方向の透過率が文献値と1%違うと、式(10) で求められる光度には6%の違いとなって現れる。

また、これまでRGBの各バンドを波長650、550、 450 nmの単色光で代表させてきたが、これらを変化 させるとどうなるか.特にRバンドはカメラに赤外カ ットフィルターが付いている場合、もっと短い波長で 代表させた方が良いかも知れない、そこで代表波長を 640 nmに変更してその影響を調べた.詳細は省くが、 650 nm と640 nm では空の明るさと火球光の大気によ る吸収量が違う.また、その単色光(ただし波長幅1 nm)が黒体放射の中で占める割合も違う。こうした要 因をすべて考慮すると、図4(d)に示す単位波長当た りの光度(Rバンド)は約10%増加する.また、次章 で述べる衝突エネルギーは8%増加する.一方, R/G から求めた最大光度前後での温度3000~4000 K(図4 (e))は約400 K低下する. 同様にBバンド代表波長を 10 nm 変化させ460 nm にした結果は、約10%の光度 の減少と400 Kの温度の低下であった.

4.考察

図4(e)で、29.3秒(この時高度46.6 km)までは3つ の比から求めた温度は一致しない.また、R/G、R/B 比による結果は40000 Kを越えてしまうが、このよう な高温は考えられない.天体が分裂せずに飛行してい たと考えられるこの期間の放射スペクトルは黒体放射 とは全く異なったものなのだろう.スペクトルが観測 されたベネショフ(Benesov)火球でもこの期間は線ス ペクトルが卓越していた[23].また、数値シミュレー ションによる火球の放射スペクトルも高高度では線ス ペクトルが卓越している[24].今回の結果はこれらの 結果と整合している.

30.1~30.7秒では、Bバンドでの光度が0になって おりR/B、G/Bについての温度は算出できない、雪面 の明るさ(図1領域A)がカメラ感度低下の補正を加え ても火球出現前より暗くなったためであるがその原因 はわからない、なお、最初の25.5秒までにも同様の理 由で温度が計算できない場合があり、図4(e)では0 K で表示されている。

光度が急激に増加した30.7~32.4秒のフレア[25]で は、R/G、R/B、G/B比から求めた温度が3000~4000 Kで一致している、ベネショフ火球でもフレア時には 連続スペクトルが卓越しており[23],数値シミュレー ションも、衝突天体が大きい程、また飛翔高度が低い 程,連続スペクトルが強くなることを予想している(例 えば, 直径10 mのHコンドライトが20 km s⁻¹で高 度40 kmを飛翔する場合)[24]. 天体サイズは、ベネシ ョフ火球では2 m[23]、チェリャビンスク火球では18 m[3]と見積もられている。最大光度となる高さは、前 者で24 km[23]. 後者では30 km[4]である(NASAの発 表では23.3 km[3]であるが他の結果は約30 kmを支持 している). やや高い高度でフレアを起こしているが, より大きなチェリャビンスク火球からの放射が、連続 スペクトルであっても不思議ではない. それは約 3500 Kの黒体放射でよく近似できるものだったのか も知れない.

光エネルギーの殆どはフレアで放射されている.フ レアは他の火球でも多く観測されており、衝突天体の 爆発的破壊に伴って起こる[25].その原因は、大気密 度の指数関数的な増加に伴う天体前面に働く動圧の急



図6: RGBの各バンドで、単位波長当たりの光度から6000 Kの黒 体放射を仮定して全波長での光度を計算し、それを時間積 分して全放射エネルギーを算出する.そして経験式[26]を 使って衝突エネルギーを見積もった.衛星搭載センサの感 度波長域[27]に近いRバンドの結果は、NASA公開値[3]に 近い450 kton TNTを示す.一方、RGB間での結果の相違 は6000 K黒体放射ではないことを示唆している.

激な増大であると考えられている. さて, 3500 Kの 黒体放射を仮定した場合, 550 nm での1 nm 当りの放 射は全放射の 4.9×10^{-4} となっている. 故にGバンド での最大光度 4.9×10^{11} W nm⁻¹(図4(d)参照)は $1.0 \times$ 10^{15} Wに相当する. この値は衛星観測から推定した 3.4×10^{14} W (2.7×10^{13} W sr⁻¹[4])の3倍であるが,違 いの理由は後者では6000 Kの黒体放射を仮定してい ることである. 高度30 kmとして距離による減衰のみ を考えると,直下点でのフラックスは 8.8×10^{4} W m⁻² となるが,これは太陽定数の約65倍である. 6000 K ではなく3500 Kの黒体放射に近かった場合,可視光 で感じた以上の近赤外線での強い放射があったことに なる.

13件の火球について、インフラサウンド等から求 めた衝突エネルギー E_{Impact} は正しいと仮定して、それ と衛星観測から推定した全放射エネルギー E_0 を比較 して次のような経験式が得られている[26]. NASAが 公表したチェリャビンスク火球の衝突エネルギー[3] もこの関係式によっている.エネルギーの単位にはす べてkton TNTを使う(1 kton TNT = 4.2×10^{12} J).

$$E_{\text{Impact}} = (8.25 \pm 0.30) E_0^{(0.885 \pm 0.075)}$$
(14)

この関係式の導出では、限られた波長域での衛星によ る測定値から E₀を計算するために6000 Kの黒体放射 を仮定している.我々の結果についても、この式を利 用して衝突エネルギーを算出してみよう.まず RGB 各バンドについて、図4(d)に示す単位波長当たりの 光度から6000 K黒体放射を仮定して全波長での光度 を計算し、これを殆どの放射が起きている29.3~32.8 秒で積分し E₀を得る.そして式(14)によって衝突エ ネルギーを得る(図6).図中のエラーバーは式(14)が 含んでいる誤差によるものである.6000 K黒体放射 の仮定が適切でないためにバンド間で衝突エネルギー が大きく異なっているが、分光感度特性が衛星のセン サ[27]に最も近いであろうRバンドでは450 kton TNT となり NASAの結果[3]と一致する.

火球では、まず火球前面の衝撃波によって地球大気 が数万Kに熱せられる.高温大気は可視光域では強い 放射をしないが,他の波長域での放射で天体表面をア ブレートし、蒸発したガスを更に熱すると考えられて いる.効率よく可視光域で放射を行うのは鉄などを含 むこの衝突天体由来のガスである.ガス量が多いと光 学的に厚くなり、更に電離によって生じた電子による 制動輻射も加わって連続スペクトルを放射する[23]. 衝突天体が分裂すると表面積が一気に増える.天体の 運動エネルギーから熱エネルギーへの変換が増大する 一方、アブレーションの増大はエネルギーを消費する. 両者のバランスで、光学的に観測される光学的深さが 1(それ以上先が見通せない)となる部分の温度が、丁 度3000~4000 Kとなったと考えられる.

この温度(T_{flare} =3500 Kとする)と光度の最大値 (S_{MAX} =1.0×10¹⁵ W)から、次式により黒体放射をする面積 A_{MAX} を計算することができる.

$$A_{\rm MAX} = S'_{\rm MAX} / (\sigma T_{\rm flare}^{4}) \tag{15}$$

ここで σ はステファン・ボルツマン定数(5.67×10⁻⁸ W m⁻² K⁻⁴)である.結果は A_{MAX} =120 km²となる. この面積を説明するために、火球の軌跡に沿った円柱 の表面からの放射を考える.まずは円柱の半径を推定 する.

密度 ρ_gの大気中を速度vで進む天体の前面にかか る圧力Pは、超音速の場合でも、大気密度×断面積 ×速度の2乗に比例する抵抗力を断面積で割ったもの と同じオーダーである.

$$P \sim \rho_{\rm g} v^2 \tag{16}$$

圧力は単位体積当たりのエネルギーと同じ次元をもつ ので,前面近くの天体物質には,単位体積当たりにこ の圧力相当の弾性エネルギーが蓄えられると考える. 分裂による弾性エネルギーの開放で,この単位体積が 軌跡と直角方向に速度 $v_{\rm T}$ で飛び出すとする.小天体 の密度を $\rho_{\rm p}$ とすれば次のエネルギー保存則が成り立 ち,2つの式から $v_{\rm T}$ が得られる.

$$\rho_{\rm p} v_{\rm T}^2 / 2 \sim P \tag{17}$$

高度30 kmでの値 $\rho_g=2 \times 10^{-2}$ kg m⁻³, $\rho_p=3.6 \times 10^3$ kg m⁻³, v=19 km s⁻¹[3]を代入すると, $v_T=63$ m s⁻¹ となる. フレア継続時間が1~2秒であったことから, 分裂片とアブレーションガスは軌跡に沿って半径100 mの範囲に円柱状に広がったとする. すると,上記の A_{MAX} に対応する円柱の長さは190 kmというあり得ない長さになってしまう.

ー方、インターネット上の動画等の解析から、軌跡 の半径は1.0~1.8 kmであったという報告がある[7]. 仮に1 kmだとすると円柱の長さは19 kmである.フ レア直後の動画には、長さ20 kmほどの発光雲が写っ ており、最大光度時にはこの長さに渡って3500 Kの 黒体放射をしたのかも知れない.ただし、1~2秒で この半径になるには、分裂片やガスが500~1000 m s⁻¹で広がらねばならない.式(16)、式(17)で小天体 の密度を1/10にすると $v_{\rm T}$ =630 m s⁻¹となるが、天体 前面の圧力で圧縮された物質が低密度であるとは考え 難い.何か別のメカニズムが働いているのであろう.

5. まとめ

- (a) 車載カメラのデータからでも条件が良ければ,火 球の明るさと色の時間変化をかなりの精度で求める ことができる.
- (b) 光放射の殆どは、約2秒間のフレアで起きた.
- (c) フレア以前の放射は明らかに黒体放射ではない.
- (d) フレアは約3500 Kの黒体放射と矛盾しない.
- (e) 3500 K黒体放射を仮定した場合の最大光度は1.0
 × 10¹⁵ Wであった.
- (f) 放射エネルギーから衝突エネルギーを算出する経 験式によれば、衝突エネルギーはTNT爆薬換算で

450 kton TNTであった.

謝 辞

当研究で解析した動画はロシア,カメンスク・ウラ リスキー市のアレクサンダー・イワノフ(Aleksandr Ivanov)氏によって撮影され公開されたものである. その他Google Mapに投稿された多くの写真も用いた. こうした方々や多くのインターネットサイト運営者に 深く感謝する.石原吉明氏には論文執筆の機会を与え て頂いた.また,原稿を丁寧に読んで下さった匿名の 査読者からは多くの適切なアドバイスを頂いた.

参考文献

- [1] Emel'yanenko, V. V. et al., 2013, Solar System Research 47, 240.注1
- [2] 高橋典嗣, 吉川真, 2013, 遊星人 22, 228.
- Yeomans, D., 2013, http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/, http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html (last browsing: Feb. 2014).
- [4] Brown, P. G. et al., 2013, Nature 503, 238.
- [5] Zuluaga, J. I. and Ferrin, I., 2013, http://arxiv.org/ abs/1302.5377 (last browsing: Feb. 2014).
- [6] Zuluaga, J. I. et al., 2013, http://arxiv.org/abs/1303.1796 (last browsing: Feb. 2014).
- [7] Borovicka, J. et al., 2013, Nature 503, 235.
- [8] Galimov, E. M., 2013, Solar System Research 47, 255. 注1
- [9] Meteoritical Society, 2013, http://www.lpi.usra.edu/ meteor/metbull.php?sea=Chelyabinsk&sfor=names&a nts=&falls=&valids=&stype=contains&lrec=50&map =ge&browse=&country=All&srt=name&categ=All& mblist=All&rect=&phot=&snew=0&pnt=Normal%20 table&code=57165 (last browsing: Feb. 2014).
- [10] Univ. Bologna, http://www-th.bo.infn.it/tunguska/ (last browsing: Feb. 2014).
- [11] 清水建設, http://www.shimz.co.jp/theme/dream/ greenfloat.html (last browsing: Feb. 2014).
- [12] Ceplecha, Z., 1996, Astron. Astrophys. 311, 329.
- [13] 浦川聖太郎ほか, 2013, 遊星人 22, 222.
- [14] 吉川真,山口智宏, 2013, 遊星人 22, 214.

- [15] 後藤和久ほか, 2013, 遊星人 22, 207.
- [16] Boslough, M. B. E. and Crawford, D. A., 2008, Int. J. Impact Eng. 35, 1441.
- [17] Ivanov. A., https://www.youtube.com/ watch?v=iCawTYPtehk (last browsing: Feb. 2014).注2
- [18] http://dateandtime.info/citycoordinates. php?id=1504826 (last browsing: Feb. 2014).
- [19] Rybicki, G. B. and Lightman A. P., 1979, Radiative Processes in Astrophysics (Wiley & Sons, Inc.), Problem 1.1 in Chapter 1.
- [20] US Standard Atmosphere 1976, NASA-TM-X-74335, pp. 241.
- [21] Cox, A. N. (editor), 1999, Allen's astrophysical quantities, 4th edition (New York: Springer), §14.6 and §11.20.
- [22]永田武,等松隆夫,1973,超高層大気の物理学(裳華房), §8.1.2.
- [23] Borovicka, J. and Spurny, P., 1996, Icarus 121, 484.
- [24] Golub, A. P. et al., 1997, Solar System Research 31, 85.
- [25] Ceplecha, Z. et al., 1998, Space Sci. Rev. 84, 327.
- [26] Brown, P. G. et al., 2002, Nature 420, 294.
- [27] Tagliaferri, E. et al., 1994, in Hazards Due to Comets and Asteroids (edited by Gehrels, T., Univ. Arizona Press), 199.
- 本文(参考文献)への注釈
- 注1:参考文献[1], [8]を含むこの雑誌の47巻4号は特集 になっており、チェリャビンスク火球に関する論 文を他に3つ載せている.
- 注2:この動画をYouTubeから直接ダウンロードする ことはできなかったため、次のサイトにある同 一の動画を取得し解析した: http://www.youtube. com/watch?v=Uol9hOU_TvI&list (last browsing: Feb. 2014).

始原天体有機物研究の今とこれから Ⅲ. 有機ナノグロビュール

中村 圭子¹

2013年12月31日受領, 2014年2月17日受理.

(要旨) 隕石中の不溶性有機物の一部である有機ナノグロビュールは, 星間分子雲あるいは原始太陽系円盤 外縁部の極低温環境に起源をもつ極めて始原的な有機物で,これまで数多くの始原惑星物質中で存在が確認 されている.太陽系形成以前からの情報を記録している有機ナノグロビュールがこれほど多くの始原惑星物 質中で認められるということは,これらが太陽系形成初期においていたるところに存在し,惑星系形成にお いて重要な役割を果たしたことに他ならない.有機ナノグロビュールの形状や有機化学・同位体組成,存在 量の違いをサンプル毎に比較することにより,母天体自身の物質進化・変性過程の解明にも役立つと期待さ れる.本稿では有機ナノグロビュールの特徴・起源とこれまでの研究結果を時系列にそってレビューする.

1. はじめに

有機ナノグロビュールとは、多くの始原的太陽系物 質中に認められる不溶性有機物からなるナノサイズ球 体(ナノグロビュール)で、多くの場合、中心部分が空 隙で、明瞭な同心円状のコア・マントル構造を持つ。 有機ナノグロビュールは、筆者が「コアマントル状ア モルファス炭素粒子の発見」[1]として本誌にも発表し た2002年当時は、透過型電子顕微鏡による形状と周 辺鉱物との関連の観察及び、限られた分光分析による 化学組成の傾向が指摘できたのみで、その起源・形成 過程は推測の域を出なかった.しかしその後のナノス ケール分析法の向上・普及により飛躍的に解明が進み、 2006年にはNANOSIMSによるin situ(その場)同位体 分析によって、太陽系物質の同位体とは著しく異なる 水素及び窒素同位体比が検出されたことから、ナノグ ロビュールは分子雲あるいは原始太陽系円盤外縁部の 極低温環境に起源をもつ始原的な有機物であると確定 した[2]. 2014年現在では数多くの始原惑星物質中で ナノグロビュールの存在が確認されている[表1].本

keiko. nakamura-10nasa. gov

表1:	有機ナノグロビュールが確認された地球外物質サンプルー
	覧. 電子顕微鏡による形状の確認とNANOSIMS によるN
	同位体異常が確認されたもののみ記載.*[13]は北海道大学
	の同位体顕微鏡での水素同位体を測定.

サンプル名	タイプ	文献
Tagish Lake	CI breccia	[2]
Orgueil	CI1	[5]
Bells	CM2	[5-8]
Murchison	CM2	[5, 8, 9]
Paris	CM2	[10, 11]
Sutter's Mill	CM breccia	[12]
GRO95577	CR1	[5, 8]
NWA801	CR2	[9, 13*]
EET92042	CR2	[5, 8]
QUE99177	CR3	[5, 8, 12, 45]
ALH77307	CO3.0	[8]
Isheyevo	CH/CB	[14]
Comet Wild2	彗星塵	[5, 15-16]
Chondritic IDPs	含水・無水	[6, 17]

稿では便宜上Tagish Lake またはBells隕石中のナノ グロビュールを中心に進めるが、代表的なナノグロビ ュール研究論文全てを適宜に引用するように努めた. 隕石ごとの詳細については引用文献をご参照いただき たい.

隕石中のアミノ酸に関しては薮田博士による「始原 天体有機物研究の今とこれからI.アミノ酸」[3]を,

アメリカ航空宇宙局ジョンソン宇宙センター 地球外物質探索科学部門



図1: Tagish Lake隕石の有機ナノグロビュールのTEM明視野像

また有機ナノグロビュール以外の不溶性有機物 (Insoluble Organic Matter : IOM)に関しては癸生川 博士による「始原天体有機物研究の今とこれから II. 不溶性有機物」[4]をご参照いただきたい.

2. 有機グロビュール研究の意義

現在我々が手にとって分析することができる地球外 物質の中でも、炭素質コンドライトおよび彗星塵は最 も始原的な太陽系物質と考えられているが、その構成 物質が記録する母天体形成までのイベントは多種多様 である. 高温太陽系星雲ガスの形成(CAIs)、ガスの 凝縮・蒸発による塵の形成(マトリクス)、太陽近縁で の高温凝縮物質の形成(CAIs、コンドリュール). そ してそれらが混合・集積し微惑星を形成したのちに母 天体上での二次変成(熱変成,水質変成,衝撃変成な ど)を受ける.

コンドライトや彗星塵の中には、これら母天体上で の変成過程を経てもなお太陽系形成以前の情報を留め る物質・プレソーラー粒子(Presolar grains)が存在す る[18]. ミクロンサイズに満たないプレソーラー鉱物 粒子(星間塵, SiCやグラファイトなど)は希ガスや炭 素・窒素・珪素の同位体比異常を持つことから赤色巨 星や超新星爆発を起源とすることがわかっている[18]. また炭素質コンドライトから化学抽出されたIOMか らは500種以上の高分子有機物が検出されている。それら中には水素・窒素同位体比が太陽系(地球)の同位体比からかけ離れていることから,星間空間・極低温の分子雲を起源とする始原的なプロトソーラー(Protosolar)有機物が含まれているといえる。

これらのプレソーラー・プロトソーラー粒子、特に 変成に弱い始原的有機粒子が(1)いかにして母天体上 での変成を免れ、あるいは変成を受けつつも太陽系形 成以前の情報をとどめることができたのか。(2)変成 を受ける前の有機物本来の姿とはいかなるものか、そ して(3) 有機物が隕石中でいかにして他の構成無機鉱 物と交じり合い、共存しているのか、これら3つの謎 を解き明かすことは、その他の固体惑星物質研究と共 に太陽系構成鉱物と惑星形成解明につながる. IOM 研究における多くの偉業は、それらを化学的に抽出す る手法でのみなされてきたが、上記の3つの謎を解く ためには有機溶剤を用いないミクロトーム法や Focused Ion Beam (FIB)といった無機・有機物質を 同時に研磨できるサンプル作成法の確立と、21世紀 に入ってから急速に発展したナノスケールその場同位 体分析の普及を待たねばならなかった.

3. 有機ナノグロビュールのTEM観察

カナダの凍結湖上に落下し、サンプルの一部が隕石

落下直後に回収され冷凍保存されたTagish Lake隕石 は地球上での有機物汚染が最小限に留められた炭素質 コンドライトで,有機物のその場観察には最適であっ た. Tagish Lake隕石のバルク密度は1.67 g/ccと他の 隕石試料と比べて低密度で[19],マトリクス部分は特 に脆く,岩石試料の透過型電子顕微鏡(TEM)用薄片 作成に通常用いられていたイオン研磨法では試料作成 が困難であった.そのため,惑星間塵(IDPs)や軟金属, 生体物質の試料作成に使われていたウルトラミクロト ーム法をTagish Lake隕石のマトリクス薄片作成に応 用した[1].包埋には従来のエポキシ樹脂は使わず, 代わりに常温で液体から透明固体に変化する純粋硫黄 を使用することで,試料作成による有機汚染の可能性 を除去した.

ウルトラミクロトームで50-70 nmの厚さに薄切 りにしたTagish Lake 隕石のマトリクスには、主要鉱 物であるサポナイトやサーペンティンなどの含水ケイ 酸塩の隙間に埋まるような形で、球状のアモルファス 物質が数多く観察された(図1-3).この物質の直径 は平均200 nm、最大でも2 μmに満たず、中心部分が 空隙のものがほとんど(図1)で、薄片化によってドー ナツ状に見えるが、元は核部分が空洞のナノサイズ球 体(ナノグロビュール)である.図2下のグロビュール のように中央の空隙がないものや、明瞭な同心円状の レイヤー構造を持ち、レイヤーの間に気泡(図2下、 矢印)を含むものも確認できた.

ナノグロビュールから得られたエネルギー分散型X 線分光(EDS)及び電子エネルギー損失分光(EELS) (共に空間分解能は~30 nm)によると、ナノグロビュ ールはアモルファス炭素構造に酸素・窒素・硫黄・塩 素が含まれていることがわかった。

比較的大きなナノグロビュールのTEM明視野像 (図3a)とエネルギーフィルター像(C K-edge, 図3b) を見ると,ナノグロビュールのマントル部分はさらに 細かな炭素質粒子(100 - 200 nm)で構成されている ことがわかる[2].

その後Bells, Mighei, Murchison, Murray隕石と いう4つのCM2炭素質コンドライトのTEM観察でも 同様のナノグロビュールが確認された[19]. 化学組成 はTagish Lake隕石中のグロビュールと同様であった が, さらにくわしいEELS分析の結果, アモルファス 炭素構造は芳香族炭素の割合が高いことがわかった



図2:層状ケイ酸塩(サポナイト,網状)と硫化物(黒色)のマトリ クスに埋まる二つの有機ナノグロビュール.中心部分が空 洞でないナノグロビュールは同心円状の層をなしており, 層間に多数の気泡がある(白矢印). Tagish Lake隕石より [1].

[19]. またOrgueil隕石(CII)から化学抽出されたIOM からも、上記と同様の特性をもつナノグロビュールが 発見されたことからナノグロビュールが不溶性有機物 であることが確認された[20].

上記のような TEM 観察・分析のみの限られた情報 に基づいて、その組織が分子雲を模擬した実験生成有 機物と酷似していることから、有機ナノグロビュール もまた分子雲中で生成されたアモルファス氷星間塵が 隕石母天体に取り込まれたのち、低温に保たれたまま マトリクスの含水層状ケイ酸塩を形成したのと同じ水 溶液中で再合成されたと仮説が立てられた[1]. 2006 年に有機ナノグロビュールの窒素・水素の同位体組成 情報が得られ、その形成起源はさらに絞り込まれるこ とになる.

3. 有機ナノグロビュールの同位体組成

21世紀に入り惑星科学分野で本格的に稼動し始め た高空間分解能二次イオン質量分析器NANOSIMSの 最大の利点は,薄片試料の数十µmの領域の同位体組 成分布を100 nm以下の空間分解能で定量的なイメー ジとして最大7種の質量を同時取得できる点である



図3:有機ナノグロビュールのTEMとNANOSIMS を併用したイ メージング. (a):TEM明視野像, (b):C K-edgeエネルギー フィルター像, (c): δ¹⁵N 像, (d): δD像. Tagish Lake 隕石より[2].

(NANOSIMSの詳細については[21]を参照). 図3,4 のようにウルトラミクロトーム薄片(厚さ70 nm)を TEM観察し,ナノグロビュールの形状・化学組成・ 鉱物分布状況を把握した後,さらなるサンプルプロセ スを経ずともNANOSIMSで水素・窒素・炭素などの 同位体組成分布を取得することができる.

図3c, dに示す Tagish Lake隕石マトリクスのδ¹⁵N とδD同位体組成像を観ると, TEMで確認したナノ グロビュールに¹⁵NとDが濃集していることが明らか である.水素が特に水熱変成に敏感である[22]ことを 裏付ける証拠として,δD像(図3d)をみると,Dがグ ロビュールから周囲のマトリクスに滲みでている様子 が見て取れる.このような現象は窒素同位体では見ら れない(図3c).有機ナノグロビュールの水素がマト リックスの含水鉱物の構造水あるいはその隙間に拡散 していったものと考えられる.

水素同位体に関しては、TEM観察に伴う電子線照 射により最大で δ D~+1000‰ほどの同位体分別が 起こることが確認されているため[8, 23], グロビュ ール中の水素同位体を議論する際には、水素・窒素同 位体測定後にFIBで δ D, δ ¹⁵N濃集部分を切り出し、 TEMでナノグロビュールの存在を確認するという方 法が望ましい. 図4にBells(CM2)隕石のマトリクス 部 分 広 領 域(2 μ m²)のTEM像(図4a)・ δ ¹⁵N像(図 4b)及び領域内のナノグロビュールを矢印で示す. グ



図4: Bells(CM2) 隕石のマトリクス部分広領域(2μm²)TEM・ NANOSIMS coordinatedイメージング. (a):TEM像とグ ロビュール部分の拡大図, (b): δ¹⁵N 像. 領域内のナノグ ロビュール位置を矢印で示す[6].

ロビュール以外でも100 nm以下の大きさで¹⁵Nが濃 集している箇所があるが、グロビュールは全てにおい て¹⁵Nのホットスポットとなっており、 δ^{15} Nも大きい ことがわかる.

TEMとNANOSIMSを併用したグロビュール個々 の同位体組成分析の結果,有機ナノグロビュールの δ^{15} N値はTagish Lake隕石:+200 -+1000‰[2], Bells隕石:+500 -+2000‰[5,6]と,それぞれの隕 石の全岩(bulk) δ^{15} N値:+77‰[24],+335‰[25]よ りも突出していることがわかる.また数十nmの距離 に隣接し合うグロビュールの窒素同位体組成がそれぞ れ大きく異なる(図4参照)ことから,個々のグロビュ ールの同位体組成のばらつきは,隕石母天体での水熱 変成によるものだけではなく,母天体に含まれる以前 のグロビュール形成時にすでに同位体組成が不均一で あったことがうかがえる.De Gregorioら[5]は7種の 始原隕石から化学抽出したIOM中に明らかにナノグ ロビュールの形状を保ったままの物質を確認し,これ らの形状・窒素同位体組成・有機化学組成の比較を行 い,岩石タイプによって特異な傾向があるか調査した. その結果,ナノグロビュールの窒素同位体組成に関し ては,岩石タイプ別の傾向は確認できず,バルク δ^{15} Nが高い隕石ほどナノグロビュールの数もグロビ ュール自体の δ_{15} Nも高いことがわかった[5].

4. 同位体組成から見る有機ナノグロ ビュールの起源

地球上での有機汚染の可能性:有機ナノグロビュール の¹⁵N/¹⁴N比は地球の大気窒素と比べて1.2~2倍,D/ H比では地球の標準平均海水と比べて2.5~9倍の値を 示すことから,これらが地球上での有機汚染によって 形成された可能性は排除できる[2].

小惑星・彗星など母天体起源の可能性: NAN-OSIMS による同位体イメージングで明らかになったように、 ナノグロビュールは周辺のマトリクス部分と同位体組 成が完全に異なり、またバルク同位体組成よりも明ら かに高い¹⁵N/¹⁴N(図5)・D/H比値を示すことから、ナ ノグロビュールは母天体上で形成されたものではない と断定できる.特記すべき点として、ナノグロビュー ルが含水鉱物に富む隕石マトリクス中と、水質変成が 認められていない無水鉱物からなるCR3タイプ炭素 質コンドライトマトリクスや、無水彗星塵 (STARDUSTによって持ち帰られたWild2彗星粒子 や無水IDP)の両方で見つかっていることから、小惑 星や彗星母天体中での水質変成によってナノグロビュ ールが形成された可能性は排除できる. また水質変成 によって重水素や¹⁵Nの濃縮は理論的にも実験的にも 実証されていないため、有機ナノグロビュールに関し ては、[1, 28]のような水溶液中での球体形成は当て はまらない.

超新星・炭素星など星周起源の可能性: 有機ナノグロ ビュールの窒素・水素同位体組成は太陽系組成からも バルク組成からもかけ離れていたが、炭素同位体組成 は δ^{13} C ~ - 77から+16 ‰と、バルク組成(-9 ‰)



図5: Tagish Lake隕石中の有機ナノグロビュールの窒素及び炭素同位体組成(黒丸,26個の異なるナノグロビュールの測定値. 誤差は1σ)のバルク組成との比較[2]. バルク組成: Cl1(δ¹⁵N=+31~+52‰), CM2(δ¹⁵N=+15~+47‰) [25]. ただしBells隕石(δ15N=335‰)を除く. Tagish Lake 隕石バルク組成は白抜き菱形, Tagish Lake隕石の有機物 は白抜き四角で示す[2].



図6: 有機ナノグロビュールの窒素及び炭素同位体組成領域(矢 印で挟まれた領域)とプレソーラー SiCの同位体比較.プ レソーラー SiCプロットは[18]に基づく.データ出展は[18] 参照.

と比べても大きな異常は認められなかった(図5).また数多く抽出されている鉱物星間塵・SiC [29,30]の同位体組成と比較した場合、その組成範囲がいかにわずかであるかが一目でわかるように(図6)、炭素同位体組成からみて有機ナノグロビュールはCircumstellar起源ではないことがうかがえる。有機ナノグロビュールの起源を考える場合、星周起源以外での¹⁵N及び重水素の濃縮が可能な領域を考えなければならない。

分子雲あるいは原始太陽系円盤外延部起源:重水素と 水素、あるいは¹⁵Nと¹⁴Nはそれらの質量の違いから 重い同位体を持つ分子はゼロ点振動エネルギーが低く. これらの同位体交換反応は発熱反応となる、極低温付 近では逆化学反応が起きないため、有機分子は高い D/H.¹⁵N/¹⁴N比を持つことになる.またDを含むイ オン分子が電子と結合する際. 解離結合によりD元素 が出来ることからさらにD/H比が高くなる[31, 32]. 有機ナノグロビュールが持つ水素・窒素の同位体組成 (D/H~太陽系組成の10倍,¹⁵N/¹⁴N~太陽系組成の 2倍)を可能にするには、10K以下という極低温の環境 でなければならない[33]. このような条件を満たし. メタンやアンモニアなどの単純有機物を形成するに足 る分子を持つ宇宙環境として. Bok Globuleと呼ばれ るような星間分子雲、あるいは分子雲の中でも特に密 度の高い分子雲コアが考えられる[32]. 分子雲は水素 密度が高く(水素個数密度:10³-10⁴cm⁻³),極低温(10 ~数10 K)の領域で、分子ガスが重力収縮することに

よって,星が生まれると考えられている. 分子雲と同様に重水素・¹⁵N濃縮が可能な極低温環

境として、カイパーベルトのような原始惑星系円盤の 外縁部(30 AU以遠)あるいは、原始星コアから100 AU程度離れた原始太陽系円盤外縁部があげられるこ とから[34]これらの領域でも高い重水素・¹⁵N過剰を もつ有機ナノグロビュールが形成され得る.

5. 有機ナノグロビュールの形成過程

分子雲には鉱物を核とし、その周りをCO, H₂O, メタノール、PAHなどの分子雲中の有機物、さらに 分子雲でのUVによる光化学反応で生成された有機 物・アモルファス氷と炭素質微粒子が層状にとりまく 星間塵が存在すると理論的に考えられている[35, 36].



図7:Wild2彗星塵中で観察されたシリケイト鉱物の核を持つ有 機ナノグロビュールのTEM像とC-K, Fe-KのX線元素マッ プ[16].



図8:ナノグロビュール模擬実験で生成された有機球状物質の TEM像. [39]より抜粋.

このような有機質星間塵を発案者の名前を冠して Greenbergモデル星間塵と呼ぶ.始原的隕石・彗星塵 中で見つかった有機ナノグロビュールはGreenbergモ デル星間塵と形状・サイズともに非常によく似ている. しかしながら図7のように鉱物の核を持つ有機ナノグ ロビュールは例外的で,ほとんどの場合で核部分は空 隙が観察されている.

Greenbergモデル星間塵理論に基づいて有機ナノグ ロビュールの形成過程を理解するにあたり、ナノグロ ビュールの中心空隙内にはもともとどのような物質が 含まれていたのか、という謎を解明する必要がある. ナノグロビュールをTEMで観察すると、その中心部 分はほとんどの場合で空洞(hollow)になっている。こ れは化学抽出したIOM中のナノグロビュールの場合 中心部分の鉱物が融け出てしまっただけかもしれない し、またウルトラミクロトームで薄片を作成した場合 には、中心部分に含まれていた硬い鉱物が切断の際の 物理的圧力によって押し出されてしまった可能性が懸 念される. ナノグロビュールの内部構造を観察するた め、大阪大学の松本らは放射光X線源を用いた3次元 トモグラフィーで非破壊分析を行った[37]. その結果. ナノグロビュール内部は鉱物,あるいはハーライト (NaCl)やシルバイト(KCl)のような水溶性の岩塩鉱物 や水溶液の存在も確認できなかった. TEMでのトモ グラフィー撮像でも同様の観察結果が出た[38]. 有機 ナノグロビュールはGreenbergモデル有機星間塵のよ うに鉱物を核とする代わりに、揮発性の高い氷が核と なって形成された結果.環境温度上昇に伴い核部分が 空隙になったと考えられる.図2下のナノグロビュー ルのように、核部分の空隙が存在せず同心円状構造を 持つものの場合は、揮発性氷の代わりに有機物が核と なったと考えられる。またPAHを原材料とした分子 雲空間模擬実験でも鉱物の核を持たずとも形状・大き さが有機ナノグロビュールと似通った有機球状物質が 生成できることが確認されている[39].

6. 有機ナノグロビュールの化学組成

サブミクロンの大きさしかない有機ナノグロビュー ルの詳しい化学組成を得るためには、高分解能で有機 分子の分布状態を分析できる技術が必要である.これ までは放射光走査型透過X線顕微鏡を用いた炭素X 線吸収端近傍構造スペクトル(C-XANES)分析が行わ れてきた.図9に示す有機グロビュールとマトリクス のC-XANES比較からみて、有機グロビュールは主に PAHからなることがわかる[40].

隕石から抽出したIOMと、そのIOM中に含まれる 有機ナノグロビュールのC-XANESスペクトルを比較 した結果、ナノグロビュールにはケトン基及び水酸基 を伴うPAHが多く含まれていることがわかった[7, 8]. これらのグループはまた、ナノグロビュールと IOMのC-XANES分析後にNANOSIMSを用いた同位 体分析を行った、その結果C-XANES分析で、より顕



 図9: Bells隕石中有機ナノグロビュールとマトリクスの C-XANESスペクトル比較[37]. 285eV:芳香族炭素由来の 二重結合炭素(C=C:オレフェン), 286. 5eV:芳香族ベ ンゼンに結合したケトン(-C=O)及び水酸基(-OH), 287. 5eV:カルボキシル基(-COOH)[40].

著な芳香族性を示したナノグロビュールほど高い ¹⁵N/¹⁴N比を伴うことから,芳香族性が高く¹⁵Nに富む ナノグロビュールほど,母天体上での熱変成を強く受 けていないオリジナルに近いものだと結論づけた[7, 8]. これは[4]で示された加熱実験結果とも一致する. 水質変成の影響をほとんど受けていないCR3隕石中 に見られるナノグロビュールからは,N-XANES分析 でニトリル基(-C≡N)が検出されている[41]. ニト リル基はまた水質変成に非常に敏感で,一般的な IOMではこれまであまり検出されてこなかった[41].

7. 隕石タイプ別によるグロビュールの 変化

有機ナノグロビュールが,隕石から抽出したIOM 中でも特徴的な球状を保持していると考えられること から(図10)ひとまとめに数多くのナノグロビュール サンプルの有機化学組成分析が可能になった.しかし これらの形状は,激しい酸を用いた化学抽出作業過程 で変形してしまっている可能性がある.また抽出過程 でIOMは必ず酸溶液中に浸されるため,[28]のような 水溶液中での球体形成が化学抽出作業途中で起こる可 能性がある。酸水溶液中で形成された球体では¹⁵Nや



図10:GR095577(CR1)から抽出したIOM中の有機ナノグロ ビュールのTEM明視野像. [5]より抜粋.

Dの凝縮は起きないため、同位体組成が低く見積もら れてしまう。化学抽出したIOM中のグロビュールの 形状・組成比較、起源の議論には特に注意が必要であ る。隕石中でのナノグロビュールの分布状況や周辺鉱 物との関係性を調べる際には、ウルトラミクロトーム とTEM観察による地道な確認作業が不可欠である。

先に述べたとおり、ナノグロビュールの窒素同位体 組成と隕石タイプには整合性はなく、また隕石中で隣 り合ったナノグロビュール同士でも同位体組成が大き く異なることがある.そのため、ナノグロビュールの 同位体は母天体上での水熱変成よりも、元来から持つ 個々の同位体組成、つまりは有機ナノグロビュールの 起源である分子雲あるいは原始太陽系円盤外延部とい うとてつもなく広大で不均一な形成環境の地域的な条 件にかぎりなく依存するものと考えられる。しかし、 隕石別にナノグロビュールのマトリクス中での分布状 況、形状を詳しく観察した結果、それぞれ特徴がある ことがわかってきた.以下に特記すべき特徴をもつも のをあげる.

QUE99177隕石(CR3)は水質変成をほとんど受け ておらず、マトリクスは細かい無水アモルファスケイ 酸塩粒子とFe・Niのメタルと硫化物粒子の集合体か らなる.QUE99177隕石はプレソーラー鉱物の含有量 も非常に多いことから、炭素質コンドライトの中でも もっとも始原的と考えられている[41-44].QUE99177 隕石の有機ナノグロビュールは、マトリクスの合間に 脈状に存在するIOMの中に点在している(図11a)[45]. このようなIOM中の含有物として存在する有機ナノ グロビュールは無水IDP中でも確認されている[15,46]. C-, N-XANES分析ではナノグロビュールと、そのま



図11: 有機ナノグロビュールのサンプル別構造比較.全てウルトラミクロトーム薄片をTEM観察したもの.
 (a): QUE99177(CR3)隕石,筆者未発表赤矢印部分がグロビュール(b): Sutter's Mill(CM2)隕石[46],(c): Bells(CM2)隕石,筆者未発表,(d):南極で回収された微小隕石,[49]より抜粋.

わりのIOMの有機化学組成に際立った違いは認めら れず[45],またNanoSIMSによる窒素同位体組成も,ナ ノグロビュールを含むIOMの脈全体がグロビュール と同程度の非常に高い同位体異常を示した[45,IDPに 関しては筆者未発表データ]. このような分析結果か ら脈状IOMとその中に含まれるナノグロビュールは 非常に限られた時間内に同一の条件下で形成された、 あるいはIOMの中でグロビュールが形成されたと考 えるのが自然である.

Sutter's Mill隕石はCM2と分類されているが, Breccia状で,フラグメント毎に岩石タイプが異なる [47]. Sutter's Mill隕石では,有機ナノグロビュール はこれまでのところ無水鉱物からマトリクスからなる フラグメントでのみ観察されている[46]. このフラグ メントのマトリクスは無水アモルファスケイ酸塩粒子 とFe・Niメタル・硫化物粒子からなり,QUE99177 のマトリクスとよく似ている.有機グロビュールはこ のマトリクス中に数個の集合体をなして点在しており, 多くの場合空隙を持たない球状で比較的小さい(図 11b, [48]).

Bells 隕石 (CM2) のナノグロビュールは含水層状ケ イ酸塩マトリクス中に集合体をなしており、その存在 量は非常に多く、時としてケイ酸塩領域よりも上回る。 個々のグロビュールが持つδ¹⁵Nは非常に高いが、周 りのケイ酸塩鉱物と同様の水質変成を受けたためか、 グロビュール同士が接続し合ってAggregateを形成 していたり、また一部が泡状構造をとっている(図 11c).これに似た構造は、下記のナノグロビュールで も観察されている:

- 1)南極で回収された含水鉱物に富む微小隕石 (AMM)(図11d, [49]).
- Cold Bokkeveld(CM2.2), GRO95577 (CR1), Al Rais(CR1/2), MET01070(CM2.0)といった比較的 強い水質変成を受けた炭素質コンドライト[50,た だし酸処理後の抽出されたIOMでのみ観察].
- 3)水質変成を受けていないCR3コンドライト・ QUE99177[50,ただし酸処理後の抽出されたIOM でのみ観察].

4)水質変成を受けていないIDP 試料 [17, 46].

図11d下のグロビュールのように同心円層の合間に 空隙が広がっているのは、もともとは図2下のような グロビュールだったのが、層間に異なる気化点をもつ 揮発性に富む有機物・氷を含んでいたため、なんらか の加熱によってこのような形状になったと考えられる. 加熱が起こった場所・期間を特定するのは難しいが、 揮発した物質が氷であれば、長時間の高温加熱は必要 ない。またマントル部分が球状を保っているため、加 熱が起こる以前にある程度強い高分子有機物である必 要がある。これを裏付けるものとして、青木と赤井 [51]はTEMの加熱試料ホルダーを用いて、ナノグロ ビュールを773Kで90分間加熱したが、ナノグロビュ ールの形状・物性に変化は生じなかった。

上記の観察結果から考察するに、CR3タイプ隕石, あるいは彗星塵のような無水鉱物からなる物質・マト リクス中に含まれる有機ナノグロビュールは、母天体 上での変成度合いが最小限に留められたオリジナルに 近い形状と考えられる.低温状態で集合体あるいは IOM有機物・あるいは有機物氷の脈中に点在してい たが、母天体中で徐々に加熱され、最も揮発性の高い 氷・有機物氷が溶け出し、その水溶液の流れに乗って マトリクス全体に拡散されていった.さらなる加熱で マトリクス全体が水質変成を受け、層状ケイ酸塩が形 成されるに伴い、個々のナノグロビュールの核であっ た氷物質も揮発し、中心部分が空隙になったまま層状 ケイ酸塩マトリクスに閉じ込められた.また高温の水 質変成を受けた場合は、グロビュールマントル中の有 機物が揮発性の高いもの順に蒸発してゆき、同心円・ 泡状の形状となった. 元々のグロビュールのサイズに も依存するが,強い水質変成を受けた隕石中のグロビ ュールは中心部の空洞が大きく,またマントルが薄く, それに伴い球状が複雑に変形する傾向がある。 上記のグロビュールの進化シナリオを確定するために は、さらなる観察・分析が必要である.

8. 将来の展望とまとめ

有機ナノグロビュールは大きさが最大でも2ミクロ ンほどと非常に小さいため、存在の確認・分布状況・ 形状・有機化学組成・同位体組成、これら全てを正し く理解するには地道な作業を要する.しかし、2002 年の発見から11年経ち、数多くの研究グループが競 い合うように研究成果を出し合った結果、上記のよう に多くのことがわかってきた.

有機ナノグロビュールが「同位体異常を持つ」とい う特徴を除けば、[28, 39]のように気相・液相中で比 較的容易にグロビュール状有機物を作成できる「生命 の起源論」という視点からこの有機ナノグロビュール を見た場合、有機物がナノグロビュールのような膜状 球形組織(membrane)を形成することは(1)薄膜内部 の有機物を外部から防御し(2)有機分子合成において 必要なエネルギーを内部に保存することができる[52]。 という点でその形状は極めて重要な意味を持つ. また 生命の起源論においては、有機ナノグロビュール自体 がいかに始原的か(プレソーラーか,プロトソーラーか, あるいは隕石母天体起源物質か)ということもさした る意味を持たない。ナノグロビュールという membrane構造を持つ有機物質が、地球だけでなく、 宇宙空間、そしてさまざまな天体で形成される普遍的 な存在で、それらは条件が整えば(Habitable planets) 生命の種となり得る、ということを特記して おく.「宇宙起源の有機物」という,好奇心を掻き立 てるが分析・解析過程で過ちを犯しやすく敬遠されが ちなサブジェクトではあるため、本論文では、「同位 体異常 | という地球上での汚染物ではあり得ない確固 たる宇宙起源の有機物が存在し、その個々の有機物質 をナノテクノロジーという手段で分析できる」という メッセージを明確にすべく,「同位体異常をもつ有機 ナノグロビュール」にのみ重点を置いて解説した.

有機ナノグロビュールは惑星物質中のIOMその場

分析の対象としてだけではなく,分子雲・始原星円盤 での軽元素同位体濃縮理論,有機星間塵形成理論,そ れらの天文学的観測との比較対象となり,惑星物質学 者と天文・物理学者,さらにはアストロバイオロジス トの交流・共同研究の架け橋となることを期待する. 現在NASAジョンソン宇宙センターで開発中の2段式 レーザー脱離光イオン化質量分析顕微鏡[53]を用いた PAHのその場マッピング,あるいはアトムプローブ などの次世代分析器で,有機ナノグロビュールの同心 円層状別の有機化学組成分布を測定することができれ ば,始原有機物・惑星系形成の理解はさらに深まるだ ろう.

謝 辞

本原稿執筆の機会を与えてくださり,また査読者と して大変有益なコメントを下さった薮田ひかる博士に 心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 中村圭子ほか, 2002, 遊星人 11, 112.
- [2] Nakamura-Messenger, K. et al., 2006, Science 314, 1439.
- [3] 薮田ひかる, 2010, 遊星人 19, 28.
- [4] 癸生川陽子, 2013, 遊星人 22, 14.
- [5] De Gregorio, B.T. et al., 2013, Meteor. Planet. Sci. 48, 904.
- [6] Messenger, S.et al., 2008, LPSC 39, 2391.
- [7] Nittler, L.R.et al., 2009, Geochem. Cosmochem. Acta 73, A948.
- [8] De Gregorio, B.T.et al., 2010, Geochem. Cosmochem. Acta 74, 4454.
- [9] Hashiguchi, M. et al., 2010, Meteor.Planet.Sci.Suppl., 5181.
- [10] Hewins, R.H. et al., 2014, Geochem. Cosmochem. Acta 124,190.
- [11] Remusat, L. et al., 2011, Meteor. Planet. Sci. 45, 5327.
- [12] Nakamura-Messenger, K. et al., 2013, LPSC 44, 2759.
- [13] Hashiguchi, M. et al., 2013, LPSC 44, 1758.
- [14] Ishii, H. A. et al., 2010, Meteor.Planet.Sci. Suppl.5406.
- [15] Matrajt, G. et al., 2008, Geochem.Cosmochem.Acta

72, A603.

- [16] Nakamura-Messenger, K. et al., 2012, LPSC 43, 2551.
- [17] Matrajt, G. et al., 2012, Meteor. Planet. Sci. 47, 525.
- [18] Zinner, E. in Treatise on Geochemistry, (Elsevier, 2004) 1, 17.
- [19] Garvie, L.A.J. and Buseck, P.R., 2004, Earth, Planet. Sci. Lett.224, 431.
- [20] Garvie L.A.J., 2006, Carbon 44, 158.
- [21] 伊藤元雄, スコットメッセンジャー, 2007, 遊星人 16, 308.
- [22] Kebukawa, Y. et al., 2010, Meteor. Planet. Sci. 5, 99.
- [23] Le Guillou, C. et al., 2013, Icarus 226, 101.
- [24] Grady, M.M. et al., 2002, Met. Planet. Sci. 37, 713.
- [25] Kerridge, J.F., 1985, Geochim. Cosmochim. Acta 49, 1707.
- [26] Messenger, S., 2000, Nature 404, 968.
- [27] Floss, C. et al., 2006, Geochim., Cosmochim., Acta 70, 2371.
- [28] Dworkin, J.P. et al., 2001, Proc.Nat.Acad.Sci. 98, 815.
- [29]甘利幸子, 1993, 遊星人 2, 73.
- [30]千貝健, 小笹隆司, 山本哲生, 2001, 遊星人 10, 178.
- [31] Millar, T.J. et al., 1989, Astrophys. J. 340, 906.
- [32] 相川祐理, 2005, 遊星人 14, 168.
- [33] Rogers, S.D. and Charnley, S.B., 2004, Mon. Not. R. Astron. Soc. 352, 600.
- [34] Aikawa, Y. and Herbst, E., 1999, Astrophys. J. 526, 314.
- [35] Greenberg, J.M, 1998, Astron. Astrophys. 330, 375.
- [36] 香内晃, 1994, 遊星人 3, 94.
- [37]Matsumoto, T. et al., 2013, Geochim. Cosmochim. Acta, 116 84.
- [38] Stroud, R.M. et al., 2013, Met. Planet. Sci., 76 5143.
- [39] Saito, M. and Kimura, Y., 2009, Astrophys.J. 703, L147.
- [40] Nakamura, K. et al., 2004, in Chondrites, Protoplanetary Disk, 9067.
- [41]De Gregorio, B.T.et al., 2013, LPSC 2390.
- [42] Abreu, N. and Brearley, A., 2006, LPSC 2005.
- [43] Nguyen, A.N. et al., 2007, Astrophys.J. 656, 1223.
- [44] Floss, C., and Stadermann, F.J., 2008, LPSC 1280.
- [45] Peeters, Z. et al., 2012, LPSC 43, 5283.
- [46] Messenger, S. et al., 2012, LPSC 43, 2696.

- [47] Jenniskens, P. et al., 2012, Science 338, 1583.
- [48] Nakamura-Messenger, K. et al., 2013, LPSC 44, 2759.
- [49] Sakamoto, K. et al., 2010, Met.Planet.Sci. 45, 220.
- [50] Changela, H.G. et al., 2013, LPSC 44, 3101.
- [51] Aoki, T. and Akai J., 2008, J. Mineral. Petrol. Sci. 103, 173.
- [52] Deamer, D.W. and Barchfeld, G.L., 1982, J. Molecular Evolution 18, 203.
- [53] Clemett, S.J. et al., 2012, LPSC 43, 2889.

iSALE shock physics codeによる 数値衝突計算

黒澤 耕介^{1*}, 千秋 博紀¹, 和田 浩二¹, 三上 峻², 平田 成³, 鎌田 俊一^{2,4}, 石原 吉明⁵, 玄田 英典⁶, 中村 昭子⁷, 高田 淑子⁸

(要旨) iSALE shock physics codeは惑星科学者に対して公開されている汎用性の高い衝突計算コードであ る. 我々は日本の衝突コミュニティでもiSALEを自由に扱い,研究を進められる環境を整備するために 「iSALE users group in Japan」というグループを立ち上げた.本稿ではiSALEについての簡単な解説を行い, 幾つかの計算例を示す. 衝突現象は惑星科学の至るところで重要になってくる素過程である. 自らの手で数 値衝突計算を行えるようになれば,研究の幅が大きく広がることが期待できる. 本稿がiSALEでどんなこ とができるのか想像するための一助となれば幸いである.

1. はじめに-iSALE users group in Japan

近年「iSALE」という計算コードの名前を耳にする 機会が増えてきたのではないだろうか? iSALEは Impact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)の略で,数値流体計算コードの一つである SALE code[1]を元にして天体衝突現象を取り扱える 様に,欧米の惑星科学者が改良,整備,提供している Shock physics codeの一つである[2-4].主な開発メン バー (Core developers)はGareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausenの5人 である.すでに多くの欧米の研究者が使用しており, 50報を超える研究成果が査読付き論文として出版さ れている.iSALEの特徴は次章で詳述するが,CTH やAUTODYNといった他の衝突計算コードとの大き な違いはユーザの国籍を問わず,惑星科学者に対して 無償で公開されているという点である.初心者にはま

2. 北海道大学 大学院理学院宇宙理学専攻

- 4. Department of Earth and Planetary Sciences, University of California Santa Cruz
- 5. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
- 6. 東京工業大学 地球生命研究所
- 7. 神戸大学 大学院理学研究科
- 8. 宮城教育大学 理科教育講座
- kosuke.kurosawa@perc.it-chiba.ac.jp

ず二次元計算のみが可能なiSALE-2Dが提供される. これに習熟してコードの開発に協力するという意思表 示をすると、三次元の計算を行うことができる iSALE-3Dの使用が許可される[5]. 我々は日本の惑星 科学/衝突研究コミュニティでもiSALEを自由に使え るユーザを増やすため、惑星科学会内のグループとし て「iSALE users group in Japan」を立ち上げ、普及活 動を行なっている.メーリングリストと情報を集約し たwiki[6]の運用を開始している他、2月には勉強会も 開催した(本号に掲載予定の報告記事[7]も参照).本 稿では計算コードの概要を解説し、読者の皆様に iSALE shock physics code を紹介する.

2. iSALEとは?

本稿ではiSALE-2Dについてのみ解説する.現在の ところ筆者らもiSALE-3Dのアカウントは手にしてい ない.本章ではiSALEの概略を以下のように項目分 けして解説する.iSALEの1タイムステップ内での数 値解法を2.1,状態方程式を2.2,物質モデルを2.3,計 算条件設定に関して2.4,計算結果の描画に関して2.5 でそれぞれ解説する.我々のwikiページ[6]ではさら に詳しい解説資料を公開している.そちらも合わせて ご覧頂きたい.

^{1.} 千葉工業大学 惑星探査研究センター

^{3.} 会津大学 コンピュータ理工学部

2.1 数值解法

iSALE-2Dでは数値解法としてオイラー法のEuler mode. ラグランジュ法のLagrange mode, 両者を合 わせたALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) modeの いずれかを選択することができる. これはiSALEの 元になったSALE code[1]の最大の特徴であるが、現 在のiSALEはもっとも安定に計算を行うことができ るオイラー法に焦点を絞って整備が進んでいるようで ある.実際にiSALE-3Dではオイラー法のみが実装さ れている[5]. 以降ではEuler modeについて解説する. Euler modeでは計算領域を格子に分割し、隣合った 格子間の圧力勾配を計算し、流体方程式に従ってセル 内の物質を移流させる. iSALEのEuler modeでは, 1 ステップだけ格子そのものを動かし, 偏差応力, 圧力 勾配、人工粘性を計算し、移流後に格子を切り直すと いう処理を行なっている(セミラグランジュ法). 衝撃 波通過に伴う不可逆加熱を取り扱い、かつ物理量の不 連続面で起こる数値不安定を抑制するためにvon Neumann-Richtmyer型の人工粘性を採用している. 人工粘性の強さは2つの入力パラメタで表され、ユー ザが自分で変更することも可能である.

2.2 状態方程式

流体方程式は密度,エネルギーの2つのスカラー量 と速度, 圧力(勾配)の2つのベクトル量からなり, 質量, 運動量、エネルギーの保存式のみでは方程式系を解く ことができない. そこで登場するのが状態方程式 (EOS)である、EOSは一言で言えば圧力を密度とエ ネルギー(もしくは温度)の関数として表現したもので あり、物質に依って異なる. iSALEではEOS名を指 定することで、解析解で求められる Tillotson EOSと テーブル形式の ANEOS のどちらかを選択することが できる. どちらも衝突による相変化を表現できる特徴 を持ち、数値衝突計算では頻繁に用いられている。 iSALE パッケージの中には火成岩、堆積岩、水氷、金 属鉄、プラスチックなど様々な物質に対するEOSの 入力パラメタが用意されており、物質名を指定するだ けで、それぞれの状態方程式を読み込むことができる. ANEOSは分子気体を取り扱うことができるように近 年改良されたもの(M-ANEOSと呼ばれる[10])が整備 されている. iSALEを用いると、これまで日本のコ

ミュニティで扱えるものがいなかった ANEOSを用いた数値衝突計算を行うことができることは特筆すべき 点であろう.

2.3 物質モデル

iSALEがHydrocodeではなくShock physics code と呼ばれているのは、物質の弾塑性体応答も同時に解 くことができるからである。物質強度は塑性変形を起 こす条件(降伏応力)として計算に取り込まれる。岩石 物質に対しては応力を受けてダメージが蓄積し、物質 強度が弱くなっていくような破壊の物理を反映したモ デル[3]が、金属に対しては物質強度が応力及び歪速 度に依存するという金属の物性を反映したモデル[11] が実装されている。物質モデルを計算に入れる場合は、 2.2で解説したEOSから求まる圧力勾配とレオロジー モデルを使って、偏差応力テンソルを求め、保存則の 方程式系を解き物質を移流させる. ダメージに依存し た強度の低下だけでなく、融点に近づくと物質が流動 化して強度を失うことを表現した Thermal softening model[12]も実装されている.温度-圧力平面上の熔 融曲線は多項式の形(Simon equation)で与えることが できる. それぞれの物質の入力パラメタは自由に変更 することができ、そのパラメタが結果に与える影響を 調べるといったことも簡単に行うことができる.

ミクロな空隙を持った物質を扱う際にはε-α compaction model[4]を使用する.このモデルは実験 で決定可能な入力パラメタのみで微小空隙の圧密を表 現することができる.また空隙がない物質に対する状 態方程式を微小空隙を持つ同一物質にそのまま適用可 能であるため汎用性が高い.

大規模クレータの崩壊・修正過程を扱うために Acoustic fluidization modelが実装されている. この モデルではある閾値を超える応力を受けた際に物質の 強度が下がり,流動化することを表現したモデルとな っている[例えば13]. これは衝突に伴う衝撃波伝播に よって衝突点の遠方まで弾性波が励起され,その"音 響"が物質を流動化させ,クレータ崩壊に寄与するの ではないか?という仮説に基づいたモデルである. 残 念ながら入力パラメタはフリーパラメタとなっており, 実験的に決定できるような値ではないものの,パラメ タの設定により複雑クレータの特徴である小さい深さ / 直径比を再現することが可能である[13].



図1: 直径10 kmの天体が20 km/sで衝突した場合の時系列.衝突天体と地面の状態方程式には共に花崗岩 のANEOSを用いた.(a)静水圧平衡の初期圧力分布が自動的に計算され、与えられる.ここでは地球 と同じ重力加速度を与えている.(b)衝撃波が球殻状に伝播して,衝突点近傍は非常に強く加熱され ている.(c)クレータの深さ方向の成長が停止.クレータ内部は高温の衝突蒸気雲が満たしている.(d) リバウンドによってクレータの底が盛り上がっている.

2.4 計算条件設定

本節では実際にiSALEで計算を行う際にユーザが 設定する計算条件について解説する. iSALEでは3種 類の異なる物質を同時に扱うことができる. この場合 は3種類の異なる物質に任意の名前をつけ、それぞれ に状態方程式、物質モデルを割り振る.

ユーザが変更可能な計算条件の中で代表的なものを 列挙すると,計算座標系,計算格子の配置,タイムス テップ,計算終了時間,境界条件,人工粘性の強さ, 出力する物理量,重力の向き,大きさ,プロジェクタ イルの数,形状,層状ターゲットの層数,プロジェク タイル及びターゲット内の温度分布,トレーサ粒子の 配置などがある.

計算座標系はデカルト座標系と円柱座標系を選ぶこ とができる. iSALE-2D でも軸対称性が担保されてい る場合は,円柱座標系を用いることで衝突実験結果と 計算結果を直接比較することができる.衝突計算の難 しいところは,周期境界条件を用いることができず, 計算境界からの反射波の影響を受けやすい点である. 反射波の影響を排除するためには見たい領域(例えば クレータ)に対して過剰に広い計算領域をとる必要が

あり、計算コストが高くなってしまう. iSALEでは 計算コストを軽減するために"High-resolution zone" と"Extension zone"を設定することができる。前者は 均等に格子を分割するが、後者は境界に向かって格子 サイズを等比数列で大きくしていく様に設定すること ができる. "Extension zone"では衝撃波が人工的にな まってしまうことになるが、少ない格子数で広い計算 領域を確保することで、見たい領域に反射波が干渉し てしまうことを避けることができる. 衝撃圧縮を受け た物質の音速は状態方程式から自動的に計算され、そ れに合わせてCourant-Friedrichs-Lewy条件(CFL条 件, $C_{s}dt/dx < 1$, ここで C_{s} , dt, dxはそれぞれ音速, タイムステップ,格子サイズを表す)を満たすように タイムステップが自動的に更新される. もちろんユー ザがそれ以下のタイムステップの値を入力することも 可能である.

重力の向きは一軸方向と自己重力を選択することが できる。Projectile及びTarget内の初期圧力分布は与 えた重力場に対して静水圧平衡を満たすように自動的 に計算される。標的中の温度分布はConstant, Conductive profile, Conductive/convective profileの3 種類から選択できる。iSALEでは各ステップで熱伝



導や対流を解いているわけではないが、表面温度、表 面付近の地温勾配、惑星半径、地殻厚を指定するとそ れに即した初期温度分布が設定される.2.1で述べた ようにiSALEではEuler modeが最もよく整備されて いるが、必要に応じてラグランジアントレーサ粒子を 挿入し、物質の移動を追跡し、温度・圧力・空隙率の 時間発展を記録することができる.

2.5 計算結果の描画

iSALEのパッケージの中には"iSALE plot"と "VIMoD"という描画ソフトが含まれており、任意の タイムステップの物理量を画像データとして出力する ことが可能である、数値計算初心者でも容易に解析を 行うことができるように整備されている点もiSALE が爆発的に広まった一因であろう. 図1にiSALE plot による出力の一例を示す. 直径10 kmの天体が20 km/sで垂直衝突した場合を円柱座標系で計算した. このように同時に2つの物理量(この図では左が温度、 右が圧力)を同時に表示することができる. 衝撃波伝 播による衝撃加熱、衝突蒸気雲の発生/クレータの成 長、地面のリバウンドなどが起こっていることが見て 取れる.図1のようなコンターマップでは定量的な解 析は困難であるが、任意の平面で切った物理量をテキ ストデータとして出力することも可能である. また iSALE plotを使うと任意のトレーサ粒子に対して時 刻、位置、設定した2種類の物理量をテキストデータ として出力することができる¹. 例えば個々の粒子が 温度 - 圧力平面上でどんな経路をたどっているかを調 べるといった使い方も可能である.

3. 計算例

本章ではこれまでに我々が行った計算例をいくつか 紹介する.計算結果の詳しい解析は本稿の目的を超え ているのでここでは行わないが,比較的簡単に多種多 様な計算を行うことができるということを示す.なお, Core developersによる豊富なサンプルプログラムと その計算出力も公開されている[14].そちらも合わせ てご覧頂きたい.実際に計算条件を設定する際には, 行いたい計算に最も近いサンプルプログラムをベース にして変更を加えるという方法がよいようである.

3.1 妥当性検証

図2に一次元衝撃波管問題の解析解とiSALEの計算 結果の比較を示す.円柱座標系で動径方向に一様な高 圧気体と低圧気体を配置し,一次元的に衝撃波が伝播 するように計算条件を設定した.人工粘性の入力パラ メタはCore developersによる推奨値をそのまま使用 した.エネルギー分布は衝撃波面前後で多少のズレが みられるが,圧力分布は非常に良く再現していること がわかる.このエネルギー分布のズレはどんな数値解

iSALE plotは描画ソフトとして利用されるだけではなく、出 カファイルから特定のデータを抽出するためのフィルタプロ グラムとしても利用される。



図3:千葉工大惑星探査研で行った衝突実験結果との比較.クレータ形成後のプロファイルを比較した.iSALE計算結果としてはアルミニウムの強度モデルをいれた場合と完全流体として扱った場合の2例を示す.iSALE計算では強度入りモデルでクレータの成長がほぼ止まった衝突後20 μs後のプロファイルをプロットしている.

法であっても多かれ少なかれ発生するものであり, iSALEでは衝撃波面の前後で~20%ほどのアンダー シュートが生じ得るということを念頭において計算を 行う必要があるということである.また空間解像度に よらず、衝撃波面を10セル(半値幅は3セル程度)ほど で表現していることがわかる.この結果は例えば衝突 後の衝撃圧力分布を見積もりたい場合、衝突天体サイ ズを10×10以上の格子で分割しなければいけないこ とを示している.

続いて千葉工業大学惑星探査研究センターで行った 衝突実験との比較を試みた. 直径4.8 mmのポリカー ボネイト球を7.3 km/sで厚さ2 cmのアルミ板に衝突 させ, 生成したクレータのプロファイルを計測した. この場合は射線軸に対して現象が対称的であることが 期待できるので2.4で述べた通り, 実験結果とiSALE-2Dの計算結果を直接的に比較できる. 状態方程式に はポリカーボネイト及びアルミニウムに対応する Tillotson EOSを用いた. アルミ板の強度モデルには 金属の強度を表現した Johnson-Cook model[11]を使用 した. 比較のためにアルミ板が完全流体として振る舞 う場合(強度なし)の計算も実施した. ポリカーボネイ ト弾は全体がHugoniot elastic limitを超える衝撃圧を 受け, 衝突後の振る舞いは物質強度によらないと期待 できるため, 完全流体であると仮定した. 図3にクレ



図4:高空隙率標的への衝突計算例.衝突体形状の影響を調べた. 左が完全球,右が球殻.

ータプロファイルの比較結果を示す.アルミ板を完全 流体であると仮定した場合はクレータの大きさを大幅 に過大評価してしまうが,アルミニウムの物質モデル を用いると実験結果を非常に良く再現できることがわ かる. Core developersが行った検証ではiSALEでク レータの最終形状だけでなく,その直径及び深さの時 間進化まで含めて実験結果をよく再現できることが示 されている[15]. これを持って実際の天体上の複雑ク レータの形成過程を完全に再現できると言える訳では ないということには注意しなければならないが,実験 結果と計算結果の一致は, iSALEが衝突による衝撃 波伝播,物質の流動化,希薄波との干渉による掘削流 の形成といった素過程を正しく取り扱えているという ことの傍証となるだろう.

3.2 高空隙率標的への中空弾丸衝突

近年,小惑星表面に弾丸を撃ち込み,その深部物質 を露出させる能動的探査が計画されるようになってき た.計画段階でどんな規模の衝突であれば小惑星の深 部をどのくらい掘削できるのか調べる必要があるのだ が,その予測には2つの大きな困難がある.まず第一 に小惑星の表面状態がわからないことである.もし仮 に空隙率が数10%に及ぶような表面であったなら弾 丸が小惑星の奥深く貫入してしまい,物質の放出が起 こらず目的を達成できないかもしれない.2つ目は, 弾丸が完全な球形状とは限らないことである.実際に Deep Impact[16]やSMART-1[17]といった衝突型探査 では中空弾丸が用いられており,現在計画中のはやぶ さ2のSmall Carry-on Impactor(SCI)は半球殻形状 [18]である.このような不規則形状弾丸を用いた際に 駆動される掘削流がどのような流線を描くのかは十分 に理解されていない.このような状況を踏まえて本節 ではiSALEで高空隙率標的への中空弾丸が衝突する 計算を行えることを示す.2.3で述べた通りiSALEで は空隙を取り扱える ε – a compaction modelが実装 されており,無限小空隙が掘削過程に与える影響を調 べることができる.また円(楕円も含む)や長方形を組 み合わせて描けるような図形であれば、衝突体形状を 簡単に変更することができる.ここでは直径5 mm, 厚みが1 mmの花崗岩球殻が、7 km/sで空隙率67 % の花崗岩に衝突した場合を計算した.比較のために中 身のつまった花崗岩弾丸が同じ高空隙花崗岩に衝突し た場合も計算した.図4に比較計算結果を示す.同じ 時刻でのクレータ断面図である.中空弾丸の場合はク



図5: VIMoDによる弾丸中流線の可視化例.弾丸のサイズは直径4.8 mmとして計算した.弾丸 と標的の境界に沿って弾丸が変形していることがわかる.図中の色の違いは動径方向の粒 子速度を示している.Jetが衝突速度よりも速く放出されている(オンライン版では赤色). VIMoDは軸の値を描画してくれなかったり、複数のバグがあったりと不便なところも多 いのだが,計算結果を直感的にいじって観察できるところがiSALE plotよりも優れている.



図6: "Mesoscale"計算例. コンドリュール様の球粒とマトリックス様の組織をランダムに配置し、バルク空隙率を50%とした.計算領域上部からはドライバプレートが2 km/sで流入してくるように設定している.ここではドライバプレート, コンドリュール、マトリックスの全ての物質の状態方程式に石英のANEOSを用いた.3種類の物質に同一のEOSを用 いているにも関わらず著しい温度の不均質が生じていることがわかる.(b)の図中の黒線は物質境界線である.

レータが浅くなっているが、動径方向はあまり変化が ないようである。今後盛んに行われるようになるであ ろう中空弾丸の衝突実験と合わせて、このような計算 を行っておくと衝突型探査の結果の解釈を行う際に有 用であると思われる。なお示した計算例は球殻の厚み を10セルとしているために球殻が受ける衝撃圧分布 は正しくないのかもしれないことに注意しておく、空 間解像度を変化させた計算を行なって結果の収束性を 調べる必要がある。計算を走らせれば答えが出てくる が、計算設定が妥当かどうかには常に気を配る必要が ある。

3.3 弾丸変形の可視化

本節では衝突する弾丸の変形過程を詳細に調べるた めの計算例を示す. このような計算によって, 球弾丸 衝突時のImpact jettingの数値解析が可能になってき ている[19]. 図5はポリカーボネイト球をアルミ板に 垂直衝突させた計算のVIMoDの出力である. ここで は先行研究[19]に習って弾丸を1600×1600セルとい う高解像度格子で分割して計算し、弾丸中物質の流線 をトレーサ粒子で可視化した. 弾丸と標的の境界に沿 って弾丸が変形し、最終的にいわゆる"Impact ietting"が生成していることがわかる。衝突実験で詳 細に観察できればよいのだが、実際にはカメラの時間 分解能が足りない、弾丸の表面しか観察できない、強 烈な熱輻射(連続光のためにフィルタでカットするこ とも難しい)によって見たい領域が見えないなどの 様々な障害があって難しい. このようにiSALE計算 でトレーサ粒子をうまく配置することで流線を可視化 して、何が起きているのかを理解すると、実験結果を 解釈する際の助けとなるだろう.

3.4 不均質標的への衝突

最後にiSALEが隕石の組織分析,あるいははやぶ さ2で回収予定の試料の微細分析の解釈にも役立つこ とを示す.iSALEには"Mesoscale modeling"を簡易的 に行うことができる機能が実装されており[20],マク ロ空隙を含んだ不均質標的に一次元的に衝撃波が伝播 するような状況を計算することができる.図6に結果 の一例を示す.コンドリュールを模した大きめの球粒 と、マトリックスを模した四角い組織をランダムに配 置し、バルク空隙率が50%になるようにしてある. 計算領域の上部から一枚岩が2 km/sで衝突してくる 設定になっている.この計算例では一枚岩同士が2 km/sで衝突した場合の衝撃温度は430 K程度である が,空隙の効果で全体的にそれより高い温度に達して いる.そして1500 Kにも達する加熱を受ける領域も あることがわかる.隕石の薄片分析から母天体体の衝 突履歴を解釈する際の助けになるだろう.

4. まとめ

ここまで紹介してきたようにiSALEは非常にユー ザフレンドリな設計がなされており,初心者でも比較 的簡便に望み通りの計算を走らせ、解析を行うことが できる. またCore developers は現在でも iSALE の改 良, 整備を続けている. 近年の珪酸塩に対するレーザ ーショック実験の結果は最新のANEOSに修正を迫る ものである[21, 22]が、そういった最新の知見を取り 入れた改良も進んでいるようである[23]. iSALEでは 境界条件や空間解像度の計算設定に問題がなければ、 計算に入れている物理過程のみを反映した結果が返っ てくる. 衝突実験,惑星探査,物質分析の結果を解釈 するときだけでなく、どんな計測を行うと成果を最大 限にできるか計画を立案する際にも役立ってくれるで あろう、ご興味を持たれてiSALEを使い始めたいと いう方は「iSALE users group in Japan」にご参加頂け れば幸いである(連絡先: isale-workshop@perc.itchiba.ac.jp).

謝 辞

iSALEの 開 発 者 で あ るGareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausenの各氏とクレータのプロファイル計測を 行なって頂いた株式会社キーエンスの大木重美氏に感 謝致します.

参考文献

- Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [2] Ivanov, B. A. et al., 1997, International Journal of Impact Engineering 20, 411.

- [3] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.
- [5] http://www.isale-code.de/projects/isale/wiki/ISALE
- [6] https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/
- [7] 常昱, 2014, 遊星人 23 (本号).
- [8] Tillotson, J. H., 1962, Technical Report GA-3216, General Atomic Report.
- [9] Thompson, S. and Lauson, H., 1972, Sandia National Laboratory Report, SC-RR-71 0714:113p.
- [10] Melosh, H. J., 2007, MAPS 42, 2079.
- [11] Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, Proc. 7th International Symposium on Ballistics.
- [12] Ohnaka, M., 1995, GRL 22, 25.
- [13] Wünnemann, K. and Ivanov, B. A., 2003, P&SS 51, 831.
- [14] http://www.isale-code.de/projects/isale/wiki/Example_ problems
- [15] Pierazzo, E. et al., 2008, MAPS 43, 1917.
- [16] A'Hearn, M. F. et al., 2005, Science 310, 258.
- [17] Foing, B. H. et al., 2001, Earth, Moon, Planets 85/86, 523.
- [18] Wada, K. et al., 2014, 45th LPSC, 1768.
- [19] Johnson, B. C. et al., 2014, Icarus, in press.
- [20] Davison, T. et al., 2014, 45th LPSC, 2718.
- [21] Kurosawa, K. et al., 2012, JGR 117, E04007.
- [22] Kraus, R. G. et al., 2012, JGR 117, E09009.
- [23] Collins, G. and Melosh, H. J., 2014, 45th LPSC, 2664.

宇宙科学・探査ロードマップと惑星科学

渡邊 誠一郎¹

(要旨)本稿では、2013年9月に宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所(ISAS)から宇宙政策委員会 宇宙科学・探査部会に報告され、同部会で了承され親委員会に報告された「宇宙科学・探査ロードマップ」 [1](以下,RM2013と略称する)について解説し、特にその中での惑星科学・探査に関わる部分について、そ の後の動きを含めて紹介したい。著者は、ISASの宇宙理学委員会・工学委員会²の下に設けられたタスクフ ォース(TF)の一員として、その作成に関与した。このTFは同年6月12日開催の第39回理学委員会および7 月5日の第37回工学委員会において設置が承認され、9月4日の第38回工学委員会および9月9日の第40回 理学委員会に答申を報告したということで、実質、夏休みの1ヶ月ちょっとという短期間での検討となった。 そのため、ボトムアップによる合意形成ではなく、TFメンバーの見識(?)とISAS執行部の意向が強く反映 されるものとなっている。以下では、RM2013の記述に従って³その内容について整理し、その背景および 惑星科学・探査に関わるその後について簡単に補足したい。

1. ロードマップ作成の背景

日本の宇宙科学の大型研究は、大学共同利用による コミュニティからの提案に基づいてプロジェクトを実 行する方法(ボトムアップ方式)で機能してきた.しか し、2013年夏の時点では、惑星分光観測衛星SPRINT-A(9月の打上げ後は「ひさき」)、小惑星探査機「はや ぶさ2」、ジオスペース探査衛星ERG、X線天文衛星 ASTRO-H、国際水星探査計画BepiColomboが開発中 である一方、その先のミッションの提案募集は発出さ れていない状況が続いていた.

その背景には、2009年からの電波天文衛星 ASTRO-Gプロジェクトの中断(2011年11月に正式に中止決 定)や2010年12月の金星探査機「あかつき」の金星周 回軌道投入失敗などに伴う ISASを取り巻く厳しい状 況のもとでの2011年3月に発生した東日本大震災によ る予算縮減の圧力、2012年7月に宇宙開発利用に関す る政策を審議する場が文部科学省の宇宙開発委員会か ら内閣府の宇宙政策委員会に移されたことなどに加え 2013年1月,宇宙開発戦略本部が決定した新たな宇 宙基本計画⁴において,「宇宙科学等のフロンティア」 は3つの重点課題の1つとして位置づけられた.また 宇宙科学・探査の推進については,「一定規模の資金 を確保し,世界最先端の成果を目指す」と謳われ,「一 定規模の資金確保に当たっては,科学の発展や衛星開 発のスケジュールに柔軟な対応が必要である」とされ ている.問題は,今後の日本の宇宙科学の推進戦略と 国家財政の逼迫状況に照らして,この「一定規模の資 金」をどの程度の額に設定すべきなのかということで ある.ISAS(および宇宙科学コミュニティ)に対して

て、プロジェクトの大型化・先端化・リスク軽減強化 に伴う開発経費増があると考えられる.次期有力候補 と目されていた赤外線天文衛星SPICAは、中型計画 の250億円規模をはるかに超える予算が必要と見込ま れたため、そのスタートがなかなか決まらずにいた.

^{2.} 宇宙科学 = 宇宙理学 + 宇宙工学というISAS流の定義で記載 する. 宇宙探査の位置づけについては意見が分かれる.

^{3.} 煩雑になるので, RM2013[1]からの引用はいちいちマークはつけていないが,多くを引用している.

^{1.} 名古屋大学大学院環境学研究科

seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp

^{4.} 宇宙基本法の制定から宇宙科学基本計画の立案の過程、およびその内容に関しては[2]を参照いただきたい。

は、この議論の前提となる、従来からの実績・成果に 立脚し、かつ現在進行している研究・プロジェクト提 案活動などに基づいた、中長期的な計画を戦略的に策 定することが求められた.

このためISASでは、宇宙科学・探査の今後の計画 を俯瞰し、戦略性を持って今後の計画を策定するため、 宇宙科学研究所理工学委員会のもとにTFを設置し、 RM2013を策定することとなった。

2. ロードマップ作成の基本となる 考え方

宇宙科学は、スペース(宇宙空間)でのその場観察・ 探査,および宇宙観測により,地球・太陽系の起源, 宇宙の物質・空間の起源,宇宙生命の可能性探求に新 たな地平を築く人類の知的資産創出を狙い,同時に探 査機・輸送システム等の宇宙工学技術をパラダイムシ フト的に革新することをめざして先導するものである とRM2013では位置づけている.その成果は人類の活 動領域の拡大など宇宙開発全体にも資するものである. ISASは、これまでの日本の宇宙科学の実績と特徴を 生かし、強い意志を持った戦略的実行と、ボトムアッ プによる競争的環境の健全な維持発展の両立を図り, 理工学コミュニティと一体で以下の課題に取り組むと している.

- A. 宇宙・物質・空間は何故できたのかの解明
- B. 太陽系と生命はどの様に生まれて来たかの解明
- C. 探査機,輸送システム等の宇宙工学技術の先導・ 革新

限られた予算の中で、これらを実現するために、(a) 宇宙科学の目的と必要とされるリソースを厳しく見極 め、ミッション規模を適切に設定し、(b)国際協調と 相互補完により効率的なミッション計画を立案し、

(c) イプシロンの高度化などの日本の基幹ロケット開発と密接に連携して、低コスト・高頻度な宇宙科学ミッションを実現し、(d)世界を先導することを期待される分野においてはフラッグシップ的ミッションを戦略的に進め、(e)海外プロジェクトへの参加などの多様な飛翔機会の活用など、限られたリソースで成果創出の最大化を図るとしている。

RM2013では、具体的な進め方としては以下を提案 している。

1) イプシロンロケット高度化等を活用した低コスト・

高頻度な宇宙科学ミッションを実現するべく,衛 星探査機の小型化・高度化などの工学研究課題に 取り組む.惑星探査,輸送系,深宇宙航行システ ムの研究成果をプロジェクト化する.

- 2)太陽系探査科学分野は、最初の約10年を機動性の 高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲 得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以 降の大型ミッションによる本格探査に備える。
- 3)天文学・宇宙物理学分野は、フラッグシップ的中型、 機動的に実施する小型および海外大型ミッション への参加など多様な機会を駆使して実行する。
- 4)成果創出、人材育成、求心力維持などの観点から、 (a)イプシロンで打上げる小型ミッションを2年に 1度程度の頻度で実行し、(b)ASTRO-Hを含め、 今後10年間に3機程度の戦略的フラッグシップ的 中型ミッションを実現し、(c)多様な機会を活用 した小規模ミッションを高頻度かつ継続的に推進 する。
- 5) 関連コミュニティや関連大学等との連携を高め, 効率的効果的な推進体制構築を更に進める.

今後の宇宙科学・探査プロジェ クトの推進方策

RM2013では、宇宙科学における各分野の今後のプロジェクト実行の戦略に基づき、厳しいリソース制約の中、従来めざしてきた大型化の実現よりも、中型以下の規模をメインストリームとして優先し、中型(H-IIロケットクラスで打上げを想定)、小型(イプシロンで打上げを想定)、および多様な小規模プロジェクトの3クラスのカテゴリーに分けて実施するものとしている.

ここで中型プロジェクトとは打上げ費用を含め300 億円程度の経費で行い,世界第一級の成果創出をめざ し,各分野のフラッグシップ的なミッションを日本が リーダとなりつつ,多様な形態の国際協力を前提に, 戦略的に実施するものとされている.小型プロジェク トとは,打上げ費用を含めて100-150億円規模の経費 で行い,高頻度な成果創出を目指し,公募型で実施す るものとされ,地球周回および深宇宙ミッションを機 動的かつ挑戦的に実施していくとともに,現行小型衛 星計画から得られた経験等を活かし,衛星・探査機の 高度化による軽量高機能化に取り組むと謳われている. 小規模プロジェクトとは、年間10億円以下の経費で 行い、海外ミッションへのジュニアパートナとしての 参加、海外も含めた衛星・小型ロケット・気球など飛 翔機会への参加、小型飛翔機会の創出、ISSを利用し た科学研究など多様な機会を最大に活用し成果創出を 最大化するものとされている。

新たに定義されたこれらのカテゴリー毎のミッションの実施頻度に関しては、戦略的中型プロジェクトは10年間に3回程度、公募による小型プロジェクトは2年に1回程度、多様な小規模プロジェクト群は年間経費枠の範囲で推進することが提案されている。

RM2013では、こうした推進方策のもとでの宇宙科 学・探査の実効に必要な「一定規模の資金」を見積も っている.この資金の対象としては、学術研究を目的 とした宇宙科学・探査に関する活動とし、基幹ロケッ トの開発や追跡管制の施設設備整備費用などの経費は 含まないものとされる.必要経費を試算すると、中型 プロジェクトが85億円/年、小型プロジェクトが60 億円/年、小規模プロジェクトが10億円/年、学術 研究・実験等や軌道上衛星の運用、施設維持に関して 75億円/年となり、「一定規模の資金」としては、約 230億円/年の予算が必要となる.もちろん、衛星開 発スケジュールなどによって、各年度の予算は変動す ることに留意が必要である.

ただし,数年平均で「一定規模の資金」に収まらな い場合(世界をリードする大型プロジェクトの実施な ど),学術の動機以外の要素を含め,文部科学省およ び宇宙政策委員会において政策的な評価を受け,承認 を得られれば,「一定規模の資金」の外枠として推進 する可能性を留保している.

4. 天文学・宇宙物理学分野の将来 構想

RM2013には、天文学・宇宙物理学分野全体を俯瞰 する将来ビジョンとして、

- (a) 宇宙の本質的理解に関わる課題 宇宙の誕生と進化の過程(インフレーション,宇 宙膨張の加速),バリオン宇宙の多様性(元素合成, 行方不明バリオン),宇宙における生命の探査(太 陽系外惑星)など.
- (b)物理学の根幹に関わる課題 素粒子論と物質の根源(暗黒物質,反物質,中性

子星), 一般相対論の検証(暗黒エネルギー, ブラ ックホール,重力波),進化と構造形成の物理学(プ ラズマ過程, 天体形成,粒子加速)など.

が掲げられている.そして今後20年程度を通して,

日本が採るべき戦略を、以下のように列挙している.

- (1) 広範な国際協力の下,国際的優位性をもつ分野を さらに発展させると同時に、インパクトのある新 分野を育成し、有望な萌芽的課題を世界に先駆け 開拓する。
- (2) H-IIロケットによる中型ミッション、イプシロンロケット等を用いた小型ミッション、相乗り機会や海外計画への参加による小規模計画を、柔軟かつ適正に組み合わせる。
- (3) 中型ミッションは、研究コミュニティ(学会・学 術会議等)、宇宙理工学委員会、およびISASで の審議や検討を通じ、段階的かつ戦略的に選定す る.
- (4)宇宙工学や国内先端産業と協力して独創的な技術 を開発し、日本の宇宙活動に貢献する.関連大学 や近隣分野と、人的な連携交流を一段と強化する. 今後5年程度の目標は、ASTRO-HとSPICAが掲げ られ、20年先を視野に入れた目標としては、原始重 力波の痕跡である宇宙マイクロ波背景放射の偏光Bmode観測や、スペースでの原始重力波の直接検出を めざす国際大型計画への参加、近赤外線域での遠方超 新星および地球型系外惑星のサーベイ、初源巨大ブラ ックホールや銀河団形成期を探査する国際大型X線 天文台計画への参加、広視野X線分光による「行方不 明」バリオンの探索などが例示されている。

5. 宇宙工学分野の将来構想

RM2013では、様々な飛翔機会を活用して宇宙工学 研究を創造的・実証的に遂行し、宇宙へのアクセス(よ り自在に)と宇宙でのモビリティ(より遠くへ)を確保 するとともに、より多面的かつ高度な科学観測や探査 活動を実現することにより、宇宙開発利用全体への貢 献や人類的課題の解決への先駆けとなることをめざす としている、そして、将来ビジョンとしては、

(a) 宇宙航行・輸送系の課題

イプシロンロケット高度化につながる固体ロケッ トシステム・推進技術研究により,低コスト/高 信頼化と運用性や製造性の向上を実現する.また, 深宇宙航行を革新するためのシステム・推進技術・ 大気圏内高速飛行/再突入研究を推進する.さら に,再使用技術,新たな推進システムなどにより, 低コストで高頻度な将来型輸送システムを実現す る.

(b) 探査機・衛星系の課題

月惑星表面探査技術として,自律運用(ロボティ クス)・着陸・表面移動・越夜等の技術研究を推 進し新たなミッションを創出する.衛星探査機ア ーキテクチャの革新,超小型化・軽量化,深宇宙 航行の通信・航法・誘導・制御技術,非化学推進, ソーラセイル,宇宙空間におけるエネルギー発生・ 伝送技術などの革新を図り,より高度かつ自在な ミッション創出を図る.

を掲げている.今後20年程度を見通して,日本が採 るべき戦略としては,地上から地球周回軌道までの将 来宇宙輸送と地球重力圏外へのモビリティ(太陽系探 査)のための宇宙飛翔体における工学的課題に集中す るとしている.

今後5年程度の計画としては、打上げ頻度の最大化 のため、ミッションの小型化・高度化(自律化・知能化) と連動し、低コスト・機動的なミッション創出と、太 陽系探査科学のミッション実行可能性を拡大するとと もに、イプシロン高度化を含む将来輸送システム構築 への貢献、および小型飛翔体による観測実験機会の革 新のため、再使用観測ロケット計画を推進するとして いる.さらに20年先を視野に入れた目標としては、 ロケット推進、輸送システム、軌道間の輸送、深宇宙 航行の推進技術などを革新するための実証的研究を、 飛翔実験機会を活用して推進し、宇宙科学のみならず 日本の宇宙開発利用に貢献するとしている.

6. 太陽系探査科学分野の将来構想

RM2013には、太陽系探査科学分野を俯瞰する将来 ビジョンとして、

a)太陽物理学

太陽活動の起源を理解するとともに、太陽のプラ ズマ現象を理解し、磁場の起源と変動に迫る.そ こから、宇宙天気予報を実現し、人類の宇宙進出 を支え、地球環境への長期影響を解明する.

- b) 宇宙空間物理学(磁気圏プラズマ物理,惑星大気科 学) 太陽活動により変動する太陽圏・惑星圏環境を理 解し,惑星大気プラズマのダイナミクスと進化を 解明する。
- c)惑星科学(固体惑星,始原天体) 太陽系形成過程を物証に基づいて明らかにすると ともに、太陽系における生命起源物質の進化過程 を探る。

と謳われている.さらに、今後20年程度を見通して、 日本が採るべき戦略は以下であるとされている.

- (1) イプシロンロケットの高度化等により、小型太陽 系探査を高頻度で実施し、日本独自の技術や観測 機器の実証を系統的に行える枠組みを構築する。
- (2)先進分野を国際共同の枠組みで実施しつつ、今後の発展が必要な分野を分野間連携・理工連携により強化する。
- (3) 国際的な優位性を持つ太陽物理・磁気圏プラズマ 分野は、世界の動向を踏まえた国際協力をさらに 積極的に推進する。
- (4) 始原天体探査は、はやぶさ・はやぶさ2の実績を 発展させ国際的な優位性を確立する.
- (5)惑星周回探査や重力天体着陸探査については、小型探査により日本独自の技術を育成した上で、欧米とは差別化された本格的探査を立案・実施する。 今後5年程度の目標は、あかつき、ひさき、はやぶ

さ2, ERG, BepiColomboの遂行と,小型惑星探査ミ ッションの計画立案が掲げられている.さらに20年 先を視野に入れた目標としては,太陽活動・プラズマ 現象の総合的な理解のための超高解像度撮像・紫外線 分光観測,編隊宇宙機によるプラズマ・ダイナミクス のマルチ・スケール観測(国際協力),木星・氷衛星総 合探査計画(JUICE,国際協力),惑星表面探査機(月, 火星あるいは金星など),小天体往復探査機(地球接近 小惑星,彗星,トロヤ群小惑星など)が例示されている.

7. 惑星科学・探査に関わるその後

さて, RM2013に記述されたイプシロンロケットの 高度化により,小型太陽系探査を高頻度に行っていく ことは可能であろうか.日本惑星科学会では2013年 夏に将来計画委員会の下に小型惑星探査計画ワーキン
ググループが作られ,5回にわたる検討を行った[3]. その後,RM2013の発表を受けて,11月には第6回小 型探査計画WGが開催され,惑星科学会秋季講演会時 の総会で荒川将来計画委員会委員長から報告があった. さらに2014年1月22日に神戸大学惑星科学研究セン ターにおいて「イプシロンロケットによる小型惑星探 査」のシンポジウムが開催された[3].小型惑星探査計 画WGの活動は継続中なので,その詳しい内容をここ では述べず,いずれ『遊・星・人』に報告をしていた だくのが妥当だろう。

ここでは、RM2013に示された太陽系探査の方向性 に対して、われわれが考えておかなければいけないこ とを最後に述べたい。現状のイプシロンロケットの打 上げ能力は惑星探査ミッションの実行には不足してい る. イプシロンロケット最終形態について、どの程度 の増強をめざすのか、それをどんなスケジュールで進 めるのかは今のところ不確定である。太陽系探査の側 から、具体的なミッション案を想定して、打上げ能力 に対する具体的な要望を強く出していくことが必要で あろう.太陽系の一定の領域(月,火星,金星,地球 接近小惑星など)を守備範囲とし、10年後の太陽系探 査につながるような挑戦的で若手がのめり込めるよう なミッション案を打ち出したい。ただ、増強されると 言ってもイプシロンロケットの打上げ能力は限られて おり、探査機側の小型化・軽量化・高度化を追求する ことが不可欠である.理学側からもバスシステムに踏 み込んで、試作・実験に基づいた技術検討を進められ る人が出ることが強く求められている。つまり、真の 意味での理工連携ミッションを創り上げていくことが, 今後の惑星探査の目標となろう.

参考文献

- [1] 宇宙科学研究所, 2013, 第7回宇宙科学・探査部会 資料1, http://www8.cao.go.jp/space/comittee/kagaku-dai7/ siryou1.pdf
 [2] 秋山演亮, 2012, 遊・星・人 22(2), 102.
- [2] 扒田衡光, 2012, 避千星千八 22(2), 102.
- [3] 日本惑星科学会HP将来計画委員会小型惑星探查 計画WG Wiki,

https://www.wakusei.jp/~shourai/wiki/epsilon/

惑星探査データの保存と公開 ~ PDS4の紹介~

山本 幸生

1. はじめに

室内実験と比較して,惑星探査による「その場観測」 は金銭的コストが高く,その結果データを得る機会は 制限され,同種のデータを取得することが容易でない. 科学における客観性と再現性という意味において,こ の容易に取得することのできないデータを第三者が利 用できるように整備することは,惑星探査の科学的価 値を維持する上でも重要な作業であると言える.

こと惑星探査においては、データを保存するための 仕組みとして、NASAが開発しているPlanetary Data System(PDS)と呼ばれるシステムが事実上の標準(de facto standard)として利用されている[1]. De factoと して採用されている理由は単純で、NASAが最も多 くの惑星探査機を打ち上げ、最も多くの惑星探査デー タをアーカイブしているからに他ならない.本稿では 惑星探査データの特徴に触れながら、このPDSの最 新状況について紹介する.

2. 惑星探査データの特徴とPDS Nodes

ー重に惑星探査データと言っても単純ではない.惑 星探査機には様々な学術分野の観測機器が搭載されて おり,各々の学術分野には歴史ある「しきたり」が存 在する.研究者にとって「しきたり」に従った方法で データがアーカイブされていることは,データを扱っ た研究を始める上での敷居を下げることになる.PDS では分野横断的なデータアーカイブを実現するために, PDS Nodesと呼ばれる学術分野や技術分野のまとま りを切り口とした拠点を設け,そこからデータのアー カイブとサービスを提供している.

3. PDSの意味

PDSという言葉は場面によって異なる意味で使用 される.「PDSに問い合わせる」という使い方は, NASAの一部門としてのPDS部門やPDS Nodesの 個々のノードを意味している.また「PDSからデータ を公開する」では、PDS部門やPDS Nodesが個々に管 理しているウェブサイトのことを意味する.本稿で紹 介する「PDSでデータをアーカイブする」という文脈 におけるPDSの使い方は、「データアーカイブの技術 的な仕組み」のことを指すが、難解なことに、この表 現はしばしば混乱の元となる.それは「何をどこまで 行ったらPDSでデータをアーカイブしたことになる のか」という点を明確に示していないため、受取手に よっては異なった対応を想像するからである.

4. PDSの対応レベル

曖昧さを減らすために、PDSの対応レベルとして4 段階を定義する。

- PDSに従ったフォーマット・ディレクトリ構造 でファイル群を保存する
- (2) PDSが求めるドキュメント整備を行う
- (3) PDSのピアレビュー(査読)に合格する
- (4) PDSのウェブサイトからデータを公開する

(1)と(2)は技術的・人的リソースを含んだコストの問題であり、(3)と(4)宇宙機関をまたぐ政治的な問題と言える. ESAでは(1)と(2)のみ対応したPlanetary Sciecne Archive(PSA)を開発し、ピアレビューやデータの公開は独自に行っている. JAXAも基本ESA

^{1.} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

yukio@planeta.sci.isas.jaxa.jp

と同じ方針としているが、プロジェクトによっては PDSからデータを公開することもある.

5. PDSウェブサイトから公開するこ との課題

技術的な話に入る前に、ここでPDSのウェブサイ トから公開することの課題を述べておく、PDSのウ ェブサイトには、世界中の惑星探査データをアクセス する人が集まるため、データを本当に利用してもらい たいと望むのであれば、PDSのウェブサイトからデ ータを公開する意義は大きい、ではなぜJAXAは PDSからデータを公開することを躊躇するのか、そ れは主導権と知的財産権に関係しており、そのことに ついてJAXA内で十分な議論がなされていないため である.

PDSのウェブサイトからデータを公開するために は、論文と同様に「ピア・レビュー」と呼ばれる査読 プロセスを通さなければならない.このことはすなわ ち、日本のデータで日本が公開したいと希望するのに、 PDSに投稿しPDSのウェブサイトから公開する以上、 査読結果によってはリジェクトされ、データの主導権 がNASAに握られてしまう可能性がある.

またPDSのウェブサイトからデータを公開すると、 特殊な場合を除き、それらのデータはパブリックドメ イン扱いにされてしまう、パブリックドメインとは、 知的財産権がないことを意味しており、商用利用や改 変に関する権利を放棄することになるため、今のとこ ろJAXAの方針と相容れるものではない.

6. PDS4概要

PDSの開発は1990年のPDS1からスタートした.現 在は2010年に公開され今もなお開発の続いている PDS4が最新版である.PDS4はIT分野の発展を十分 に取り入れた設計が行われている.メタデータ記法, データ型の再定義,用語の再整理が行われ,これまで のPDS3とは大きく変わっている.

PDS3は、敢えて言うならば、天文分野で良く使わ れるFITS形式[2]に似通っている. 観測年月日や観測 領域などのメタ情報部分は、FITSヘッダーの代わり にPDSラベルと呼ばれるテキストファイルを利用し、 そこにObject Description Language(ODL)という独 自の記述形式を用いる。特にPDSラベルとデータ部 分を1つのファイルに合わせ込むDetached形式は、 他のファイルフォーマットを強く意識していることが 感じられる。

PDS4では、メタ情報部分はXMLという汎用な記述方式に置き換わり、設計にはXMLスキーマ(拡張子. xsd)を利用し、スキマトロン(拡張子.sch)を使って検証ルールを作成する方式へと変更された.この一般的な技術の導入により、周辺システムとの親和性が向上し、また関連技術を有する技術者の調達が容易となった.しかしながら、惑星科学を主たる専門とする研究者が、PDS4に準拠したデータアーカイブを自力で行うのは、もはや非現実的な段階へと差し掛かった可能性がある.

PDS4のデータ部分は、4つの基本的なクラスへと 再整理された. 配列型(Array), テーブル型(Table_ Base), 構文解析可能なバイト列(Parsable_Byte_ Stream), 符号化バイト列(Encoded_Byte_Stream)で ある. この再整理により, 既存フォーマットとの対応 がより明確になった. 例えばシンプルなFITSフォー マット(Binary Table Extensionを利用していない FITS)の画像データはPDS4のArrayと互換性がある. 固定長のASCIIで書かれたテーブルはTable_Baseと して, HTML, XML, CSVなどはParsable_Byte_ Stream, JPEG, PNG, PDFはEncoded_Byte_ Streamといった具合である.

したがって既存のフォーマットを流用すれば、デー タ部分の準備は、比較的少ない手間でPDS4に対応す ることが可能である.しかしながら、PDS4のデータ 部分はEncoded_Byte_Streamを用いるべきでないと いうポリシーがある[4].これはJPEGやPNGによる データの公開はPDSとして認めないことを案に表明 しているが、その一方で同様に複雑なデータ構造を持 つCommon Data Format(CDF)も除外されてしまう など、課題点は残っている.

7. PDS4によるアーカイブ例

PDS4には論理的な概念としてBundle-Collection-Productの層構造がある.これはファイルシステムを 考えると比較的容易に理解可能である[3]. Bundleは トップディレクトリ, Collectionはその下に作られる



図1: PDS4のディレクトリ構造例. 黒字(太字)は観測機器チームで用意. 赤字はPDS4のウェブサイトからダウンロードするファイル.

ディレクトリ(browse, context, data, document, xml_ schema, etc.), またProductは各種Collectionディレ クトリに含まれるファイルに相当する.

図1に「はやぶさ2」のカメラ(ONC)を想定した PDS4のディレクトリ構造例を示す.この例では HAY2_ONCと言うBundle名称に, context, data, document, xml_schemaの各Collectionが用意されて いる.プロジェクト用意すべきファイル,観測機器チ ームが用意すべきファイルが黒字で示されている.こ の例における実際のデータ本体は,FITS形式のabc. fitと,そのメタ情報を含むabc.xmlである.データ本 体以外の部分で用意すべきファイルが多いことが分か る.これこそがPDS4でデータを整備することの、す なわち長期的なアーカイブをめざした場合に必要な手 間なのである.

8. おわりに

NASAは2011年11月以降打ち上げの全ミッション に対してPDS4を適用することを決めた.また惑星探 査データの標準化に対して意見の言える国際惑星デー タ連合(International Planetary Data Alliance; IPDA) [4]は、PDS4を惑星探査データアーカイブの標準とし て推奨した.このことは即ち、PDS3に関するNASA のサポートは絶望的であり、一方でPDS4を使用する のであれば全面的な協力が得られる状況にある.日本 は継続中のミッション(あかつき)ではPDS3を採用し、 今後打ち上げられるミッション(はやぶさ2、 BepiColombo)についてはPDS4を採用する予定であ る.そのため一刻も早くPDS4を構築する体制を作ら なければならない.

参考文献

- [1] The Planetary Data System, http://pds.nasa.gov/.
- [2] Wells, D.C. et al., 1981, Astron. Astrophys. Suppl. 44, 363-370.
- [3] PDS4 Concepts Version 1.0.0, http://pds.nasa.gov/ pds4/doc/concepts/Concepts_130507_v1.pdf.
- [4] Data Provider's Handbook, http://pds.nasa.gov/pds4/ doc/dph/current/PDS4_DataProvidersHandbook_ 20130507.pdf.
- [5] International Planetary Data Alliance, http:// planetarydata.org.

水谷先生と語る太陽系探査

水谷 仁¹, 山本 哲生², 林 祥介³, 倉本 圭⁴, 小久保 英一郎⁵, はしもと じょーじ⁶

(要旨) 2013年9月17日から20日まで,北海道ニセコ町で惑星科学フロンティアセミナー2013(主催・惑星 科学フロンティアセミナー実行委員会)が開催されました.この中で,講師に迎えた独立行政法人宇宙航空 研究開発機構(JAXA)の宇宙科学研究所(ISAS)名誉教授で科学雑誌Newton編集長の水谷仁氏を囲んで, ISAS在任中の思い出を語り合う座談会が企画されました.月探査機LUNAR-A計画の狙いに始まり,宇宙 科学研究をどのように展開すればよいのか研究手法にも話題が及び,さらには惑星科学コミュニティーが中 心となって次なる惑星科学の研究テーマをどう見出すべきなのかといった内容が話し合われました.以下, 座談会で行われた主なやり取りを紹介します.(敬称略)

■「やりたいことはLUNAR-A」

小久保英一郎(国立天文台教授) 月のことですが,自 分がやり残したと思っていること,これからやりたい と思う科学に関して,何か考えていることがあれば聞 かせていただけますか.

水谷仁(宇宙科学研究所名誉教授) やりたいことは LUNAR-A.内部構造が分からないと月の起源は分か らない.例えば,親鉄性元素の存在度が分かるだけで, かなり違ってくる.だから内部構造を,コアがどれく らいあるのかということが,きちんと分かれば,月起 源の話にも結びつくし,面白い.これは誰も知らない し,いまあるデータだけでは,ほとんど結論がつかな い.LUNAR-Aができなかったのは残念だね.

小久保 計画自体はロシアのものとかいろいろあると 思いますが.月の起源といえば、よく月周回衛星「か ぐや」(SELENE)のことを聞かれます.

水谷 SELENEで月の進化ぐらいは分かる.何億年 ぐらい前に,この地域ができて,クレーターがどれく

- 1. 株式会社ニュートンプレス/宇宙科学研究所名誉教授
- 2. 神戸大学惑星科学研究センター
- 3. 神戸大学大学院理学研究科
- 4. 北海道大学大学院理学院
- 5. 国立天文台
- 6. 岡山大学大学院自然科学研究科

らいの頻度でできて、ということは分かります.月の 起源はLUNAR-Aの問題であって、SELENEは月の 起源をだすものではない.

小久保 何ができたらよいかと考えたときに、やはり 僕はLUNAR-Aがよいと思う訳です. 直接、刺して、 地震とか熱量をみないとダメなのですよ. それこそが 質的に新しいことで、それじゃないと月の起源につい ては新しいことを知ることは難しい.

水谷 そう言い続けてきたけど,残念ながらできなかった.いまさら申し訳ないのだけど.

はしもとじょーじ(岡山大学准教授) いやぁ, LUNAR-Aは打ったらいいと思うのですよね.

山本哲生(神戸大学教授) お気軽に言っている. 水谷 お気軽にはできないのだ.残念ながら. はしもと お気軽にというか,もうできたのですよね. だったら,打たなきゃ. 山本 次だろうけど.実証試験がある.

はしもと 実証試験終わっていないのですか.

水谷 実証試験,一応,できた.

山本 スペースでのがね.

小久保 1カ所でも刺せればいいのですかね.

倉本圭(北海道大学教授) 1カ所は何とか.

小久保 あとローバーで遠くに運んでいってもう1カ 所とか. 倉本 それは無理ですね.

水谷 200 km ぐらい離れていればね. 5 km や10 km では難しいな.

小久保 ペネトレーターを落として刺すというところ が、ちょっと博打のような感じがするので、ロボット で着地して刺すというのを3つばらまくとか、そうい う方向は考えてなかったですか?

水谷 その方がはるかに難しいと思ったのだね.

小久保 そっちの方が難しいのですか.

水谷 軟着陸させることはものすごく難しい. 軟着陸 させないでやるのはペネトレーターの利点である.

はしもと それは同じ重量でやるのだったらという話 ですよね.リソース使ってロケット何本打ってもいい というのだったら,軟着陸して刺すほうが楽なんじゃ ないですか?

水谷 楽ではないと思うけど, M—Vロケットの能力 でできるかというと, たぶんできない.

はしもと M—Vロケットを10機使えばできるわけ ですよね.

林祥介(神戸大学教授) ロボットでやるよりは、ペネ トレーターに制御装置をつけて真っ直ぐ落としたほう が良いではないですか? 斜めに刺さるのでしんどか った訳ですよね.

水谷 まっすぐするのが難しい.

会場から 制御してもまっすぐにならないのです. 真空なので.

会場から せめて火星ぐらいの大気があれば.

山本 火星だったらね.

水谷 重量のことを考えなければ、ペネトレーターに ジェットをつけて姿勢制御することは不可能ではない のだけど、かえって重くなる、火星のように大気があ ればパラシュートだのいろんな方法が考えられて、姿 勢制御できる、月はとても難しいですね。

小久保月以外で,地球でも他の惑星でもいいのです けど,こんなことをやってみたいなと,いまになって 思えばいかがですか?

水谷月の次に僕らはマーキュリーをやりたかった. マーキュリーに地震計を置きたかった.

参加者一同 おお――.

倉本 それはなぜですか.

水谷 マーキュリーは理論的予想によると、コアがものすごく大きい、一様になっているのではないかとい

う気もするし,コアがあんなに大きくて,70%ぐらい だったか,なぜ,そんなに大きなコアになったのか. 林 液体核が,どれくらいあるかというのは?

会場から 液体核はあるとされています.

水谷 磁場があるからね.

林 計算によると液体核は薄っぺらいのでは?

倉本 厚さは制約できていないです. データからは.

水谷 だからね,あれは測ったら面白い.

小久保 水星にペネトレーターということですか?

水谷 そうそう.月でもできれば水星でもできるだろ うという,まあ,非常に単純な発想だよ.そういう難 しさがあることを知らなかった訳だよ.熱の問題とか 姿勢制御の問題とか始めは知らなかった.宇宙研にき て初めて,なかなか難しいなというのを知った訳だけ ども.でも,やりたいことの1つだな,水星は.

水谷 この場合は1個でもいいのだよ.まず,地震が あるかないか調べないといけないから.1個置いて,

まず地震があります,それだけでもいい.次に地震が あると分かったら3台飛ばしましょう,4台飛ばしま しょうという話になる.やはり順を追って調べる.

はしもと 順を追ってという話であれば、まず、動く かどうかを確かめましょう. だから、まず月に1発打 ったらいい.

水谷 1発打つだけでもいいのは水星だ. 月だと地震 があるということは分かっているから.

小久保 他の惑星はどうですか? 水星以外.

水谷 どんな惑星でも興味あるのだけど,第一級というと月と水星でしょう.マーキュリー.金星だって火 星だってホントは内部構造が分かっているとは言えないから,どれでもいいのだけど.

山本 水星が面白いというのはよく分かりましたけれ ど,月は現時点でも何か面白いですか?

水谷 月がどうやってできたかというと、巨大な衝突 でできたという説もあるし、まだ、そうでないという 考え方もある、コアクリション(co-accretion)みたい な話もあるし、これに決着をつけるには、やはり内部 構造ですね。

山本 内部構造の何が決着をつけるのですか.

水谷 それは親鉄性元素の存在. 重いものは地球に落 ちてきているから,小久保君のシミュレーションのよ うにできたとすると鉄の量は少ないはずだから,月の コアは小さいはずだということになる. 山本 現在は間接的な証拠で分かっているのでは?

水谷 分からない.慣性能率である程度分かるという けれど,あれはどのようにでも解釈できる.コアしか ないと考えれば,ある程度分かるけど.プラスマイナ スを考えたら,300 kmでも400 kmでもあり得る.

山本 そうですか.

水谷 慣性モーメントだけでいくと400 km ぐらいの コアがあってもおかしくない. コアが400 km もあっ たら小久保君の説は破綻するでしょう.

山本 もし問題をコアの大きさにスペシファイするの だとすると、ペネトレーター以外の方法もあり得るの ではないですか? 例えば、月の周回衛星、長い間、 回して、軌道から観測する方法とか.

水谷 慣性能率を非常に精密にとる? 多分,あまり 望みがないのです.精度を上げて観測しても,要する に慣性能率って,全体の質量分布を反映するので,ク ラスト側にちょっとモノがあるとコアの半径に影響す る.だから,多分,慣性能率だけではだめですね.

山本 重力場は?

水谷 重力場も同じことですね. 慣性能率でさえ,上 層部にハイデンシティーのレイヤーがちょっとでもあ ったりすると,簡単に変わる.上の方にちょっとデン シティーの高いものを置くと,コアの大きさを多少変 えるようなことは,いくらでもできる.

小久保 巨大衝突説の弱点の1つに,地球と月の岩石 の酸素の同位体比があまりにも同じだという問題があ ります. どう考えても地球と同じ物質としか考えられ ないと.この点に関しては,どうお考えですか.

水谷 酸素同位体比は地球と隕石だってほんのちょっ としか違わない.地球周辺であれば地球と同じような 存在比になる.明らかに変なところでできたものは酸 素の同位体比が違うと思うけれど,地球周辺でできた 隕石などの酸素同位体比は同じ値になる.地球から持 っていく必要はないのではないかな.

小久保 火星起源だったらどうですか?

水谷 火星ぐらいだったらかなり厳しいかもしれない. 小久保 近地球型小惑星の隕石もずいぶん違うようです.小惑星はもっと遠くにあったかもしれないので, 一概には言えないのですけれども.

水谷小惑星の中にはいろんなものがあるからね.酸素同位体比が非常に地球に近いものもあるし、そういうものもあるので何ともいえないけれど、それで距離

が分かるという訳ではないと思う. そもそも酸素同位 体比がなぜ違うのかということも分かっていないです から. 酸素同位体比を元に, その起源を考えるという のは難しいでしょうね.

小久保 最近の巨大衝突説の研究では、地球と月の酸 素同位体比が同じであることを説明するために、衝突 によって地球から物質を地球軌道に上げることが考え られたりしています。前もって高速スピンさせておい た原始地球にうまく原始惑星をぶつけると、地球から けっこう月の材料がバラまかれる場合がある。でも、 そこまでしないといけないのだろうかと思っているの ですけど、近場の物質といえば……。

山本 近場って、どれくらいの距離までのこと?

水谷 僕もよく分からないですけど,まあ,常識的に 考えると火星軌道よりも内側で,金星軌道よりも外側 で大丈夫ではないでしょうか.

山本 力学的にOKですか?

小久保 大丈夫ですけど,酸素同位体の研究者はあま りにもそっくりだと言っています.(笑い)

倉本 他の同位体もよくあうのです.

山本 酸素以外にも?

倉本 昔は測れなかったのだけど,最近,測れるよう になってきて,それで見てもピタッと一致している.

山本 どれくらいまで一致しているのですか?

倉本 誤差の範囲内で一致しています.

山本 火星軌道くらいだとダメだと言える?

倉本 火星隕石はけっこうずれているのです.

水谷 火星隕石は違う.

倉本 オーディナリーからすべて外れているのです. なぜか一番ピタッとあうのはエンスタタイト・コンド

ライト(Enstatite chondrites)なのです.

水谷 それは昔から地球に近いと言われている.

山本 地球ができたころにエンスタタイト・コンドラ イトが地球の軌道付近にいる理由に必然性はあります か?

倉本 それも結構, 悩ましくて, エンスタタイト・コンドライトは酸化鉄を含んでいないので地球のマントルを説明できないのですよね.

山本 地球の一部から月ができたと考えるのが,物質 科学的には素直ですか?

倉本 物質科学的には素直ですね.

小久保 巨大衝突説を説明している本には、衝突によ

って地球の破片が散らばってそれから月ができた、と よく間違いが書いてあるのです. でも最近はそれもあ ながち間違いではない、というふうになってきている 状況です.(笑い)

■「ペネトレーターは日本の独創的 な技術」

山本 ペネトレーターは日本の独創的な技術. いまま で惑星探査は、アメリカとか世界中でやられてきたけ れども、表層と大気とプラズマしかやってきていない ですよね. 惑星の大部分を占めているのは内部なのに、 内部構造に手が届いていない. ペネトレーターは、そ れをやる現時点では唯一のインスツルメント、日本の 独創的な技術だと思うので、本当は惑星コミュニティ ーの人がペネトレーターを使ったミッションをやれや れともっと言うべきだと思います.

はしもと 何をやったらいいと思いますかと聞かれて, 僕はペネトレーターと言ったのです.本当にそれは山 本さんが言うように素晴らしい技術で,問題は1回や って,動くということを見せるというのが大事だと思 うのです.

山本 現時点がそうだと思いますよ.だから,もっと それをやるべき.最初は失敗するかも分からない.そ ういうものなのだと,みんな理解した上でやるべきな のです.ペネトレーターについては実際,海外の方が 注目していて,例えばイギリスとか,いくつかプロポ ーザルがある.日本人がなぜ,特に惑星業界の人がな ぜそれを評価できないのか,非常に残念.

はしもと 問題は上がっていないからではないです か? 華々しく失敗していたら,誰も文句を言わなか ったと思うのですよ.だから上がらなかったのがいけ なかったのだと思うのですよね.1本では震源が決ま らないとか言わないで,1本でもいいから打って,う まくいっても,うまくいかなくても1本打っておけば よかったと思うのですよね.

山本 それには反対だ. そういういい加減なのはダメ だと思うよ. 長い目で見た時に非常に悪影響を及ぼす. 失敗でもいいからやってみようはダメだと思う.

はしもと 成功させるために努力するのは当然のことで、まずはやってみないと始まらないと思うのです. 山本 いきなり本番でやる必要はない.

水谷 それは地上試験で確かめられるはずだよね. そ

れを確かめようとして時間がかかったということでね. 完成して,地上試験して,ほとんど大丈夫でしょうと いう段階になれば,やるべきだと思う.そういう方向 でいまは時間がかかっているけど,そのようなミッシ ョンがこれから認められるかどうかは別の問題.

はしもと 1本打って動いたら、いいと僕は思うので す.とにかく動いたら大丈夫なのではないでしょうか. 水谷 それだと工学ミッションとして、ペネトレータ ー工学試験ミッションというようなものでやればいい けど、それは理学のミッションの目標には適わないか. LUNAR-Aの元々の目標には適わなかったと思う.だ からLUNAR-Aとは別にペネトレーター試験ミッショ ンという性格のミッションとすれば、それはそれで意 味があると思う.

林 途中で切り替えられなかったのでしょか?

水谷 切り替えられなかったのだな. なぜかというと 衛星を3機載せるようになっているから,設計を変え るようなことはものすごく大変. 後戻りするというの は,ものすごく労力とお金が必要だけれども,それが できなかったということが,悪かったかもしれない.

山本 ペネトレーターの技術開発に携わったわけでは ないので詳しくはよく分からないですけど、ある意味、 未知の環境.前もってある程度は予測できるけれども、 それでも100%は予測できないような技術だったと思 うので、結果論になるかわからないですけど、そうい う要素があるのだということを、今後、若い人が惑星 科学、惑星ミッションをやるとき、そこは是非、知っ ておいてもらいたいなと思う.つまり、本当にチャレ ンジングな技術というのは未知の要素がいっぱいある はず.はじめから分かっていたらチャレンジでも何で もない、宇宙科学ミッションとしては未知の要素を残 したようなプロジェクトとして進めていかないといけ ない.いまその余裕が全然なくなって、逆方向に向い ている気がしますけど.

水谷 LUNAR-A の試験装置がなかなかできなかった. それの代替の方法を考えて進めたので,かえって時間 がかかった.まあ,誰も考えたことのない,やったこ とのないミッションで,試験設備までも作らなければ いけないというミッションはいままでなかった.そう いう意味ではちょっと難しかった.

はしもと 話を聞くと工学ミッションにしておくべき だったのではないのかなと思うのですが. **水谷** そのころの理学委員会(宇宙科学研究所)では, これを工学ミッションにしても理学ミッションにして も結局,ペネトレーターを打つのだろうからミッショ ンとしては同じ.だから僕らは,工学ミッションと言 おうが,理学ミッションと言おうが同じですと言われ た.工学ミッションだからいい加減でいいというわけ ではなくて,結局は同じことなので,工学ミッション でも理学ミッションでもどちらでもよかったですね.

はしもと 工学ミッションならば1本でよかったわけ ですよね.1本だったら、もうちょっと楽だったとい うようなことはなかったのでしょうか.

水谷 1本成功するのと3本成功するのと, 確率が3 分の1という, そんなものではないと思う. 3分の1 の確率しかないようなものを打つわけにいかない.

はしもと 僕はそこが理解できなくて. チャレンジン グなことをしているのだから失敗する確率は必ずある と思うのですけど,失敗する可能性のあるものなんか 上げられる訳ないという意見もあって…….

山本 そんないい加減なことをやってはダメですよ.

はしもと いや, いい加減ではなくて, 一生懸命やっ ても失敗することは必ずあると思うのですよ.

水谷 壊れる確率が10分の1もあったら宇宙研のミッ ションとして認められない.

はしもと 絶対,全部のことなど分からないのだから, 思いもしなかったことで失敗して,失敗した後で,何 でこんなことに気が付かなかったんだろうということ は絶対にあると思います.

山本 だったらいいよ.

はしもと だから、失敗しなければ分からないことが あると思うのですよ.

水谷 十分,地上で試験して,これならばたぶんもう, 失敗はないなと思って打って,初めて,あ,見逃して いたところがあったなというのであれば,認められる とは思います.地上試験で5回打って1回しか成功し ないようなものだと誰も認めてくれない.5回打って 3回成功でもたぶん認めてくれない.

はしもと 5回やって3回成功で、2回の失敗の理由が 分かれば次にやるときは直すことになる訳ではないで すか.

水谷 直すことになる.だから直してから打てという ことになる.結局,同じ.直せば5分の3の成功が,5 分の4の成功になることが分かっているのであれば. 直しなさいということになる.5分の3の成功の確率 では打つなと、これは当然の判断だと思う.

はしもと いや, でもやはり僕は1回でも, データが ほんの少しでも取れたらいいと思うのですよ. 取れた らもう1回やろうという気になるじゃないですか.

山本 例えば3本打って,たまたま1本,刺さったと して,何も分からない.サイエンスではなくて工学的 にも何も分からない.たまたまそういうことになった ということは,何も分かっていないということと同じ です.次に活かせない.考えられることを100%やっ ても、失敗は起こるのだから.

はしもと チャレンジングなことをしているのだから 失敗することもあるということではないですか?

山本 やるべき試験は全部やって,全部尽くしておい て,それでも失敗がでるのだから.それがホントの失 敗で,可能性を全部,潰しておかないとダメですよ.

■「ペネトレーターの数を増やしたら」

水谷 目に見えるぐらい失敗する確率があるものは誰 も認めてくれない. やる側も,絶対,失敗しそうもあ りませんと自信持って言えないと,なかなか, ミッシ ョンをやらせてくださいとは言えない.

山本 それを乗り越える1つのやり方としては、数だ と思うのですよ.数って、どういう意味かというと、 1回のミッションで、極端なことを言うと100本のペ ネトレーターを打つことができますよという議論にな ると、議論の質が変わってくる.

谷川享行(北海道大学特任助教) 3本ではなくてね.

山本 100本でそのうちの70%成功したらどうです か? ということだったら話は違うし,それは別の議 論になる. 質的に変わる.

谷川 100本だと当たり前ではないですか. 10本だと どうですか?

山本 そのときの状況による. つまりほかのミッションとの比較による. 複雑な問題になる.

白石浩章(宇宙科学研究所助教) 10本のうち7本は月 面に均等にばらけられるのだったら.

山本 だったらいい. それだったらOKだね. サイエ ンティフィックな成果がだせるのだったら.

会場から 4本だと4本全部成功しないとすべての地 震のパスをカバーできないのですが、7本あればほぼ 全部カバーできます.

会場から リスクを含めても100%サイエンスは成功 するということですか.

会場から そうです.

山本 アイデアというか,僕が勝手に言っているだけ だけれども、ペンシル・ペネトレーターをやれればい いと思う.ペンシルまでいかなくてもいいですよ、(両 手を50 cmぐらいの幅に広げて)これくらいでも.い まよりも軽量化して小型にして、その代わりに数を増 やすようなことができると、それはいま一番やるべき だと思いますね.そうすると内部構造、地震だけでな くてもいいし、ほかにも、もっとできることがあると 思う.むしろ惑星コミュニティーで小型ペネトレータ ーを複数個、何個か、3個以上とか、というようなミ ッションが可能だとしたら、どんなサイエンスが面白 いだろうかとみなさんで考えるべきだと思う.

山本 僕の持論なのですけども,月着陸探査機 SELENE-2の他の搭載機器すべてやめてしまって,ペ ネトレーター・ミッションをやったらどうですかと言 っているのです.

小久保 いいと思います.

山本 そのときにペネトレーター1本ではだめで, 複 数個やりたいわけですね. 複数個やるときに重量の問 題がでてくるので軽量化が必要, CPS(惑星科学研究 センター)の放談会とかで, TV会議で毎週でている 話題ですけれど, そのときにいまよりも軽いペネトレ ーターを現在のペネトレーターから作るのは難しいだ ろうかと, そのときたまたま田中智(宇宙科学研究所 准教授)君がいたので聞いたら, 彼は簡単ですと言っ たのです. すごく, 嬉しいというか, 何というか. そ れを白石君どう思う?

白石 いまその開発の提案書を準備し始めています. **山本** 軽量化できたらすごくいいのですよね.

白石 そこができるかどうかのフィジビリティスタデ ィを半年ぐらいでやるという提案書です。

小久保 あり得るということですか.

白石 あり得るので、一応、検討を始めました.

小久保 おーすごい.

山本 すごいですよ. そうすると, さっきみたいな統 計的な, 確率的な議論ができる. 10本のうち7本だっ たらいいですか?という議論ができるわけですよ. そ うすると, はしもとじょーじ君が言ったような確率的 な議論ができる.

水谷 小型ペネトレーターは電池の課題がある. ペネ トレーターは自分で電気を持っていなくてはいけない からね. 太陽電池で供給するというわけにはいかない. LUNAR-Aは中に1年分の電力が入っている. それが ペネトレーターのサイズを決めているようなものだと いえる. 地震計もあるけれども, 地震計のサイズは小 さなものだから, 大部分が電池. 電池のサイズをいま の半分にできるというレベルではまだない. だから難 しいと思う. ある意味ではね.

白石 それも含めてトータルでやります.

水谷 寿命を短くするとか,いろんなことを考えて, バッテリーのサイズを小さくするとかそういうことを 考えようとしているのかな?

白石 運用で逃げるかですね.電力はほとんど通信で 使っているので,通信機会を減らせばいいので,その あたりをトータルで考えることが検討課題です.

会場から SELENE-2にペネトレーターを積めるだけ 積めるとしたら,何本ぐらい積めるのですか.

水谷 どうだろうね.

白石 たぶんオービター2機で8本ですね.

参加者一同 お――.

山本 それが僕の言っているプロポーザルです. ほか のインスツルメントをやっている人は怒るだろうけど. 白石 オービターにけっこう載せられます. 残ったオ ービターに載せられる.

■「地球人と宇宙人がいるからいい」

山本 惑星科学の人と喋っているとよく感じることが ある.いい加減なことよくやるなと思って.ミッショ ンだけではないですよ.研究に対しても.そんないい 加減な研究やっていいの?というのがある.惑星業界 一般にそうですが,宇宙人と地球人がいるというのが 僕の持論です.宇宙人と地球人のギャップはやはり大 きい.宇宙人,地球人というのはどういう意味かとい うと,オリジンの違い.大学院でどういう教育を受け てきたかという点です.惑星科学はフロンティアで, フロンティアというがバウンダリーと言った方がいい かな.両種の人種がいることで,いい業界なのです, ある意味では.面白い業界で,そこに文化摩擦が生じ ていて,科学自体を発展させるエネルギーになると思 うのですけれど、溝はなかなか埋まらない.林さんと か倉本さんとか、いろいろな人と議論した話なのだけ れど、中川(義次・神戸大学教授)さんは宇宙人、僕も 宇宙人なのですけども、林さんとか倉本さんは地球人. 考え方,発想がまず違う.水谷先生は丁度、中間人で すね、(笑い)

参加者一同 中間人?

山本 出自は地球人なのだけれども,発想が宇宙人. 発想というか考え方が.

水谷 そうかね.

山本 若い人に言ってもピントこないかもしれないけ れども、僕らの世代だと、元々、惑星科学という学問 は日本にはなくて、水谷さんとか中沢(清・東京工業 大学名誉教授)さんとかが中心になって作られたので すけど、そのときに両人種が混在した国家になった訳 ですね、それで文化摩擦が起きたときにどのように進 化するか、もちろん学会としては同じ学会の中にいる のだけど、それぞれ分かれて、仲間同士でやる、仲良 しクラブでやる、それはそれでコンファタブルだと思 う.だけど、それでは学問は発達しない、僕の持論は、 もっと喧嘩するべきで、学問的にシビアな議論をやら ないといけないのです. 僕らの世代からするとそれは 避けられているような気がする. そういう喧嘩をやり たくない、折角の平和な世界を乱したくないという意 識かな. 日常的なことでつまらん喧嘩してもしようが ないが、学問的にはもっと喧嘩するべき. それが欠け ているという気がする.すごく感じるところ.しかし, それがないと今後の惑星科学はないような気がするね。 林 話が細かいと喧嘩しにくいよね.

山本 話が細かいというかね,そこが違っていて,細かい話をするのではなく,新しいところを目指さないといけない.

水谷 それはそう.

山本 系外惑星はその1つだけども,何か細かくなっ ていっている.ここは是非,小久保さんの意見を聞き たいな.系外惑星の現状を,そういう観点から見たら どうですか?

小久保 まあ,確かにそうですね.

山本 世界中でやっていてね.

小久保世界中でやっていて、いろいろな人が入って きていて、いろいろ細分化していっているという、そ ういう時代ですね。 山本 ゴールがみんなわりと一致していて,例えば, 観測的には地球を探そうというような大きな目的,生 命とかね.考え方は同じ.僕は学問的にはちょっとま ずいと思う.別のことを考えている研究者がいないと, 次が出てこないかなと思うのですけど.

水谷 系外惑星の人の見方からすると,観測して予想 のつかないものがでてきて,そこから新しい芽がでて くるのではないかと思っているところもあると思う. 山本 観測をしている人はね.

小久保 系外惑星を見て,他者を見て自分を知る.太陽系のことを見直す機会になると思います.それがものすごく重要だろうという認識はあります.

水谷 認識はね. ただ, まだ, 跳ね返ってきていない ところがあるような気がする.

小久保 まだ十分に跳ね返ってきていない.太陽系も ホントは大事なのに,太陽系のことまで手がまわらな い.太陽系の起源もそうなのですけど.

水谷 どのように太陽系が形成されたのか,まだまだ 完成した理論ではありえないのに.

小久保 全然, 完成していないのですけど.

林 形成には跳ね返ったのでは?

小久保 まだこれからですかね. 形成の素過程で太陽 系ではこれまで考えられてこなかった大事な要素があ るとか分かってきました.

林 だけど,内側に大きい惑星が存在するというのは 観測する前から自明だったのですか?

小久保 自明ではないです. 誰もそんなことは考えて いなかった.

林 そういう意味ではフィードバックがあったわけね. 小久保 はい.

林 惑星がマイグレーションするということは,普通 は起きていることなのだということはフィードバック だったのではないの?

小久保 そこはそうですね. 惑星が動くこと自体,予 測されることなのですが,太陽系でそうしたことが起 きていないように思われるので目をつぶっていた,あ るいは,ないことにしていたということでしょうか.

林 動くこと自体, 1970年代から分かっている.

小久保 系外惑星が注目されていますが、太陽系を疎 かにしてはいけないなという気がします。小惑星帯が なぜあそこにあるのか、というのですら答えられない し、なぜ太陽系では惑星が動かなかったのかとか。 Niceモデルのように小さく作って大きく広がるとい う考え方もありますけど.もちろん、太陽系が系外惑 星の発見で、多数の惑星系の1つであるという認識に なりました.この太陽系が普通かどうか分からない、 特殊かもしれない、それはこれから観測が答えを出す という時代になっている.でも、やはり太陽系があっ て地球があって、自分たちにつながっているので、こ こは大事に理解しないといけない、もう少ししっかり 研究しないといけないのではないかと、最近、僕はよ く思っています.系外惑星で、何か不思議な系があっ て、これがこうやってできましたといわれても、いや いや、それよりも自分たちの家のことをもっと知ろう と、そのように思ったりもします.

山本 精度という面で系外惑星と太陽系の惑星探査は 違う.太陽系は非常に細かく、微に入り細に入りで、

例えば,小惑星探査機はやぶさが取ってきた粒子はミ クロンサイズで,そのギャップがすごいのですよ.ど のようにコンプロマイズすればいいですか.

小久保難しいですね.面白かったのは山本さんの宇宙人と地球人とおっしゃっていたのは、まさにそうで、僕も宇宙人、宇宙の出身なので、物理のやり方が違うところがあります.

山本 それそれ.

小久保 オーダーエスティメートして,例えば,その…….

田中秀和(北海道大学准教授) いやいや,それは非常 に一方的な言い方なので,宇宙人の方からばかり言っ ても仕方がない.宇宙人が勝手に地球人だと言っても 仕方がないような気がします.

山本 まず, 宇宙人とは何ですかというのが小久保さんの説明で, その後に林さんから地球人とは何ですか と聞きたい.

小久保 国立天文台の観山正見前台長は,東大の阿部 (豊・東京大学准教授)さんとか松井(孝典・東京大学 名誉教授)さんのことは自分たちの仲間だと思ってい たりする.宇宙人だと思っている.だけど,そう思っ ていないわけですよ,本人はたぶんきっと,自分は地 球人だと思っている.

山本 林さんの地球人の定義は何? 僕が一番感じた のは、CPS(惑星科学研究センター)とかグローバル COE(国際的に卓越した教育研究拠点を形成するため のプログラム)をやって思ったのは、その申請書を書 くときの目的,地球人は惑星科学をやる,惑星いろいろ,系外惑星含めてだと思うけれど,目的はそのような天体の研究をして地球を理解するのであると,そこに戻ってくる.それが地球人の僕の定義なのです.

林 僕, そんな風に書きました?

山本 書いてないけど、よく議論したときにそれを言 っていた. 宇宙人から見たら地球なんて宇宙全体から みたらありふれた惑星で、決して特殊ではないという 発想. 地球を理解するために惑星を研究している訳で はないのが宇宙人で、地球を理解したいという目的で やっているのが地球人. 研究目的が違うのです. 水谷 どちらかというと地球人だな. (笑い)

■「Eロケットで何を研究するか」

山本 惑星業界はどうするかといったときに,惑星探 査が大きなテーマになっている訳だけれども,一方で 大きな流れとして系外惑星がある.両方があって,も ちろん,直接には関係してはいないですよね.惑星科 学全体を発展させるときに,どのように,無理にリン クさせるというフェーズに入っていないと思うけれど, そういう視点は持っておくことが大事だと思う.

田中 宇宙人だけでやっているだけでは関連付けることはもうできない.

山本 両方必要なのです.

田中 地球人のいいところをうまく利用することが. 山本 そこが惑星科学のアドバンテージなのです、そ れを言いたい、両人種がいるところが非常にアドバン テージで、そのアドバンテージをどう活かすかという ことを、惑星業界が一番考えるべきことだと思ってい る.このような業界は他にないので、非常にユニーク. いまのところ、そのアドバンテージがあまり活かせて いない、そういう意味で、系外惑星と惑星探査がパラ レルで走っているということは、このアドバンテージ を活かす環境が熟成されつつあるのではないかと思っ ています、それをもっと積極的にプッシュできれば、 する方法があれば非常にいいと思う.

山本 研究テーマを選ぶときに,エスタブリッシュされた分野でペーパーを書くというのは,それはそれでいいことなのだけれど,海のものとも山のものとも分からない,怪しげな分野に首を突っ込んで研究するというのも1つのやり方であります.大抵,失敗するこ

日本惑星科学会誌 Vol. 23, No. 2, 2014

とも多いのですけれども、当たれば大きい.

林 iPS細胞ですね.

山本 過去の科学の歴史を全部知っている訳ではない けれど、そういうところで新しいブレークスルーが生 じてくることが多いというのは間違いない. 昔の歴史 書を読むと、失敗した人のことはでてこないで成功し た人のことしか書かれていないから分からないのだけ れど、その100倍か、1000倍か知らないですけど、失 敗例はいっぱいあるはず. そうしたことをしないと新 しいことはでてこない.

林 しかし, それは, 誰も研究していないから, 研究 するということではないのですよね.

山本 研究したい人がやるのです. そういうことを研 究する人がいることが大事.

水谷 勝手にやるのだよ.

山本 いることが大事.

林 いるの?

山本 いるのは、もちろんいるのだけど、その人をエ ンカレッジしないといけない、つまり、その人が例え ば研究費がないとしたときに、つぶれてしまう、ポス トにもいられない、普通は、つぶれるのです。

水谷 そういう意味では非常に難しい時代.

山本 そのときにそういう,ある種,目利きの人がい て,そういう人をエンカレッジする,大規模にはもち ろんできないですよ.ですけれども,次のブレークス ルーをもたらす上では大事.

林 1980年代は、アメリカから日本に人がきたとき に何て言われていたかというと、「日本はうらやまし いですねと、予算に汲々としていない」と言われた. 単に貧乏だけだったということだけれど.

山本 1980年代は宇宙科学,スペースサイエンスで 言うと日本の黄金時代ですよ.それはNASA(米航空 宇宙局)でも羨ましがられていた.あの当時,アメリ カは何をやっていたかというとボイジャー1号,2号 を打ち上げるなど大艦巨砲主義で,日本は1986年に, M-Vロケットで打ち上げた探査機さきがけとすいせ いで,初めてハレー彗星を探査した.これが最初の日 本の惑星探査ミッションです.その当時,ほかにX線 とかやっていたのですよね、1980年代中ごろ,惑星 科学,宇宙研に水谷先生がこられて,ほとんど同時に 奥田(治之・宇宙科学研究所名誉教授)先生もこられて スペースインフラレッド・アストロノミーが始まる. あの当時はいまから思うと黄金時代です.海外からも、 そう思われていた.そのときの日本の宇宙科学が標榜 していたこと、キャッチフレーズは、アメリカの理論 物理学者フリーマン・ダイソンの言葉で言うと"Quick is Beautiful",それから"Small is Beautiful"です. "Small is Beautiful"はアメリカがやろうと思えばでき たのかもしれないが、"Quick is Beautiful"は要するに 頻度を上げる、小型でも毎年打てるとかね、そういう ものだった.今は日本もNASAのようになってきて いて10年に1発しか大型ミッションをできないように なってきているけれど、アメリカは当時、まさに大鑑 巨砲主義だった.

はしもと ボイジャーだけしか打っていなかった訳で はないですよね? ボカボカ打っていたと思いますけ どね. アメリカ人が日本を羨ましがるなんてありえな いと思いますけどね.

山本 予算が違うからですよ. ダイソンの言葉には半 分ぐらい,お世辞が入っていると思うけれど,本音も 入っていると思います.

はしもと その後, NASAのディスカバリー計画(惑 星探査計画)が始まってからはアメリカもポカポカ上 げていましたよね.

山本 あれは日本の真似.

水谷 ディスカバリー計画は完全に日本の真似.毎年 1機,必ず打ち上げるということを宇宙研はやってい た.アメリカ人から羨ましがられていたのは確か.5 年で各分野に順番が回ってくるから,要するに大学院 生が博士論文を出して1つのミッションが終わるとい う感じだから,5年周期で回ってくる.ところが予算 がないし,惑星,赤外線,電波とテーマが増え,具は 沢山あったけどパイが増えないから段々,打ち上げる 頻度が下がってきたというのが現状かな.

山本 ある意味,お金で解決する問題.

水谷 宇宙研に毎年200億円ずつ予算がつけば,定期 的に打ち上げることができたのだけれど,200億円の 予算を獲得できなくなってきた.それが宇宙研の困っ たところですね.日本の惑星科学にとっては,少なく とも1年に1機打ち上げるというのを堅持できるとい いと思うのだけれど,それができなくなってしまった のが辛い.

山本 CPS(惑星科学研究センター)の放談会などで, H-IIロケットに比べれば圧倒的に打ち上げ重量は少な いですけれど、Eロケットは比較的に安く打ち上げ頻 度を上げられるので、Eロケットで何ができるのかが 惑星科学コミュニティーに問われている大きな問題で あると最近、よく議論しています.

はしもと 無茶があると思うのです. Eロケットでで きることで,世界があっと驚くようなことをしろと言 われても. それは無理だよと思うのですけど.

山本 それは間違っているといいたい. そういうとき こそ頭を使わないといけない. 大きなミッションと違 って,限られた予算でどれだけのことをできるのか, 工夫を凝らさないといけないところです. 総合的なこ とはやったらだめですし,できないですよ. 一点突破

を狙う.要するにゲリラ作戦をやるようなものです.

果たして何をやるか. やることはいっぱいあるのだけ れど,それで何を狙うのか,それをどのように鋭くし ていくのか.そこが一番,惑星業界がいま考えるべき 問題です.カネがあって大艦巨砲主義でいくことがで きれば,それは一番,楽なことです.だけど,いま惑 星業界でやらなくてはいけないことは,限られた予算 で,限られた重量しか上げられないときに,何が一番 重要なことなのかを考え,それを具体化するところま で持っていくことです.それは、ある意味,研究その ものなのですよ.惑星科学コミュニティーが,これか らどうしていくのか真剣に考えないといけない時期に きていると思います.

エポックメイキングな隕石たち(その3): Yamato-74159 ポリミクトユークライト

山口 亮1

(要旨)連載第3回では、分化隕石のYamato-74159隕石を紹介する.この隕石はユークライトに分類され、 分化小惑星の表層近くの岩石片からなるポリミクト角礫岩である.このような隕石の構成物質の岩石学的及 び化学的特徴から、原始惑星の地殻発達史が明らかにされてきた.

1. はじめに

1969年12月に,第10次南極地域観測隊により,や まと山脈付近の裸氷体において,9個の隕石が発見さ れた.これは,第一回目の記事で紹介されたAllende 隕石の落下,そして,アポロの月着陸と同じ年である. この発見以来,南極では大量の隕石が見つかり,現在 では地球上で確認されている隕石総数の70%をしめ る.隕石は,我々が手にすることの出来る地球外物質 のほとんどをしめ,惑星や太陽系形成史の解明に大き な役割を果たしてきた.Yamato-74159隕石(Y-74159) は,第14次南極地域観測隊により,1974年に同じ地 域の裸氷帯で発見された.

Yamato-74159隕石は、玄武岩質ユークライトに分 類される隕石で、小惑星の中で3番目に大きいベスタ (直径530km)に由来すると考えられている。 Yamato-74159隕石(回収時の重量:98.2グラム)は、 ポリミクト角礫岩(複数の種類の岩石破片の混合物)で ある(図1,2).熱変成作用を受けていない玄武岩質 ユークライト岩石片を多く含むことで知られている。 このような玄武岩は、溶岩が原始惑星表面に噴出し急 冷したものだとされる[1].例えば、ハワイのキラウ エア火山から噴出する溶岩のようなものである。



図1: Yamato-74159の写真. 破断面に,角礫岩の組織がみられる. 隕石のまわりの黒い部分は,大気圏突入時にできた溶融皮 殻である.立方体の一片は,1 cmである.



図2: Yamato-74159の薄片写真、右側2/3は、に玄武岩岩石片である。白い棒状の結晶は斜長石で、それに挟まれたものが 輝石である。黒い部分は、ガラス質のメソスタシスである。 左側は、破砕し固結した部分である。玄武岩や鉱物の破片 からなる。横幅6.9 mm.

1. 国立極地研究所 yamaguch@nipr.ac.jp

2.分類

ユークライトは, HED(ホワルダイト・ユークライ ト・ダイオジェナイト)隕石と総称される分化隕石の 1つである. HED隕石は, 分化隕石の中では最大のグ ループで,現在確認されている全隕石の約6%(1430個, 2014年2月現在)をしめる.

ユークライトは、主にピジョン輝石と斜長石からな る玄武岩もしくはハンレイ岩である.副成分鉱物とし て、シリカ鉱物、イルメナイト、クロマイト、自然ニ ッケル鉄、トロイライトなどを含む.ダイオジェナイ トは、主に輝石からなる集積岩である.ホワルダイト は、主にユークライトとダイオジェナイトの機械的な 混合物である.ほとんどすべてが、衝突の影響を受け ている.

Y-74159隕石は、他にペアとされる隕石を含めて、 Y-74159タイプ・ポリミクト角礫岩(Y74159タイプ) と総称される.これまでに、7個ほど確認されている. これらの隕石は、隕石シャワーとして落下したものと 考えられる.

1970-80年代当時発見されていたユークライトの, ほとんどすべては,熱変成作用を受けたものであった. ところが,Y74159タイプの主な構成岩石片は,変成 作用を受けていない始原的な玄武岩である.その当時, 熱変成作用を受けていない玄武岩質ユークライトは珍 しく,唯一,Pasamonteというユークライトが知られ ていた.

3. HED隕石と小惑星ベスタの関係

現在では、HED隕石は、小惑星4ベスタからきた とされている.ベスタは、太陽系初期に存在した分化 原始惑星の生き残りである.未だに原始地殻を保持し ている唯一の分化原始惑星とされている.太陽系初期 には、微惑星から惑星形成の途中に、このような原始 惑星が多数存在していたと考えられる.なお、小惑星 ベスタ以外の天体に由来する、HED隕石に類似する 隕石も数個確認されている.

HED隕石がベスタから来たと言われる理由は,い くつかある.地上の望遠鏡による赤外分光観測から, ベスタ(とベスタ族)は,HED隕石と鉱物組み合わせ と鉱物組成が類似する唯一の小惑星であるといっても 良い.衝突によってベスタから放出された小惑星(ベ スタ族)は、小惑星軌道の脱出ルートである軌道共鳴 まで散らばっている.この領域にはいった小惑星は、 領域外にはじき飛ばされることが知られている.近地 球型小惑星にも、ベスタに似た小惑星が見つかってい る.さらに、地球において、他の隕石種に比べ、 HED隕石は異常と思えるほど高い個数が回収されて いる.その回収量は、分化隕石では最大であり、全隕 石種では、普通コンドライトに次ぐ数である.これら の理由から、ベスタは、地球に大量のHED隕石を供 給した(現在も供給し続けている)と考えられる.

2011年に,探査機DAWNがベスタを訪れ,詳細な 表面観測を行った[2]. その結果,ベスタの表層地質は, HED隕石から推定されるものと非常に良い一致を示 すことがわかった.DAWNの重要な成果の一つは, 南半球に巨大クレーター(Rheasilvia,直径約500 km) が見つかったことがある.この巨大クレーターから放 出された地殻の破片がベスタ族であり,最終的には, その破片が地球においてHED隕石として回収された とも言われている.この巨大クレーターの底には,マ ントル物質(カンラン岩)が見つかっておらず,これも, HED隕石に,カンラン岩が見つかっていないという ことと調和的である.

4. 成因と意義

Y74159タイプは、ベスタ表層付近の玄武岩からな る角礫岩である.この岩石片に含まれる輝石や斜長石 は、広い組成範囲にわたる化学的ゾーニングを示すが、 これは熱変成作用をほとんど受けていないことを示唆 する.これは、大部分のユークライトが、熱変成作用 を受け、輝石のMg/Feが均質な組成を示すのと対照 的である.ところで原始地殻は、溶岩流が地表に噴出 し、固化し、それが積み重なって成長していくとされ る.したがって、初期に噴出したものほど深く埋没し、 熱変成作用を受ける.逆に、後期に噴出したものは、 表層付近にとどまるため、熱変成作用を免れる. Y74159タイプのものは、このような理由で溶岩の始 源的な特徴を保持するものと考えられる.

ユークライトは,母天体全体が融解したために生じ たマグマ大洋の中で,結晶分化後の残液が地表に噴出 したものだと考えられている[2]. こうして,ほとん どの玄武岩質ユークライト(メイングループと呼ばれ る)の化学組成は、1つのマグマ(つまり、マグマ大洋) 中での結晶分化過程で説明される.しかしながら、 Y74159タイプは、主要元素組成(鉄、マグネシウムな ど)がメイングループに類似しているにもかかわらず、 微量不適合元素(チタンやサマリウムなど)の含有量が 相対的に高く、この化学的特徴は、長い間、マグマ大 洋モデルでは説明できなかった。

最近,この化学的特徴は、メイングループマグマが, 先に形成した地殻の部分融解により生じた液により, 汚染を受けたという説が提出された[3].この説では, Y74159タイプのユークライトの化学組成が,非常に 良く説明できる,また,最近見つかった残渣ユークラ イトの存在が説明できる.残渣ユークライトとは,主 要元素が玄武岩質ユークライトに類似するのに, Y74159タイプとは逆に,不適合元素が欠乏している ユークライトである.部分融解の残渣だとされる.多 くのユークライトの変成温度(~900-1000℃)は, ソリダス温度(~1050-1100℃)近傍であることに調 和的である.

そうすると, Y74159タイプに含まれる玄武岩は, 地殻形成後期に噴出したことになる. なぜならば, Y74159タイプのマグマは,既に形成していたユーク ライト地殻と反応しなければならないからである. こ れは,Y74159タイプの変成度が低い,すなわち,後 期に噴出したことに調和的である. もし,この仮説が 正しいとすると,メイングループユークライトなどに 比べ,形成年代が新しいことになる. 今後の,精密な 放射年代測定が待たれる.

最近の詳細な研究によると, Y74159タイプのユー クライトは, 溶岩から固まった後に, 二次的プロセス の影響を受けたことがわかった. 輝石の縁に, 鉄かん らん石や微量の二次的な斜長石が見つかった. Y74159タイプのユークライト限らず, 多くのHED隕 石に, 二次的なメタソマティズムの痕跡が見つかって いる. ある種の流体が関わったことが指摘されている が, その詳細なメカニズムは良くわかっていない. い ずれにせよ, Y74159タイプの隕石は小惑星ベスタの 表層付近の複雑な地質史を記録している岩石である.

謝 辞

木村眞氏, 岡崎隆司氏からはこの原稿執筆の機会を 与えて戴いた.また木村眞氏,野口高明氏,武田弘氏 には粗稿を読んで戴いた.岸山浩之氏には,隕石の写 真撮影をして頂いた.これらの方々にこの場をお借り して感謝いたします.

参考文献

- Takeda, H., 1997, Meteoritics & Planetary Science 32, 841.
- [2] McSween, H.Y. et al., 2013, Meteoritics & Planetary Science 48, 2090.
- [3] Yamaguchi, A. et al., 2009, Geochimica et Cosmochimica Acta 73, 7162.

系外惑星「遠い世界の物語」その3 ~複数惑星系KOI-94から紐解く惑星の軌道進化~

平野 照幸1

(要旨)中心星近傍を公転する巨大惑星の起源を議論する上で,惑星軌道の傾き(軌道傾斜角)は重要な情報 となる.巨大惑星を中心星近傍に移動させるプロセスは様々であるが,プロセスごとに異なる惑星の軌道傾 斜角を予言するためである.本稿では,KOI-94(Kepler-89とも呼ばれる)という複数のトランジット惑星を 持つ系に着目し,ロシター効果と呼ばれる現象を使って惑星の軌道傾斜角を制限する手法を紹介する. KOI-94に注目した過程で偶然発見した惑星同士の食についても触れ,その解析とロシター効果の観測を組 み合わせる事でKOI-94系では太陽系同様に複数の惑星がほぼ同じ面内を公転し,さらにその公転面は中心 星の自転軸にほぼ直交している事を示す.最後に,KOI-94を含む惑星系の軌道傾斜角の最新の観測から見 えて来た惑星系の進化への示唆を述べる.

1. はじめに

1.1 短周期巨大惑星の起源

太陽系外惑星が最初に見つかってからすでに20年 近くが経過し,現在ではより小さな惑星,より長周期 の惑星を見つけようというプロジェクトが精力的に進 められている.また惑星の発見そのものに加えて,見 つかった惑星をいかに特徴付けるかや,さらにその特 徴から惑星系の起源を探る議論も活発である.

最初に見つかった太陽型星周りの系外惑星であるペ ガスス座51番星を含め多くの巨大惑星は中心星近傍 を公転しており,太陽系とは全く異なる姿をしていた. これはもちろん周期の短い巨大惑星(ホットジュピタ ー,ホットネプチューンなどと呼ばれる)の方が見つ かりやすいという観測バイアスによるところが大きい が,そもそもそういった惑星系がどのようにして形成 されたのかが問題となった.一般に巨大惑星は氷など の固体材料が豊富に存在する中心星から十分離れた¹ 領域でしか形成されないと信じられており,短周期巨 大惑星を説明するには何らかの方法で惑星を内側まで

1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻 hirano@geo.titech.ac.jp 落としてくるメカニズムが必要となった.現在ではこ の惑星移動として以下のような重要なモデルが提唱さ れている.

- (a) タイプI,II惑星移動 原始惑星円盤内で形成され つつある惑星が、円盤との重力相互作用で角運動 量の交換が起き徐々に内側に移動する場合がある。 特に木星サイズの巨大惑星の場合惑星周辺のガス は惑星に降着して円盤内にギャップを作るので、 ギャップを保ったまま円盤の散逸と共に惑星が内 側に移動する(タイプII惑星移動)[2].
- (b) スリングショットモデル 複数の巨大惑星が円盤 内で形成された場合,円盤が散逸したあとも惑星 同士の重力によって惑星軌道が大きく変化する事 があり,最終的に軌道交差を経験して一部の惑星 が散乱されたり,軌道離心率が大きくなったりす る.離心率が極端に大きくなると惑星の近星点が 中心星に近づくため(~0.05AU),今度は惑星と 中心星の潮汐相互作用が働き軌道エネルギーの散 逸が起こる.このプロセスは惑星の近星点距離を ほぼ保ったまま進行するため,最終的に円軌道の 短周期惑星が形成される(スリングショットモデ ル)[3, 4].

^{1.} 太陽型星だと一般に中心星から数AU以上.



図1: ロシター効果の概念図. 左半分がλ=0°, 右半分がλ=50° の場合の視線速度変動を表す.



図2:角λの定義.

(c)古在移動 ある惑星系の近くに伴星などの大質量 天体があると、円盤が散逸した後も伴星からの永 年摂動が作用し、惑星の軌道が変化する事がある (古在効果).古在効果は特に最初の惑星軌道面と 伴星の公転面がずれている場合に起こり、惑星の 軌道離心率や軌道傾斜角を振動させる.軌道離心 率が極端に大きくなると上記(b)と同様に中心星 と惑星の潮汐力が作用し、最終的に円軌道の短周 期惑星となる[5].

上記プロセスはいずれも物理的にはもっともらしい が、数多く見つかっている短周期巨大惑星の形成にど のプロセスが支配的に関わっているのかは自明ではな い.筆者らは上で述べたような巨大惑星の起源・進化 の歴史を観測的に制限する事を目的として、以前から 惑星の軌道傾斜角に着目して来た.通常軌道傾斜角と はある基準面の法線と惑星軌道の角運動量ベクトルの 向きのなす角であるが、ここでは惑星の公転軸と中心 星の自転軸のなす角度とする.なぜ軌道傾斜角が惑星 の進化過程を調べる上で重要かと言うと、上で述べた (a)-(c)のプロセスが軌道傾斜角の分布に対して異な る予言をするためである.例えば(a)のタイプIまた はⅡ惑星移動では、基本的に惑星軌道面は保たれたま ま静かに内側に移動してくるので観測される惑星軌道 面は形成当初の円盤面を反映している可能性が高い. 一方(b)や(c)のシナリオでは惑星の散乱や古在効果 によって惑星軌道面が大きく変化する場合が多く、結 果として観測される惑星公転軸は円盤の角運動量の向 きを反映する中心星自転軸と揃っていないという事が 予想される.つまり惑星の軌道傾斜角を調べる事で惑 星の進化の歴史を紐解く事が出来るのである.

本稿では、このように惑星系の起源や進化を論じる 上で重要な情報となる惑星の軌道傾斜角の測定法につ いて具体的な観測例も交えて紹介し、これまでの観測 から見えてきた惑星系の進化への示唆を述べる.

1.2 惑星の軌道傾斜角測定

軌道傾斜角の測定にはこれまで様々な手法が考案さ れており、(1)トランジット惑星系のロシター・マク ローリン効果(以下、単にロシター効果)[6,7,8,9,10], (2)惑星による黒点前通過[11],(3)星震学[12],(4)射 影自転速度測定[13],(5)恒星面の重力減光[14],を用 いるものなどがある.ここでは以下で説明する(1)ロ シター効果について注目し、実際の観測結果と合わせ て紹介をする.

一般に恒星は自転しており,我々の視線方向に相対 的に近づく側と遠ざかる側が存在する(図1).トラン ジット惑星系ではこの恒星面の一部分が遮蔽される事 によって減光が起こるが,その際恒星の視線方向の速 度(以下単に視線速度)を測定すると恒星面上で惑星が 隠している場所に応じて見かけ上視線速度が変化する. すなわち,惑星が恒星面の近づく側の半分(図1の恒 星図の左側)を隠している時は恒星の視線速度は遠ざ かって観測され,逆に遠ざかる側(図1の恒星図の右 側)を隠している時は恒星の視線速度は見かけ上近づ いて観測される.この現象はロシター効果と呼ばれて おり,連星系やトランジット惑星系など天体同士が食 を起こす系では普遍的に見られる現象である.ロシタ ー効果の観測からは図1に示したように,恒星の自転 軸と惑星の公転軸のなす関係を調べる事が出来る.こ こでは惑星の軌道傾斜を表すパラメータとして,恒星 自転軸と惑星公転軸が天球面上でなす角度λを用い ている(図2).例えば図1の左半分のようにλ = 0°で 惑星がトランジットを起こすと、トランジット中の視 線速度の変動はトランジット中央時刻に対して点対称 な形となるが、一方で図1の右半分のようにλ = 50°でトランジットが起こると、惑星は恒星面上のほ ぼ遠ざかる側だけを隠す事になるので恒星の視線速度 の変動は大きく非対称なものとなる.この違いを利用 して惑星の軌道傾斜を表すパラメータλを調べる事 ができ、短周期巨大惑星の起源を論じる上で重要な情 報となる.

ロシター効果の観測はすでに多くのトランジット惑 星系(>70)に対して行われているが、観測結果は惑星 軌道の傾き λ が必ずしも 0° を示すわけではなく、 λ が0°から有意にずれている系が少なからず存在して いる[15] このような惑星の公転軸と恒星自転軸の向 きの不一致は、短周期巨大惑星が円盤との相互作用に よって徐々に内側に落ちて来たのではなく,惑星同士 の散乱や伴星からの摂動によって軌道面が乱され、後 に恒星との潮汐相互作用で短周期惑星となったという 見方が一般的である²(上記(b)または(c)のプロセス). 一方. $\lambda \approx 0^{\circ}$ となる系に関しては二つの考え方が存 在し、単に上記(a)のプロセスによって円盤の中を惑 星が落ちて来たというものと,短周期巨大惑星は(b) や(c)のプロセスによって形成されたが(その場合最初 は惑星の軌道面が大きく傾いていた),その後中心星 との長期間の潮汐相互作用の結果,再び惑星の軌道と 中心星の自転の角運動量の向きが揃ったというもので ある.これらをロシター効果の観測だけから厳密に区 別する事は難しく、伴星の有無や潮汐力の大きさの指 標となる惑星の質量や軌道長半径などから総合的に評 価する他ない.

K01-94系における惑星同士の食の発見とロシター効果の観測

ここではロシター効果の観測ターゲットとして KOI-94系に着目した経緯と実際に筆者らが行った観 測について述べ、その過程で明らかになった惑星同士 の食という現象についても報告する.

2.1 複数惑星系における軌道傾斜角測定

系外惑星に対するロシター効果の観測は、最初のト ランジット惑星であるHD 209458bを筆頭にこれまで 数多くの系で行われており、筆者がKOI-94系に着目 した2012年当時すでに観測から解析までがルーチン 化されている状況であった.ただしそれまでのロシタ ー効果の観測は全て、トランジット惑星が一つしか系 にない「単一トランジット惑星系」に対してのみであ った.

トランジット惑星が複数存在する惑星系に対してロ シター効果を測定する事は重要な意義を持つ、一般に、 複数の惑星が同じ恒星をトランジットするというのは それらの惑星の軌道面がよく揃っていなければ極めて 起こりにくく、複数の惑星が同じ軌道面内を公転する という事は惑星同士の散乱など、動的なプロセスを経 ていない事が示唆される。また、それら惑星が共有す る軌道面は惑星が形成された当時の原始惑星系円盤の 円盤面を反映していると考えるのが自然である.一方. 恒星の自転角運動量の向きは円盤があった当時の円盤 の角運動量の向きを反映していると考えられるため、 当然このような複数トランジット惑星系では中心星の 自転軸と複数の惑星の公転軸の向きが互いによく揃っ ている事が予想される.従ってもし仮に、ロシター効 果の観測から少なくとも一つの惑星の λ が有意に0° からずれているという証拠が得られれば、それは上記 の論法のうちの少なくとも一カ所が成り立たないとい う事を意味する. 単一トランジット惑星系に対するこ れまでのロシター効果の観測結果に対する解釈を確か める上でも、複数トランジット惑星系に対するロシタ ー効果の観測は重要であった.

そこで筆者らが着目したのが、ケプラー宇宙望遠鏡 によってトランジットが報告されたKOI-94(別名 Kepler-89)という複数惑星系である。恒星の視線速度 測定によるロシター効果の検出には惑星の半径がある 程度大きい必要があるが、KOI-94系は表1に示したよ うに0.83RJ(木星半径)の惑星KOI-94.01³を含む4つの トランジット惑星で構成されており、KOI-94.01のト ランジットによるロシター効果は検出可能という試算

^{2.} ただしまだ論争に完全な決着はついていない.

^{3.} ケプラー望遠鏡によって見つかった惑星候補は,見つかった 順にKOL??.01, ??.02,・・・といった名称が付けられる(??は系の 番号).

表1:KOI-94(Kepler-89)系の惑星

惑星名称	公転周期 (日)	惑星半径 (R_J)
KOI-94.01	22.34	0.83
94.02	10.42	0.31
94.03	54.32	0.49
94.04	3.74	0.13

となった. KOI-94系が筆者らの特に注意を引いたのは, 複数惑星系でしかも木星型惑星(KOI-94.01)を持つに もかかわらず,そのいずれの惑星も周期が100日以内 の比較的短周期惑星であったという点である.すでに 述べたように,KOI-94.01のような巨大惑星がスノー ラインよりも内側で出来たとは考えにくく,恒星から 数AUのところで形成され内側に落ちて来たという可 能性が高い.さらに複数の惑星が同じ軌道面内を公転 している事を考えると,KOI-94系は惑星散乱などに よる軌道進化ではなく,むしろ原始惑星系円盤内を 徐々に惑星移動して来たと見るのが自然であろう.ロ シター効果の観測によってもし恒星自転軸と惑星公転 軸が揃っていたら,上記のシナリオが裏付けられる事 となり,これまでの惑星進化の議論を一歩進める事が 出来る.

筆者らはこのように興味深いKOI-94系でのロシタ ー効果をすばる望遠鏡で観測するため観測提案を準備 していたが、観測可能日を計算したところなんと 2012年は8月10日(UT)以外は観測できないという事 が判明した.これはKOI-94.01の公転周期がトランジ ット惑星としては比較的長いというのと、トランジッ トの継続時間が非常に長い(6-7時間)ために一晩の うちに観測するのが困難である事に起因していた⁴. これほど特定の日付を指定するとなかなかプロポーザ ルを通してもらえない可能性もあったが、それでも一 か八かで提案する運びとなった.結果的に興味深い天 体であるというのをレフリーにも認めてもらえ、8月 10日を観測夜としてもらえる事になった.

2.2 惑星同士の食

観測夜が無事割り当てられたので,筆者らは2012 年7月下旬くらいから観測の準備を行っていた.一方 KOI-94系は惑星の軌道進化を議論する上で極めて重 要なサンプルであるため、ロシター効果の観測が決ま った後にすばる望遠鏡の高コントラスト撮像装置 "HiCIAO"を使って伴星の有無についても調べられた [17]. これに関連して、筆者らはケプラー望遠鏡の測 光データの解析を行っていたが、その際偶然二つの惑 星(KOI-94.01と94.03)が同時にトランジットを起こし ているの(ダブルトランジット)を発見した(図3).通 常のトランジットだと惑星が恒星面の一部を隠す事で "U字型"の減光が起こるが、図3のダブルトランジッ トではU字の途中でさらに別のU字型の減光が起こ っている.しかもよくよく拡大してみると、ダブルト ランジットの中心付近で逆にわずかながら増光してい る様子が見える(図3矢印で示したあたり). このよう なトランジット途中の増光は惑星が恒星面上の黒点を 通過した場合などに起こるが. KOI-94については観 測された程度の増光を起こすサイズの黒点はケプラー の測光データには見られず、増光はそれ以外の要因に よって起こった可能性が高い事が分かった. 我々は増 光が起こったタイミングと大きさから、これが惑星同 士がトランジット中に重なり合った事(惑星同士の 食)による増光であると結論付けた.このような現象 は予言こそされていたものの[16]、実際の報告例はこ れまでなかった. こうしてKOI-94系は単に巨大惑星 を持つ複数トランジット惑星系という以上に、惑星同 士の食が初めて見つかった希有な系となった.

トランジット中の惑星同士の食は単に天体現象とし て興味深いという以上に,そのライトカーブから食を 起こした二つの惑星(今回の場合KOI-94.01と94.03)の 軌道面同士のなす角度を制限する事が出来る(後述). 複数の惑星の軌道面同士のなす角は太陽系でこそよく 分かっているが,太陽系外ではほとんど分かっていな い.太陽系のように±3°程度の範囲内で惑星軌道面 が揃っているのか(あるいはずれているのか)は惑星の 形成や進化過程を議論する上で貴重な情報となる.

2.3 すばる望遠鏡での観測

さて、いよいよKOI-94.01のロシター効果をすばる 望遠鏡で観測するために、観測日前日にハワイに向か った. 観測は筆者と東大大学院生の増田賢人氏(現 D1)で参加した. 行きの飛行機の中では、ケプラー望 遠鏡の公開データで見られた惑星同士の食から情報を

^{4.2012}年8月10日を逃すと、次の観測可能日まで2年程待つ必要 があった.



図3: 2010年1月15日(UT)に起こったKOI-94系での惑星同士の食.

引き出すためにそのライトカーブのモデル化を行った のを記憶している.すばる望遠鏡のあるマウナケアの 山頂まで到達した時の天気は晴れ、観測は予定通り開 始された、ところがしばらく経ち、すばる望遠鏡のお 隣にあるケック望遠鏡(口径10 m)がすばるとほぼ同 じ方角を向いているのに気付いた。その後もずっとケ ックはすばると同じ方角をトレースし続けており、ひ ょっとしたら同じターゲットを観測しているのではな いかという不安がよぎった.気になってケック望遠鏡 のサイトから観測提案者を調べてみると8月10日の提 案者がG. W. Marcy氏⁵となっており、不安は確信に 変わった。すばるとケックではやはり望遠鏡の口径に 加えて解析のパイプラインがケックの方が充実してお り、同じロシター効果の観測でも彼らの方が精度が高 い可能性が高かったため、筆者らはすばるの観測結果 をすぐさま公表する必要が出て来た⁶.

観測は最後まで順調に進行し,観測中のクイックル ックでもまずまずのデータの質であった.下山直後に 早速視線速度解析を行ったところ,図4のような結果 となりロシター効果は予想通り検出された.視線速度 変動のパターンは図1の左側のようにトランジット中 心に対して対称な形となり,恒星自転軸と惑星公転軸 はよく揃っている事が分かっ



図4: すばる望遠鏡で観測されたKOI-94.01のロシター効果.

 $tc(\lambda \approx -6^{\circ}).$

観測から戻ってくると、筆者らはロシター効果の解 析に加えてケプラーのライトカーブについても解析を 行い、図3の惑星同士の食をモデルでフィットしてみ た. フィッティングでは、 通常のトランジット・ライ トカーブを記述する恒星と惑星の半径比 惑星軌道傾 斜角. 恒星半径で規格化した惑星の軌道長半径などに 加えて、天球面上で惑星同士の軌道のなす角(δ: mutual inclination)を自由パラメータとした. 定性的 には、δは惑星同士の食が起こっている継続時間を 決める. δが0°付近の場合は、惑星はほぼ同一方向 に移動するため惑星同士の食の継続時間が長い。 一方 で惑星同士が互いに逆行している場合はδ≈180°と なり、惑星同士の食は短時間で終わる、4つのトラン ジット惑星を持つKOI-94系では当然惑星は全て同じ 方向に公転しているものと予想される. 実際フィッテ ィングの結果も $\delta = 1.15^{\circ} \pm 0.55^{\circ}$ となり、惑星同士の 食を起こしたKOI-94.01と94.03の軌道面は太陽系同 様に高い精度で一致している事が明らかとなった.

3. 解析結果のまとめと複数惑星系の起源への示唆

KOI-94系に関する解析結果をまとめると図5のようになる.すなわち,まずKOI-94.01のトランジット 中のロシター効果の観測により94.01の公転面は KOI-94の中心星の自転軸にほぼ直交している事が分

カリフォルニア大学バークレー校にて系外惑星の研究を行う 研究者. ロシター効果の観測にも関わっている.

^{6.} 最終的に筆者らのグループが先に結果を公表する事が出来た.



図5: KOI-94系に対する観測結果のまとめ.

かり, またケプラーの公開データを用いた惑星同士の 食の解析から, 食を起こしたKOI-94.01と94.03の公転 面がほぼ一致している事(δ =1.15°±0.55°)が明らか となった. このように精密に複数惑星系の軌道角運動 量が特徴付けられたのはもちろん初めての事である.

このような複数惑星系における軌道角運動量と中心 星の自転角運動量の向きの一致は太陽系と酷似してお り,惑星が原始惑星系円盤内で形成され,円盤の降着 によって恒星も同じ向きの角運動量を獲得したという シナリオと合致する.ただ太陽系と大きく異なるのが, KOI-94系ではKOI-9401を始め巨大惑星が周期100日 以下の中心星近傍に位置している点である.これは, 先に述べたようにKOI-94系の惑星が原始惑星系円盤 内を円盤と相互作用しながら徐々に内側に移動して来 た証拠と考えられる.ここで以下のような疑問が生じ た人もあるだろう.

- 同じ中心星近傍に巨大惑星を持つ系でも、惑星公 転軸と恒星自転軸が揃っているものといないもの があるのはなぜか。
- 太陽系の巨大惑星(特に木星・土星)は惑星移動に よって中心星付近まで落ちて来ていないのに、 KOI-94系のように落ちて来ているものがあるの はなぜか。

上記1. については,諸説あるが現在では「孤立した (isolated)」短周期巨大惑星は,惑星同士の重力散乱(ま たは古在効果)とその後の恒星との潮汐相互作用によ って形成されたという考えが一般的である[18, 19]. ここでいう「孤立」とは、近くに(例えば周期100日以 内に)他に巨大惑星を持たないという意味である. 惑 星同士の散乱によって形成された場合惑星の軌道傾斜 角は幅広い分布となるが、惑星と恒星の潮汐相互作用 は徐々に軌道公転軸と恒星自転軸を同じ向きに揃える 方向に働く. 潮汐力の強さは惑星の質量・軌道長半径 や恒星の対流層の大きさに依存しており、それらを考 慮すると、孤立した短周期巨大惑星に対するロシター 効果の観測結果(λの分布)をある程度説明する事が 出来る.

一方、恒星近傍であっても孤立していない巨大惑星 は一般に重力散乱などではなくタイプIまたはタイプ Ⅱ移動などによって内側に移動して来たと考えられる。 特にKOI-94系の場合全ての惑星の軌道面が高い精度 で揃っている事から、形成当時の惑星の配置や軌道面 を保ったまま徐々に円盤内を移動した可能性が高い。 このような惑星は上記の孤立した短周期巨大惑星に比 べて、軌道公転周期が比較的長い(P>5日)、軌道離 心率が小さい(e<0.1)などの特徴を持つ、つまり、最 近多く見つかって来た「複数トランジット惑星系」は 孤立した短周期巨大惑星とは全く異なる進化の歴史を 持っていると言えよう。なお上記2.については、同 じ複数惑星系でもなぜタイプIまたはⅡ移動を経験し た系とそうでない系が存在するのかについては、初期 条件としての円盤の面密度の違いなど様々な可能性が 指摘されているが、はっきりした結論は得られていな 13

4. 今後の展望

海王星サイズ以上の巨大惑星の起源や進化の歴史は 徐々にその全貌が明らかになりつつある.一方ケプラ ー望遠鏡によるトランジット惑星の探査結果は、「ス ーパーアース」を含むより小さな地球型惑星の方が存 在頻度が高い事を示しており、より普遍的に存在する 地球型惑星の起源や進化に対してもこれまでの議論が 適用出来るのかは今後の観測において重要なテーマと なる.

^{7.} Kepler-56系には、周期10.5日、21.4日の二つの巨大惑星が存在 する

^{8.} 原始惑星系円盤自体が伴星からの摂動によって円盤面を変化 させた[21],など.

一般に小さい惑星に対して視線速度法によって質量 や軌道離心率を精度よく決定するのは困難であり、ま たロシター効果などによる軌道の特徴付けも容易では ない、では完全に無理なのかと言うと、条件さえ揃え ば地球型惑星であっても軌道の特徴付けを行う事は出 来る. 筆者らはロシター効果が適用出来ないような小 さい惑星を持つ系に対し、測光から求めた恒星の自転 周期と分光学的に求めた射影自転速度を使って惑星の 公転軸と恒星の自転軸の関係を制限する方法を考案し. 実際にいくつかの系に対して観測を行った[13, 20]. ここでは詳細は割愛するが、結果として地球型惑星を 持つような系でも巨大惑星を持つ系同様、惑星公転軸 と中心星自転軸が揃っているもの, 揃っていないもの が両方存在する可能性が高い事が分かった. ただしこ の方法はロシター効果の観測に比べ系ごとに軌道傾斜 角を制限できる精度が低く、多くのサンプルを使って 統計的な議論を行う必要がある.

なお巨大惑星の進化の歴史についても実はまだ分か ってない部分がある事を強調しておく.例えば,最新 の観測結果によると,複数トランジット惑星系 Kepler-56⁷において星震学を用いた解析から惑星の軌 道面と中心星の自転軸がずれている可能性が高い事が 報告され[12],上で述べたルールに当てはまらないケ ースがある事が分かった.実際はKepler-56について は視線速度の観測から長周期の伴星(か巨大惑星)が外 側にいる事が示唆されており,通常とは異なった進 化⁸を惑星系が経験したのではないかと提案されてい る.今後もこうした惑星軌道を調べる観測を継続する ことで惑星系の起源・進化の普遍性を紐解く事が出来 るだろう.

今回検出されたKOI-94系での惑星同士の食は次回 2026年4月1日(UT)に起こると予想される[22].惑星 同士の重力によってそれらの軌道が変化して食が起こ らなくなる可能性もあるが,次回の食が観測された場 合その見え方によって惑星の軌道や質量をさらに制限 する事が可能となる.いずれにしろ極めて稀に見る天 体ショーとして次回が大いに期待される.

謝 辞

本稿の執筆を勧めて頂き,原稿を注意深く読んでコ メントを下さった共同研究者の成田憲保氏に感謝致し ます.また大学院時代の指導教官の須藤靖先生,図5 を提供してくれた増田賢人氏にはこの場を借りて御礼 申し上げます.本研究は日本学術振興会からの助成金 をもとに行いました.感謝致します.

参考文献

- [1] Hirano, T. et al. 2012b, ApJ 759, L36.
- [2] Lin, D. N. C. et al. 1996, Nature 380, 606.
- [3] Nagasawa, M. & Ida, S. 2011, ApJ 742, 72.
- [4] Wu, Y. et al. 2007, ApJ 670, 820.
- [5] Fabrycky, D. & Tremaine, S. 2007, ApJ 669, 1298.
- [6] Rossiter, R. A. 1924, ApJ 60, 15.
- [7] McLaughlin, D. B. 1924, ApJ 60, 22.
- [8] Winn, J. N. et al. 2005, ApJ 631, 1215.
- [9] Ohta, Y. et al. 2005, ApJ 622, 1118.
- [10] Narita, N. et al. 2007, PASJ 59, 763.
- [11] Sanchis-Ojeda, R. et al. 2012, Nature 487, 449.
- [12] Huber, D. et al. 2013, Nature 342, 331.
- [13] Hirano, T. et al., 2012a, ApJ 756, 66.
- [14] Barnes, J. W. 2009, ApJ 705, 683.
- [15] Narita, N. et al. 2009, PASJ 61, L35.
- [16] Ragozzine, D. & Holman, M. J., 2010, arXiv: 1006.3727.
- [17] Takahashi, Y. H. et al., 2013, arXiv: 1309.2559.
- [18] Winn, J. N. et al., 2010, ApJ 718, L145.
- [19] Albrecht, S. et al., 2012, ApJ 757, 18.
- [20] Hirano, T. et al. 2014, ApJ 783, 9.
- [21] Lai, D., 2014, arXiv: 1402.1907.
- [22] Masuda, K. et al., 2013, ApJ 778, 185.

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その2 ~サブミリ波分光計JUICE-SWIの挑戦~

笠井 康子^{1,2}, 佐川 英夫³, 関根 康人⁴, 黒田 剛史⁵, 菊池 健一⁶, 西堀 俊幸⁷, 真鍋 武嗣⁸, JUICE-SWI日本チーム

(要旨)欧州宇宙機関の次期木星圏探査機JUICEに搭載される科学観測装置の一つに,サブミリ波分光計 Submillimetre Wave Instrument(SWI)がある.深宇宙探査機の歴史の中で,サブミリ波を用いた惑星観測 はこれまでに例がなく,SWIが世界で初めての提案となる.サブミリ波分光計とは何か? 本稿ではサブ ミリ波観測の紹介を皮切りに,我々がSWI開発に至った経緯,SWIが拓くと期待されている科学,それを 達成するための観測装置,そして最後にJUICEミッションへ向けた抱負を述べる.

1. サブミリ波とは何か?

-惑星科学への可能性-

ここではSWI惑星科学を述べる前に、まずはサブ ミリ波を用いた惑星観測がどのようなものかを説明し たい.

1.1 サブミリ波

サブミリ波電磁波は、マイクロ波ミリ波よりもさら に高周波の電磁波であり、一般に周波数300-3000 GHz(波長0.1-1.0 mm)の周波数帯を示す.遠赤外 光と電波の境界領域であるサブミリ波の検出技術が発 展してきたのは比較的最近のことである.サブミリ波 の検出方法には、遠赤外光の検出技術として従来用い られてきたボロメータ方式と電波の受信に利用されて きたヘテロダイン検波方式があるが、SWIは後者の 技術を使用している.アンテナで集光した観測対象か らのサブミリ波熱放射はミキサで局部発信器からのサ

情報通信研究機構
 東京工業大学
 京都産業大学
 東京大学
 東北大学
 東北大学
 国立天文台
 宇宙航空研究開発機構
 大阪府立大学
 ykasai@nict.go.jp

ブミリ波基準信号と混合し,扱いやすい低周波数帯に 変換し,分光器を通して周波数分解されたスペクトル を得る.ヘテロダイン検波方式はボロメータ方式と比 較すると,帯域が狭いものの,周波数分解能が極めて 高い(SWIの場合は100 kHz)高感度な観測が可能とな る.サブミリ波分光計は可視紫外や赤外,そしてミリ 波の分光計と比較すると,「小型軽量」と「高い周波数 分解能」の両者を同時に実現することが可能になる. また,マイクロ波の観測と比較すると,同じアンテナ 口径の場合,サブミリ波観測の方が高い空間分解能を 達成できる.これは,視野角内のアンテナ感度特性(ア ンテナビーム)の広がりが,観測周波数が高いほど小 さくなるという性質によるものである.

1.2 サブミリ波観測から得られる化学情報と 物理情報

サブミリ波観測は比較的質量の軽い分子(CO, SO, O₂, H₂O, NH₃, OCS, HCN, C₃H₂, CH₃CN, CH₃OH, H₂CO, O₃, HO₂, SH₂), ラジカル(C, O, SH, OH, HCO, CN, CCN, NO, CS, CCCS), イ オン(C⁺)などの観測を得意とし, これら多種の分子 測定による惑星大気の組成や惑星の化学進化などの議 論を可能とする. また, HDOやH₂¹⁸Oをはじめとする 同位体分子の観測から得られるD/Hや¹⁶O:¹⁷O:¹⁸Oの 値, あるいは H₂OやNH₃における水素のオルトパラ 比や, O₂などで見られる磁場の影響によるゼーマン 分裂など,分子内部の物理情報により,惑星における 物質循環や物理進化の議論が可能になる.ドップラー 効果を利用した大気中の風速推定などもその一つであ る.

また,サブミリ波は大気中の分子スペクトル観測の みではなく,惑星地表面からの熱放射も観測する.こ の時に観測される輝度温度は,地表面温度と地表面物 質の物性などによる放射率が掛け合わされたものを観 測する.地表面温度を何らかの方法で決めてやると, 地表面を構成する物質の種類やその状態を制約するこ とができる.この特徴はマイクロ波地球観測で確立さ れている手法であるが,サブミリ波でも同様の観測原 理が成り立つ.

天文分野では新しい波長・周波数での観測が常に新 しい発見をもたらしてきた. サブミリ波による新しい 宇宙の姿を切り拓く目的で、2011年9月から南米チリ 大型サブミリ波干渉計ALMAが初期科学運用を開始 している.SOとcvclic-C₃H₂の観測を用いて惑星系円 盤が形成されつつある際に劇的な化学変化が起こるこ とを明らかにする[1]など、驚くべき発見が相次いで いる.このように画期的な発見をもたらす魅力を持つ にも関わらず、これまでサブミリ波が深宇宙における 惑星探査に用いられなかったのは何故だろうか?それ は、サブミリ波が光と電波の境界領域で10-20年ほど 前までは「未開拓周波数帯」と呼ばれてきた新規技術 であり、ようやく観測の有効性が実証されてきた「さあ、 これから」というフェーズであるということに集約さ れる. サブミリ波観測は、まさに今、惑星観測の新し い姿を切り拓いていこうとしている.

1.3 SWIの背景

これまでサブミリ波衛星観測技術は主に地球周回軌 道からの地球上層大気観測において発展してきた.こ れまでに米国NASAのUARS/MLS(Microwave Limb Sounder)(1991年打上),Aura/MLS(2004年打上), スウェーデン・カナダ・フランス3カ国共同のOdin/ SMR(Submillimetre Radiometer)(2001年打上),日 本の国際宇宙ステーション(ISS)搭載超伝導サブミリ 波サウンダJEM/SMILES(2009年打上)の4機のサブ ミリ波衛星が軌道上から地球大気観測を実施してい る.SMILESの特徴は4Kに冷却した超伝導ミキサと 20 K, 100 KのHEMTアンプを搭載することで、 MLS. SMRと比較し10-20倍もの良い感度を実現し たことである. SMILESの観測により地球大気の新し い一面が明らかになっている.特筆すべき点としては, 成層圏や中間圏に体積比で1000億分の1程度しか存在 しないBrOラジカルの日変動のふるまいを世界で初 めて捉え、中間圏における塩素系ラジカルのふるまい を明らかにしたことであり、これらを通して人間活動 により放出された物質が成層圏のみではなく中間圏に おいても活発な大気化学を展開していることを明らか にした.また、その高感度スペクトルを用いて世界で 初めて成層圏下部および中間圏における風速を導出し、 気象モデルの精度向上の一役にも立っている、ここで は紹介しきれないが、これらをはじめとする SMILES の地球大気観測成果は[2]にまとめてあるのでそちら を参照されたい.

地上のサブミリ波望遠鏡や干渉計を利用した金星, 火星や木星といった惑星大気の観測も,数は少ないな がら実施されており,各惑星大気における微量成分の 測定や大規模スケールの風速場の導出など,他の波長 帯での観測とも相補的な研究がなされてきている.木 星 観 測 に おいて は,1994年のShoemaker-Levy 9 (SL9)衝突によって木星大気上層に注入された微量成 分の定量が行われている[3] (本稿2章に詳述する).

地上からのサブミリ波観測では地球大気がどうして も観測の邪魔となる、その問題点を解決したのが、欧 州の宇宙天文台Herschelである. Herschelは地球-太 陽の第二ラグランジュポイントに置かれた口径3.5 m のサブミリ波・遠赤外望遠鏡である。 搭載機器の一つ であるサブミリ波分光器HIFI(Heterodyne Instrument for the Far Infrared)はSMILESと同様に4 K超伝導ミキサを搭載し、サブミリ波・テラヘルツ波 を利用した太陽系天体の観測を実施した. そのハイラ イトは木星族彗星103P/Hartley2の水蒸気同位体比観 測である[4]. HIFIは木星族彗星103P/Hartlev2にお けるHDO, H₂Oの509.292, 556.936 GHz放射スペク トルを観測し、それらからD/H比を導出したところ、 地球海洋におけるD/Hの値と非常に良く似た値を示 した. これは彗星が地球の水の起源として重要な役割 を持つ可能性を示唆している. これらは彗星探査機 Rosetta 搭載のサブミリ波観測装置 MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter)によりさら

142

に解明されていくことと期待される.

こうしたサブミリ波惑星観測の新たな局面として登 場するのがJUICE-SWIであるが、この観測装置の構 想が始まったのは、木星探査計画がまだLaplaceとい う名前で呼ばれていた頃である。IUICEそのものの 検討の変遷は前回の記事[5]に詳しいのでここでは割 愛するが、その頃からドイツ・マックスプランク太陽 系研究所(MPS)を中心としてフランス・パリ天文台 やアメリカ・IPLなどとの国際協力のもとで観測装置 の提案が練られてきた、そして、IUICEへの搭載観 測装置が募集された際に、ちょうどその頃IEM/ SMILESでの経験を将来の惑星探査用小型サブミリ波 観測器の開発に繋げようとしていた日本チームも SWIの開発に合流することとなり、まさに日欧米の サブミリ波惑星科学コミュニティが一体で取り組む国 際共同プロジェクトとなった。その後、IPLが撤退と なったものの、現在、スイスやスウェーデン、ポーラ ンドなども参加した測器開発が鋭意進行中である.

2. JUICE-SWIの科学

2.1 サブミリ波観測が拓く木星ガリレオ衛星の 科学

ここでは、SWIが行うガリレオ衛星のサブミリ波 観測に焦点を絞り、その科学的意義や波及効果につい て述べる(対象を、本記事のタイトルにも含まれてい る「氷衛星」とせず「ガリレオ衛星」と敢えてしている のは、イオの希薄大気の観測もSWIの重要な科学目 標の一つだからである).SWIの特徴である高周波数 分解能を活かした、ガリレオ衛星希薄大気の同位体観 測や、エウロパから噴出するプリューム[6]に含まれ る内部海由来の溶存ガスやイオンの測定など、JUICE ミッション全体の科学目標の達成(木星系のキャラク タリゼーション、氷衛星のハビタビリティの理解)に 深く関わる観測も、これに含まれている。

前者の木星系氷物質の同位体組成は、太陽系物質科 学のみならず、惑星形成論や系外惑星系円盤の天文観 測にとっても重要なデータとなり、後者は宇宙におけ るハビタビリティの理解という意味で、惑星科学のみ ならず地球化学や極限微生物学にも広い波及効果をも つだろう.JUICEの探査が実現する2030年代という 先を見越した期待を述べれば、SWIが行う多様な観 測対象や分子種の観測データは、それぞれの学問分野 の進展に貢献するに留まらず、これらの分野を結びつ けた新たな学問領域(アストロバイオロジーや比較惑 星系円盤学)を創成する種にもなるであろう.

(1) ガリレオ衛星希薄大気観測と惑星形成論

太陽系の氷衛星は、周ガス惑星円盤中の固体物質の 集積によって形成したと考えられている[7]. 近年の ガス惑星形成理論によると、氷衛星が形成するガス惑 星形成後期の周ガス惑星円盤内では、低圧低温のため 化学反応がほとんど起こらなかったことが示されてい る[7]. その場合、氷衛星の材料物質となる氷微衛星 の組成は、原始太陽系円盤のガス惑星形成領域の氷物 質組成を反映したものとなる[7]. 従って、原始太陽 系円盤の木星形成領域(標準モデルでは5 AU)の物理 化学情報を得るためには、ガリレオ衛星(特に、地質 活動が乏しく、初期の情報を保持しているであろうカ リスト)の化学・同位体組成を理解することが重要と なる.

SWIが行うガリレオ衛星の希薄大気中での重要な 観測項目の1つに、H₂OのD/H比の測定がある.過去 の研究から、分子雲において水と水素ガスのD/H比 は大きく異なることが示唆されている[8].低温の外 側太陽系では、これら分子雲由来のD/H比は保存さ れるが、内側太陽系の水の雪線付近では水と水素ガス 間の同位体交換が活発に行われることが予想されてい る[8].このような原始円盤における同位体交換効率は、 円盤温度やガス粘性といった円盤の物理パラメタに大 きく影響を受ける.言いかえれば、現在の太陽系にお いて、始原的な水氷の持つD/H比の動径方向の分布 が得られれば、上記の物理パラメタを制約することに つながる.

上記の原始円盤における物理パラメタは,惑星形成 論において惑星系の大構造を決定する極めて重要な値 であり,これが惑星探査から実証的に制約できる意義 は大きい.実際,Cassini探査機によって,土星衛星 エンセラダスの水のD/H比が,彗星のものとよく一 致していることが確かめられている.同様の水のD/ H比が木星系でも得られれば,太陽系におけるD/H 比分布や,上記の制約に対して大きな意味を持つだろ う.このような物質・同位体分布の理解や,原始太陽 系円盤の物理化学状態の理解は,地球の材料物質(特 に水の起源)を、より詳細に制約することにもつながる. さらに、ALMAをはじめとする高空間分解能を持つ 地上大型望遠鏡によって、系外惑星系円盤の温度構造 や同位体分布が、近年急速に明らかになりつつある. このような天文観測結果と、探査結果および円盤モデ ルにより推定される原始太陽系円盤の姿を比較するこ とで、太陽系の初期条件が、数多の系外惑星系円盤の なかで普遍的なものか特殊なものなのかを理解するこ ともできるだろう.このような惑星形成論や原始円盤 モデルは、日本が世界をリードする分野である.今後 も当該分野を引っ張る存在であるためにも、望遠鏡を 使った天文観測のみならず、SWIを始めとする太陽 系探査との連携は重要となる.

(2) エウロパプリュームとハビタビリティ

地球上の生命は、(a)液体の水、(b)生命必須元素、 (c)自由エネルギーの3つを必要とする。生命自体を 探すことの困難さを考えれば、上記の3要素が満たさ れる環境を宇宙において探すことが、現状において地 球外生命発見のための第一歩となるだろう、エウロパ の場合, Galileo 探査機がもたらした様々な証拠から 判断して、液体の水が内部に存在することはほぼ間違 いない、しかし、これでエウロパが生物学的にハビタ ブルであると結論できるかといえばそうではない. エ ウロパの生命生存可能性を理解するためには、(b)や (c)の条件が満たされているかを明らかにする必要が あり, そのためには, 内部海の詳細な化学組成の情報 が不可欠である.しかしながら,エウロパ内部海は厚 い氷地殻の下に存在するため、塩だけでなく溶存ガス 種も含む化学情報を、観測によって直接得ることは困 難であろうと思われてきた.

Hubble望遠鏡によってもたらされた大きなブレイ クスルーは、エウロパにおいてもエンセラダスのよう なプリューム活動が存在することが明らかになったこ とである[6]. この発見により、探査機の周回(あるい はフライバイ)観測から、エウロパ内部海の化学組成 を明らかにすることができる可能性が示された. エウ ロパプリュームでの重要な観測項目は、炭素(CO₂, CO, CH₄)、硫黄(H₂S, SO₂)、窒素(NH₃, N₂)といっ た元素を含む分子種の検出および定量である. これら の元素は生命必須元素であり、内部海におけるこれら 元素の存在形態や量を調べることは上記(b)の理解に 直結する. さらに, これらの分子種は地球上の生命活 動によっても生成・消費される分子種であり, エウロ パにおける上記(c)の理解や生命活動の有無を調べる バイオマーカーともなりうる. 以下, この点を少し詳 しく述べる.

エウロパのような太陽光の届かない内部海では、生 命が利用できる自由エネルギーは、分子種の酸化還元 反応によって得られると考えられる[9]. エウロパでは、 内部での海底熱水反応によって還元剤(例えばH₂)が 生成され、氷地殻内での放射線分解反応によって酸化 剤(例えばSO2, CO2)が生成されている可能性がある [9]. これら還元剤、あるいは酸化剤の供給によって、 内部海組成は化学的に非平衡となる.地球化学的物質 循環において、生命は非常に効率のよい触媒である、 もしエウロパに生命が存在すれば、酸化還元反応によ って還元剤や酸化剤を消費し、内部海組成をより低い エネルギー状態(あるいは平衡状態)にするであろう. したがって, 内部海組成に非平衡が存在すれば, 上記 (c)の自由エネルギーが存在することを示し、上に挙 げたような生命関連分子の存在量比に、熱水活動や放 射線分解などの非生命過程で説明できない異常が見つ かれば、それがバイオマーカーとなるだろう、この際、 重要となるのは、エウロパにおける非生命過程で生じ る酸化還元反応の理解である。日本ではこれまで、地 球化学と極限環境微生物学の研究者が協力し、地球の 海底熱水噴出孔での非生命酸化還元過程の理解を、深 海底探査および実験的に制約し、海底熱水噴出孔にお ける生命存在可能性を議論してきた.現在.惑星科学 の研究者がこれに加わり、世界に先駆けてエウロパな どの氷衛星での非生命酸化還元過程の実験的・理論的 制約を行っている.

JUICE探査機の観測機器の中でプリュームの化学 組成を調べることができるのは,SWIとUVI(UV Imaging Spectrograph)による分光観測である.SWI は極性分子であるH₂S,SO,CO,CN,NO,SiOな どに感度がよく,存在量が微量であっても検出・定量 できる可能性がある.また,UVIは単純なSO₂,N₂な どの分子種の観測を行うことができるだろう.SWIと UVIは,相補的に観測可能な分子種をカバーし合い, プリュームに含まれる主要溶存種の化学組成の全容を 明らかにすることができるかもしれない.これら探査 結果と,実験や深海底探査に基づいたエウロパ内部海 モデルによるそれらの解釈は、エウロパにおける生命 存在可能性の理解を本質的に前進させてくれるだろう.

2.2 木星成層圏大気観測とその意義

JUICEにおける木星本体の探査に対して,SWIは 木星大気観測の中心的役割を担う.木星という巨大ガ ス惑星における大気物理現象を理解するということは, 地球大気の理解をベースに発展してきた大気物理学を, より普遍的な惑星大気物理学に発展させるための大き なブースターになると考えられる.

木星大気の理解における最終目標は、流体力学・気 象学・惑星物理学・大気光化学・熱化学をベースとし て、極から赤道に至るまで、コアから最上層に至るま でのガス惑星構造と組成、および物理諸過程の解明で ある、地球より自転周期が短く、太陽放射のみならず 内部熱源の影響も受ける木星大気について、その循環・ 温度場・雲層・大気組成を決定する力学・放射・化学 メカニズムの理解は,比較惑星気象学の観点からも興 味深い. 木星の大気は100 hPa付近を境界に対流圏と 成層圏に分けられる[10].対流圏上部にはアンモニア, アンモニア化合物、水蒸気による雲層が存在し、よく 知られる縞模様構造や大赤班はこの雲層の構造を見て いる. また成層圏上端(0.001 hPa付近)より上には. 熱圏上層大気が存在する、しかしながら、木星大気の 鉛直方向の循環や物質輸送がどのような過程において, どのような規模で、どのような深さまで互いに影響し 合うのかはわかっていない.

SWIは、木星成層圏の物理化学プロセスをターゲ ットとした大気観測を行う.この高度領域は、内部熱 源によって循環が駆動されている対流圏と、外部から のエネルギー供給が支配的となる上層大気とを繋ぐ高 度領域であり、木星大気の循環や熱収支を理解する為 には重要な鍵となる.さらにこの観測は、雲層より深 い対流圏の観測を対象とする米国のJUNO探査機搭載 マイクロ波放射計MWIによる観測と互いに相補的な 面を持つ.

以下にSWIの目指す主な木星大気科学を述べる.

(1) 成層圏風速場および気温場観測

一般的な惑星大気において,対流圏では大小の対流 セル構造がエネルギーや運動量輸送を担うのに対し, 成層圏では放射と大気波動の影響が強く効いていると (b)

図1: SWIの観測周波数帯である(a)600 GHz帯および(b)1200 GHz帯における木星大気スペクトル(リム放射)のシミュ レーション図. 1000 hPaの接線高度を観測したケースを想 定. (a)内部の図は,556 GHzのH₂O吸収線拡大図.木星大 気の高速回転によって,吸収線の中心周波数がドップラー シフトをしている.

考えられている. 雲層付近で生成された大気波動は, 成層圏へと上方伝搬する. コリオリ力が相対的に小さ い赤道域では, 下層大気からの大気波動は主に東西風 を加速・減速させる効果をもたらす. その一方で中緯 度帯においては, コリオリ力と作用し子午面風を駆動 する. このメカニズムにより大気の東西風の向きが周 期的に入れ替わることになり, 地球で見られる準二年 周期振動などをもたらす要因となっている[11など].

木星の場合はどうか. VoyagerやCassini探査機, 地上赤外望遠鏡などによる木星成層圏の気温場観測の



図2: SWIの概念図. (a) JUICE探査機とSWI (JUICE Yellow Bookより), (b) SWIアンテナ光学系, (c) SWIブロックダイ アグラム.

結果を見ていくと、赤道域で約4地球年周期での変動 の存在が示唆されている[12など]. この準四年周期振 動(Quasi-Quadrennial Oscillation, QQO)とも呼ぶべ き変動はモデル計算による再現も行われているものの [13], その存在を定量的に検証するような成層圏風速 場の直接的な観測結果は未だ得られていない。現在ま でに得られている木星大気循環に関する観測的研究は、 雲構造をトレーサーとして対流圏の大気運動を可視化 するような観測、あるいは成層圏の気温場から温度風 近似を利用して東西風速を求めるような研究に限られ ている.後者としてはCassini 探査機で得られた気温 場を利用したものがあるが、そこでは低緯度帯(23°N、 5°N)に60-140 m/s にも達する高速東西風の存在が 示されている[14]. そのような高速流は安定して存在 するか、QQOとの関連性はどうか、また温度風近似 が成り立たない赤道域の様子や、成層圏子午面循環の 情報など、未だ多くの観測的情報が欠落したままであ る.

SWIでは木星成層圏に存在する微量大気成分(CH₄, H₂O, HCN, CO, CS等)からの大気放射を, 非常に 高い周波数分解能で観測する(図1).またサブミリ波 観測の大きな利点として,分子吸収線のドップラーシ フトを用いて大気風速を直接的に観測することが可能 なことが挙げられる.こうした風速観測は地上のサブ ミリ波望遠鏡を利用しても可能ではあるが,周回軌道 からの観測を行うことで,空間分解能の改善だけでは なく,鉛直方向の情報分離も可能となる.SWIでは, 0.01-400 hPaと広い高度領域をカバーすることを目 指している.

1995年に投下されたGalileo プローブによる測定や 地上望遠鏡による観測から,対流圏では東西風ジェッ トは長期にわたり持続的に,また高度方向にはほぼー 様に(少なくともGalileo プローブが測定した22 000 hPaより上の領域では)吹いており,さらに大赤班の ような渦状構造が長期的に持続して存在することが示 唆されている.このような対流圏における大気運動が 成層圏にどのような影響を及ぼしているか,JUNO/ MWIによる対流圏深部の観測と合わせて新たな知見 が得られることが期待される.

(2) 成層圏大気微量成分の解明

木星の大気組成は、1章で述べたSL9衝突にも見ら れるように、惑星外部からの影響を度々受けると考え られている. SL9衝突の際には、CSやCO、HCNとい った分子が木星大気に注入されている。こうした外的 要因が惑星の大気組成の進化にどのように影響を及ぼ してきたのかを知る為に、成層圏大気組成の空間・時 間変化をモニター観測していくことが必要である.特 に先ほど述べたようなCSやCOといった分子は、化 学的に比較的安定な為,SL9衝突発生後惑星全体に広 がり、その後希薄化していく様子が観測されており、 木星大気における大気循環や渦拡散を定量的に測るト レーサーとなっている [3]. 近年のCassini 探査機によ る観測では、空間分解能の良い観測が実現した結果、 HCNとCO2が木星上で異なる空間分布(HCNが極域 では殆ど存在しないのに対し、CO2は南極にその存在 量の極大を持つ)が示されている[15]. SWIではこう した物質循環を高い空間分解能(緯度分解能1度)で観 測を行い、様々な空間・時間スケールの水平移流と拡

また,H₂OもSWIの重要な観測ターゲットである. 木星成層圏におけるH₂Oは,赤外線宇宙天文台によ る観測で発見されたが[16],その起源は未だ定量的な 理解は出来ていない.SL9衝突の様な突発性事象でも たらされたという説[17]も存在するが,それ以外にも, 惑星間ダストにより恒常的に木星大気へと降り込んで いるとする説,木星周囲のリングや氷衛星から磁力線 を介して取り込まれているとする説などが唱えなれて いる.SWIではH₂Oの鉛直分布を観測し,その緯度 分布をモニターすることで,巨大ガス惑星における H₂Oの起源を定量的に評価する.

散プロセスを定量的に明らかにする.

JUICE-SWI センサ概要と開発スケ ジュール

SWIの測器概要を図2に、測器性能を表1に、観測 分子を表2に示す.図2aはJUICE探査機とSWIである. 図2b, cに示すようにSWIのアンテナは開口直径30 cmのオフセット・カセグレン鏡である.木星や氷衛 星のマッピング観測の他,信号レベルの較正のために 深宇宙を指向する必要があるため、アンテナ系は直交 した2軸方向に走査を行うための駆動機構を持ち、 JUICEの軌道面内方向には±76°,それに直交する方 向にも±43°の範囲で視野を移動できる.SWIは2系 統の独立した受信機を搭載しており,600 GHz帯で直 交する二偏波の観測を行う(1系統を1200 GHz帯の受 信機に置き換えるオプションも検討している).受信 機のフロントエンドはショットキー・バリア・ダイオ ード・ミクサであり,ここで観測信号と局部発振器信 号とを混合することによって,サブミリ波帯の観測信 号をマイクロ帯の信号に変換する.マイクロ波信号は 最終的に高分解能分光計(CTS)と広帯域分光計 (ACS)へと導かれ,分光スペクトルとして検出される.

SWIの開発はMPSをとりまとめ機関とする国際分 担で進められており、日本はアンテナ鏡面の開発を担 当する.惑星観測のためにはアンテナ指向性向上やサ イドローブ抑制などが重要になるが、アンテナ鏡面に 関して、日本はSMILESの開発経験から高い技術的成 熟度を持つ.観測対象のサブミリ波強度を正確に知る にはアンテナ鏡面の損失などの較正データが重要であ るが、日本チームは鏡面のオーミック損失を評価する 特許技術などを有しており、地上でのアンテナ光学系 の評価を主導することも期待できる.

JUICEの2022年の打ち上げを目指し、日本担当分 については2018年にフライト品を完成し、MPSへ輸 送する計画である。MPSでは各国で開発されたコン ポーネントを組み上げ、SWI全体としての試験を実 施した後、SWIをJUICEへと引き渡す。

SMILESのヘリテージを最大限に活かすため,日本 分担分の開発においては,SMILESのアンテナ開発の 実績があるメーカとの協力体制を構築する.電気性能 (サブミリ波性能)に関わる設計・試験はSWIチーム が実施し,担当メーカは主鏡,副鏡,第3鏡の機械設計・ 製作,および機械測定(鏡面精度・粗度測定,周期的 歪みの測定)を実施する.2014年度には,SWI国際チ ームが分担して開発するコンポーネント間のインター フェースを確認するためのモデル(デモンストレーシ ョン・モデル)の開発を行い,MPSにおいてSWI全体 としての機能を確認する試験を実施する.また,並行 して鏡面のサンプルを用いた環境試験(高強度放射線 に対する耐性と低温環境を含む広範囲温度における安 定性等)を行い,鏡面が木星環境での使用に耐えるこ とを確認する予定である.

表1:SWIの測器仕様.

観測性能				
	観測周波数	600 GHz帯 (~ 530-600 GHz),		
		1200 GHz帯(1075-1275 GHz)(オプション)		
	システム雑音温度	1500 K (DSB ^[1] , 600 GHz 帯),		
		3000 K (DSB, 1200 GHz 帯) (オプション)		
	空間分解能	1000-2000 km@15木星半径 (0.5-1.0 km @ 500 km)		
アンテナ系				
	ビーム幅	約 0.11° @600 GHz		
	鏡面精度	<6 µm r.m.s		
	駆動範囲	軌道面内方向:-73 - +73°		
		軌道面に直交する方向:-4.3°-+4.3°		
	ポインティング精度	<5秒角(knowledge)(設定精度は<30秒角)		
受信機系				
	ディテクタ	ショットキー・バリア・ダイオード		
分光計				
	形 式	広帯域分光計(ACS ^[2]),高分解能分光計(CTS ^[3])		
	観測帯域	ACS: 5 GHz, CTS: 1 GHz		
	周波数分解能	ACS: 19.5-4.9 MHz(256-1024 ch),		
		CTS: 0.1 MHz(10000 ch)		

[1] SWIは両側波帯(double side band, DSB)の受信機である.

[2] Autocorrelation Spectrometer

[3] Chirp Transform Spectrometer

表2:SWI観測物理量と観測精度.

	木星		
地表面	大 気 温度・風速・組成の3次元プロファイル		
 ガニメデのレゴリ スの理解:600, 1200 GHzバンドよ り表層の輝度温度 	トレーサー分子の3 次元構造モニタリン グ	ガニメデ/カリスト: H ₂ O, O ₂ , COからの ¹⁷ O, ¹⁸ O, D, オルト・ パラ比	H ₂ O, CS, HCN, CO, OCS(SL9衝突や 木星外部由来の大気 分子)
を高空間分解能で 測定 ・レゴリスの表面~ 1cmの熱波の振幅	新しい分子種の探査	$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	
・レゴリスの熱・物	鉛直分解能	1 km	\sim scale height
理的特性を測定	水平分解能	2–10 km	<5 degrees
• 大気と表層の特性 の相関を見る	温度観測精度	<2 K in collisional range	<5 K
	ドップラー風速観測 精度	10 m/s	10 m/s (CH ₄ , H ₂ O)

4. これから

本稿では駆け足ではあるが,JUICE搭載サブミリ 波分光計SWIについて述べた.初めての探査機から のサブミリ波惑星観測は惑星科学の発展にどのような ブレイクスルーをもたらすのであろうか.SWIの科 学目標の中でも、「氷衛星の物理化学」に関しては日 本のSWIサイエンスチームの活躍が期待されるとこ ろである.また、GALAなど他の観測装置から得ら れる情報と連携することで、さらなるサイエンス展開 が期待される.そうしたサイエンスの議論を日本のコ ミュニティが牽引できるよう,今からしっかりとした 準備をしていきたい.その為には,ALMAなどを用 いた地上観測によりサブミリ波惑星観測の実績を重ね ることも非常に重要である.また,若い分野である「サ ブミリ波惑星探査」は大いなる可能性を秘めている. SWIの測器開発で培う惑星探査の技術を次世代の若 者に継承し,これからの学生諸君に夢と発見を与える 日本オリジナルのサブミリ波惑星探査機[18]を実現し ていくことに挑戦していきたい.

5.謝辞

本連載を企画し,SWI紹介の機会を与えて頂いた 木村淳氏(東京工業大学地球生命研究所)に感謝する.

参考文献

- [1] Sakai, N. et al., 2014, Nature 507, 78.
- [2] SMILES Publications, http://smiles.nict.go.jp/pub/ publication/publications_all.html
- [3] Moreno, R. et al., 2003, Planet. Spa. Sci. 51, 591.
- [4] Hartogh, P. et al., 2011, Nature 478, 218.
- [5] 木村淳ほか, 2013, 遊星人 22(3), 146.
- [6] Roth, L. et al., 2014, Science 343, 171.
- [7] Canup, R.M. and Ward, W.R., 2006, Nature 441, 834.
- [8] Mousis, O. et al., 2000, Icarus 148, 513.
- [9] Zolotov, M.Y. and Shock, E.L., 2004, J. Geophys. Res. 109, E06003.
- [10] Seiff, A. et al., 1998, J. Geophys. Res. 103, 22857.
- [11] Baldwin, M.P. et al., 2001, Rev. Geophys. 39, 179.
- [12] Simon-Miller, A.A. et al., 2006, Icarus 180, 98.
- [13] Friedson, A.J., 1999, Icarus 137, 34.
- [14] Flasar, F.M. et al, 2004, Nature 427, 132.
- [15] Lellouch, E. et al., 2006, Icarus 184, 478.
- [16] Feuchtgruber, H. et al., 1997, Nature 389, 159.
- [17] Lellouch, E. et al., 2002, Icarus 159, 112.
- [18] Kasai, Y. et al., 2012, Planet. Space Sci. 63-64, 62.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その6 ~工学技術としてのはやぶさ2~

津田 雄一1

(**要旨**) はやぶさ2は、小惑星サンプルリターン探査技術を推し進めるミッションであり、初代はやぶさの 技術蓄積を橋頭保として、サンプルリターン探査技術を確実なものとし、かつ新たな探査技術を実証するプ ログラムである. はやぶさ2は、基本設計思想は初代はやぶさを踏襲することで、開発期間の短縮とヘリテ ージに依拠した信頼性確保を目指している.一方で、システム設計には、工学上の挑戦的要素を随所に配し て、探査技術の発展とミッション価値の増大に貢献している.小天体探査を工学面で持続的に発展させるに は、技術の継承と革新の両面をにらみながら、ミッションを組み立てていくことが重要である. はやぶさ, はやぶさ2、そしてその次へ. 我が国の小天体探査は続く.

1. はやぶさ2の工学的位置づけ

「はやぶさ2」は、小惑星探査機"1号機"である.先 代のMUSES-C「はやぶさ」は、今でこそ小惑星探査機 と呼ばれることが多いが、正式には工学実験機であり、 将来のサンプルリターン探査に必要な鍵となる技術の 習得と実証を目的として作られたミッションであった. 工学実験機としてのはやぶさは、その役割を十二分に 果たしたと言えよう.何よりも4大目標(①電気推進 による惑星間航行、②光学自律航法誘導による小惑星 接近・着陸、③微小重力下の試料採取技術、④高速再 突入カプセルによる試料の直接地上回収)のすべてを 実施できたことは極めて重要で、開発・運用の当事者 である私たちは、幾多のトラブル克服の経験も含めて、 かけがえのない技術蓄積ができたと思っている.

はやぶさ2は、この技術蓄積を活かし、小惑星探査 を実践する実用機第1号のミッションである。実用機 の意味するところは大きい。はやぶさが拓いた小惑星 探査は、我が国が世界をけん引しうる分野であり、は やぶさ2プログラムの実施は、小惑星探査をそのよう な分野として育てていく、我が国の意思表示でもある。

表1:はやぶさ2のミッション定義と成功基準設定.

理学目標1	C 型小惑星の物質科学的特性を調べる. 特に鉱物・水・有機物の相互
	作用を明らかにする。
【成功基準】	【ミニマム】近傍観測による知見、【フル】回収サンプルの分析
理学目標2	小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の調査により、小惑星の形
	成過程を調べる。
【成功基準】	【ミニマム】近傍観測による知見、【フル】人工クレータ生成による知見
工学目標1	「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用
	性を向上させ、技術として成熟させる。
【成功基準】	【ミニマム】小惑星ランデブー、【フル】サンプル採取、ローパー着陸、カプセルリエントリ
工学目標2	衝突体を天体に衝突させる実証を行う。
【成功基準】	【ミニマム】人工クレータ生成、【フル】特定領域にクレータ生成 【エクストラ】クレータからのサンプル採取

したがって、実用機としてのはやぶさ2は、サイエン ス価値が一級であることが求められるのはもちろんの こと、工学価値の面でも、初代はやぶさとは異質の意 義が求められる.その価値は、次の2点に要約される であろう.

- 1)はやぶさの技術へリテージを活用し、小惑星探査技術の確実性を上げること、(継承)
- 2)小惑星探査技術の先進性を維持するために、新しい 探査技術を開拓すること.(革新)

継承は、小惑星探査を持続的に発展させるために必 要な仕掛けであり、革新は世界に伍してこの分野の科 学を押し進めるため、そしてこの分野が探査という科 学分野に携わる当事者たちにとって魅力的であり続け るために必要な仕掛けである. はやぶさ2プロジェク トのミッション定義、サクセスクライテリア設定から は、この工学のココロが反映されているのが読み取れ

宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所・月惑星探査プログ ラムグループ tsuda, yuichi@jaxa, jp

る(表1).

著者のはやぶさ2における役割はプロジェクトエン ジニアであるが、この仕事には、探査機を技術的に取 りまとめるという"苦行"と、工学(Engineering Sciences)としての価値を高めるという"快楽"の両面 がある^{*1}.本稿では、そのような一科学者の視点から、 はやぶさ2の探査技術と、ミッションに上述の工学的 なココロを宿らせる小さな努力を紹介したい.

2. 探査機システム設計

2.1 目標天体選定

はやぶさ2の探査対象は、有機物や含水鉱物が多く 含まれるとされる、C型スペクトルの小惑星である[1]. はやぶさ2は、探査機質量および電気推進系の能力が はやぶさと同水準であり、この加速能力で到達可能な 範囲から、候補天体が選定された(図1). 探索の結果、 広義のC型に分類される近地球小惑星で、現有の加速 能力で到達可能な小惑星は、1999JU₃、1998RQ₃₆、 2008EV₅の3つであり、日米欧それぞれの探査計画(は やぶさ2/OSIRIS-REx / MarcoPolo-R)がこれらを 分け合えたのは数奇と言えよう.

1999JU₃は,着陸可能な程度の大きさ(~直径数 100m以上)と自転速度(自転周期が速すぎないこと)を 有すること等,はやぶさの技術へリテージを受け継ぐ はやぶさ2のハードウェアに起因する各種制約条件を 満たす天体として,3天体の中では最良の選択であっ た.

2.2 軌道計画

はやぶさ2の軌道計画は、(i)EDVEGAフェーズ (Electric Delta-V Earth Gravity Assist, 地球→地球), (ii)Transferフェーズ(地球→1999JU₃), (iii)Mission フェーズ(1999JU₃滞在), (iv)Returnフェーズ(1999 JU₃→地球)の4フェーズに分割される. このうち, (i), (ii), (iv)がイオンエンジンによる連続推力軌道設計を 必要とする部分である. また, (i)と(ii)の接続は, 地 球スイングバイを経ることで実現する.

軌道設計は、状態量拘束、制御量拘束条件付きの非







図2: はやぶさ2の軌道計画(太陽=地球ライン固定座標系).

線形最適化問題として定式化される[2]. たとえば, イオンエンジンの能力は制御量不等式拘束で表現され, 太陽電池が太陽を向いていなければならない, という ような姿勢制約は状態量不等式拘束で表現される. 最 適化対象はイオンエンジンの燃料消費であり, これを 最小化する軌道解を見つけるのが軌道計画である.

とは言え,実際のミッション立案においては,この 最適化問題の求解は,軌道計画作業の入り口に過ぎな い.純粋に数学的に解いた最適解は,美しすぎて(!) 実ミッションの遂行には不向きであり,人為的に解に 整形を加えることで,初めて実用に耐える軌道計画と なるのである.たとえば,最適解における姿勢履歴は 連続関数になるが,それを7日単位で不連続関数化す

150

^{※1.}ちなみに、著者は苦行より快楽が好きだが苦行も嫌いではない。


図3: はやぶさ2の外観図.

ることで,現実的な労力で運用ができるよう手を加え たり,完全最適解から故意に非最適方向に解を整形す ることで,イオンエンジンの不測の停止に対して復旧 する時間的余裕を確保したり,ということを行ってい る.なお,年末年始に極力忙しい運用とならないよう な配慮もしたかったが,結果として完成した軌道計画 は,12月に地球スイングバイ,12月に小惑星出発, 12月に地球帰還となってしまった.ここは,私たち ごときでは天体力学の神の御業に抗えなかった部分な ので,プロジェクトメンバーの皆さん,悪しからず.

図2に,軌道設計結果を示す.打ち上げは2014年に 種子島から,H2A202-4Sにより行われる.2015年12 月の地球スイングバイを経て,小惑星到着は2018年6 月,約1.5年間小惑星に滞在後,2019年12月に離脱, 2020年12月に地球へ帰還する計画である.

2.3 システム設計

はやぶさ2の外観を図3に、システム構成を表2に 示す.システム設計の詳説は、他の文献[3][4]に解説 を譲る.

はやぶさ2は,設計思想,システムの基本構成をは やぶさ初号機の設計に依拠することで,短期開発(設 計に2年,製造・試験に2.5年)を実現している.小惑 星への接近・近傍運用,タッチダウンなどの,本ミッ ション特有の運用は,はやぶさ初号機の経験を最大限 活かすべく,当初から同一の運用戦略をとる方針で設 計された.探査機コンフィグレーションは,この運用 戦略と,イオンエンジン等の巡航に必要な装備と姿勢 系システム,小惑星の熱環境と熱設計,軌道計画と通 信系設計の整合等,非常に多くの設計パラメータから 決まる.この設計パラメータ空間の中から,適合解を 探索するのが,探査機設計である.例えるなら,多変 数の混合整数非線形計画法問題(Mixed Integer Nonlinear Programming)^{*2}を解くようなものである. 救いは,完全最適解を求める必要はなく,適合解であ りさえすればよいことであろう.

この問題を現実的な時間で解くには、解探索の範囲 を狭めることが肝要である. はやぶさ2の開発にあた っては、初代はやぶさの開発・運用実績を参照するこ とで、とても効率的に解空間を狭めることができてい る.外見上は、イオンエンジンや太陽電池パドル、サ ンプラーホーンやカプセルなどの、はやぶさ2の特徴 が初代はやぶさを色濃く反映していることからもそれ がわかる. これはすなわち、探査機の開発上非常に時 間と労力を要する、熱設計・構造設計上のリスクを下 げていることをも意味する.

これらの活動は、どちらかというと"苦行"に属する. 次に、"快楽"の話をしよう.

はやぶさ2は,諸般の事情でプロジェクトの立ち上 がりが遅れに遅れ,2018年の会合タイミングで 1999JU₃に到達できるぎりぎりのタイミングでスター トを切った.しかし,このような短期開発であっても, ミッションの価値を高めるための努力は数多くなされ た.工学面でのそのような快楽的活動をいくつか紹介

^{※2.} 変数が連続変数および離散変数で制約条件や目的関数が非線形である最適化問題.離散変数のみで定式化される整数計画法自体がNP困難と呼ばれる問題クラスに属し、厳密解を効率的に求めることは絶望的とされている.連続変数や非線形関数が加わるとなおさら難しい.

表2:はやぶさ2のシステム主要諸元.

構造	-1.6m×1.0m×1.4m(H) 箱型構造, 固定型太陽電池パドル×2翼 -質量 600kg(wet), 500kg(dry)		
データ処理系	-DHU-PIMバス方式(CPU:COSMO16) -自動化自律化機能 -データレコーダー 1Gbyte		
誘導航法制御系	-2重冗長化プロセッサ(CPU:HR5000S) -リアクションホイール(×4), IRU(×2), ス タートラッカ(×2), 粗太陽センサ(×4), 加 速度センサ(×4). -小惑星近接運用航法用センサ LIDAR, LRF, ターゲットマーカー(×5), フ ラッシュランプ -航法カメラ (ONC) Wide: ONC-W1, ONC-W2 (視野 54deg×54deg, 1Mpix) Telescopic: ONC-T (視野 5.4deg×5.4deg, 1Mpix, 5 band filter)		
推進系	化学推進系 -2液ヒドラジン方式 - 20N スラスタ(×12.) 電気推進系 -マイクロ波放電式イオンエンジン(μ10) -最大推力 28mN,比推力 2800sec. -スラスタ数 4 (2軸ジンバル上に配置) -3基同時駆動(4/3冗長)		
通信系	-X帯テレコマ系 (コヒーレントXup/Xdown), 8bps-32Kbps, 完全2重冗長構成 -Ka帯高速テレメトリ系 (コヒーレントXup/Ka- down), 8bps-32Kbps -折り返し型/再生型測距システム -DDOR用トーン生成 -アンテナ: X-HGA, Ka-HGA, X-MGA(2軸ジ ンパル上に配置), X-LGA(×3)		
電源系	太陽電池 -1.4kW@1.4AU, 2.6kW@1AU. 2次電池 -リチウムイオン2次電池 13.2AH. 電力系 -シリーズスイッチングレギュレータ方式, 50V バス		
ミッションペイ ロード	-サンプラーホーン (SMP) -小型衝突機(SCI) -近赤外線分光計(NIRS3) -中間赤外カメラ (TIR) -ローパー(×3)(MINERVA-II-A1/A2/B) -着陸機(MASCOT, DLR提供) -分離カメラ(DCAM3) -再突入カプセル(CPSL)		

する.

(1) 姿勢軌道制御系(AOCS)

従来のタッチダウン運用では、ターゲットマーカー を1回の着陸に1つ投下して、小惑星相対の画像航法 を実現するが、はやぶさ2では、それに加えて、直径 2 mの人工クレーターへの着陸を実現するため、ター ゲットマーカーを複数使用したピンポイントタッチダ ウンのしくみを導入した。[5]

また、小惑星近傍での各種観測運用のためにはリア

クションホイールによる高精度姿勢制御が欠かせない が,往路3.5年の巡航中,そのリアクションホイール を極力温存するために,はやぶさやイカロス[6]で培 った,太陽光圧を積極的に利用した姿勢安定化を行う.

タッチダウン運用は、機上の自律化機能・シーケン ス管理機能と地上からの支援を組み合わせた方法が採 られているが、その運用法には多くの改良が盛り込ま れ格段に進化している[7][8].

(2) 自動化自律化機能

はやぶさ2は、地球から36億km離れた小惑星での 近傍運用やタッチダウンを行うが、これは電波で片道 20分かかる距離であり、探査機が機上で自律的に各 種判断を行うことが必須である。はやぶさ2を構成す るコンポーネントのうち、姿勢系計算機、観測装置群 を制御する計算機、バスデータ処理系システムの計算 機には、そのための自律判断と状態遷移が可能なシー ケンスプログラム機能が備わっており、初代はやぶさ からは格段に機能が向上した。一方で、各コンポーネ ントをインテリジェントにすればするほど、それらコ ンポーネント間の協調動作の検証が難しくなる。はや ぶさ2では、探査機の状態遷移を模擬する運用シミュ レータを新たに開発して、これに対処しようとしてい る。

(3)通信系

はやぶさ2の外見を特徴づけている2つの円盤形状 の平板アンテナは、ひとつが金星探査機「あかつき」 にも搭載されたラジアル給電スロットアレイ方式のX 帯ハイゲインアンテナ(HGA)であるが、もう一方は4 倍の周波数のKa帯ハイゲインアンテナである[9].こ れにより小惑星近傍で従来の4倍、最大32 Kbpsにダ ウンリンクビットレートが向上し、はやぶさに比して より多くの観測データを取得することが可能となる. Ka通信系は、はやぶさ2で新規に開発したもので、 これにより我が国の深宇宙探査機として、初めて32 GHz帯の通信システムを実現し、この分野で欧米に 肩を並べることができたことになる.現状、Ka帯の テレメトリを受信できる地上局は、米国DSN局に限 られているが、これを機運に、国内でもKa帯深宇宙 局が実現できることが望まれる.

また, はやぶさ2のX帯通信系には, DDOR(Delta Differential One-way Ranging)機能が我が国として初 めて標準装備された[10]. DDORは, 地理的に離れた



図4:幻の「独立インパクタ」ミッションコンセプト.

複数の地上局で同時に探査機からの電波を受信するこ とにより、VLBIの原理で探査機方向を精度よく決定 する軌道決定手法で、最近の米国の深宇宙探査機では 標準的に利用されている。我が国においては、イカロ スにおいてDDOR用X帯送信機が実験的に装備され たが、はやぶさ2においては主通信機に実装され、本 格的なDDOR運用に供せる状態となった。DDOR技 術により、探査機の軌道決定精度が10倍以上向上す るほか、小惑星上空滞在中、小惑星の精密な軌道決定 にも貢献できる。検出の難しいYarkovski効果の観測 の糸口になることも期待したい。

(4) イオンエンジン

イオンエンジンは、はやぶさで開発し実証された、 マイクロ波放電式イオンエンジンµ10を継承する[11]. イオンエンジンの、低推力だが高比推力(燃費が良い) という特性は、長期間の航行が常の太陽系探査に適し た推進方式であり、特にマイクロ波放電式は、原理的 に長寿命が狙える点で、太陽系探査に有利と言えよう. 我が国の太陽系探査の強みとして育てていきたい技術 である. はやぶさ2においては、初代µ10エンジンの 設計を踏襲しつつ、推力を20%向上させた、また、 はやぶさ初号機に比べてイオンエンジンシステムとし ての自律性が高まり、より運用しやすいエンジンに仕 上がっている.これにより、はやぶさ2の軌道計画に 余裕が生まれ、運用信頼性の向上と、より長い小惑星 滞在時間の確保に繋がっている.

(5) 衝突装置/分離カメラ

衝突装置(SCI)/分離カメラ(DCAM3)の技術とそ の新規性は、文献[12]を参照されたい.ここでは、は やぶさ2の初期検討段階で検討された、全く異なるミ ッションコンセプトを紹介しよう.

それは、「独立インパクタ方式」と言う(図4)[13]. はやぶさ2本体が1999JU₃滞在中に、別の探査機を小 惑星に衝突させてクレーター生成し、はやぶさ2本体 からその様子を観測しようという構想であった。別の 探査機と言っても、はやぶさ2と同一ロケットに相乗 りで打ち上がり、(小惑星ランデブーの必要がないた め)イオンエンジンを持たず弾道軌道を飛んで小惑星 に衝突する。300 kg級の探査機を3 km/sで衝突させ るため、現SCI方式(2 kg, 2 km/s)に比して2桁高い 衝突エネルギーを実現できる計画であった。米国の Deep Impactが同種の実験を行ったことがことは記憶 に新しいが,我々の計画は,(高速で通過しながらで はなく)小惑星上空に停留中のはやぶさ2から詳細に クレーター生成過程を観測できるのが売りであった. ミッションの成立性を示し提案にまでこぎつけたが, 技術的リスクとコストが,現状案(SCI方式)に比して 高く,結果として採用されなかった.

現在のSCIは,それ自身挑戦的であり工学的理学的 価値の高いミッションに仕上がっている.その裏には, 上述に代表される消えた対案がたくさんあり,トレー ドオフにより選りすぐられた技術が,はやぶさ2への 搭載の切符を手にしているのである.

(6) その他にもまだまだあります

上記は,主として工学的価値の観点に立って努力が 払われた搭載系技術の典型例として紹介した.ここで は紹介しきれないが,他のサブシステム(サンプラー 然り,カプセル然り,航法カメラ然り,その他諸々 諸々)にも,宇宙探査を前進させる,いぶし銀に光る 技術が散りばめられている.

一般に探査機の設計は、挑戦的要素と継承すべき要素、信頼性確保とコスト制約の心地よいバランスで決めていく.宇宙探査プロジェクトは、それに携わる人間にとって、長い時間と多大な労力を強いられる活動である.異例の短期開発とされるはやぶさ2でも、プロジェクト発足から打ち上げまで4.5年、地球帰還まで含めると10年超である.このような複雑かつ長期に渡るプロジェクトをまとめるには、プロジェクトに関わる個々人にとって、ミッションと技術が魅力的であることが不可欠である.プロジェクトメンバーの士気も、探査機設計という混合整数非線形計画法の重要な制約条件の一つなのである.

3. アストロダイナミクスとはやぶさ2

著者は研究者としてはアストロダイナミクスに傾倒 しており,はやぶさ2はその観点でもとても魅力的な ミッションである.はやぶさ2のサイエンスチームに は,アストロダイナミクスの分科会を作っており,ま た工学研究に主眼を置いたアストロダイナミクス研究 会も設置している[14].

アストロダイナミクスは,守備範囲が広く定義が難 しい分野なのだが,著者のイメージは,「天体力学を 人工物に応用するための学問」である.



図5:2014年後半の打ち上げをめざしシステム試験中のはやぶさ 2フライトモデル(©JAXA).

はやぶさ2において扱うアストロダイナミクスの問 題を列挙してみる.①低推力連続推力を利用した軌道 計画,②小惑星近傍での誘導航法制御,③小惑星ラン デブー時の電波・光学接近航法誘導,④小惑星の地図 作り(グローバルマッピング),⑤電波・光学情報を駆 使した重力場推定,⑥小惑星の軌道推定,⑦YORP/ Yarkovski効果,⑧クレーター生成時のイジェクタの 挙動等々.

ー言で表すならば、はやぶさ2のアストロダイナミ クスの観点での魅力は、強摂動下での姿勢・軌道運動 の探求と実践であろう.古典的なケプラー運動(二体 問題)の摂動論を超えた天体力学の複雑さ(=強摂動) を積極的に利用し運用に役立てること、小惑星の微小 重力も、太陽光圧も強摂動、イオンエンジンの推力も、 人工的な摂動として扱える.

アストロダイナミクスは歴史ある学問分野であり, 世界中の数多くの研究者により支えられている. その 一角を,アストロダイナミクスの実践の場として,小 惑星探査機はやぶさ2がけん引し貢献できたら,これ に勝る幸せ(快楽)はない.

4. 小惑星探査の将来とはやぶさ2の使命

はやぶさが実証して見せた,小惑星サンプルリターン探査は,世界の追随が激しい.米国のOSIRIS-REx ははやぶさ2と同時期に小惑星に到着するし,欧州も MarcoPolo-Rを企画中である.

思い返せば,我が国の深宇宙探査ミッションは,ハ レー彗星探査機「さきがけ」「すいせい」に始まっており, 「はやぶさ」「はやぶさ2」(図5)も含めると,小天体 探査に強みを打ち出せる土壌がある.小天体探査にお けるこの実践力は、日本の科学に対する国際的評価、 国際的なプレゼンスを高めるものであるし、その効果 を私たちは過小評価してはいけない.

こういうと、厳格な工学者からは怒られるかもしれ ないが、技術の本質は紙の上に残るものではない. は やぶさの開発経験者、運用経験者こそが、はやぶさ2 が依拠する最大のヘリテージであり、そのような人的 ヘリテージを橋頭保として、技術は進化していく. は やぶさ打ち上げからはやぶさ2打ち上げまで11年. 開 発の当事者としては、技術「者」の経験とspiritの継承 という意味で、この時間はぎりぎりであったと感じて いる.

予算規模に勝る欧米が本気を出せば、私たちの優位 性はひとたまりもない。私たちの進むべきは、機動性 高く、高頻度で、小さくてもリスクを取り、アイディ アの詰まったミッションを創出し続けることである。

小惑星サンプルリターンという探査法を世界で初め て実践するというリスクを私たちは取った. その実証 結果は,世界中でその次の計画創出に繋がった. はや ぶさ2で,新たな小天体探査のステージに私たちは進 む.はやぶさ2を,その次の小天体探査の橋頭保にし たい.

参考文献

- Yoshikawa, M., Hayabusa-2 Project Team, 2011, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-k-19.
- [2] 津田雄一ほか, 2011, 第55回宇宙科学技術連合講演 会, 1D03.
- [3] Tsuda, Y. et al., 2013, Acta Astronautica 2013, 90, 356.
- [4] 津田雄一、はやぶさ2プロジェクトチーム、2012、第 56回宇宙科学技術連合講演会、3A02.
- [5] 尾川順子ほか, 2012, 第56回宇宙科学技術連合講演 会, 3A11.
- [6] Tsuda, Y. et al., 2013, AIAA Journal of Guidance, Navigation and Control 36, 4, 967.
- [7] Mimasu, Y. et al., 2013, 19th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, FrAT1.3.
- [8] Terui F. et al., 2013, 36th Annual AAS Guidance & Control Conference, AAS13-094.

- [9] 戸田知朗,津田雄一,川原康介,2012,第56回宇宙科 学技術連合講演会,3A06.
- [10] 竹内央ほか, 2012, 第56回宇宙科学技術連合講演 会, 3A07.
- [11] 細田聡史ほか, 2012, 第56回宇宙科学技術連合講演 会, 3A09.
- [12] 荒川政彦,和田浩二,はやぶさ2SCI/DCAM3チーム,
 2013, 遊星人 22, 3, 152.
- [13] Tsuda, Y., Saiki, T., Terui, F., 2013, 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013d-19.
- [14]池田人ほか, 2013, 第13回宇宙科学シンポジウム, P2-123.

「第一回iSALE勉強会」参加報告 常 昱¹

1. はじめに

2014年2月5-6日の二日間,千葉工業大学津田沼 キャンパスにおいて,第一回iSALE勉強会が開催さ れた.

iSALEとは、ヨーロッパのグループが開発した衝 突流体計算コードの一つである。日本のコミュニティ は千葉工業大学の黒澤耕介氏を筆頭に、衝突研究会の 有志メンバーによって2014年初めに立ち上げられ、 現在29名の研究者・大学院生が参加している。本稿 はその第一回集会の報告である。本コミュニティに興 味のある方は、黒澤ほか[1]及び以下のwikiページを 参照されたい。(https://www.wakusei.jp/~impact/ wiki/iSALE/)

2. iSALEの歴史と本勉強会の趣旨

iSALE(impact SALE)とは複数の物質及びレオロジ ーを扱える衝突流体計算コードである. 1980年に Amsdenら[2]により開発されたニュートン流体のみ を扱えるSALE(Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)コードに基づき,弾性・塑性モデル,破壊 モデル,空隙モデル,状態方程式の導入を通して,惑 星科学分野における衝突研究用に改良したものである [3-5].惑星科学的な衝突現象に特化した複数のオプシ ョンを使用可能な準オープンソースとして,現在欧米 の多くの研究者に使われている.

最近では惑星スケールの衝突現象,クレーターの形 態学的特徴の解釈や実験室スケールの衝突クレーター

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 joh@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp



図1:講演の様子.

形成実験やメソスケールの衝撃変成作用の解釈などで も用いられ,衝突分野において幅広く利用されている [e.g., 6, 7].

iSALE勉強会は、近年多くの論文で見かける本衝 突流体コードを日本の惑星科学の衝突研究コミュニテ ィにも導入し、ユーザー同士の情報交換を活発に行う ために立ち上げられた。第一回会合は、まず参加者全 員が数値計算の特性及び限界を理解すること、そして 各人の計算機で本コードを走らせることができるよう になることを目標に開催された。

3. 勉強会の概要

iSALE勉強は2日に分かれて開催された.初日には iSALEや衝突流体計算への理解を深めるための講演 が行われ,2日目にはインストールしたコードで計算 し,計算結果を可視化するための実習が行われた.詳 細な日程については表1に示した.両日に行われた講 表1:iSLAE勉強会のスケジュール.

第一回 iSALE 勉強会				
日時:2014年 2	2月5日-2月6日			
場所:千葉工業ス	大学 津田沼キャンパス			
勉強会	: 6 号館 5 階 654 講義室			
ラボツン	アー:惑星探査研究センター 高速衝突実験室			
http://www.it-chib	a.ac.jp/institute/campus/tsudanuma.html			
2月5日 (水) 四	圣学編			
講師:高田淑子,	玄田英典,中村昭子,黒澤耕介			
13:00 - 13:10	黒澤耕介(千葉工大)「勉強会の趣旨説明」			
13:10-13:55	高田淑子(宮城教育大)「衝突流体計算の歴史」			
14:10-14:55	玄田英典(東工大 ELSI)「衝突流体計算の計算手順」			
15:10-15:55	中村昭子(神戸大)「物質強度・空隙モデルの解説」			
16:10 - 16:55	黒澤耕介(千葉工大)「状態方程式の解説」			
17:10-17:20	黒澤耕介(千葉工大)「iSALE について」			
19:00 - 21:00	iSALE を用いた将来研究に関する討論会			
2月6日(木)実	ミ践編&衝突実験見学			
講師:黒澤耕介,	千秋博紀,和田浩二(千葉工大)			
10:00 - 12:00	iSALE 実践			
13:30 - 14:45	千葉エ大ラボツアー:衝突実験の見学			
15:00 - 16:00	総合討論			
677.#L				
胖 就				

演内容ついて以下で簡単に紹介する.

3.1 座学編

一日目は、天体衝突の各分野より講師をお招きし、 数値計算や衝突流体計算に必要となる基礎知識の習得 を目的とした講義が行われた.各講義の詳細に関して は、wikiページに置かれている講演スライドを参考に されたい.

最初に、衝突流体計算の歴史について宮城教育大学 の高田淑子氏にご講演いただいた。1950年代に軍事 目的で開発された衝突コードの利用目的の多様化に伴 う発展の過程、モデルにおける運動の表記法や物質モ デルの記述法の違い、そして現在使われている衝突流 体計算の各種コードの系譜と特性についてご説明いた だいた。また、計算を行う上での注意点として、座標 系の対称性や境界条件の取り扱いに由来する人工的な 影響を評価することの重要性を提起した。 次に、実際のiSALEコードの中身と計算の流れに ついて、東京工業大学の玄田英典氏にご講演いただい た.衝突流体計算の核となる基礎方程式のオイラー形 式及びラグランジュ形式の解法の違いによる物理量や 計算グリッドの取り扱いの違い、iSALEにおける人 工粘性取り扱い、弾性・塑性モデルの説明とその物質 強度モデルや降伏応力モデルへの取り込み方について ご説明いただいた。そしてiSALEで行われている計 算のフローチャートとオイラー法やラグランジュ法の 組み込み方を解説し、iSALEコードを用いた計算の 流れを明確に整理していただいた。

神戸大学の中村昭子氏には, iSALEコードに組み 込まれている物質強度モデルと空隙モデルについてご 講演いただいた.まず,物質強度や破壊が重要となる 現象について紹介していただき, iSALEにおける物 質強度モデルの導入と破壊のモデルについて解説して いただいた.また, iSALEで選択可能ないくつかの



図2: 衝突銃の見学の様子.

物質強度モデルについてそれぞれ紹介された.最後に は、数値計算と実験の関係についてご自身の経験を元 にお話いただいた.

千葉工業大学の黒澤氏には、衝突計算における状態 方程式(EOSと略す)とその取り扱いの現状について ご講演いただいた.とくに、iSALE計算で使われて いる状態方程式であるTillotson EOSとANEOSの原 理及びそれぞれの長所・短所、そして各パラメータの 求め方をご説明いただいた.そして実際に計算する上 でどのEOSを使用すべきか、どこに注意すべきかに ついて解説し、目的に合わせてEOSを選ぶことの重 要性を喚起した.

最後には、iSALEコードの妥当性の確認として、一 次元衝撃波管問題の解析解との比較による内部エネル ギーや衝撃波面の再現、そして、千葉工業大学で行わ れたポリカーボネートの衝突実験結果とiSALEを用 いた計算結果の比較に基づいたクレーター形状の再現 テストの結果をお話しいただいた.また、翌日の実践 編に向けて、具体的なモデルの操作に関連したパラメ ータの説明が行われた.

3.2 実践編

3.2.1. iSALEの実行と計算結果の描画

二日目は、まず黒澤氏によるiSALEコードの使い 方のデモンストレーションが行われ、計算で使用する 際の操作方法の説明がなされた.また、計算条件の設 定方法やその合理性についても説明された.計算結果 の描画には同iSALEグループで開発された描画ソフ ト(VIMoD)を用いて解説された.参加者は事前に本



図3:参加者の集合写真.

計算コードのインストールと計算が走ることについて の確認をしてもらう予定だったが、インストール作業 が上手く行かずに手間取っている方も多く見受けられ た.

実際に計算を行ってみた印象として,まず計算条件 の設定は比較的に簡単であった. 描画ソフト(二種類 あるうちのVIMoD)は直感的な操作が可能で,数値計 算の初学者にも容易に理解できる.また,計算に用い られる各パラメータは,計算コードのインストール時 にパッケージとして配布されるマニュアルに詳細な説 明があり,それを参照することで大抵の問題は解決で きた.いくつかの数値計算を行った結果,初期のパッ ケージに入っていない物質や条件を計算する際の各物 質のパラメータ設定,そして境界条件の取り扱い等, モデルの特性についての理解が条件設定や計算結果の 解釈時に重要となることを実感した.

3.2.2. 衝突銃の見学会

本勉強会のもう一つの目玉として,千葉工業大学の ラボツアーが二日目の午後に行われた.千葉工業大学 にある二段式軽ガス銃は,日本でも最高速度である8 km/sの弾丸速度が到達可能である上に,世界最速の 超高速度ビデオカメラによる撮像が可能である.さら に,衝突の様子は高速度カメラを通して,別室で観察 することができる.衝突実験をここで実際に行ってお られる黒澤氏によって,各装置の紹介・説明とともに, 実際の衝突実験をデモンストレーションしていただい た.参加者もこのような大型装置を初めて見る者が多 く,筆者を含めて,皆興味深く説明を受けていた.

4. おわりに

今回の勉強会には実験,理論の専門の枠を超え,23 名の研究者が一同に集まってiSALEコードについて 勉強し,その応用可能性について検討した.初日の討 論会から最後の話し合いまで,活発な意見交換が行わ れた.実験,理論,観測分野の研究者が一合に会して, 意見交換を行う交流を通して,本勉強会には共同研究 の場としてのポテンシャルを感じた.筆者は本勉強会 に参加して,iSALEコードの中身についての理解が 格段に深まった.また,実験・分析結果の解釈として 手軽に使える計算コードの有用性の大きさを感じた. 今後iSALEコードの利用を通して衝突研究が活発化 することに期待したい.

今回の勉強会は初回ということもあり, iSALEコ ードを活用する上では, さらなる知識と深い理解が必 要だと感じた. 最後に取ったアンケートでは, 多くの 参加者が次回の勉強会にも意欲的な姿勢を示していた. 次回の勉強会開催時には, 有志によるiSALEを使っ た研究結果の報告が期待されている. 将来的には, 海 外のiSALEグループとの共同会議等を通して, 国内 外の衝突研究コミュニティが交流する機会が得られる こと楽しみにしている.

謝 辞

今回はこの記事を執筆する機会を黒澤さんからいた だきました.ありがとうございました.また,本勉強 会の開催に際してご尽力された千葉工業大学の皆様, 誠にありがとうございました.ここにお礼申し上げま す.

参考文献

- [1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人(本号)
- [2] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report LA-8095, 101.
- [3] Melosh, H.J. et al., 1992, JGR 97, 14735.
- [4] Ivanov, B.A. et al., 1997, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [5] Collins, G.S. et al., 2004, MAPS 39, 217.

- [6] Miljkovic, K. et al., 2013, Science 342, 724.
- [7] Kowitz, A. et al., 2013, EPSL 384, 17.



惑星物質科学は近年大きな転換期を迎えている. そ の第一の原因は、これまで入手不可能であった地球外 物質が入手可能となったためである。南極地域観測隊 による宇宙塵の大量採取.彗星塵採集計画(スターダ スト). 太陽風採集計画(GENESIS). はやぶさ小惑星 サンプルリターン計画などは、従来の隕石のみを研究 対象とした分析では決して得られなかった知見を我々 に与えてくれた. そして今年度, 次期小惑星探査機は やぶさ2がC型小惑星に向けて打ち上げ予定である。 生命の起源物質を求めるこのミッションで重要な事は、 持ち帰られた微量の試料をいかにして分析し、最大の 成果を上げるかである、本研究会集は、これらの分析 をはじめとした重要なミッションを担う人材の基本的 な議論の場である。2010年に帰還したはやぶさのサ ンプル分析においても、本研究集会の功績は計り知れ ない. Science誌に掲載された6報のはやぶさ試料の 分析結果のうち5報の主著者は本研究集会の主要メン バーである (Science 333巻, p. 1057-1188).

本研究集会は小規模ながら、国際的に極めて高い競 争力を有した伝統ある研究集会である.東京大学宇宙 線研究所の共同利用研究からの助成を受け開催してい る本研究集会は20年以上の歴史を持つ.現在,「惑星 物質科学のフロンティア」研究集会という名称で研究 集会を開催しているが,以前から同研究所からの共同 利用研究助成を受け,「宇宙塵研究集会」,「地球外起 源固体微粒子に関する総合研究」小集会と時代ととも

3. 大阪大学

に名称は変更しているものの一貫して地球外起源物質 を様々な角度から研究している研究者の交流の場とし て開催している研究会である.当初は関係者中心の研 究集会であったが,近年は関係者を中心にオープンな 研究集会として,惑星科学会をはじめとし関連学会等 にも開催を告知してもらい多様な研究者の交流の場と なるように努めている.本研究集会を通じ,探査,観 測,理論,分析といった学界の枠を超えた異分野間の 研究者交流を通じて太陽系物質進化の認識を深化させ ることが,本研究集会の大きな目的の一つである.

昨年度は、2014年3月13~14日の2日間に東京大学 宇宙線研究所大会議室において「惑星物質科学のフロ ンティア」研究集会を開催した.この研究集会は成果 発表だけではなく、異分野間での情報の共有を図るた めに研究の解説や今後の研究につなげるための意見交 換なども積極的に行っている.本報告では、昨年度開 催された研究集会での発表概要を紹介する.

1.2013年度研究集会の概要

1.1 プログラム

「惑星物質科学のフロンティア」研究集会プログラム 日時:2014年3月13日(木)~14日(金) 場所:東京大学宇宙線研究所大会議室(千葉県柏市) 【1日目】

- 1) 羽場麻希子,長尾敬介,角野浩史,三河内岳(東大), 小松陸美(早大),Michael Zolensky(NASA):ロシ ア・チェリャビンスク隕石の希ガス同位体分析
- 2) 今栄直也(極地研):新たに開発した手法によるコン

^{1.} 学習院大学

^{2.} 日本原子力研究開発機構

toshio.murakami@gakushuin.ac.jp

ドリュールメルトへのシリカに富むガスの凝縮に伴う急速かつ大量の低Ca 輝石の析出実験

 平井隆之(総研大),矢野創(ISAS/JAXA): IKAROS-ALADDINにより明らかになった周太陽 ダスト凝集域の微細構造

4)ビジネスミーティング

【2日目】

- 5) 松本 徹(阪大) [代読:土山教授(京大)]:小惑星イ トカワのレゴリス粒子の表面微細構造から考察する レゴリスの宇宙風化
- 6)土山 明(京大):イトカワレゴリス粒子の3次元形状:高速衝突実験破片および月レゴリス粒子との比較
- 7)尾上哲治(熊本大),佐藤峰南(九大),中村智樹(東 北大),野口高明(茨城大),大澤崇人,初川雄一(原 子力研究開発機構),海老原充,白井直樹,日高義 浩(首都大学東京),鈴木勝彦,野崎達夫(海洋研究 開発機構):【招待講演】日本から発見された2億 1500万年前のイジェクタ堆積物
- 8)柴田裕実(阪大),石川優人,松田知之,金子竹男, 小林憲正(横浜国大),三重野 哲(静岡大),長谷川 直(宇宙研):超高速ダスト衝突による有機物生成実 験
- 9)大澤崇人(原子力研究開発機構):即発ガンマ線分析の自動化システムの開発と応用可能性
- (10)寺田健太郎(阪大): SIMSからSNMSへ:次世代局 所U-Pb年代分析の基礎開発

1.2 研究発表の概要

前節のプログラムの通り,探査,観測,理論,分析 の各分野の成果発表,分析機器開発に関する報告,予 備的実験の報告などがなされた.報告の概要は以下の 通りである.

羽場(東京大学)らは、昨年ロシアに落下したチェリ ャビンスク隕石の破片13個をもとに希ガス同位体分 析を行い、宇宙線照射年代、各破片の大気圏突入前の 天体における表面からの深さを求める試みに関する発 表を行った.また、1つの隕石破片について、Ar-Ar およびI-Xe年代測定を行うことにより、チェリャビ ンスク隕石の母天体における熱史について考察を行っ たことを報告した.He,Ne,Ar同位体組成から、分 析試料には宇宙線生成核種が含まれていることが確認 されたが,隕石破片によって宇宙線生成核種の濃度が 異なることが確認された.この宇宙線生成核種の濃度 の違いは、チェリャビンスク隕石の大気圏突入前の天 体が大きく、それぞれの破片が異なる深さに存在して いたことを示している.破片の一つHR-7において得 られた21Neと81Krの濃度から、宇宙線照射年代を求 めた.Ar-Ar年代およびI-Xe年代から、チェリャビン スク隕石の母天体では衝突イベントによって脱ガスが 生じており、複雑な熱史を経験していることが示唆さ れた.

今栄(極地研究所)は、低Ca輝石(およびその多形) は太陽系岩石圏を構成する最も主要な相である。原始 太陽系星雲における低Ca輝石(エンスタタイト, MgSiO3, Mg/Si=1)の析出問題について、実験的に検 討した。この目的のため、実験装置を新たに開発しそ の概要と実験結果について報告した。

平井(総合研究大学院大学)らは、JAXAのソーラー 電力セイル小型実証機「IKAROS」に搭載されたダス トその場計測器「ALADDIN」の開発についての解説 と実際の観測結果の解釈のために開発中の新しいダス ト分布モデルの試計算結果の紹介を行った.試計算結 果は従来のモデルに比べ、より宇宙実測に近い値を示 すことができたことを報告した.

松本(大阪大学,代読:土山教授)は,はやぶさが回 収してきたイトカワ粒子の表面モルフォロジーに注目 し,粒子表面構造の系統的な分類・解釈を行うととも に,宇宙風化リムの観察を行い,小惑星表層のレゴリ ス粒子の形成・進化過程と小惑星の宇宙風化過程との 関連性を明らかにすることを目的にした研究の成果発 表を行った.X線マイクロトモグラフィーによる3次 元外形の評価,FE-SEMによる表面微細構造の観察, TEM/STEMを用いた宇宙風化リムの断面構造観察を 行い,それらの結果から表面観察のみで粒子表面の宇 宙風化の程度を判断できることを示した.

土山(京都大学)は、新たにJAXAから配分された イトカワ粒子、新たな月レゴリス粒子(10084: Apollo 11の静かの海のソイル、60501: Apollo 16のデカルト 高地のソイル)、および新たにおこなった高速衝突実 験[1]により回収された破片粒子の3次元形状を、 SPring-8のビームラインBL47XUにX線CTにより求 めた.さらに、ノギスによる測定に対応するCT像か らの3軸長測定の手法を開発し、イトカワ粒子、月粒 子,衝突実験粒子の3次元形状を同じ方法で比較する ことにより,イトカワ表面でのレゴリス粒子の生成・ 進化をより詳細に理解するとともに,月も含めた大気 のない天体での表面プロセスを包括的に理解すること をめざした研究の現状について報告した.従来の研究 ではイトカワと月粒子の形状分布は明瞭に区別できる ものと考えられていたが,今回明らかとなった連続的 な変化は,イトカワ・月粒子の形状が同じプロセス(摩 耗と破壊)に支配されていると考えると説明しやすい ことを示した.

尾上(熊本大学)らは、岐阜県坂祝町において、2億 1500万年前に形成されたと考えられるイジェクタ堆 積物を発見しネイチャー・コミュニケーションズに発 表した. この発表についての詳細な解説を行い、今後 について報告した.この地域では、三畳紀後期に太平 洋の中~低緯度域で堆積した層状チャートとよばれる 主に大量の放散虫殻から構成される岩石が観察される が、今回発見された約2億1500万年前の層状チャート には、放散虫殻をほとんど含まない粘土岩(層厚約5 cm)が一時的に堆積したことが明らかになった.この 粘土岩には、ニッケルに富む磁鉄鉱やスフェルールな どの隕石衝突に起源を持つと考えられる粒子が含まれ、 これらをICP質量分析装置や多重ガンマ線分析装置を 用いて元素分析を行ったところ地球上の火山活動など のプロセスでは説明できないほど過剰な高濃度の白金 族元素を検出した. 白金族元素の異常を示す粘土岩に ついてOs同位体比を測定したところ、コンドライト 隕石に特有の低いOs同位体比が得られ、これらの結 果から巨大隕石の衝突により蒸発した隕石由来の大量 の白金族元素が海洋に供給され、最終的に深海底の堆 積物中に固定されたことを意味していると解説した. 今後、隕石衝突が引き起こした環境変動や絶滅につい て詳細な研究を進めていく予定であると締めくくった.

柴田(大阪大学)らは、アストロバイオロジーの観点 から宇宙ダストの模擬衝突実験を行い、まず、どのよ うな有機物質が生成されるのかを調べることを目的と する研究の初期実験結果について報告した.宇宙ダス トを模した球状のアルミナやポリカーボネート粒子を 約6 km/sに加速し、ポリカーボネートの板及び炭素 円板標的に衝突させた.現在までの衝突後の標的を電 子顕微鏡、ラマン分光、EPMAを用いて標的の形態 測定及び照射クレータの分析を行った結果を報告した. 今後、衝突後に標的周りを囲ったアルミフォイルに付着した物質をアルコールや水等で抽出し、電子顕微鏡 や赤外吸収分光、レーザー脱離イオン化質量分析器で 質量分析を行った後、加水分解し液体クロマトグラフ ィにて分析を行う予定であり、化学反応生成物に関し てはこれらの分析で明らかになると思われると報告し た.

大澤(原子力研究開発機構)は、原子力科学研究所の 研究炉JPR-3に設置されている即発ガンマ線分析装置 に垂直多関節ロボットを導入した経緯を詳細に解説し た.LabVIEWで開発した制御プログラムで完全な自 動分析が可能になり、ヘリウムの自動流量制御、画像 認識を用いたフェールセーフ機能、中性子フラックス 自動記録、自動メール配信機能など、機能を満載した ことを紹介した.今回の装置の開発により、多数の試 料の非破壊分析の効率化を実現し、今後の地球、惑星 科学への発展に多大な貢献をするものになることを示 した.

寺田(大阪大学)は、サブミロン領域における高精度 U-Pb年代測定を行うことを目指し、0.1 µm径まで絞 れるGaイオン源+フェムト秒レーザー+多重周回型 Time of Flight (MULTUM II) からなる装置の開発現 状について報告した。ウラン放射壊変系を利用した岩 石・化石試料のU-Pb年代分析法は、太陽系の進化や 地球史を明らかにする上で重要な絶対年代情報を与え る.特に、ウランを多く含む閉鎖温度の高い鉱物(ジ ルコンやアパタイトなど)をターゲットにした、2次 イオン質量分析(SIMS)による局所U-Pb年代分析は、 地球惑星科学の発展に多大な貢献をしてきたが, SIMSの場合、1次イオンビーム(酸素イオン)による スパッタリングで生成されるU+, Pb+のイオン化効 率は1%以下と低く、スパッタされた殆どの中性粒子 は無駄に消費されているのが最大の難点であった。そ こで寺田らのグループでは、高強度レーザー照射によ って中性原子をポストイオン化することでイオン収量 を増加させるレーザーイオン化SNMS(Sputtered Neutral Mass Spectrometry)の開発を行ってきた[2] ことを解説した.

2. 今後の活動

この研究集会の成果は共同利用研究成果として東京

大学宇宙線研究所で発表され、またWEBサイトでも 概要を一部公開してきました。WEBサイトのリニュ ーアルも検討しているので研究集会での成果など情報 発信も積極的に行いたいと考えています。リニューア ル中のサイトを以下の通り公開しております。

http://dust.cc.gakushuin.ac.jp/ICRR_meeting/

今後も研究集会を継続して開催していく予定ですの で,分野を問わず興味のある方は是非ご参加ください. なお,この研究集会は東京大学宇宙線研究所共同利用 研究助成をうけて開催してきました.

参考文献

- [1] 島田玲, 2014, 修士論文, 大阪大学.
- [2] Ishihara, M. et al., 2010, Surf. Interface Anal. 42, 1598.



月惑星探査育英会が主催する第7回月惑星探査デー タ解析実習会が2014年3月6日(木)から8日(土)まで 会津大学で行われました(図1).本実習会は、将来の 惑星探査を担う人材の育成と地球惑星科学教育の拡充 を目指して、2009年から毎年1-2回のペースで継続 的に開催されている短期集中型の実習会です。7回目 を迎える今回のテーマは「可視 – 近赤外スペクトルデ ータから探る月面表層情報」でした. 日本の月探査機 「かぐや」によって観測された精細な分光データを参 加者が自ら解析して月表層の岩石や鉱物・風化につい て学ぶことが目的です。国立環境研究所の山本聡さん と会津大学CAIST/ARC-Spaceの小川佳子が「かぐや」 の分光データの解析の手ほどきをしました. かぐや/ スペクトルプロファイラーデータの取り扱い. 地理情 報システムを使った解析、そして、スペクトルと鉱物・ 風化の関係を、実際のデータに触れながら理解してい くことを具体的な作業達成目標としました.

初日は実際にデータに触ってみることを目的として, 読み出し方や可視化・グラフ化のやり方を学びました. 二日目からは基礎較正と解析の演習,会津大学が中心 となり昨年度開発された月面連続分光データビューワ 「月光」(http://fructus.u-aizu.ac.jp)を用いてデータを 可視化する演習に取り組みました.最終日三日目の午 後には参加者それぞれが実際に解析した結果を紹介す る発表会を行いました.

4. 名古屋大学大学大学院環境学研究科

参加者は、東北大学、会津大学、総研大学、名古屋 大学、京都大学、大阪大学の大学院生8名でした。参 加者同士が教えあう場面も見られました。参加者が、 今回の実習会で得たスキルや知識・経験を、ぜひ自分 の現在そして今後の新しい研究に役立てていって頂け ればと思います。

最後に今回の実習会の開催にあたり,資金面および 運営面で後援を頂きました日本惑星科学会と神戸大学 惑星科学研究センター,宇宙航空研究開発機構 (JAXA)に心よりお礼申し上げます.どうもありがと うございました.今後もこのような将来の惑星探査を 担う人材の育成を掲げる実習会が継続的に開催されて いくことを祈っております.(小川)

かぐや/スペクトルプロファイラー(SP)データは, 画像データと違って、反射分光データの集合形式にな っているため、慣れていないユーザーにとって非常に 取り扱いにくいです.一方、最初から賢い可視化ツー ルを使ってしまうと、「講師の指示に従ってただボタ ンをポチポチ押すだけの実習会」になってしまい、長 い目で見た時に、学部生・大学院生の方々にとって、 結局なんの役にも立たなくなるのではないかという危 惧がありました、そこで、思い切って、SPデータと 正面切って戦うハードな実習内容(世話人の小林さん 曰く「ストロングスタイル」)にしてみたわけです。一 方で,そのハードさ故に,参加者の皆さんが途中で挫 けてしまわないか心配でもありました、ところが、参 加者の皆さんは、思いの外、楽しそうにかつ熱意を持 って取り組んでくれたことに驚きました。また、皆さ んの基礎能力の高さと、決して諦めない熱意のお陰で、

^{1.} 会津大学CAIST/ARC-Space

^{2.} 国立環境研究所

^{3.} 神戸大学 CPS

^{5.} ISAS/JAXA

yoshiko@u-aizu.ac.jp

当初の予定以上のレベルまで進めることができました. ということで,講師としてもとてもやりがいのある実 習会になったと思います.今回の実習会が今後各人の 研究においてSPデータを使うきっかけとなってもら えれば幸いです.(山本聡)

Webサイト: https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/ top/?school mission-7

開催日程:

- 2014年3月6日(木)13:00~
 - 2014年3月8日(土)17:00
- **開催場所**:会津大学 研究棟東棟 M11 教室
- **主 催**:月惑星探查育英会 実行委員会
- **共 催**:月科学研究会
- 後 援:神戸大学惑星科学研究センター(CPS),日本 惑星科学会,宇宙航空研究開発機構
- 内 容:
 - 月面表層物質の一般知識・概論
 - ・可視 近赤外波長域連続分光データを用いた月面
 表層へのアプローチ:月科学研究の紹介
 - ・かぐや/可視-近赤外連続分光データの取り扱い

課題演習:

- 1. かぐや/可視-近赤外連続分光データを用いた,
 - (1-a)輝度値データから反射率データの作成
 - (1-b)太陽距離を補正した反射率の作成
 - (1-c) コンティニューム(連続光成分)を差し引い た鉱物吸収帯の把握
- かぐや/可視-近赤外連続分光データの基礎校正:反射率補正係数の作成
- 3. 月面連続分光データビューワ「月光」の紹介,風 化度指標の算出と評価
- 講 師:山本聡(国立環境研究所),小川佳子(会津大学)
- T A:橋本涼(会津大),石山謙(東北大),加藤伸祐 (名大),伊藤晋(会津大),岡崎瑞祈(阪大)

参加者:

14名(学部生1名,博士前期課程·修士課程学生5名, 博士後期課程学生2名,教員6名)

世話人:

小川佳子,出村裕英,平田成,本田親寿,北里宏平 (会津大),山本哲生(CPS),諸田智克(名大),小林 直樹(ISAS/JAXA)

参加者の感想:

岡崎瑞祈(大阪大学理学部物理学科専攻 B4)

今回の実習会は、私は惑星科学会のメーリングリス トで知り、指導教官の佐々木晶先生に勧められて参加 した.卒業研究に当たって実験試料のスペクトルデー タを取り解析していたが、エクセルを用いて自分なり の指標を考えるなどにとどまっており、勉強の必要性 を感じていた.また、探査データとの照合が目的の根 底にあるのに惑星探査についてよく知らなかったとい うことに気付かされ、学ぶことの多い実習会となった.

旅費の関係もありTAに志願したが,この実習会の レベルを知らないままに志願してしまい,事前資料で 他の参加者の方が修士,博士課程の方ばかりで私が最 年少だったことを知り,また内容が学生実験で触れた 程度ですでに忘れかけているCのプログラミングであ ることに気付き,TAを志願したことを後悔した.他 の参加者の方は,月の探査データを使って解析をして いる人など探査データの扱いに慣れている人もおられ, 自分がちょっと場違いな気がして不安になってしまっ た.

だが実際に実習が始まると,講師の山本先生,小川 先生の講義内容が非常に興味深く,純粋に学ぶことが 楽しかった.プログラミングの実習に入っても、「cd」 「ls」といった基本から質問してしまったり,windows の設定に悩まされたりと苦戦したのはもちろんだが, 周りの先生方に助けていただきながらもグラフを上手 く表示できた時,データ処理できた時の感動は,今で も覚えている.研究の醍醐味とはこういうものなのか もしれないとその時少しだが感じることができたのは 大きかった.

実習会はこじんまりしたものであったため一人ひと りの先生方、学生の方とお話することができたことも 今回実習会に参加してよかったことの一つである.い ろんな研究が随所で行われていることを知り、自分の 研究のことしか眼中になかった自分が、いかに狭い世 界にいたかということに気付かされた.会津大も学部 が一つしかなくコンピュータ関係に特化していたり、 データを気軽に見られる「月光」が開発されていたりと、 会津大での研究を知るのも興味深かった.

今までなんとなくプログラミングを避けてきていた が、今回具体的な解析の仕方も学ぶことができたので、 自分の研究に応用していきたい、今後もこのような実 習会に積極的に参加していきたと思った.

最後に,この実習会でお世話になったすべての皆様 に,この場をお借りして御礼申し上げます.

加藤 伸祐(名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科 学専攻 M1)

非常に充実した3日間でした.講師のお二方には非 常に丁寧に解説をして頂いたり質問に答えて頂いたり して,理解しやすかったです.また,学生も意識の高 い方ばかりで,とても良い刺激になりました.SPの データは以前から使ってみたいと思っていましたが, 今回の実習会で利用方法が分かったので,今後の研究 で積極的に利用していきたいと思いました.また,月 光は非常に便利で,画像との対応が簡単であり,欲し い地点のデータが容易に取得できるという点にとても 感動しました.今後も利用できたら良いと思います. 最後に,この実習会を通してお世話になった全ての方 に厚くお礼申し上げます.

嵩 由芙子(京都大学理学研究科地球惑星科学専攻 D1)

私は月表面の組成の違いを見るため,Multi-band Imager(MI)データや可視画像を主に使ってきた.MI が多色撮像であるのに対し,SPは連続分光であるため, SPデータを使えばより精確に鉱物量比を決めること ができる.この実習会を機に,SPデータの使い方を 習得し,最先端で研究される方々の月表層組成の解釈 などに少しでも触れたいと思い解析実習会へ参加を希 望した.

まず,月の一般知識の再認識やSPデータとは何か, SPデータを使った最新の研究の紹介などから始まり, データの取得方法,そして生の連続分光データを解釈 可能なレベルまで処理する方法を教わった.具体的に は,輝度値として得られた分光データを反射率へ変換 する方法や,各波長の反射率データをグラフにプロッ ト,異常値の排除,コンティニュームを引く方法をC 言語を使った実習形式で行われた.これらの手順を踏 んで初めて,どの波長に吸収帯があり,どのような鉱 物が分布しているのか解釈をいれることができる.す でに使いやすい形でデータが提供されていると,つい 生データがどのような処理をほどこされて提供されて いるのか知ることをおごそかにしてしまいがちなので, 非常にいい経験であった.また独りで学ぶと瑣末なと ころで躓きがちだが、プロから教わったおかげでずっ と早く、正確に、要点を押さえられました. C言語に あまり馴染みがなく、ついていくのに必死だったが、 講師の方々の丁寧な指導に非常に助けられた. スクリ プトを書いたり、ソフトを使ったりする時にいかに自 分が今までそのときやりたいことができればいいとい う勉強に仕方をしてきたかを思い知らされました. し っかり復習をして自分のものにしたいと思います.

データのユーザーとして理解しておかなければなら ないことを学んだ後、こうした煩雑な処理をすでに完 了した状態で提供してくれるデータビューア「月光」 の紹介が行われた.「月光」では、同時観測された可 視画像上にSPデータのデータ点が表示され、表示さ れているスペクトルプロファイルは月のどの地点なの か正確に知ることができる.これは非常に簡便で、あ の地点の組成はどんなかな?この地点は??と非常に 面白くやめられない.今後もぜひ使っていきたいと思 った.

SPデータの本質的な理解から始まり,便利なツー ルの紹介まで,最初から最後まで非常に勉強になりま した.実習会は本当に実りが多く,しっかり復習をし て,今後SPデータを使っていきたいと思います.最 後になりましたが,御講師の方々,世話人の皆様方に は大変お世話になりました.行き詰っているときにも 丁寧に教えてくださったおかげでみんなと同じメニュ ーをこなすことができました.ここに感謝の意を示し たいと思います.どうもありがとうございました.

■アンケート集計結果(括弧内は回答人数):

1. 本実習を知った経緯

学会メーリングリスト(3),指導教官・研究仲間・世 話人からの紹介(2),(何らかの)メール(2),前回実 習会でアナウンス(1)

2. 参加理由

反射スペクトルのプログラム処理・データ解析を学 ぶため(2),かぐや/スペクトルプロファイラーデ ータの扱い方を知りたかった(2),自分の研究に活 かせる知識を学ぶため(2),自分の研究に必要であ るため(1),宇宙全般・GIS解析について知ること ができると思ったから(1)



図1:実習会参加者の集合写真.2014年3月8日会津大学実習会会場にて.

3. 実習難易度

ちょうど良かった(4), なんとかついていけた(2), 課題をこなすだけで精一杯(1), 難しかった(1)

4. 講師·TAに求めること

丁寧に教えて貰えた(3),特になし(2),専門用語が 多かったので事前に資料が欲しい(1),無回答(2)

5. 今後取り上げてほしいトピック(複数回答可)

はやぶさのデータ,小惑星イトカワ表面の分析,海 外のデータ,重力場,もっと多くの種類の解析手法 について(どんな時に使うのか?どのように使うの か?),かぐや/LRSデータを使った実習・SAR処理 の手法,かぐや/LMGデータを使った実習・月深部 の進化

6. 自由記述欄(複数回答可)

惑星探査データの解析手法を学ぶことができ、参考 になった(2)、主成分分析等学びたいと考えていた ことができてよかった(1)、皆様に助けて頂き何と か進めることがきた(1)、かぐや/スペクトルプロ ファイラーデータについてしっかり理解することが できた(1)、今後の自分の研究に活かしていきたい (1)、実行環境を同じにした方が進め易いのでパソ コンの貸し出しをしてほしい(1)、PCがMacだっ たからよかった(1)、ありがとうございました(4)

2014年度秋季講演会のお知らせ

2014年度日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(東北大LOC) 中村 智樹

本年度の日本惑星科学会秋季講演会を東北大学片平 さくらホールにおいて開催致します.本講演会は日本 惑星科学会が主催し,東北大学理学研究科共催の下に 開催されます.未だ検討中の事項もありますが,以下 では,2014年4月末時点での予定をお知らせ致します. 詳細については本会ホームページhttps://www. wakuseijp/上に随時掲載致します.多数の皆様のご 参加をお待ちしております.

1. 日程と会場

●日程

2014年9月24日(水)~9月26日(金)

9月25日(木)に総会と懇親会,および今年度の最優 秀研究者賞受賞講演会を予定しています.

なお、9月23日(火・祝)に一般向けの講演会を予定 しています.(第8項をご参照ください.)

●講演会場

東北大学片平さくらホール

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1-1

(受付は1階, 講演会場は2階会議室, ポスターセッションは1階ラウンジ)

地図は東北大学のアクセスマップをご覧下さい.

●懇親会

東北大学片平さくらホール 1階にて,9月25日 (木)19:00から行う予定です.

2. 発表要項

●発表資格

著者に本会の会員を含むこと.

1.東北大学 aloc-ml@wakusei.jp

●発表形式とプログラム編成

口頭発表またはポスター発表.

今回の秋季講演会でもポスター発表を充実させたい と考えていますので、積極的なご応募をお待ちしてい ます.但し申込み数の関係で発表形式のご希望に添え ないことがあります.原則として、同一の方が第一著 者として複数件発表される場合、口頭発表は1件まで とさせて頂きます.発表の採否も含め、プログラム編 成については実行委員会が最終的に決定致します.予 めご了承下さい.

●口頭発表

1講演につき10-12分程度(質疑応答も含む)を予 定しています.スクリーンを1面,液晶プロジェクタ を一台利用可能です.

●ポスター発表

ポスターセッションを設けます.ポスター会場は講 演会場1階ラウンジとなります.一人当たりのポスタ ースペースはA0用紙を縦張りできるサイズを予定し ています.

●最優秀発表賞セッション

本講演において第一著者として発表する博士学位を 有していない学生会員は、最優秀発表賞に応募できま す.最優秀発表賞セッションに採択された発表者には 口頭発表とポスター発表の両方を行って頂きます.別 途定める今年度の要領に従ってください.詳細は本会 メーリングリスト(oml)および本会ホームページ 「2014年秋季講演会のお知らせ」でお知らせ致します.

●予稿原稿

本会ホームページに記載された指示に従ってくださ い. なお, インターネットが利用できない方は「9.そ 2014年秋季講演会のお知らせ

の他」の項をご覧ください.

3. 参加および発表の申込み方法

本会ホームページよりお申込み下さい.申込みには 事前参加・発表・予稿原稿の三段階の登録手順があり, すべて本会ホームページ上で行います.これらの登録 には次の(1)(2)の両方が必要になります.

(1)本会の会員番号もしくは非会員登録番号(2)本会 ホームページに会員または非会員としてログインする ためのパスワード.本会への新規入会登録および非会 員登録も本会ホームページから行ってください.なお, 非会員登録には一日以上,新規入会登録には二週間以 上かかりますので,発表申込みを予定されている非会 員の方はできる限り早目に登録手続きを開始してくだ さい.

郵便振替口座 振込先

口座記号番号:02280-3-114635

口座名称(漢字): JSPS 東北大LOC

口座名称(カナ):ジェーエスピーエストウホク ダイエルオーシー

他銀行等からのお振込みの場合は以下をご利用下さい. 銀行名[金融機関コード]:ゆうちょ銀行[9900] 店名[店番]:二二九(ニニキュウ)店[229] 預金種目:当座 口座番号:0114635 申込みの詳細は,本会メーリングリスト(oml)と本会 ホームページでお知らせします.

4. 本秋季講演会までの主なスケジュール(予定)

2014年6月2日(月)事前参加申込・発表申込・事前 支払・予稿原稿の受付開始
2014年7月7日(月)最優秀発表賞申込の受付締切
2014年7月14日(月)発表申込締切
2014年8月22日(金)予稿原稿の受付締切
2014年8月29日(金)事前参加申込・事前支払の受 付締切

5. 予稿集について

本年度は予稿集の冊子体での販売を行いません.講 演会に先立って本会ホームページにPDFを用意する 予定です.また、当日受付にてお手持ちのPCにコピーするためのCD-Rを準備する予定です.

6. 参加費用

費用項目		事前支払	当日支払
参	一般会員	3,000 円	4,000 円
加 費	学生会員	2,000円 ※	3,000円 ※
	非会員	5,000円 ※	5,000円 ※
懇親会費	一般会員	4,500 円	6,000 円
	学生会員	2,500 円	3,000 円
	非会員	4,500 円	6,000 円

※非発表の学部生・M1に限り、参加費を無料とし ます。

7. 交通手段・食事など

東北大学片平さくらホールは、仙台駅前からバスで 約10分程です。仙台駅前バス停11番乗り場もしくは 12番乗り場からのバスに乗車し、東北大正門前下車 となります。詳しくは、下記をご参照ください。

http://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/ campus/01/katahira/

また,東北大学片平さくらホールは仙台市中心部に 位置しており,近くには多くの飲食店がございます. http://dateuma.jp/menu/index.html

8. 一般向け講演会の開催について

- 日 時:2014年9月23日(火・祝)
- 場 所:東北大学片平さくらホール 〒 980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1-1
- 講 演:(1)國中 均(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学 研究所・教授)

題目:「はやぶさ2」が拓く宇宙探査

- (2)渡邊 誠一郎(名古屋大学大学院環境科学 研究科・教授)
 - 題目:「はやぶさ2」が探る惑星科学
- 主 催:日本惑星科学会
- 共 催:東北大学理学研究科

9. その他

(1)乳幼児を同伴され保育サービスのご利用を検討されている方は、下記までお早めにご相談ください. 最寄りの保育施設などを紹介いたします.なお、保育費用の一部を学会が補助します.また、受付締切後も可能な範囲で対応いたしますので、お気軽にご連絡ください.お待ちしています.

受付締切:7月27日(日)

担当:高田 淑子

E-mail: aloc-takuji@wakusei.jp

(2)秋季講演会の申込にあたり、インターネットが利用できない方、またご不明な点がおありの方は、 下記までお問い合わせください。

> 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3 東北大学大学院理学研究科地学専攻 中村智樹 FAX:022-795-5903

(3)このお知らせの内容は、やむを得ない事情が発生した場合にその一部が変更される可能性があります、本会ホームページで最新の情報をご確認下さい。

JSPS Information

◇日本惑星科学会第105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105回運営委員会議事録

期 間:2014年2月14日(金)~2月21日(金)

議 題:秋季講演会予稿集の見直しの承認

運営委員会委員:

出席者 23名

田近英一,渡邊誠一郎,倉本 圭,中村昭子,荒川政彦,林 祥介,生駒大洋,渡部潤一,並木則行, 永原裕子,井田 茂,千秋博紀,はしもとじょーじ,平田 成,荒井朋子,小久保英一郎,藤本正樹, 橘 省吾,佐々木晶,野 信一,小林直樹,中本泰史,杉田精司

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

議題.秋季講演会予稿集の見直し(冊子版の作成・希望参加者への配布を行ってきたのを改め, PDFダウンロード版をHPに置くことにする)の承認

<中村昭子行事部会長からの説明>

現状,予稿集冊子の作成・配布はほぼ実費で行われているが,2012年・2013年の両LOCから,予稿集冊子作 成について見直すことの提案があった.2013年の場合,遠隔会場であったため,現地への送付にコストがかかっ た.また,有料予稿集を扱うことでお金を扱う手間が余計にかかるとの指摘があった.

他方, 2014年LOCからは,

a. 予稿集冊子体を配布

b. 予稿集PDFの入ったUSBを配布

c. PDFダウンロード版をHPに置く

のいずれも対応可(ただしどれか一つのみを希望)と伺っている.

行事部会としては、会員の手間は増える面もあるが、LOCの手間の簡素化を目指してc案を採用し、事前に会員がダウンロードしたり印刷したりできるように、講演会開催前(例えば2週間前など、あらかじめLOCから予告された時期に)に公開することを提案したい.

2012年の場合,印刷所に入稿したファイルは約17MBだったとのこと.2013年は,約46MB.(目安として,表 紙等~5MB+200kB×200件程度とのこと)

この場合,事前に予稿集を見られなかった方(例えば,当日になって参加を決めた方など)への学会当日の対応

- として,
 - ・受付等で希望者に電子ファイルを受け渡す,か,
 - ・受付等に予稿集閲覧用PCを準備する,か,
 - ・受付等に閲覧用のプリントアウト版を用意する,か,
 - ・学会会場のいずれかにwifiを用意する

等,LOC・会場の事情に応じた対応をあわせてお願いすることとする.

現在の予稿集送付先については、賛助会員・NIIには電子版を行事部会がCD-ROMに焼くなりして送付、国立 国会図書館にはニーズを確認して対応する(必要とあらば、プリントアウト版を行事部会が1部だけ作る)ので良 いと考える.

議題は全会一致で承認された(可23, 否0).

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2014年6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.

2014/06

6/24-27 第16回流れの可視化に関する国際会議(ISFV16)

(a)沖縄コンベンションセンター,沖縄県宜野湾市

(b)可視化情報学会(日本惑星科学会協賛)

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

172

2014/07

- 7/21-22 第42回可視化情報シンポジウム (a)工学院大学 新宿キャンパス,東京都新宿区
 - (b)可視化情報学会(日本惑星科学会協賛)
 - (c)http://www.visualization.jp/event/detail/vsjsymp2014top.html

2014/09

9/15-17 日本流体力学会 年会2014

(a)東北大学 川内北キャンパス講義棟, 宮城県仙台市(b)日本流体力学会(日本惑星科学会協賛)

 $(c)\,http://www2.nagare.or.jp/nenkai2014/index.html$

9/24-26 日本惑星科学会 秋季講演会

(a)東北大学 片平キャンパスさくらホール, 宮城県仙台市
(b)日本惑星科学会
(c)https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/

2014/11

11/22-24 第55回高圧討論会

(a)徳島大学 常三島キャンパス,徳島県徳島市

(b)日本高圧力学会(日本惑星科学会協賛)

(c)http://www.highpressure.jp/new/55forum/

On Line Publishing & Data Base Service

TERRAPUB

英文校正サービス

ジャーナル投稿,プロシーディング,書籍(編著/単著)等 専門のネイティブが校正をいたします.

【対応分野】

地球科学,物理学,数学,生物学

【作業の流れ】

原稿は電子ファイル(MS word もしくは PDF)でいただきます.紙上での手書きと なります.手書きの修正原稿をスキャニングの上,PDF ファイルでご返却いたします.

【お支払い方法】

料金後払いです.銀行振込またはクレジットカード(VISA, MASTER CARD)での 決済が可能です.機関(公費)払いも対応いたします.

【お見積もり・ご依頼・お問い合わせ】 Email: tagawa@terrapub.co.jp URL: http://www.terrapub.co.jp/english_editing

Online Monograph

Monographs on Environment, Earth and Planets (MEEP)

http://www.terrapub.co.jp/onlinemonographs/meep

Open Access

Trans-Neptunian Objects as Natural Probes to the Unknown Solar System Patryk Sofia Lykawka

Monogr. Environ. Earth Planets, Vol. 1 (No. 3), pp. 121-186, 2012 doi:10.5047/meep.2012.00103.0121



近刊のご案内

An Introduction to Space Instrumentation Edited by K. Oyama and C. Z. Cheng 税込 15,000 円,発売日: 2013 年 12 月 Hard cover, 240+viii pp. ISBN: 978-4-88704-160-8 【ご購入はこちらまで】 Email: sales@terrapub.co.jp URL: http://www.terrapub.co.jp/books アマゾンでもご購入いただけます

TERRAPUB 〒 158-0083 東京都世田谷区奥沢 5-27-19-2003 Tel: 03-3718-7500 Fax: 03-3718-4406 URL: http://www.terrapub.co.jp

編集後記

先日行われた連合大会ではお世話になりました.今年 は会場を例年の幕張から横浜に移しての開催で,一部の 部屋が異常に狭いなどの問題はありましたが,部屋数の 多さや周辺の飲食環境を総合すると良かったのではない かと思います.また,惑星科学会に関係する大きな変化 として,宇宙惑星科学セクションでも学生発表賞を設け たことが挙げられます.私が聴いた講演に限れば,発表 賞があることで例年よりも学生の発表の質を上げると同 時に,聴く側の意識も高める効果をもたらした印象でした. 話は変わります.私はもともと記憶力のあるほうでは

ないのですが、最近は特に物忘れが激しいです。海馬の 調子が絶望的に悪いです。様々な書類の締切、メールの 返事を忘れがちです.家庭サービスの予定も忘れて出張 や飲み会の予定を入れてしまい,妻によく怒られます. しかし飲み会の約束は忘れません.そんな私が編集幹事 のお仕事を致命的なミスをせずにこなせているのは,惑 星科学会の"顔"である遊星人[はしもと,2008,遊星人17, 93]に泥をぬってはいけない,という思いからくる緊張感 をかろうじて保っているからかもしれません.しかし人 の慣れとは恐ろしいもので,そのような緊張感はすぐに 失われてしまいます.学会発表もしかりです.先日の連 合大会の学生発表賞エントリーの講演を聴いて,緊張感 を失ってしまった自分の最近の発表を見つめ直す良い機 会になりました. (諸田) 編集委員 はしもとじょーじ [編集長], 諸田 智克 [編集幹事], 石原 吉明 [特集「チェリャビンスクイベントと天体衝突リスク」ゲスト・エディター], 生駒 大洋,上椙 真之,岡崎 隆司,奥地 拓生,木村 勇気,倉本 圭,小久保 英一郎,白石 浩章, 杉山 耕一朗,関口 朋彦,田中 秀和,谷川 享行,成田 憲保,本田 親寿,三浦 均,山本 聡, 渡部 潤一,渡部 直樹,和田 浩二

2014年6月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第23巻 第2号

定価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 はしもと じょーじ(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社

発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階 株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会 e-mail:staff@wakusei.jp

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

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています.

複写される方へ

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

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

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

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

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