
日本惑星科学会誌 遊・星・人

第28巻 第2号

目次

巻頭言 齋藤 義文	123
-----------	-----

活動的小惑星の理解に向けて

脇田 茂, 瀧 哲朗, 伊藤 孝士	124
-------------------	-----

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その38 ～超長時間日陰クリア!～

豊田 裕之, 山崎 敦, 今村 剛	140
-------------------	-----

火の鳥「はやぶさ」未来編 その18

～はやぶさ2の高精度タッチダウンの裏側～	143
----------------------	-----

菊地 翔太, はやぶさ2プロジェクトチーム

遊星百景 その16 ～フォボスとエロスの線状構造～ 菊地 紘	150
--------------------------------	-----

宇宙における生命の起源と生命探査:惑星科学フロンティアセミナー2018参加報告

野口 克行, 木村 駿太	153
--------------	-----

2019年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ 河北 秀世	157
-------------------------------	-----

2019年度助成事業2件公募のご案内 公益財団法人 宇宙科学振興会	159
-----------------------------------	-----

学位論文タイトル紹介	160
------------	-----

JSPS Information	161
------------------	-----

Contents

Preface	Y. Saito	123
<hr/>		
Toward the understanding of Active Asteroids	S. Wakita, T. Taki, and T. Ito	124
<hr/>		
Road to the first star : Venus orbiter from Japan (38) — Survival in ultra-long umbra —	H. Toyota, A. Yamazaki, and T. Imamura	140
Phoenix “Hayabusa”: A tale of the future (18) — Design of the Hayabusa2 precision landing —	S. Kikuchi and Hayabusa2 project team	143
My favorite view in planetary sciences (16) — Lineaments on Phobos and Eros —	H. Kikuchi	150
Report on the planetary science frontier seminar 2018	K. Noguchi and S. Kimura	153
Announcement for 2019 annual meeting	H. Kawakita	157
Announcement of public offering for 2019 grants	Society for Promotion of Space Science	159
Recent theses in planetary sciences		160
JSPS Information		161

巻頭言

月日の過ぎ去るのは早いものである。初めて宇宙研に来て衛星プロジェクトに関わった頃はどこへ行っても最も年下で、毎日が知らないことだらけだった。それらの日々はいつの間にかどこかへ過ぎ去ってしまい、ふと気がつくと、自分より若い人が殆どという状況に戸惑っていたりする。私が初めて本格的に惑星探査に関わるようになったのは「かぐや」であった。このプロジェクトで初めて自分の技術と呼べるものを投入してイオン質量分析器を開発し、それまで誰も見たことのなかった月周辺イオンのデータを手にすることができた。そして初めて物質の質量を知ることの奥深さと面白さを体感することができた。衛星搭載観測装置の開発に関わると毎回のことではあるが搭載準備完了まで失敗や問題発生の連続であり、一瞬たりとも心の休まる時は無かった。特にこの時の質量分析器には電圧差3万ボルトというそれまで使ったことの無い超高電圧を使用する必要がある、繰り返す放電を如何に防ぐかを考え続けた日々でもあった。我々はこの質量分析器を宇宙研D棟3階の実験室で開発し、かぐやの運用はその一つ上の4階にできた運用室で行われた。それまで数年にわたって格闘して来た質量分析器が月の周りを飛んでおり、それをすぐ近くの部屋で操っているというのは不思議な感覚であったが同時に大きな満足感を得た瞬間でもあった。いま「はやぶさ2」がリュウグウで活躍しているが、遠く離れた装置を操る緊張感と面白さはわかる気がする。この時以来、私は観測で得られるパラメータのうち、質量の虜となった。現在も質量分析器の開発を続けているのはこの故である。これから先も、日本は月そして火星よりもっと遠い世界へと出かけて行くに違いない。私自身が手を動かす機会は減っていくだろうが、この面白さを次の世代に伝えて新しい世界をみたい。かつて授業が終わると「少年老い易く学成り難し・・・階前の梧葉已に秋声」とわけも分からず暗唱させられた遠い記憶がある。もう少年では無いがこの言葉を思い出して精進することにしてしよう。

齋藤 義文(宇宙科学研究所・太陽系科学研究系)

活動的小惑星の理解に向けて

脇田 茂^{1,2,*}, 瀧 哲朗¹, 伊藤 孝士^{1,3}

2019年3月14日受領, 査読を経て2019年4月25日受理.

(要旨) 太陽系内に存在する小天体を活動的な天体とそれ以外に分ける時, 前者の代表は彗星であり, 後者の代表は小惑星と言えよう. ところが昨今, 小惑星に分類されるものの彗星で見られるダストテイルが観測されるような天体が続々と発見されている. こうした天体は活動的小惑星と総称され, それらの実態や活動の原因を知ることが太陽系内の物質輸送や力学進化・衝突進化を理解することに繋がる. 本稿では活動的小惑星を通して太陽系の歴史を読み解くことを目指して私達が開催した一連の勉強会で得られた知見のまとめを記し, 更には活動的小惑星の今後の研究の方向についていくつかの考察を行う.

1. はじめに

一つの主題に沿った勉強会をしようという意見が著者の中で持ち上がったのは2017年春のことである. その中で『活動的小惑星』(active asteroids)が特に重要でありかつ時宜に叶っているという意見が出された. 活動的小惑星は最近の観測でいくつも見つかったはいるが, 業界内であれこれ取り沙汰されている割にはその実体には不明な点が多い. 逆に言えば今後の観測研究の対象としてのみならず理論的な研究, そして将来的な探査の候補天体としても興味深い. また, その起源や彗星との相違を探ることは小惑星帯の形成から太陽系の歴史の解明にまでつながるので, 今後の研究の発展性も見込める. これらが勉強会開催の動機であった. さて, 勉強会を始めようとしたのは良いが, 専門家でもない著者らが自力で調べて理解できる範囲には限界がある. そこで, 筆者らを含む国立天文台の有志が開催していた太陽系科学セミナーの枠内に活動的小惑星の勉強会を設け, 外部から講師を招いて活動的小惑星や広い意味での太陽系小天体に関わる様々な話題

を提供して頂くことにした(末尾の補遺1に記した活動的小惑星勉強会での講演一覧を参照のこと). 結果的にこの企画は大いに成功したものと私達は考えている. 本稿ではこの勉強会を通して私達が学んだ活動的小惑星の研究前線を紹介するとともに, 私達が考える今後の研究方向について一筆を記す.

2. 活動的小惑星の『活動』例

活動的小惑星を一言で表現すれば, 小惑星的な軌道を持ちながらもダストなどを活発に放出する現象が観測される天体となる. その定義はJewitt博士によると以下である[1]: 軌道半長径が木星のそれより小さく, 同時に天体軌道要素の指標の一つであるTisserandパラメータ(木星に対するもの. 詳細は補遺2を参照)が3.08以上であり, なおかつコマや質量損失が確認されている天体. こうした天体は以前はメインベルト彗星(main belt comets, MBCs)と呼ばれていた[2]. しかしメインベルトすなわち小惑星帯以外でも上記の条件に合致する天体が発見されたこと, また天体の活動性の要因を推定させない呼び名の方が望ましいことから, 最近ではより一般的な『活動的小惑星』という呼称が与えられている[1, 3]. これまでに約20個の活動的小惑星が確認されており[1], 候補天体を含めればさら

1. 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト

2. 東京工業大学 地球生命研究所

3. 国立天文台 天文データセンター

* ブラウン大学 地球環境惑星科学科(本稿掲載時)
shigeru@kyudai.jp

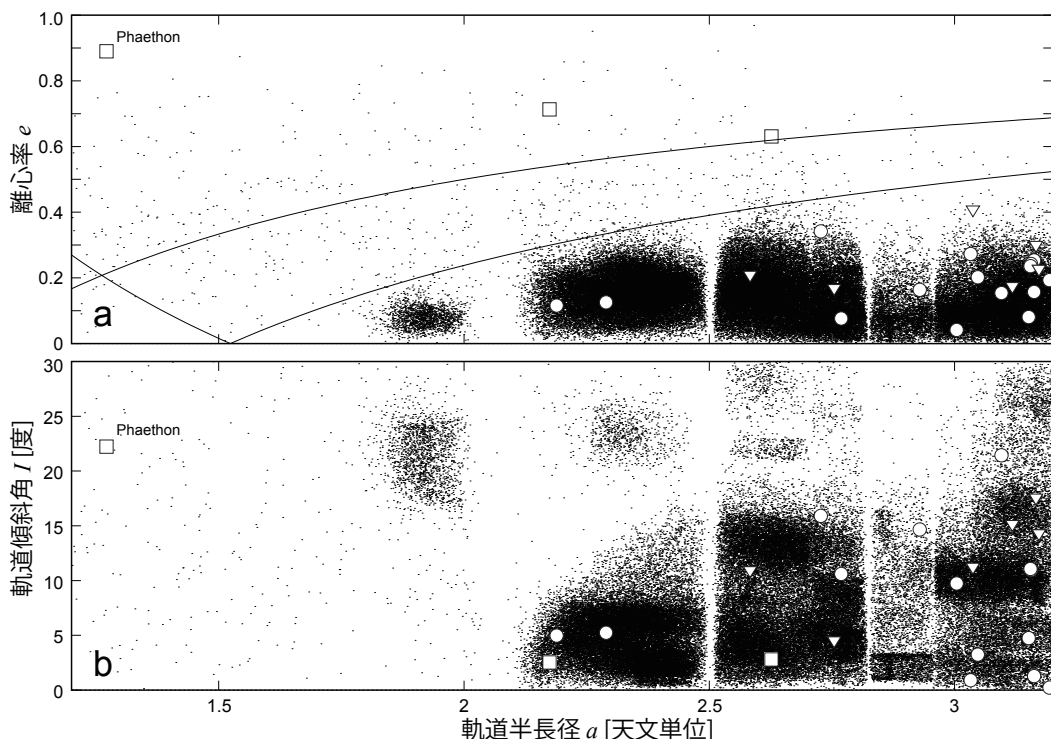


図1：活動的小惑星の軌道要素，具体的には軌道半長径・離心率・軌道傾斜角の分布（軌道要素にはこの他に近日点指数・昇交点黄経・平均近日距離などがあるが，ここでは扱わない）。（a）軌道半長径 a [天文単位] と離心率 e ，（b）軌道半長径 a と軌道傾斜角 i [度]。パネル（a）内に記された二本の実線は小天体の近日点・遠日点が惑星の軌道（地球・火星）と交差する位置を示すものである。具体的には， $e = 1 - a_p/a$ （これ以上の離心率を小惑星が持つとその近日点位置が惑星軌道と交差する）および $e = -1 + a_p/a$ （これ以上の離心率を小惑星が持つとその遠日点位置が惑星軌道と交差する）の二式を図示した。活動的小惑星の定義は研究者により異なるので，ここでは文献 [1] と [5] によるものを両方とも描画した（活動的小惑星の軌道要素は表1を参照のこと）。図中の丸（○）は文献 [1] と [5] の両方で扱われている活動的小惑星を示し，四角（□）は文献 [1] でのみ定義された活動的小惑星，そして三角（▽）は文献 [5] でのみ定義された活動的小惑星を示す。他から離れて左上隅に位置する (3200) Phaethon についてはラベルを書き入れた。背景の黒点はこの領域に存在する主な小惑星であり，米国Lowell天文台が配布する astorb.dat (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.dat>, 2018年9月28日時点のファイル) に含まれる番号付き天体から50,000個を選び出し描画した。文献 [1] による活動的小惑星の定義は以下であり，近地球小惑星が含まれている (p. 221)：「活動的小惑星とは (1) その軌道半長径が木星のそれよりも小さく ($a < a_J$)，(2) Tisserand/パラメータが3.08より大きく ($T_J > 3.08$)，(3) コマや尾のように質量放出の証拠を示す小天体である。」文献 [5] による定義は以下であり，近地球小惑星は含まれていない (p. 1)：「活動的小惑星とはコマのような質量放出を示しつつも力学的には小惑星的な軌道を示す天体である (典型的にはTisserand/パラメータが $T_J > 3.00$ ，かつ軌道半長径が木星のそれより小さい)。なおかつそれらの天体の軌道は火星および木星の軌道半長径と交差せず，またそれらの軌道半長径は木星との4:1平均運動共鳴と2:1平均運動共鳴の間にあるとする。具体的には2.065天文単位と3.278天文単位の間である。」なお文献 [5] のTable 1のように活動的小惑星を固有軌道要素で記述することもある。固有軌道要素とは時間変化する小天体の軌道要素から公転運動に起因する短周期の変動を差し引き，かつ惑星摂動による強制的な振動を取り除いたものであり，小惑星の族の同定などに用いられる [6-8]。しかしすべての小天体に関して固有軌道要素が定義できるわけではない。例えばPhaethonは軌道半長径の時間変動が激しすぎるため，固有軌道要素を定義し難い (AstDyS-2, <https://newton.spacedys.com/astdys/>)。従って本図を含む本稿では或る特定の時点における小天体の軌道要素，いわゆる接触軌道要素を使って議論を行なっている。もしも固有軌道要素を用いて上のパネル(a) (b) を描画すればメインベルト内にある小惑星のグループ，すなわち小惑星の族がより明確に浮かび上がるはずである [9-11]。

に多くの例が挙げられている [4, 5] (図1および表1)。以下では3つの活動的小惑星を例に挙げ，観測からわかるその特徴を簡単に記す [1]。

まず小惑星 (596) Scheila (直径 113 km, 幾何アルベド 0.04) では彗星でみられる特徴，つまりダストテイ

ルによく似たダストプリュームが2010年後半に観測された [12-14]。しかし，二本見えていたこのダストプリュームは観測から一ヶ月後には見えなくなった。この結果は何らかの機構によって Scheila からダストが吹き飛ばされたこと，しかし Scheila から継続的な

表1: 図1に描画された活動的小惑星の軌道半長径, 離心率, 軌道傾斜角, およびそれらから計算された木星に対するTisserandパラメータ(T_J). 軌道要素はJPL Small-Body Database Search Engine (https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)による. 活動的小惑星には文献[1,5]の両方で定義された天体, [1]のみで定義された天体, [5]のみで定義された天体があり, ここではすべてをまとめて軌道半長径の小さい順に並べた. 軌道半長径の単位は天文単位, 軌道傾斜角の単位は度である. なお文献[5]ではP/2013 R3を破片P/2013 R3-AとP/2013 R3-Bの二種に分けて扱っているが, 両者の軌道は非常に類似しているため, この表および図1ではP/2013 R3という単独の天体として扱った. これは文献[1]と同様の方式である. Tisserandパラメータ T_J の詳細については補遺2を参照のこと.

天体名	軌道半長径	離心率	軌道傾斜角	T_J	文献
(3200) Phaethon	1.2711206	0.8901263	22.2330984	4.507999	[1]
(2201) Oljato	2.1742902	0.7129028	2.5224346	3.297624	[1]
311P/PANSTARRS (P/2013 P5)	2.1885349	0.1152981	4.9684530	3.660016	[1,5]
354P/LINEAR (P/2010 A2)	2.2897068	0.1249711	5.2559323	3.582237	[1,5]
P/2016 G1 (PANSTARRS)	2.5832245	0.2100280	10.9684787	3.366013	[5]
107P/(4015) Wilson-Harrington	2.6266115	0.6308639	2.7982932	3.081302	[1]
259P/Garradd (P/2008 R1)	2.7274409	0.3415298	15.8985360	3.215839	[1,5]
P/2015 X6 (PANSTARRS)	2.7547137	0.1696788	4.5580508	3.317710	[5]
(1) Ceres	2.7691651	0.0760090	10.5940673	3.308290	[1,5]
(596) Scheila	2.9287515	0.1633217	14.6614024	3.208091	[1,5]
331P/Gibbs (P/2012 F5)	3.0040795	0.0420181	9.7395765	3.227888	[1,5]
P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS)	3.0329314	0.2734481	0.8989340	3.183541	[1,5]
233P/La Sagra	3.0373273	0.4090273	11.2764286	3.079923	[5]
288P/(300163) 2006 VW139	3.0471690	0.2012537	3.2403616	3.203784	[1,5]
324P/La Sagra (P/2010 R2)	3.0959290	0.1537844	21.4169575	3.099179	[1,5]
(493) Griseldis	3.1178902	0.1757269	15.1734893	3.139215	[5]
(62412) 2000 SY178	3.1512919	0.0809660	4.7372586	3.196647	[1,5]
358P/PANSTARRS (P/2012 T1)	3.1548350	0.2358779	11.0593748	3.134010	[1,5]
313P/Gibbs (P/2014 S4)	3.1557850	0.2422329	10.9662610	3.131814	[1,5]
238P/Read (P/2005 U1)	3.1619850	0.2531970	1.2661637	3.152931	[1,5]
133P/(7968) Elst-Pizarro	3.1621532	0.1572493	1.3892735	3.184217	[1,5]
348P/PANSTARRS	3.1658555	0.3012252	17.5853059	3.061041	[5]
P/2016 J1-B (PANSTARRS)	3.1720144	0.2282307	14.3311557	3.112837	[5]
P/2016 J1-A (PANSTARRS)	3.1720919	0.2282649	14.3301939	3.112809	[5]
176P/(118401) LINEAR	3.1937491	0.1927881	0.2346660	3.166160	[1,5]

ダストの供給は行われていないこと, の二点を意味する. Scheilaのダストプルームを観測できた期間がわずか一ヶ月であることや, 見積もられたガスの質量損失率が小さい(上限値の推定しかできなかった)ことから, ダストプルームは一時的な現象であったと理解される[15, 16]. この天体のように, ダストプルームなど物質の放出が観測されるもののそれが定常的には継続せず短期間で終息することは, 活動的小惑星の特徴の一つである.

次にP/2013 R3(Catalina-PANSTARRS)という天体については, 2013年後半に10個ほどの分裂破片が確認され, その後も数ヶ月にわたって観測された[17, 18](図2). この天体の幾何アルベドを彗星的天体の典型値である0.05と仮定すれば, 四つほどある大型の破片の大きさは200 m以下となる[17]. 一方でこの天体は上記のScheilaとは異なり分裂破片を持つことが観

測されたこと, またダストを観測できた期間がScheilaよりも長いことから, その活動の要因はScheilaのそれと異なることが想像される.

そして活動的小惑星の話題で欠くことのできない天体が近地球小惑星(3200)Phaethonである. PhaethonはApollo群の近地球小惑星であり, 赤外線天文衛星IRASのサーベイ観測により1983年に発見された. Phaethonはその軌道類似性からふたご座流星群の母天体とされ, 過去には彗星の活動が盛んであったと推定される[19]. しかし他の流星群母天体(例えばしし座流星群の母天体55P/Tempel-Tuttle. その他の主な流星群については<https://www.nao.ac.jp/astro/basic/major-meteor-shower.html>を参照のこと)とは異なり, 現在ではPhaethonが活発な彗星の活動を見せることはない. 但しこの天体は近日点へ回帰するたびに一時的なダスト放出を見せる. これは近日点($q = 0.14$ 天

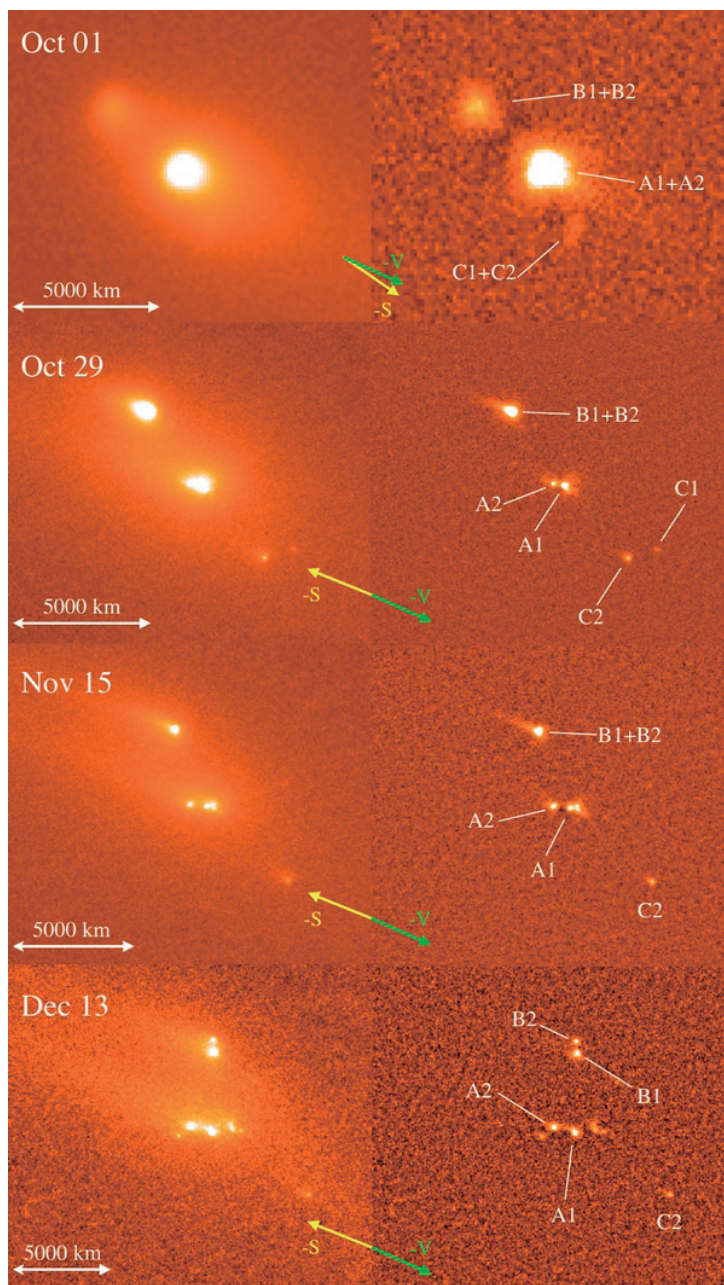


図2：活動的小惑星の典型例であるP/2013 R3の四つの異なる時期における活動を示す画像。文献[17]の Fig. 1を転載したものであり、著者のDavid Jewitt博士およびAmerican Astronomical Society (AAS) から掲載許可を得ている。左欄は生画像であり、右欄は拡散したコマを見えにくくするために空間的フィルタをかけたもの。Oct 01 (2013年10月1日)のデータはKeck望遠鏡から取得され、その他 (Oct 29, Nov 15, Dec 13)のデータはHubble宇宙望遠鏡 (HST) から取得された。各々の画像は上が北、左が東で、視野の大きさは14" x 12"。投影された反太陽方向は矢印 "-S" で示されており、投影された速度 (の逆方向) は矢印 "-V" で示されている。図中にあるA1, A2, B1などは文献[17]の本文で言及された各々の成分の呼称である。本稿のオンライン版にはこの図が原論文のままのカラーで掲載されている。

文単位)付近でこの天体が強い太陽加熱を受けるためと考えられている(第3節で詳しく述べる)。この定期的なダスト放出により Phaethon は活動的小惑星に分類される。

このように活動的小惑星の活動は天体によって異なった様相を見せる。それらはもちろん各天体の活動性の起源(機構)の違いを反映している。なお活動的小惑星のいわば裏返しの概念として枯渇彗星(extinct comets)という分類がある。(5335)Damoclesが典型例であり、同様の小天体はダモクロイドと呼ばれている[20, 21]。これらは活動性を持っていることが当たり前と思われる彗星的な天体なのに活動性が見つからないものであり、太古には活動的であったものの、長いこと近日点回帰を繰り返した末に活動性が枯渇してしまったと考えられる。これは活動性を持つことが期待されていなかったのに活動性を示す活動的小惑星とは対照的な天体と言えるが、見方を変えれば小惑星と彗星の境界がいかに曖昧かつ不明瞭であるかを示す証左でもある。小天体を彗星と小惑星に二分し、見た目の活動性の有無や Tisserand パラメータのような軌道性質を両者の境界とする時代は過去のものとなった。小惑星の中にも活動する天体があり、彗星の中にも活動しない天体がある。その曖昧さは太陽系小天体の著しい多様性を示し、同時に太陽系の力学進化と物質輸送を解き明かす鍵を秘めている。

3. 活動性の機構とその起源

活動的小惑星の活動性の源は何か?ダストテイルなどの放出物はどこで発生し、どのような機構で放出されているのか?こうした疑問にはまだ明快な答えが与えられておらず、いくつかの機構が提案される段階である[1]。第2節で例に挙げた活動的小惑星では活動性の継続する時間がそれぞれ異なっていた。このことから、天体によってその活動性の機構が異なることが推測できる。

小惑星として発見され、しかし後には近日点を通過する度に活動性を示すことが確認された最初の天体が133P/(7968)Elst-Pizarroである。この天体では1996年に初めて活動性が確認され、その後も2002年、2007年、2013年に活動性が見られた[22-24]。ここでは彗星と同様に、氷の昇華によって生じたダストの放

出が活動性の源であると考えられる[1]。続いて発見された活動的小惑星である238P/Read [25]や313P/Gibbs [26]も同様の機構で活動的になると考えられ、どれも近日点通過の前後に活動性が確認されるのが特徴である。一般に、氷の昇華が活動的小惑星の活動性として検出されるには幾つの場合がある。氷の昇華による継続的なダスト発生が長期間にわたり観測される場合や、天体のコマに氷が含まれてそれが検出される場合である[1]。第2節で示したP/2013 R3でも数ヶ月にわたりダスト放出が検出され続けたことから、この天体においても氷の昇華が発生したとも考えられる[18](図2)。しかしながら、この機構ではP/2013 R3に見られる大きな破片の放出を説明しにくい。そこで、分裂破片の速度分散が小さく最大破片からの脱出速度と同程度であることから、天体の自転に起因する分裂(自転崩壊)がP/2013 R3の破片を生成し、それに伴いダストが放出されるという機構が提案された[27]。2013年に9ヶ月にわたりダスト放出が観測された天体311P/PANSTARRS(P/2013 P5)も、やはり自転による天体の崩壊がダストを放出したと考えられている。なお311P/PANSTARRSで氷による昇華機構が棄却される理由は、この天体の軌道が小惑星の族の一つであるFlora族に近いことが関連している。Flora族の構成員の多くはその分光学的性質がLLコンドライト(普通コンドライト隕石の一種)と関連しており[28]、もともと氷を含んでいない、もしくは含んでいたとしても既に昇華した天体だと考えられている。実際に311P/PANSTARRSは(主に岩石から構成される)S型小惑星に分類され、そのことも氷の昇華による活動機構を棄却する理由となる[29]。このように活動的小惑星は小惑星の族と関連性を持つこともあり、両者の関係を調べた研究もある[5]。周知のように小惑星の族は天体同士の衝突破壊により作られる[30]。こうした関連性は、活動的小惑星の活動機構とその天体自身の起源を同時に考える上で重要である。

活動的小惑星のダスト放出期間がScheilaのように短い場合には、他天体との衝突が活動性を駆動する機構の有力な候補となる。実際に、Scheilaのダストブリューム形状の変化の時系列は衝突によるダスト発生をモデル化した数値計算でよく再現できる[31]。また同様のモデル計算により、P/2010 A2(LINEAR)の活動性も天体衝突に起因することが示唆されている[32]。

33]. これら一連の数値モデル計算に関しては私達の勉強会において石黒正晃氏に詳細な解説を頂いた。なおこうした活動性は単一の機構ではなく、複数の機構の組み合わせにより生じる場合もあろう。例えば衝突により天体内部の水が露出して昇華し、それが活動性として観測されるという説もある[5, 34]。水を主成分とするダスト放出がある程度の期間以上にわたり観測されるためには、複数回の天体衝突と昇華が必要となる。しかしそのためには活動的小惑星の初期の含水(氷)量が複数回の天体衝突でも失われないほど多い必要があり、その可能性に関する議論が現在も続いている[5, 34]。

Phaethonのように著しく太陽に近づく天体では、太陽加熱がその表面状態に無視できない影響を与えることは自明である[35, 36]。近太陽小惑星の物理進化に太陽加熱が重大な効果を持つことは小惑星の力学モデルからも明確に示されている。現在最も信頼できる近地球小惑星の定常力学モデルは、小惑星が太陽に近づくごとに少しずつ破碎され、元々の大きさに応じて寿命は異なるものの最終的には消滅し得ることを示唆する[37]。天体のこうした破碎過程においては当然ながら活動性が見られるだろう。Phaethonで観測される近日点付近での一時的なダスト放出の過程は未だ説明されたとは言えないが、各種の理論モデル研究が少しずつ進められている。例えば熱的な破壊により地表面で生成されたダストがこの天体の発する輻射圧と自転による遠心力により浮き上がって加速され、その一部が太陽輻射圧で吹き飛ばされるといった描像である[38]。天体表面の昼夜境界線(いわゆる「ターミネーター」)付近で働く電場の効果を定量的に調査し、太陽輻射圧が有効となる高度まで地表のダストが持ち上げられ得ることを実証した研究もある[39]。

ここまで述べた各種の要因による天体の活動性(氷の昇華、自転による崩壊、天体衝突、太陽加熱による破碎、等)はそれぞれ継続する時間スケールが違う上に、その活動性が示唆する天体の組成も異なる。そのため活動性を糸口として活動的小惑星の起源を考察する際には、活動性が観測された期間の長さに応じて場合分けする必要がある。例えば、原始太陽系星雲内で水が形成される軌道半半径(スノーラインまたは雪線)よりも内側で形成された天体が活動的になるためには天体同士の衝突が起こる必要がある。そして、この距離よ

りも外側で形成された天体は氷の昇華がきっかけとなって活動的小惑星となりうる(この辺りをより正確に論じるには地球型惑星領域へ供給された水の起源についても考察する必要がある。これについては第4節で触れる)。前述したように前者の天体ではダスト放出の期間が短くなり、後者の天体ではそれが長期もしくは周期的となる。したがって氷の昇華が活動性として観察される天体の含水量を検証し、それを遠方で形成したことが確実な彗星と比較することで、形成過程に関する議論を行うことが可能かもしれない。

本稿に記すまでもなく小惑星、とりわけ小惑星帯にあるそれらが辿ってきた歴史は衝突の歴史であり、したがって活動的小惑星の活動性の要因の一端を衝突現象に求めることはごく自然である。そうした背景の事実を学ぶため、私達の勉強会においては衝突に伴う小惑星帯での質量分布の時間進化、またそこから考えられる過去の小惑星帯の姿を小林浩氏に詳述して頂いた。現在の小惑星帯にある大きさが100 km以上の天体は惑星形成期に作られたと考えられる[40]。一方でそれより小さな天体の多くは100 km以上の天体が衝突破壊を繰り返すことで形作られた[41]。表1にある活動的小惑星の中で100 km以上のサイズを持つものはほぼない。つまり現代に観測される活動的小惑星も他の多くの小惑星と同様に、元々は100 kmサイズだった天体が衝突破壊してできた破片のはずである。惑星の形成過程と活動的小惑星の関連については第4節でも述べる。

一方、小惑星が衝突破壊されればその破片が地球へ隕石として飛来し得る。この話題に関し、反射スペクトルの観点から探る小惑星と隕石(とりわけ炭素質コンドライト)の関連性について廣井孝弘氏より詳細に解説して頂いた。隕石には太陽系初期の情報が含まれており、しかも宇宙空間ではなく私達の手元にあるという利点から、詳細な分析が可能となる。この視点からは、山野辺正邦氏からも隕石に含まれる始原的な固体物質(大きさが100 μm 程度のコンドリュール)における酸素同位体組成などの分析結果を解説して頂き、そこから推定される太陽系内での物質輸送の描像をお話し頂いた。その描像には活動的小惑星の進化を解き明かす道筋も潜在的に含まれている。昨今は小惑星帯における天体の反射スペクトル分布が巨大惑星の動径方向移動により作られたとする説[42]や、早期に形成

された巨大惑星の存在によって太陽系内物質がかなり初期から二分割されていたとの説もある[43]. 活動的小惑星のダストプリュームの詳細な組成をその場観測などで検証し、それを地上の隕石や他の小惑星と比較することによって、活動的小惑星の衝突史や形成過程が推定できるかもしれない。その結果は巨大惑星の早期形成説や移動説に対する支持もしくは棄却につながり、太陽系内の物質輸送史を解明するための一歩となり得る。

4. 活動的小惑星から見る惑星形成過程

一般に研究者はその専門性が高まるにつれ、近隣分野に目が届かなくなりがちである。太陽系小天体の分野もご多分に漏れず、小惑星への興味と言う観点からのみ小惑星の研究を行なう研究者も少なからず存在する。けれども昨今の惑星科学の広がりや周辺分野へ与える影響を考えると、こうした研究態度はやや寂しい。活動的小惑星は惑星科学の中でも際立って学際的な研究対象であり、そこから得られる知見は惑星科学全般、とりわけその起源を明らかにしようとする惑星形成過程の研究において大きな意義を持つ。例えば活動的小惑星は原始太陽系星雲中での始原天体(微惑星)の形成過程、地球型惑星の水の起源、木星の形成時期、惑星の動径方向移動など、惑星系形成論における多くの重大なトピックと深く関わっている。本節はそれらに関する記載である。

最近の研究により、小惑星帯(メインベルト)は現在ある天体よりも大きな天体同士の衝突で作られた破片、もしくはその集合体であることがわかってきた[40, 41]。破片の元となった大きな天体は現存しないので、現在の小惑星帯の観測から太陽系最初期の様子を直接探ることは容易ではない。小惑星帯は太陽系の進化の結果として必然的に出現したものであるが、形成された時点での情報(初期条件)の多くを忘れてしまったとも言える。しかし活動的小惑星については、これらの天体が活動的になったのが比較的新しい時代だと思えば、通常の小惑星の観測・探査ではわからない、あるいはわかりづらい天体内部の新鮮な(すなわち太陽系形成最初期の)情報に直結する物証になる可能性がある。更に、その活動性が水(氷)の蒸発(昇華)に駆動される天体は分化した天体の破片ではなく、それ自身が

始原的な天体なのかもしれない。本節ではこれまでの観測や探査から太陽系小天体について知られている事と同等もしくはそれ以上の物事が将来の活動的小惑星の研究から判明するという楽観的な推測に基付き、活動的小惑星の研究が惑星形成論に与える影響について幾つか考察を行う。

まずは微惑星の形成過程を考える。読者の多くはご存知のように、これまでのところ微惑星の形成過程に対して実質的な制約を付ける事ができた研究はない。最新の微惑星形成モデルが持つ描像は概ね以下の二種に大別される。ひとつは微小な固体同士が衝突を繰り返して直接合体成長するものであり、もうひとつは微小な固体の集団が何らかの不安定性を介して短い時間内に微惑星の大きさまで成長するものである。前者の代表格は固体微粒子の集合体(ダストアグリゲイト)の付着成長モデルである[44]。このモデルは氷微粒子の成長過程において現在の太陽系に見られる彗星(氷を主成分とする微惑星の生き残り)と想定できると整合的な内部密度を再現可能な点でも注目される[45]。岩石を主成分とする微惑星が同様のメカニズムで形成できるか否かは長年議論されてきた[46-49]。隕石などの地球外物質からはそれを構成する粒子サイズの多様性が報告されている[50-53]一方で、ダストアグリゲイトを構成する粒子サイズが小さい場合[54]やシリケート粒子の表面エネルギーの再検討[55-57]、また粒子表面の有機物層の存在可能性[50, 56, 58]に関する議論を考慮すれば、このような付着成長機構が岩石微惑星でも働くことは十分に考えられる。これに対して後者の描像を代表するものは、ガスとダストの相互作用を起因とする不安定性機構(ストリーミング不安定性[59, 60])により生成されるダスト雲(もしくはダストが濃集した領域)の自己重力収縮モデルである[61, 62](特に文献[62]は不安定性を介した微惑星形成の詳しいレビューである)。原始太陽系星雲、より一般的に言えば原始惑星系円盤に存在する成長途中の固体粒子は、ガスから抵抗を受けることで円盤内を移動する。その途中で特定サイズの固体粒子が不安定性を介して集合し、遂には自己の重力で収縮を始めることで微惑星が形成されるという像をこのモデルは描く。

上述した二つの微惑星形成モデルはどちらも有力と見做されており、いずれか一方を強く支持または棄却する観測的・実験的な証拠は今のところ提出されてい

ない。しかしながら、ストリーミング不安定性などダストの濃集を前提とするモデルが正しいならば微惑星はその形成時にサイズによる選別が行われている（「集まりやすい」粒子のサイズ領域が存在する）ことになり、微惑星もしくはそれが現在まで生き残った天体の内部構造はそのサイズ頻度分布を反映した何らかの特徴を持つ可能性がある。したがって活動的小惑星の研究から小天体を構成する微粒子の平均的なサイズ頻度分布の情報を引き出すことができれば、惑星形成論における長年の大課題である微惑星形成問題に重大な制約を与え得る。ある小天体を構成する微粒子のサイズ頻度分布を知るには、隕石などの地球外物質を分析するという方法もある。試料が手元にあるという利点を活かし、実験室において精度の高い分析を行うことができる。しかしながら隕石の飛来元である小天体、つまり隕石母天体の特定はそう容易ではない。また小天体から飛び出した小さな破片である隕石は小天体表面のある一部分から採取された試料と言える。一方、本節で想定している活動的小惑星の遠隔的な観測では、小天体表面の一部分ではなく広い範囲から噴出された微粒子のサイズ頻度分布の情報を取得し得る。もちろん、小天体表面から射出される微粒子のもたらす情報が内部を含めたその天体全体を代表するか否かには常に議論がある。けれどもこの不定性は小天体の遠隔観測のみならず、隕石の分析にも付随する。むしろ第3節で述べたような衝突を起源とする活動的小惑星に関しては、その観測から推定される微粒子のサイズ頻度分布が当該天体の内部のそれを反映する可能性がある。多くの活動的小惑星についてこの種の観測データを蓄積した上で、隕石の分析結果と比較を行えば、太陽系内の小天体の表面と内部の微粒子のサイズ頻度分布の類似または相違に関する知見が得られるだろう。

上記に加え、活動的小惑星が噴出する物質の組成を詳しく見ることでその内部に取り込まれている水や有機物の種類や量を制約できるかもしれない。水や有機物が固体粒子に含まれると、その物性の違いから、固体粒子同士の衝突時にそれらが破壊を起さず成長できる最大の速度（臨界破壊速度）が変化する。原始太陽系星雲内で発生し得る粒子間の相対速度の上限を臨界破壊速度が超えるか否かに応じて、次のことがわかる。もしも臨界破壊速度が粒子間の相対速度の上限よりも大きければ、直接合体成長によって到達可能な固体粒

子の最大サイズは、固体粒子が原始太陽系星雲内を動径方向に移動して原始太陽に落下するまでの間に成長可能なサイズとなる。このとき、成長中の固体粒子はその内部密度の進化の仕方によっては微惑星にまで成長できる[44]。逆に、もしも臨界破壊速度が固体粒子間の相対速度の上限よりも小さければ、特に地球型惑星形成領域において固体粒子は臨界破壊速度と粒子間の相対速度が等しくなるサイズまで成長できる[63]。つまり、臨界破壊速度を知ることは固体粒子が直接合体成長で到達可能な最大サイズを知ることへ繋がる。いずれの場合でも、直接合体成長で微惑星になれなかった固体粒子はそれぞれが到達可能な最大サイズで原始太陽系星雲内を動径方向に移動しながら、不安定性を介した微惑星形成に寄与する。このように活動的小惑星から提供される水や有機物の情報は、原始太陽系星雲内を移動する固体粒子のサイズに制約を付け得るという意味で、微惑星形成過程の理解に深く関わる重要な要素のひとつである¹。

活動的小惑星が放出する物質の組成を明らかにすることはまた、太陽系初期の物質混合過程、とりわけ地球型惑星が持つ水の起源について情報を得ることに繋がる。地球近傍領域への水の供給には大別して二つのモデルが提案されている。ひとつは太陽系の外側で形成された水微惑星（言ってみれば現代の彗星）が惑星からの摂動を受けて内側の軌道に落ち込むことで地球型惑星に水をもたらしたとするもの[66]。もうひとつは原始太陽系星雲内でのスノーライン（雪線）の位置の変遷[67]に伴い、小石（最近では「ペブル」と称される事が多い）サイズの粒子となって外側の軌道から落下してきた水を地球型惑星が取り込んだというものである[68]。太陽系の歴史においていずれの過程が支配的であったのか？それとも両方が同様に重要な役割を果

1. 本節の議論では以下の前提を置いている。まず、成長途中の固体粒子（ここではダストアグリゲイトを想定している）は原始太陽系星雲のガスからの抵抗を受けて常に原始太陽の方向に移動し、その移動速度はサイズが大きくなるにつれて上昇するものとする。また、ダストアグリゲイト同士の相対速度も同様にそのサイズが大きくなるにつれて上昇すると仮定する。ダストアグリゲイトがある程度の大きさに達するまで、こうした前提は概ね妥当と考えられる。「ある程度の大きさ」とは、ダストアグリゲイトとガス間の相対速度のガス摩擦による緩和時間がその場所の力学時間（その場でのケプラー角速度の逆数）と同程度となるサイズである。ダストアグリゲイトの動径方向移動速度についての詳細は文献[64]を、ダストアグリゲイトとガス間の相対速度については文献[44, 65]などを参照されたい。

たしたのか？この点については未だ議論が多く、決着が付いていない。したがって、水の蒸発(もしくは水の昇華)に由来した活動性を見せる活動的小惑星の起源については以下の三つのシナリオが考えられる。

(1) こうした天体は雪線の外側で形成された氷主体の微惑星が内側に落ち込んできた生き残りである。または(2) 太陽系の内側で作られた岩石主体の天体に対して後から氷(水)を含んだ微量のペブルが降着したものである。もしくは(3) 太陽系の外側から落ちてきた氷(水)を含んだペブルと太陽系の内側で形成された岩石ダストが混合して作られた始原的な微惑星の生き残りである。現在の太陽系において観測される活動的小惑星が放出する物質の組成・同位体比・サイズ等を詳しく見れば、上記の三説のうちどれが有力なのかを見極められる可能性がある。また活動的小惑星から得られるこれらの情報は、例えば形成途中の木星が太陽系内を大移動したとするグランドタックモデル[69]や、数百kmサイズの惑星の種に小石サイズの粒子が降り注いで天体が成長したとするペブル降着モデル[70]のような最近流行りの惑星形成シナリオを精密に定量化し得る。木星の形成時期や動径方向移動の実態についての示唆も与えてくれるかもしれない。そしてこれらの情報は全て、地球近傍への水の供給量や供給機構と深い関わりを持つ。

本節では少々掴みどころのない話を並べたが、惑星形成論の研究ではとかく、岩石の微粒子とその他の分子がどのような形態と割合で太陽系小天体内に含まれるのかの知識が重要であることを改めて強調しておく。このような視点で活動的小惑星を見ることで、原始太陽系星雲中での惑星系の進化の描像に制約を付け得ると筆者らは考える。もちろん本節に記したような都合の良い観測結果が易々と入手できるなどとは考えないが、惑星形成時の生々しい情報が埋蔵されている可能性という視点で活動的小惑星を「見る」ことの意義に疑う余地はない。活動的小惑星研究の重要性は惑星科学においてかくも普遍的である。私達は今後も広い視野を持ってこうした天体の実態を解明して行きたいものだ。

5. 活動的小惑星のその場観測へ

理論的見地での活動的小惑星の考察を一旦終え、再び観測的見地での展望に戻ろう。活動的な天体の代表

である彗星について、近年では81P/Wild 2に対するStardustや67P/Churyumov-Gerasimenkoに対するRosettaなどのミッションが行われている。惑星科学における学術的な重要性を考えれば、活動的小惑星に対しても同様の探査が行われて然るべきである。その嚆矢として、(3200)Phaethonを目指す日本の探査ミッションDESTINY⁺が推進されている[71, 72, <http://www.perc.it-chiba.ac.jp/project/destiny-plus/>, <https://destiny.isas.jaxa.jp/>]。第2節でも触れたようにPhaethonは活動的小惑星かつ流星群母天体としての意義のみならず、Lidov-Kozai振動を示すその特異な軌道[73]、(2)Pallasとの関連性[74]、極めて青いスペクトル[75]、高い直線偏光度[76]、分裂破片(155140)2005 UDの存在[77]など、様々な側面で多くの研究者の興味と関心を惹く。Phaethonは2017年12月中旬に著しく地球に近接し(最接近距離 ~ 0.069 天文単位)、その際には世界中で観測キャンペーンが行われた。それによって得られた最新の結果については私達の勉強会でも吉田二美氏より詳細な解説を頂いた。この時の観測キャンペーンでは大量の新情報が明らかになった。例えばPhaethonの非常に青いスペクトルとその自転位相依存性[78-80]、2016年秋に検出されたほどではないが相当に高い直線偏光度[81-83]、能動的レーダー観測による精密な直径推定[84, 85]、などである。一方で2009年や2012年、2016年に観測されたPhaethonの活動性[86-88](いずれも太陽観測衛星STEREOによる検出)、つまりダスト放出は2017年には確認されていない[89]。但しこれまでPhaethonのダスト放出は近日点通過の数日後に検出されていたが、2017年12月の地球への最接近は近日点通過の30日以上前であった。この違いは留意されるべきである。

深宇宙探査の技術実証機であるDESTINY⁺は理学機器としてカメラ2台(地形観測用望遠カメラおよび表層物質の可視近赤外反射分光特性観測用マルチバンドカメラ)とダストアナライザを搭載し、Phaethonをフライバイ観測する(ダストアナライザによる観測はDESTINY⁺の打ち上げ直後から開始される)。私達の勉強会においてはこの探査計画全般とそこで目指す科学目標について荒井朋子氏から詳しい解説を頂き、また石橋高氏の講演ではDESTINY⁺搭載機器によるフライバイ観測の目標を詳しく学んだ。DESTINY⁺の航行計画においてPhaethon本体の観測に使える時間

は限られている。しかし限られた時間であっても、この天体のその場観測は学術的に計り知れない価値を持つ。特にこの天体近傍で実施される高空間分解能での地形撮像はダストの放出地形を明らかにすると期待されるし、空間分解された多色測光の結果は地上観測から示唆される Phaethon 表層の不均質性の実態を私達に見せてくれる可能性がある。そうした情報はこの天体の活動性を解明することに大きく寄与するはずだし、Phaethon と強い関連性を持つとされる (2) Pallas や (155140) 2005 UD との類似性や相違も詳細化・定量化されるだろう。

この話題に関連し、2019年2月には近地球小惑星 Bennu を探査中の OSIRIS-REx が Bennu の周囲で多くの微粒子を観測したとの報告があった [https://www.asteroidmission.org/?mission_update=feb-11-2019]。この現象は惑星間を飛び交う固体微粒子の衝突により天体から飛び出したダストのイジェクタを検出した結果である可能性があり、近日点通過直後の Phaethon で観測されたダスト放出を起こす機構とは異なるものだろう。しかし DESTINY⁺ 搭載のダストアナライザは Phaethon のフライバイ中にも稼働を続け、この天体由来のダスト検出を試みる。そこでは Bennu の周囲で検出されたものと同様に Phaethon から定常的に放出されるダストが見つかるかもしれない。もしもそのようなダストを構成する鉱物の化学組成を同定でき、そこに加熱によってできた変性鉱物が見つければ、それはこの天体表面が太陽加熱により変成した直接の証拠となり得る。このように地上からの観測では見ることのできない活動現象やその痕跡が現地行きのミッションで確認されることの意義は大きく、DESTINY⁺ の学術的成果の中でも特に期待される部分である。

一般に、Phaethon のようにダストを放出する活動的小惑星のその場観測には技術的な困難が付随する。しかしながら、活動的小惑星の活動性の一機構としてのダスト放出は非常に重要である。私達の勉強会においても木村宏氏を招いて DESTINY⁺ のもう一つの科学目標である星間ダスト研究の基礎と背景、現状と将来についてお話を頂いた。OSIRIS-REx が検出したように小天体のその場観測で明らかになるダスト放出機構は確かにある。また探査機 Cassini が Enceladus のプリュームに対して行ったように、探査機が近接することでしか小天体から放出されるダストの組成分析が

できない場合もある。活動的小惑星のひとつ 107P/ (4015) Wilson-Harrington に対してはサンプルリターンを試みる探査計画も立案されている [90]。本勉強会でもこの天体の活動性に関する地上観測結果について浦川聖太郎氏から詳述して頂いた。こうした観測・分析により、活動的小惑星の起源やそれらの天体がこれまでに生き残ってきた理由に迫ることが可能となる。将来は DESTINY⁺ 以外にも活動的小惑星に近づいて精密観測を行う探査計画が多く立案され、宇宙機が送り込まれることだろう。

6. おわりに

どのようなものにせよ勉強会を開催するからには何らかの終着点(出口)が必要であるということは、筆者らの共通見解であった。その出口の一つが本稿である。そして、筆者の一人(脇田)は活動的小惑星の酸素同位体組成比を知るために地上望遠鏡で観測するという野望を抱いている。但しいきなり活動的小惑星を狙うのではなく、研究の試運転を兼ねて彗星の酸素同位体組成の検出を目標とした ALMA 望遠鏡の観測プロポーザル提出を検討した(これについては本勉強会でも一回分を割いて計画の概要を説明した)。しかしながら、彗星の酸素同位体組成比を定量的に捉えることは ALMA 望遠鏡の高い感度を持ってしても難しいことが判明し、プロポーザルの提出は現時点では見送られている(この時に助力を頂いた飯野孝浩氏には深く感謝する)。脇田が何度か参加させて頂いた ALMA 太陽系ワークショップでは「Target of Opportunity (ToO) 観測を狙った方が良い」という助言も頂いた。こうした野望達成の前段階として、活動的小惑星からのダスト放出の検出ならば ALMA 望遠鏡でも実現可能であると思われる。こうした状況であるから、次世代の各種望遠鏡(Thirty Meter Telescope(TMT, <https://www.tmt.org/>), Square Kilometre Array(SKA, <https://www.skatelescope.org/>), Next Generation Very Large Array(ngVLA, <http://ngvla.nrao.edu/>)など)では活動的小惑星から放出される物質の酸素同位体組成比も測定可能になることを楽しみにしておきたい。光学望遠鏡であれば活動的小惑星の検出はより容易であり、実際にすばる望遠鏡の Suprime Cam や Hyper Suprime Cam(HSC)を使ったサーベイ画像の中には

活動する彗星が写り込んでいる (https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/gallery_ja/にある画像で言えばhttps://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/wp-content/uploads/2016/09/pic_of_month_201609-1024x576.pngが良い例である)。眼視できるほど顕著な活動性ではなくても、サーベイ画像群に大量に写り込んだ小惑星の点影を詳細に検証すればその中に天体の活動性が見出されても不思議はない。小惑星の総数(本稿執筆時点で780,000個程度)に比べて現在確認されている活動的小惑星の数(~20個)は無視できるほど少ないが、潜在的に活動可能性を持つ天体はとて多いというのが業界の多くの人間が予想するところである。本稿を読んで筆者らと同様に活動的小惑星に関心を持った方がいれば、ぜひともこの方面の研究に参画して頂きたい。観測でも理論計算でも取り組む手法はいくらでもある。そして筆者らに連絡を頂ければこの勉強会を別の形で再開することも可能であるから、ぜひとも話題を提供して頂き、議論と理解を深めたいものである。

最後に、この活動的小惑星勉強会のために国立天文台太陽系科学セミナーの枠を使うことを快諾して頂いたセミナー世話人の皆様、一連の勉強会に講師として参加して貴重な情報を提供して下さった方々(そのうち何名かには本稿を詳しくお読み頂き、幾つもの重大かつ建設的なご指摘を頂いた)、そして講演の場で活発な議論を行って頂いた参加者各位に深く感謝したい。匿名の査読者からは本稿に対して詳細で生産的な意見を頂き、結果的に原稿の質は著しく向上した。このことにも謝意を表し、筆をおく。

補遺1. 活動的小惑星勉強会での講演一覧

2017年から2019年にかけての活動的小惑星勉強会で行われた講演の一覧。講演日・講師(所属機関)・講演題目・講演内容の順に記してある。講師名では敬称を略し、また所属機関は講演当時のものを記した。すべての講演は国立天文台三鷹キャンパスで実施され、幾つかの機関へはテレビ会議やSkypeを用いて中継された。

1. 2017年4月27日(木) 脇田茂(国立天文台)「Active Asteroids as Science Targets」活動的小惑星に関

する現状での理解や不明点の整理

2. 2017年6月6日(火) 伊藤孝士(国立天文台)「(3200)Phaethonに関する知見の一部の紹介」これまでの地上観測や理論計算・室内実験の結果を元にした近太陽小惑星(3200)Phaethonの研究前線の概説、および将来の研究方向の議論
3. 2017年7月26日(水) 石黒正晃(ソウル大学)「小惑星衝突現象の観測研究」(596)ScheilaやP/2010 A2のようにダスト放出の活動性を示し、その活動性の起源を天体衝突に持つ天体の紹介とその機構の解説
4. 2018年2月20日(火) 山野辺正邦(東北大学)「タギシュレイクタイプ隕石に含まれるコンドリュールの酸素同位体組成に基づく初期太陽系の小惑星帯外縁部の酸素同位体比」コンドリュールに含まれる酸素同位体組成とMg/Fe比の相関から導かれるそれらの形成場所の議論
5. 2018年3月20日(火) 脇田茂(国立天文台)「彗星の酸素同位体組成の観測可能性」活動的小惑星を理解する一助として彗星の酸素同位体組成比をALMAで観測する計画の議論
6. 2018年8月29日(水) 小林浩(名古屋大学)「小惑星帯での衝突史」現在の小惑星帯の質量分布を説明するための衝突を考慮した理論的計算、およびそこから得られた過去の小惑星帯の解説
7. 2018年9月27日(木) 石橋高(千葉工業大学)「DESTINY+のカメラはPhaethonの何を見ようとしているか?」数年後にPhaethonのフライバイを行う探査機DESTINY+に搭載される光学カメラの詳細と理学観測への展望
8. 2018年10月31日(水) 吉田二美(千葉工業大学)「2017年12月の最接近はPhaethonの何をどこまで明らかにしたか?」2017年12月の地球最接近前後に行われたPhaethonの国際的な地上観測キャンペーンの結果から明らかになったこの天体の姿と、そこから推定される物理的な描像の議論
9. 2018年11月28日(水) 廣井孝弘(ブラウン大学)「炭素質コンドライトの母天体」多数の炭素質コンドライトの反射スペクトル測定結果および小惑星の観測結果の比較、それらを踏まえた小惑星の実態の理解に向けた議論
10. 2019年2月7日(木) 木村宏(千葉工業大学)「The

Evolution of Organic Matter in the Universe」星間ダストには有機物が不在であることを示す観測データの紹介、観測などから得られた結果を説明可能な理論の提唱、および探査機Rosettaによる彗星ダスト有機物の炭化に関するデータの紹介

11. 2019年2月27日(水) 浦川聖太郎(日本スペースガード協会)「ライトカーブ観測から迫る小惑星における衝突イベント: 107P/(4015) Wilson-Harringtonと2012 TC4の例」小惑星の一般的な光学観測手法の紹介、光度曲線観測から示唆されるこの二つの小惑星の形状と自転運動の描像、そして小惑星2012 TC4が受けた衝突年代の議論

また、かつての太陽系科学セミナーにて開催された下記の講演は上記一連の勉強会の先駆けとなった。

- ・ 2016年6月20日(月) 荒井朋子(千葉工業大学)「深宇宙探査技術実証機DESTINY⁺による小惑星(3200)Phaethonフライバイミッション」近太陽小惑星Phaethonへ向かう技術実証機DESTINY⁺計画の概要、およびその理学観測結果から期待される活動的小惑星の実態解明に関する議論

補遺2. Tisserandパラメータ

Tisserandパラメータは円制限三体問題における近似的な保存量である。三体問題とは文字通り三つの質点が互いの重力の下で運動する系を扱う問題であるが、第三体の質量が第一体・第二体のそれに比べて無視できるほど小さいと仮定したものが制限三体問題と呼ばれる。この時に第三体は第一体と第二体の影響を受けて運動するが、第三体の運動は第一体・第二体に影響を与えない。制限三体問題は太陽-惑星-彗星、または惑星-衛星-宇宙機といった系のモデル化にしばしば用いられる。制限三体問題において第一体と第二体は共通重心の周りでケプラー運動を行うが、特にそれが円運動である場合、系は円制限三体問題と呼ばれる。

Tisserandパラメータを理解するためには、その一段階前の量となるJacobi積分について触れる必要がある。二体問題とは異なり三体問題には一般解がないものの、長い研究の歴史がある(書籍やレビュー論文[91-93])。その中で知られた著名な事実の一つに、円制限三体問題においてはJacobi積分が保存する事が挙げられる[94-97]。具体的な数式を使わず説明するの

は容易でないが、Jacobi積分とは回転座標系上で記述した円制限三体問題における第三体の運動エネルギー(の符号を変えたもの)、第一体と第二体によって誘起される重力ポテンシャル、それに回転座標系で働く遠心力を誘起するポテンシャル(的な量)の和である。回転座標系ではなく慣性系でもJacobi積分はもちろん保存量となるが、その表式は回転座標系のものとは異なる。19世紀前半にJacobi [98]が見出したこの量はエネルギー積分でも角運動量積分でもないものの、円制限三体問題における唯一の保存量である。Jacobi積分は第三体の運動可能領域の境界を示すゼロ速度曲面(またはその断面として現れるゼロ速度曲線)を規定する量として常用される。Jacobi積分の具体的な値は第三体の初期位置・速度および第一体・第二体の質量比により定まる。第三体はその初期状態が規定するJacobi積分が保存される領域、つまりその等値線に沿って運動する。

幾つかの仮定を置くことでJacobi積分を簡略化し、第三体の軌道要素で書き表した量がTisserandパラメータである。その仮定を大雑把に述べれば以下となる。(i) 中心天体(第一体)に比べて第二体の質量が十分に小さく、かつ(ii) 第三体は第二体に近付きすぎない。太陽-木星-彗星を円制限三体問題として考え、第一体(太陽)の質量を m_1 、第二体(木星)の質量を m_2 とすれば、仮定(i)は $m_2/m_1 \ll 1$ と表される。仮定(ii)はやや煩雑になるが、木星の軌道半長径を a' 、彗星-木星間の距離を r_2 とすれば $(m_2/m_1) \times (a'/r_2) \ll 1$ と記される。すなわち仮定(i)より $m_2/m_1 \ll 1$ ではあるものの、第三体(彗星)が余りに第二体(木星)に近付き過ぎて距離の比 a'/r_2 が過大になってはいけないという条件である。これらの仮定を置いてJacobi積分を第三体の軌道要素で書き表すと以下のように簡単な形となる[94-97]。

$$\frac{a'}{2a} + \sqrt{\frac{a}{a'}(1-e^2)} \cos I \quad (1)$$

ここで a は彗星の軌道半長径、 e は離心率、 I は軌道傾斜角を表す。座標系の原点は第一体すなわち太陽の上にあると考えて良い。式(1)がTisserandパラメータの定義であり、この量は上記した仮定の下で定数となる([99], p. 203-204)。慣習的には上記の量の2倍をTisserandパラメータと呼び、特に第二体を木星とする場合のそれ(式(1)の量を2倍し、 a' として木星の

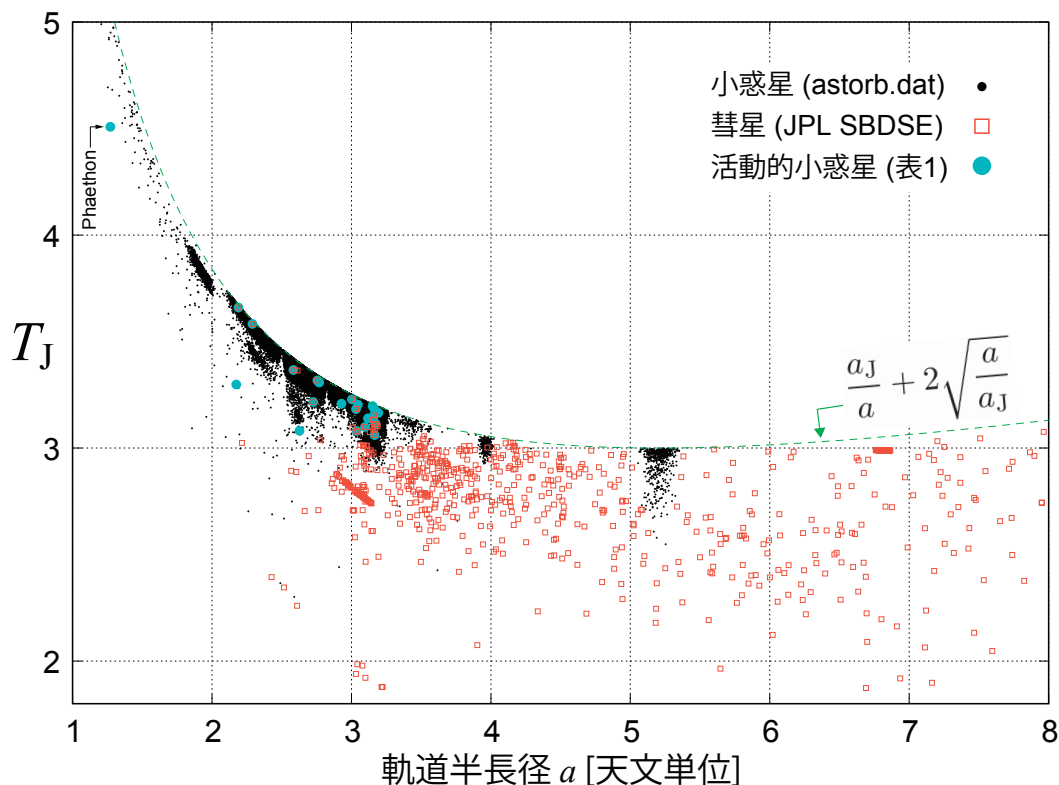


図3：太陽系の小惑星と彗星，そして活動的小惑星のTisserandパラメータ T_J と軌道半長径 a の関係．小惑星の軌道要素は図1を描画した際に使ったものと同一であり，米国Lowell天文台が発行するastorb.datから52,358天体を抽出した．彗星の軌道要素はJPL Small-Body Database Search Engine (SBDSSE)にあるデータ(2019年4月5日現在のもの)から軌道半長径 a が8天文単位未満の684天体を抽出した．図中の黒い丸印は小惑星を表し，灰色(オンライン版では橙色)の正方形が彗星である．活動的小惑星はやや大きな灰色(オンライン版ではシアン)の丸印で描画されている．図1と同様に，他から離れて左上隅に位置する(3200) Phaethonについてはラベルを書き入れた．式(1)にあるようにTisserandパラメータは $e = 0$ かつ $i = 0$ の場合に上限値 $a_J/a + 2\sqrt{a/a_J}$ を取るため，それを灰色(オンライン版では緑色)の破線で描き入れている．なお $(a, T_J) = (3.0, 2.8)$ 近辺で左上から右下に連なる彗星の群れは73P/Schwassmann-Wachmann 3(シュワスマン・ワハマン第3彗星)の分裂核群であり，また $(a, T_J) = (6.8, 3.0)$ 近辺で水平方向に連なるものはShoemaker-Levy 9(シューメイカー・レヴィ第9彗星，もしくはD/1993 F2)の分裂核群である．いずれも元々は単一天体であったことに留意されたい．小惑星に関して言えば $a = 1.8$ から $a = 3.5$ に分布するメインベルト小惑星に加え， $a \sim 4.0$ に集中するヒルダ群天体，および $a \sim 5.2$ に集中する木星トロヤ群天体が目に付く．

軌道半長径 a_J を代入したものを T_J と書くことが多く[100, 101]，本稿でもそれを採用する．第二体を木星に限る必要はもちろんなく，太陽-海王星-彗星の三体系を考える際には T_N という量が議論の対象となり得る．

式(1)に明らかなようにTisserandパラメータは彗星の軌道要素(と第二体の軌道半長径)だけの関数であり，Jacobi積分に比べると変数としての使い勝手や数値の求め易さが大きく向上している．またTisserandパラ

メータ(ここでは式(1)の量を2倍したもの)が3を超える天体は当該惑星(すなわち第二体)との軌道交差を起こさないで[102]，惑星軌道と交差・接近遭遇する天体を見分ける目安にもなる．そして，このパラメータの最も実的な応用は以下であろう．木星との遭遇を果たした彗星がその前後に持っていた軌道要素をそれぞれ (a_1, e_1, I_1) および (a_2, e_2, I_2) とすると，式(1)から以下が成り立つ．

$$\frac{a'}{2a_1} + \sqrt{\frac{a_1}{a'}(1-e_1^2)} \cos I_1 = \frac{a'}{2a_2} + \sqrt{\frac{a_2}{a'}(1-e_2^2)} \cos I_2, \quad (2)$$

式(2)はTisserandの関係式(または判定式)と呼ばれる。彗星の軌道要素(a, e, I)は木星の摂動を受けて刻々と変化し、とりわけ木星との接近遭遇の前後で大きく変わる。けれども木星からある程度の距離を隔てた領域では彗星のTisserandパラメータは一定であり(前述の仮定(ii)を参照)、他の惑星による摂動が強く働いたりしなければ式(2)が常に満たされる。Jacobi積分は円制限三体問題に固有な保存量であるから、Tisserandの関係式(2)が成立するのも厳密に言えば円制限三体問題においてのみである。しかし実際には太陽系惑星の離心率は一般に小さく(木星の離心率は約0.048)、Tisserandの関係式(2)は概ね良く成立する。この性質から、Tisserandパラメータは新発見された小天体が過去に発見された(そして一旦は見失われた)小天体と同一であるか否かを判定するのに用いられてきた。「Tisserandの判定式」(Tisserand's criterion)という名称にはこうした歴史的由来がある。

木星を念頭に置いたTisserandパラメータ T_J は太陽系小天体を分類する指標としても使われる。例えば小惑星は概ね $T_J > 3$ 、彗星は $T_J < 3$ 、という具合である[103, 104]。その例示として、図3には小惑星と彗星、そして活動的小惑星の T_J を軌道半長径 a の関数として描画した(実はこの図のような形でTisserandパラメータの分布を描画した文献を著者らは目にすることがない)。活動的小惑星は彗星にも分類されることが多いから(表1を参照)、図3においては活動的小惑星を表す記号(やや大きな丸印)の上に彗星を表す記号(中抜き正方形)が重なっているものが幾つもあることに留意されたい。図3を見ると小惑星と彗星の境界は確かに $T_J = 3$ 近辺に見える。しかしその境界には不定性があることもわかる。 $T_J < 3$ を示す小惑星はたくさんあるし、 $T_J > 3$ となる彗星も多い。そして後者の多くは活動的小惑星にも分類される天体であり、活動的小惑星が小惑星と彗星の境界を不明瞭にしていることがこの図からも読み取れる。

天体力学における円制限三体問題の研究はまだまだ盛んであり、Jacobi積分やTisserandパラメータは理論的な分野で今後も重要な位置を占め続けるだろう[105]。木星族彗星($2 < T_J < 3$)のようにその定義

をTisserandパラメータに依拠する天体群もある[106, 107]。けれども $T_J = 3$ とされてきた小惑星と彗星の古典的な境界は、活動的小惑星やダモクロイドの発見が進むにつれてますます曖昧になるはずである。

引用文献

- [1] Jewitt, D. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 221 (Tucson: University of Arizona Press).
- [2] Hsieh, H. and Jewitt, D., 2006, *Science* 312, 561.
- [3] Jewitt, D., 2012, *Astron. J.* 143, 66.
- [4] Busarev, V. V. et al., 2018, *Icarus* 304, 83.
- [5] Hsieh, H. et al., 2018, *Astrophys. J.* 155, 96.
- [6] Hirayama, K., 1918, *Astron. J.* 31, 185.
- [7] 吉田省子, 杉山滋郎, 1997, *科学史研究* 第II期 36, 218.
- [8] Knežević, Z. and Milani, A., 2000, *Cel. Mech. Dyn. Astron.* 78, 17.
- [9] 伊藤孝士ほか, 2004, *遊・星・人* 13(4), 212.
- [10] Nesvorný, D. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 297 (Tucson: University of Arizona Press).
- [11] Yoshida, F. et al., 2016, *Icarus* 269, 15.
- [12] Bodewits, D. et al., 2011, *Astrophys. J. Lett.* 733, L3.
- [13] Jewitt, D. et al., 2011, *Astrophys. J. Lett.* 733, L4.
- [14] Ishiguro, M. et al., 2011, *Astrophys. J. Lett.* 740, L11.
- [15] Howell, E. S. and Lovell, A. J., 2011, *IAU Circular* 9191, 2.
- [16] Hsieh, H. et al., 2012, *Astrophys. J.* 744, 9.
- [17] Jewitt, D. et al., 2014, *Astrophys. J. Lett.* 784, L8.
- [18] Jewitt, D. et al., 2017, *Astrophys. J.* 153, 223.
- [19] Yu, L. L. et al., 2019, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 482, 21.
- [20] Jewitt, D., 2005, *Astron. J.* 129, 530.
- [21] Sekiguchi, T. et al., 2018, *Icarus* 304, 95.
- [22] Hsieh, H. et al., 2004, *Astron. J.* 127, 2997.
- [23] Hsieh, H. et al., 2010, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 403, 363.
- [24] Jewitt, D. et al., 2014, *Astrophys. J. Lett.* 147, L117.
- [25] Hsieh, H. et al., 2011, *Astrophys. J. Lett.* 736, L18.
- [26] Hui, M. -T. and Jewitt, D., 2015, *Astron. J.* 149, 134.
- [27] Hirabayashi, M. et al., 2014, *Astrophys. J. Lett.* 789, L12.

- [28] Vernazza, P. et al., 2008, *Nature* 454, 858.
- [29] Jewitt, D. et al., 2013, *Astrophys. J. Lett.* 778, L21.
- [30] Nesvorný, D. et al., 2002, *Nature* 417, 720.
- [31] Ishiguro, M. et al., 2011, *Astrophys. J. Lett.* 741, L24.
- [32] Kim, Y. et al., 2017, *Astrophys. J. Lett.* 842, L23.
- [33] Kim, Y. et al., 2017, *Astron J.* 153, 228.
- [34] Haghighipour, N. et al., 2018, *Astrophys. J. Lett.* 855, L60.
- [35] Delbo, M. et al., 2014, *Nature* 508, 233.
- [36] Jones, G. H. et al., 2018, *Space Science Reviews* 214, 20.
- [37] Granvik, M. et al., 2016, *Nature* 530, 303.
- [38] Bach, Y. P. and Ishiguro, M., 2019, *International Symposium on Dust & Parent Bodies (IDP) 2019*.
- [39] Kimura, H. et al., 2014, *Planet. Space Sci.* 100, 64.
- [40] Kobayashi, H. et al., 2016, *Astrophys. J.* 817, 105.
- [41] Kobayashi, H. and Tanaka, H., 2010, *Icarus* 206, 735.
- [42] DeMeo, F. E. and Carry B., 2014, *Nature* 505, 629.
- [43] Kruijjer, T. S. et al., 2017, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 6712.
- [44] Okuzumi, S. et al., 2012, *Astrophys. J.* 752, 106.
- [45] Kataoka, A. et al., 2013, *Astron. Astrophys.* 557, L4.
- [46] Blum, J. and Wurm, G., 2008, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 46, 21.
- [47] Wada, K. et al., 2011, *Astrophys. J.* 737, 36.
- [48] Whizin, A. et al., 2017, *Astrophys. J.* 836, 94.
- [49] Schräpler, R. et al., 2018, *Astrophys. J.* 853, 74.
- [50] Flynn, G. et al., 2013, *Earth Planets Space* 65, 1159.
- [51] Wozniakiewicz, P. J. et al., 2013, *Astrophys. J.* 779, 164.
- [52] Bradley, J. P., 2014, in *Treatise on Geochemistry (second edition)*, Elsevier, 287.
- [53] Simon, J. I. et al., 2018, *Earth Planet. Sci. Lett.* 494, 69.
- [54] Arakawa, S. and Nakamoto, T., 2016, *Astrophys. J. Lett.* 832, L19.
- [55] Yamamoto, T. et al., 2014, *Astrophys. J.* 783, 36.
- [56] Kimura, H. et al., 2015, *Astrophys. J.* 812, 67.
- [57] Steinpilz, T. et al., 2019, *Astrophys. J.* 874, 60.
- [58] Piani, L. et al., 2017, *Astrophys. J.* 837, 35.
- [59] Youdin, A. N. and Goodman, J., 2005, *Astrophys. J.* 620, 459.
- [60] Johansen, A. and Youdin, A. N., 2007, *Astrophys. J.* 662, 627.
- [61] Johansen, A. et al., 2012, *Astron. Astrophys.* 537, A125.
- [62] Johansen, A. et al., 2014, in *Protostars and Planets VI (Tucson : University of Arizona Press)*, 547.
- [63] Birnstiel, T. et al., 2012, *Astron. Astrophys.* 539, A148.
- [64] Nakagawa, Y. et al., 1986, *Icarus* 67, 375.
- [65] Ormel, C. W. and Cuzzi, J. N., 2007, *Astron. Astrophys.* 466, 2, 413.
- [66] Morbidelli, A. et al., 2000, *Meteor. Planet. Sci.* 35, 1309.
- [67] Oka, A. et al., 2011, *Astrophys. J.* 738, 141.
- [68] Sato, T. et al., 2016, *Astron. Astrophys.* 589, A15.
- [69] Walsh, K. J. et al., 2011, *Nature* 475, 206.
- [70] Lambrechts, M. and Johansen, A., 2012, *Astron. Astrophys.* 544, A32.
- [71] 荒井朋子ほか, 2012, *遊・星・人* 21(3), 239.
- [72] Arai, T. et al., 2018, 49th Lunar Planet. Sci. Conf. (LPI Contrib. 2083), 2570.
- [73] Urakawa, S. et al., 2014, *Astron. J.* 147, 121.
- [74] de León J. et al., 2010, *Astron. Astrophys.* 513, A26.
- [75] Licandro, J. et al., 2007, *Astron. Astrophys.* 461, 751.
- [76] Ito, T. et al., 2018, *Nature Communications* 9, 2486.
- [77] Ohtsuka, K. et al., 2006, *Astron. Astrophys.* 450, L25.
- [78] Kareta, T. et al., 2018, *Astron. J.* 156, 287.
- [79] Takir, D. et al., 2018, 49th Lunar Planet. Sci. Conf. (LPI Contrib. 2083), 2624.
- [80] Lazzarin, M. et al., 2019, *Planet. Space Sci.* 165, 115.
- [81] Shinnaka, Y. et al., 2018, *Astrophys. J. Lett.* 864, L33.
- [82] Borisov, G. et al., 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* 480, L131.
- [83] Zheltobryukhov, M. et al., 2018, *Astron. Astrophys.* 620, 179.
- [84] Taylor, P. A. et al., 2018, 49th Lunar Planet. Sci. Conf. (LPI Contrib. 2083) 2509.
- [85] Taylor, P. A. et al., 2019, *Planetary Space Sci.* 167, 1.
- [86] Jewitt, D. and Li, J., 2010, *Astron. J.* 140, 1519.
- [87] Li, J. and Jewitt, D., 2013, *Astron. J.* 145, 154.
- [88] Hui, M. -T. and Li, J., 2017, *Astron. J.* 153, 23.
- [89] Jewitt, D. et al., 2018, *Astron. J.* 156, 238.
- [90] 橘省吾ほか, 2013, *遊・星・人* 22(1), 4.

- [91] Szebehely, V., 1967, *Theory of Orbits*, Academic Press.
- [92] Ito, T. and Tanikawa, K., 2007, *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan* 9, 55.
- [93] Musielak, Z. E. and Quarles, B., 2014, *Rep. Prog. Phys.* 77, 065901.
- [94] Brouwer, D. and Clemence, G. M., 1961, *Methods of Celestial Mechanics*, Academic Press.
- [95] Danby, J. M. A., 1992, *Fundamentals of Celestial Mechanics* (second edition), Willmann–Bell Inc.
- [96] 木下宙, 1998, *天体と軌道の力学*, 東京大学出版会.
- [97] Murray, C. D. and Dermott, S. F., 1999, *Solar System Dynamics*, Cambridge University Press.
- [98] Jacobi, C. G. J., 1836, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 3, 59.
- [99] Tisserand, F., 1896, *Traité de Mécanique Céleste*, tome IV. *Théories des satellites de Jupiter et de Saturne. Perturbations des petites planètes*, Gautier–Villars.
- [100] Carusi, A. et al., 1987, *Astron. Astrophys.* 187, 899.
- [101] Levison, H. F. and Duncan, M. J., 1997, *Icarus* 127, 13.
- [102] Horner, J. et al., 2003, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 343, 1057.
- [103] McFadden, L. A. and Binzel, R. P., 2007, in *Encyclopedia of the Solar System* (second edition), Elsevier, 283.
- [104] Tancredi, G., 2014, *Icarus* 234, 66.
- [105] Bonsor, A. and Wyatt, M. C., 2012, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 420, 2990.
- [106] Levison, H. F., 1996, in *ASP Conference Series* 107, *Completing the Inventory of the Solar System*, Kluwer Academic Publishers, 173.
- [107] Bottke, W. F. et al., 2002, *Icarus* 156, 399.

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その38 ～超長時間日陰クリア！～

豊田 裕之¹, 山崎 敦¹, 今村 剛²

(要旨) 2019年1月, あかつきはこれまでで最も長い日陰を乗り越えることに成功し, さらなる長期ミッションへと踏み出した。

順調に金星観測を続けていたあかつきは, 2019年1月30日, 一つの山場を迎えました。これまでに経験したことのない長さの日陰, つまり金星の影に入る時間帯が生じるのです。日陰では太陽電池による発電ができない状況で探査機をヒータで暖めねばならないため, バッテリ(蓄電池)が頼りとなりますが, バッテリの容量は限られています。金星の赤道上空を周回するあかつきはほぼ周回ごとに日陰を経験しますが, その1回あたりの長さは通常30分くらいです。ところが今回の日陰は半影も含めると302分, 本影だけでも199分もあり, これは設計時に想定していた最長の日陰時間の90分をはるかに越えています。あかつきが当初予定していなかった長周期の軌道に入ったためにこのような事態となったのですが, はじめにこの日陰が予測されたときには, これを乗り切るとは到底不可能に思われました。

今回ほどではないが長い日陰は2018年7月29日にもありました[1]。戦略はそのときと同じです。日陰に入る前に, 探査機の設定温度を通常より引き上げて余熱しておくとともに, バッテリを安全な範囲で過充電します。日陰中は, 搭載機器のヒータ温調設定を機器の保存温度下限ぎりぎりに設定(日陰設定)するとともに, バッテリ温度を高めに設定して放電可能容量を引き上げます。

実際の電源系のテレメトリデータを図1に, 探査機

の温度データを図2に示します。11時06分(UTC, 以下同様)に日陰が始まると同時に, それまで昇温設定にしていた搭載機器の温調温度を下限まで引き下げました。事前の余熱の効果もあり, 半影中のヒータ電力は数十Wという比較的小さな数値で推移しています。11時41分には太陽電池パネル(SAP)だけでは必要電力をまかなえなくなり, バッテリの放電が始まりました。それでも12時1分に本影が始まるまでSAPは発電を続け, バッテリの節約に一役買いました。本影開始後は探査機の冷却を押しとどめるべくヒータ電力が徐々に上昇し, 13時台には上限の200Wに届き始めました。バッテリ放電電力は最大で450Wに届く程度で, これは事前の予測どおりです。本影後半には探査機全体がほぼ保存温度下限になり, まさにサバイバルの様相を呈しています。電源担当者は手に汗を握りながら手元の予測グラフとバッテリ電圧を見比べ続けました。

そして15時20分, 本影が終わり半影に移行して太陽光が当たり始めましたが, SAPの発電量がまだ十分ではないため, さらに30分程度バッテリの放電が続きます。探査機温度もまだ低温側に張り付いています。ここで慌てて温調を通常設定に戻してはいけません。半影終了時刻まで日陰設定を継続して, 消費電力を最小限に抑え, 探査機が十分に温まってくるのを待ちました。

バッテリが放電モードから充電モードに切り替わったのが15時48分。無事に日陰を乗り切った瞬間です。これまでの日陰での経験をもとに立案した作戦が功

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
2. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科
htoyota@isas.jaxa.jp

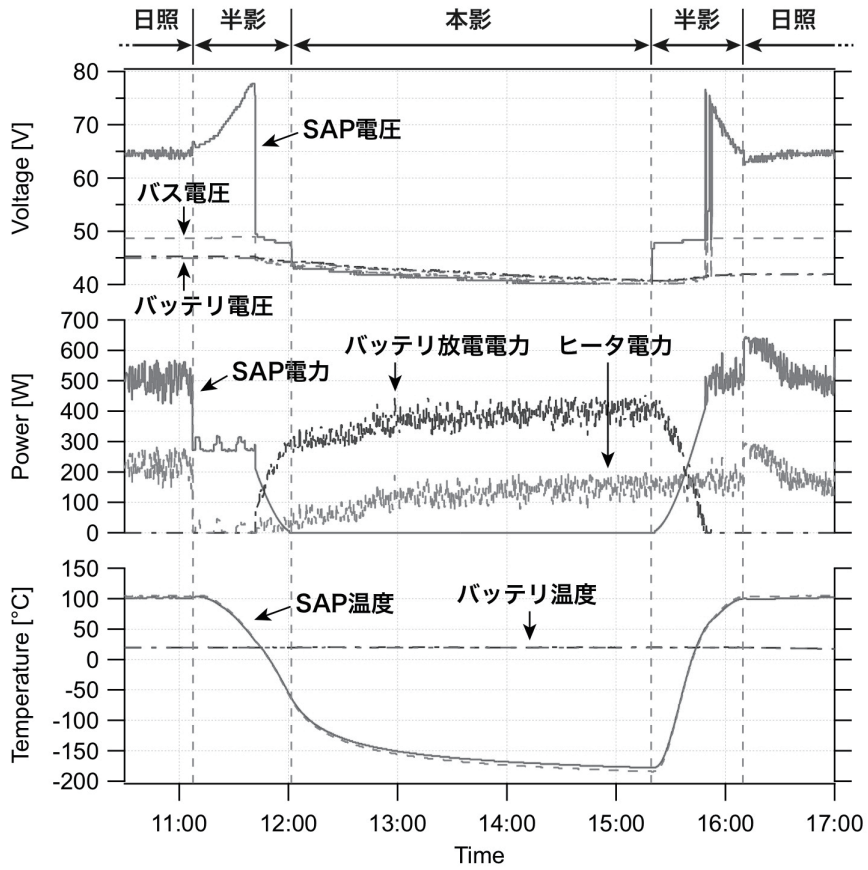


図1：2019年1月30日の日陰における電源系機器の電圧・電力・温度の推移。

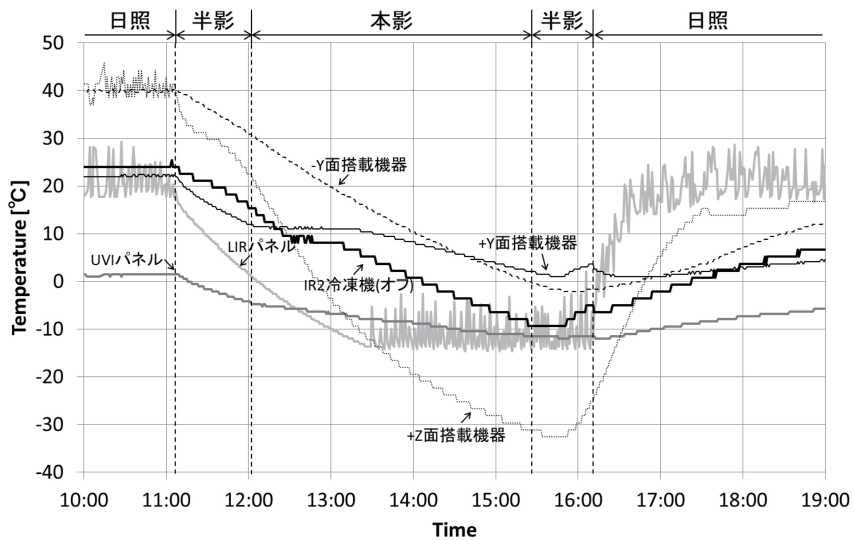


図2：2019年1月30日の日陰における探査機温度の推移。

奏し、昇温設定～日陰設定～通常設定と遷移した熱制御運用を計画通り実施することができました。

さて、事前予測ではバッテリー容量には最悪で5%しか余裕がないと見込んでいました。これに対し、実際には30%強を残して放電を終えています。各種のマージンを見込んでいたための結果ですが、今後バッテリーの容量劣化が進み、日陰運用は徐々にシビアになるはずですが、少しでも長い運用とより多くの科学成果の創出のため、気を引き締めてまいります。

参考文献

- [1] 山崎敦ほか, 2018, 遊星人 27, 258.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その18 ～はやぶさ2の高精度タッチダウンの裏側～

菊地 翔太¹, はやぶさ2プロジェクトチーム

(要旨) はやぶさ2は、2019年2月22日に、小惑星リュウグウへのタッチダウンに成功した。小惑星上に密に分布するボルダーを回避するため、はやぶさ2のタッチダウンには、誤差3mという極めて高い着陸精度が要求された。この高難度の着陸実現に不可欠であった要素について、「リュウグウ近傍の力学的環境」、「着陸地点選定」、「ピンポイントタッチダウン方式」という3つの観点から紹介する。

1. 半径3mのたまてばこ

許容誤差3m。はやぶさ2に課せられた着陸精度要求である。全幅6mのはやぶさ2にとって、「半身」以上のずれは許されない。斯くも酷な要求に、この探査機は見事な形で応える。はやぶさ2は、2019年2月22日の午前7時29分に、小惑星リュウグウへの着陸とサンプル採取のための弾丸発射に成功した。その着陸誤差わずか1m。猛禽類の名を冠する探査機に相応しい正確なタッチダウンであった。

タッチダウン直後の上昇中に撮像された画像が図1(右)である。画像中心の円が着陸目標点を表しており、探査機中心が円の内側に収まるように、タッチダウン運用が設計された。画像中央の黒い「しみ」がタッチダウンの跡(スラストや弾丸、サンプルによる巻き上げと推定されている)であり、ほぼ目標点を中心に広がっていることが見て取れる。脇に影を落とす探査機と同程度のサイズであることから分かる通り、着陸点の半径はわずか3mである。したがって、この地点へのタッチダウンには必然的に着陸精度3mが要求されたが、はやぶさ2は見事にその関門を突破した。

はやぶさ2の着陸目標点には、L08-E1というコード名が与えられ、タッチダウン成功後に「たまてばこ」という愛称が授けられた。図1(左)のリュウグウ広域

画像が示す通り、「たまてばこ」はボルダー(岩塊)だらけの小惑星上の極狭い平坦領域である。では、はやぶさ2プロジェクトチームは、いかにしてこの着陸点を選定し、またいかにして高精度のタッチダウンを実現したのだろうか? 本稿では、その検討過程と技術的要素の一端をご紹介できれば幸甚である。

過去の連載で津田さん、吉川さんがそれぞれ工学技術とミッション前半の総括をしている。したがって、本稿では、タッチダウン運用にフォーカスして、その成功の裏側を「リュウグウ近傍の力学的環境」、「着陸地点選定」、「ピンポイントタッチダウン方式」の3つの観点から深掘りしたいと思う。筆者は専ら探査機の軌道・姿勢力学およびシステム工学を研究しており、本稿は工学的な目線からの記述が主となるが、タッチダウンの成功は理工一体となった解析・運用の所産であることは論を俟たない。

2. リュウグウ近傍の力学的環境

「遙か3億kmの彼方にある探査機を、未踏の天体に誤差3mで着陸させた」と言えば、その妙は直感的には理解できる。一方で、高精度着陸の本質的な難しさは、はやぶさ2が置かれている力学的環境に一因があるように思われる。そこでまず初めに、探査機の運用・降下方法と、その背景にある小惑星周りの特異な力学系について述べたいと思う。

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
kikuchi.shota@ac.jaxa.jp

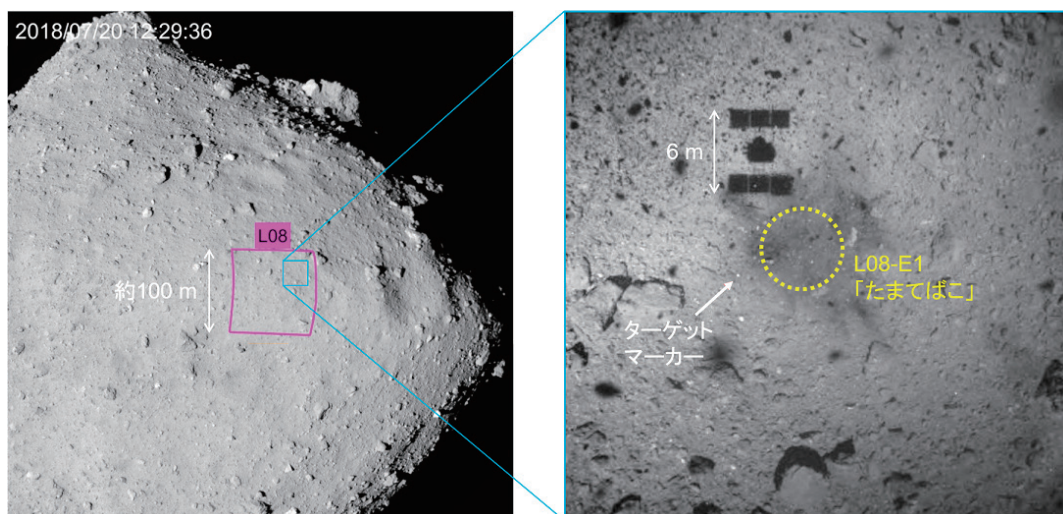


図1：タッチダウン直後に撮像された着陸点の高解像度画像（右）およびタッチダウン前に撮像された着陸点周辺の広域画像（左）。右の画像に写る「ターゲットマーカー」については後述。（画像クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研。JAXA記者会見資料より抜粋・加筆。http://fanfun.jaxa.jp/countdown/hayabusa2/press/index.html [2019年4月20日]）

2.1 はやぶさ2はリュウグウの重力圏外？

地球周りの人工衛星や天体にランデブーする深宇宙探査機のはほぼ全ては、対象天体を周回しながらミッションを遂行する。対象天体の重力を、周回による遠心力で打ち消す¹、という算段である。一方で、この例から漏れる探査機が、はやぶさ初号機とははやぶさ2である。はやぶさシリーズは、小惑星重力に抗した定期的なスラスト噴射により、高度を維持している。この手法は「ホバリング」と呼ばれ、探査機を留める点は「ホームポジション」と呼ばれる。はやぶさ2のホームポジションは、サブアースライン（小惑星と地球を結ぶ線）上で20 kmの高度に位置する。

はやぶさ2がホバリング運用を採用する理由には、小惑星周り特有の力学的環境が関係している。小惑星は重力が微小であるため、通常は無視できる太陽輻射圧などが、相対的に大きな外乱として作用する。加えて、小惑星は一般に歪な形状をしているので、その近傍で重力が不均一に作用する。ゆえに、小惑星近傍では、探査機の運動が強い摂動を受けやすい。

十分な速度さえ与えれば、楕円軌道（ケプラー軌道）

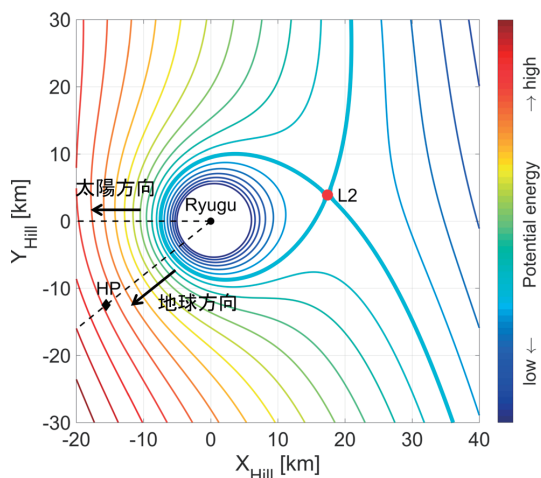


図2：リュウグウ近傍におけるエネルギー場。中心の涙滴型の太い曲線は、小惑星重力が支配的となる領域の境界（ロッシュ・ローブ）を表す。HP:ホームポジション

を描く惑星近傍の環境とは異なり、小惑星周りの強摂動環境では限定的な幾何条件でしか安定的な周期軌道は得られない。良く知られた例が、OSIRIS-RExのターミネータ軌道であり、軌道面が小惑星の昼夜境界面に含まれるような極軌道である[1]。一方で、はやぶさ2では、探査機の機器配置上、ターミネータ軌道は運用に不向きである。したがって、はやぶさ2では、

1. 天体中心の回転座標系で運動を観測することによる見かけ上の力であり、力学系の研究者の間でも現象の説明の仕方は好みが分かれる。

多少の燃料を犠牲にして、ホバリング運用を採用している。勿論、ホバリング運用で燃料収支が成立するのは、微小重力環境であるからこそである。

このリュウグウ近傍の特異な環境を視覚的に図示したものが図2である。この等高線図はリュウグウ近傍でのエネルギー場の例である²[1]。詳細は割愛するが、中心付近の涙滴状の太曲線が、実質的なリュウグウの重力圏に相当する。図に示されている通り、ホームポジションは、この重力圏の外側に位置している。古典的な3体問題で定義される重力圏は、これより広範であるが、太陽輻射圧を考慮すると、実効的な重力圏はこのように狭くなる。すなわち、小惑星近傍にいながらにして、小惑星重力には完全にトラップされていない。太陽輻射圧に吹かれれば飛び兼ねないという、センシティブな力学的環境に、はやぶさ2は身を置いているのである。

2.2 光の速度、亀の速度

では、具体的にリュウグウ近傍に滞在するはやぶさ2が受ける力はいかなる大きさであろうか。図3に示すのが、小惑星中心からの距離ごとに探査機に作用する種々の加速度の大きさである。例えば、ホームポジションでは、小惑星重力と太陽輻射圧の大きさが同程度である。また、小惑星に近づくと急速に高次重力の効果が発達し、逆に小惑星から遠ざかると太陽重力の影響が顕著となる。小惑星表面に到達するタッチダウン運用から、高度100 km強に退避する合運用に至るまで、幅広いレンジで高精度の運用を行うためには、種々の加速度を正確に推定・モデル化することが極めて重要なのである。

タッチダウン運用時には、ホバリング運用から直接降下に移行する。したがって、ホームポジションからサブアースラインに沿って、一定の速度で真直に降下する軌道となる(図4)。太陽輻射圧や高次重力の効果ゆえに、「真直に降下する」というのが存外困難であることは先述の通りである。はやぶさ2では、誘導精度を担保するために、軌道決定と軌道制御のサイクルを反復しつつ、丸一日かけて降下する。火星着陸時の

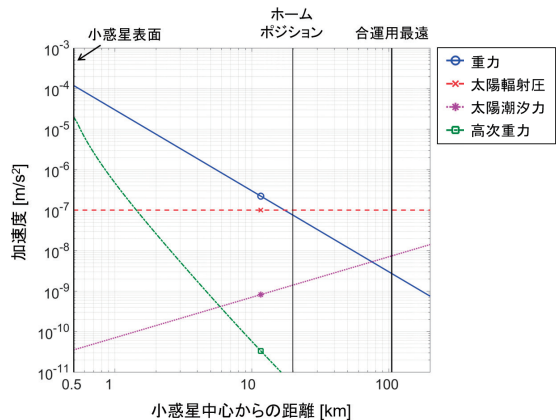


図3: リュウグウ近傍でははやぶさ2に作用する力。高次重力は、緯経度ゼロの線上で、形状モデルから数値的に計算した。

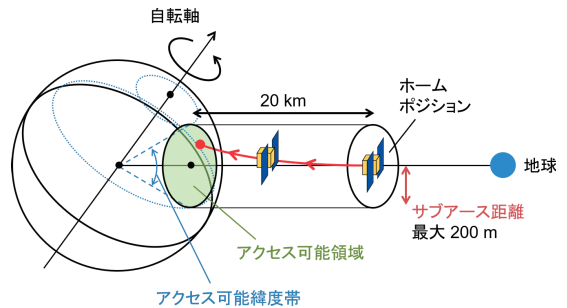


図4: はやぶさ2の降下軌道の概念図。

高速リエントリーとは様相を異にして、はやぶさ2の着陸は、龍宮城に向かう亀宜しい低速降下である³。

もう一点、高精度着陸の障壁となるのが、地球と小惑星の距離である。タッチダウン運用が行われた2019年2月22日において、地球-小惑星間の距離は約3.4億km(2.28天文単位)であり、光の速度をもってして片道20分弱かかる距離である。探査機状態の情報を地上で受け取ってから、コマンドを送信し終わるまでに往復40分要する。したがって、比較的高度が高い領域では、探査機の現在・未来の軌道を精度良く予測しながら後の制御量を計算しており、高度が低い領域では、探査機は完全自律で位置・姿勢を制御するよ

2. より正確には、太陽輻射圧を考慮した。探査機-小惑星-太陽の3体問題における、ヤコビ積分と呼ばれる保存量の等高線図である。ゼロ速度曲線とも呼ばれ、ある位置に物体を静止した状態で置いたときに、その後物体がどのように運動し得るかの示唆を与える。

3. はやぶさ2の降下運用時の降下速度は、高度5～20 kmの領域では約40 cm/s、高度5 km以下の領域では約10 cm/sである。一方で、亀の陸上走行速度の2014年7月時点でのギネス記録は、28 cm/sである。亀の水中での移動速度は、より速いのではないかと推察される。出典: <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/77951-fastest-tortoise> [2019年5月1日]。

うプログラムされている(第4章で後述)。このような表に顕れ難い工学的要素が、着陸の高精度化に多大な貢献をしているのである。

3. 着陸地点選定

3.1 安全性の定量化

はやぶさ2のタッチダウン成功において、重要な役割を果たしたのは、Landing Site Selection(LSS)と呼ばれる着陸地点選定作業である。LSSには大別して理学的な側面と工学的な側面とがある。前者が答えるべき問いは、「小惑星上のどの地点に着陸すれば、科学的価値の高いサンプルを採取できるか?」である。生憎、筆者は物質科学的な観点からリュウグウの性質を適切かつ魅力的に語るに足る知識を具えていないが、この点は過去の橘さんの連載などを参照されたい[2]。他方、工学的なLSS解析では、「小惑星上のどの地点に着陸すれば、安全かつ確実なサンプル採取ができるか?」という課題に取り組む。

安全にタッチダウンするためには、無論着陸点に大きなボルダーがあってはならないが、それ以外にも満たすべき工学的要求がいくつかある。第一にサブアースラインからのオフセット距離である。先に述べた通り、基本的に探査機はサブアースラインに沿って降下する。そのため、サブアースラインからオフセットした位置に降下する場合、軌道を「曲げる」必要があり、探査機の誘導精度が劣化する。高精度の安全な降下誘導を実現するために、サブアース距離の上限は200 mと設定されている。この要求により、図4に示す通り、アクセス可能な緯度帯が制約される。リュウグウの自転軸は、黄道面に対して垂直に近いので、アクセス可能な緯度帯の季節依存性は小さく、概ね緯度が ± 30 deg以内の地点がタッチダウン可能なエリアである。この他にも、発電を担保するための太陽角制約や、サンプル採取を担保するための傾斜角制約を設けることで、着陸可能な地点を絞り込んだ。加えて、着陸可能な地点に対して、上記の幾何量の重み付き和を「安全指数」として定義することで、図5のように地点間の相対評価を行った[3]。

この初期段階のLSSは、リュウグウの形状モデルに基づいて定量的に行われた。結果、画像による目視評

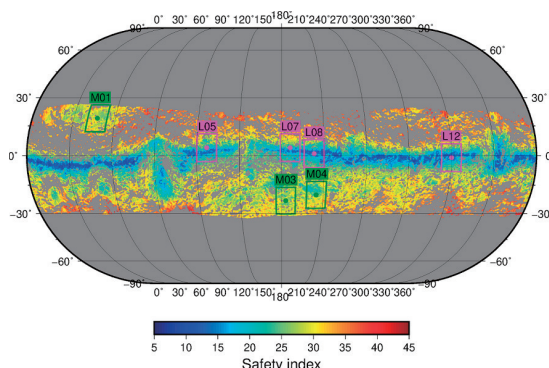


図5：安全指数マップ。安全指数が小さい青色領域が安全な領域を表す。グレーの領域は、タッチダウン不可のエリア。候補点のサイズは約100 m四方。

表1：LSSの推移。

項目	着陸候補点	サイズ
中間着陸候補点	L05, L07, L08, L12 M01, M03, M04	100 m四方
最終着陸候補点	L08 (primary) L07, M04 (backup)	100 m四方
TM投下目標点	L08-B	直径20 m
TD目標点	L08-E1	直径6 m

* TM: ターゲットマーカー, TD: タッチダウン

価と合わせて、図5に示す7つの候補点が初期段階で選定された。候補点のコード名の“L”と“M”はそれぞれ低・中緯度帯の候補点であることを表す。赤道リッジ上の低緯度帯の候補点の方が、中緯度帯の候補点より安全指数が良いが、これは主にサブアース距離が小さく、アクセスしやすいためである。

さらに、これらの候補点に対して、理学的な評価とボルダー密度の評価を詳細に行うことで、最終的には、L08点がメインの着陸候補点として選定された(表1)[4]。この時点で、同時に小型着陸機のMASCOTとMINERVA-IIIの着陸候補点も合わせて選定された。小惑星到着から着陸地点選定までに要した期間はわずか50日程度であり、このスムーズな作業はLSS訓練の賜物である[5]。

3.2 リュウグウの牙の間隙

選定されたL08点を目標として、タッチダウンのリハーサル運用が行われた。運用自体は途中でアポートする結果に終わったものの、従来と比して高解像度の

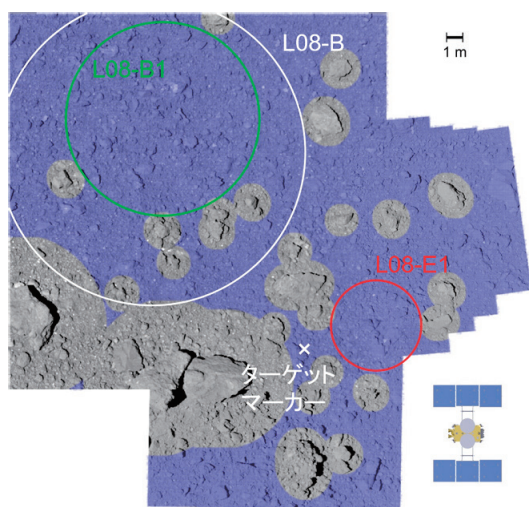


図6：着陸候補点周辺の安全エリア。青色で塗りつぶされた領域が、安全なエリアを示す。

着陸点付近の画像が取得された。当初の設計では、探査機の誘導精度は50 mと見込まれていたため、LSSでは約100 m四方の着陸点を選定した。一方で、ここまでの運用・解析結果から、比較的安全性の高いL08点であっても、領域内に大きなボルダーが多く分布していることが判明した。したがって、着陸円の範囲を狭め、同時に探査機の着陸精度を向上する策を講じることが必須であった。この状況を打開したのが、ピンポイントタッチダウン戦略と着陸点の詳細地形分析である。前者はターゲットマーカーと呼ばれる人工物を投下し、それを目印にして精密に位置を制御する手法である。その詳説は次章に譲るとして、本節では地形の詳細分析について述べたいと思う。

図6に示しているのは、タッチダウン運用に先行して行われた、2018年10月25日のターゲットマーカー投下運用(TD1-R3)でリリースされたマーカー周辺の画像である。L08領域内の直径20 mのL08-B点を目標として、ターゲットマーカーが投下された(表1)。目標点中心に対する投下誤差は15 mであり、当初の誘導精度50 mと比較すると十分高い精度であったが、L08-B円内からやや外れる結果となった。それ以上に厄介であったのが、投下時に得られた高解像度画像を含めた詳細画像解析の結果である。安全と思われたL08-B内にも、探査機に危険を及ぼすサイズのボルダーが点在していることが判明した。この状況は、津田

プロマネをもってして、「リュウグウが牙をむいてきた」と言わしめた。

プロジェクトチームは、この事態に対処するべく、地形の詳細解析を行った。図6に示されている青色の領域は、探査機に危険を及ぼすボルダーがない安全エリアである。ステレオ視や影解析によるボルダー高さの推定を踏まえて、太陽電池パドルやスラスタに衝突し得るボルダーが同定された。結果として残ったのが、L08-B1という広くてマーカーから遠いエリアと、L08-E1という狭くてマーカーから近いエリア。究極の二択である。

次章で述べる通り、タッチダウン時には光学カメラでマーカーをトラッキングするため、離れた点に着陸するためには、視野確保のために高度を上げる必要がある。そして、高高度からのタッチダウンは、着陸精度を低下させる。その結果、L08-B1点より狭いL08-E1点の方が、むしろ正味の安全マージンが大きいという事実が見出された。斯くして、半径3 mのL08-E1点、通称「たまたばこ」が最終的な着陸点として選ばれたのである。リュウグウの牙の間隙が見えてきた。

4. ピンポイントタッチダウン方式

4.1 序盤から奥の手

さて、既に述べている通り、はやぶさ2の着陸には、再帰性反射材を巻いたターゲットマーカーを用いて、ピンポイントタッチダウンという戦略が適用された。この方式は元々、インパクター運用によって生成された人工クレータに高精度で着陸するための、言わば奥の手である。対して、当初、第一回目の着陸は、ノーマルタッチダウン方式(はやぶさ方式)で行われる予定であった。いずれもターゲットマーカーを用いる手法である。では両者は何が違うのか？

図7を参照されたい。ノーマルタッチダウンでは、着陸の際にターゲットマーカーを投下し、探査機はそれを常にカメラでトラックし続ける。地面に静止したターゲットマーカーを補足しながら降下すれば、対地速度をゼロにした状態で着陸することができる[相対速度の制御]。すなわち、この方式ではマーカーが落ちた点にタッチダウンすることになるため、仮にマーカーがボルダーに囲まれた地点に静止すると、着陸時

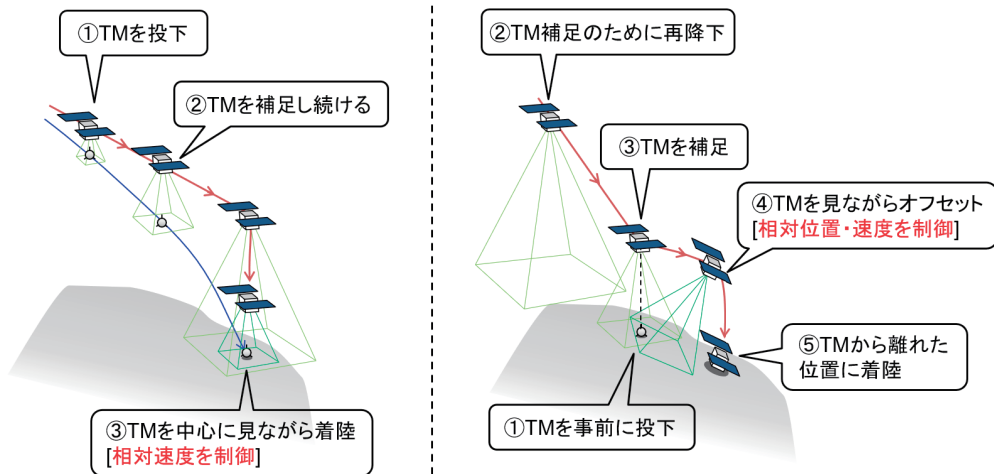


図7：ノーマルタッチダウン(左)とピンポイントタッチダウン(右)。(TM：ターゲットマーカー)。JAXA記者会見資料より抜粋・加筆。 <http://fanfun.jaxa.jp/countdown/hayabusa2/press/index.html>[2019年4月20日]

に探査機に危険が及ぶこととなる。

一方のピンポイントタッチダウン方式では、事前に別途マーカーを投下して、マーカー周辺の地形を解析し、安全な着陸点を探索する。タッチダウン本番時に再度降下して、ターゲットマーカーを補足しながら、あらかじめプログラムされた通りに移動する[相対位置・速度の制御]。これにより、マーカーから離れた位置に高精度で着陸することが可能となる。

高精度着陸ができるのなら、端からピンポイントタッチダウンをすれば良いのではないか、と思われるかもしれない。しかし、この着陸方式の実現には2つの大きな課題がある。第一に、タッチダウンの際に、事前に落としたマーカーを確実に補足せねばならない。想像して頂きたい。東京ドーム60個分程の広大な小惑星表面に横たわる直径わずか10 cmの球体を見つけに行くのである。マーカー捕捉のための降下そのものに相応の精度が要求される。第二に、ピンポイントタッチダウンで重要なのが、マーカー周辺の詳細な地形を把握することである。探査機のターゲットマーカー相対の移動量は、事前の情報に依拠するため、的確な指令を与えるためには、的確な地形情報が必要となる。

これらの課題解決に不可欠なのが、第2章で述べた探査機ダイナミクスの理解であり、また第3章に記した綿密なLSS解析なのである。こうして、リュウグウの苛烈な環境に対応するために、はやぶさ2は奥の手

を序盤から惜しみなく実践投入した。

4.2 センチメートルの攻防

ピンポイントタッチダウンで要求される着陸精度が3 mであるため、数十cmの誤差が探査機の喪失に繋がりが得るという状況である。単なる想像の域を脱しないが、恐らく、これまでの深宇宙無人着陸探査ミッションで、cmオーダーの細かな誤差評価を要したケースは無かったのではなからうか。例えば、火星の着陸機の着陸精度は通常kmオーダーである。重力や大気条件が決定的に異なるので、単純な絶対スケールの比較は意味を為さないが、はやぶさ2がこれまでとは質の異なる着陸設計に迫られたことに相違ない。

まず、気にしなければならなかったのが、探査機の機器配置である。一例を挙げると、探査機は光学カメラでターゲットマーカーの方向を認識するが、カメラは探査機中心に取り付けられているわけではない。つまり、マーカーを視野の中心に補足するような制御がなされる時、探査機中心自体はマーカーから数十cmオフセットすることになる。こういった具合で、光学カメラや、レーザー測距系、サンプラーホーン、スラスタといった機器の配置を、着陸シーケンス設計で丁寧に考慮することとなった。無論、小惑星到着前の着陸設計では想定していなかったことである。

また、数値シミュレーションにより、タッチダウン

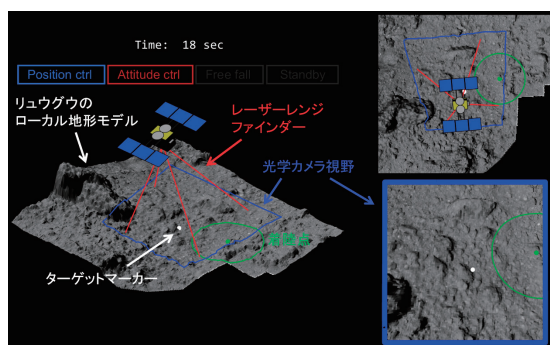


図8：タッチダウン最終シーケンスのシミュレーション。

時に太陽電池パドルや探査機下面のスラスタが、ボルダーに対して何cmのクリアランスを有し得るかを評価した。誤差解析により、ボルダーへの接触確率が極めて低いことが確認されたが、慎重を期するため、着陸時に探査機姿勢を取って10 deg程傾けるという案が採用された。少しでも危険なボルダーに対する余裕を確保するためである。その効果は30 cmに満たないが、探査機の安全性を最大限高めるこの種の工夫が随所に散りばめられた。

上述の詳細なシミュレーションを行っている様子が図8である。形状モデルチームから供された高解像度のローカルな地形モデル上で、探査機の運動が模擬されている。斯くしてcmスケールの検証を重ねることで、プロジェクトチームは、虎の穴が如き半径3 mの着陸点に対するタッチダウン成立性に自信を深め、GOの判断を下したのである。

5. 結果とその後

2019年2月21日から22日にかけて、はやぶさ2は、本稿で紹介した高精度の降下、ターゲットマーカー捕捉、ピンポイントタッチダウンの自律制御をこなし、予定された目標点に見事着陸した。図9がフライトデータから復元した、タッチダウン時の探査機位置・姿勢を示している。目標点からの誤差はわずか1 mと推定され、緻密に計画された着陸運用が結実した瞬間である。また、着陸後すぐに、弾丸が発射されたことを強く示唆するデータが得られ、その成果に管制室が沸いた。

本稿執筆時点で、はやぶさ2はインパクター運用と

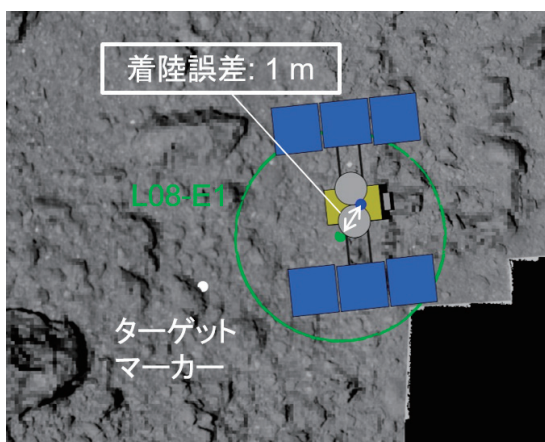


図9：タッチダウン位置・姿勢の復元結果。

クレータ生成にも成功しており、2回目のタッチダウンに向けて、粛々と準備を進めているところである。1回目にタッチダウンした「たまたまばこ」同様に、更なる「開けてびっくり」の成果に期待したい。

最後に私感を記すことをご容赦頂きたい。はやぶさ2の着陸成功そのものも然ることながら、はやぶさ初号機に携わっていたメンバーが、「初号機が成し得なかった弾丸発射という借りを返せた」と語っていたことが非常に印象深い。はやぶさ初号機、はやぶさ2、あるいはその先へと、絶えることなく受け継がれる技術や意志こそ、はやぶさが「火の鳥」たる所以なのではなかろうか。

参考文献

- [1] Scheeres, D. J., 2012, *Orbital Motion in Strongly Perturbed Environments* (Chichester: Springer).
- [2] 橋省吾ほか, 2013, 遊星人22, 261.
- [3] Yamaguchi, T. et al., 2018, *Acta Astronautica* 151, 217.
- [4] Watanabe, S. et al., 2019, *Science* 364, 268.
- [5] 石原吉明ほか, 2017, 遊星人 26, 139.

遊星百景 その16

～フォボスとエロスの線状構造～

菊地 紘¹

今回ご紹介するのは、小天体でみられる線状の構造です。小型の衛星や小さい小惑星、彗星などの小天体は大きな天体のようなテクトニクスを誘発する十分な内部熱エネルギーはなかったため、小さな天体の表面でみられる地形はその天体の起源や地質史を理解する上で貴重な痕跡です。小天体の表面には様々な地形がある中で、線状構造やリニアメントなどと呼ばれる地形があります。これには凹地形であるグループ、トラフ、ピットチェーンや、凸地形のリッジなども含まれています。天体によって線状構造が存在していないものもあり、天体の進化に関して関連性が乏しく、マイナーな地形だと思われるようです。しかしその特異性ゆえ、線状構造があれば独自の情報を保持していると考えられ、その天体の進化に新しい解釈を与えてくれることがあります。

そもそも小天体の線状構造はどのようにして形成されるのでしょうか。惑星表面の観測や衝突実験などにより、衝突によって放射状に線状地形が形成されることが知られています[1]。小惑星アイダ(イダ)や小惑星ガスプラでもそのような線状構造が観測されています。一方で、内部が一枚岩のような比較的均質な天体で衝突が起きると、衝突波が伝播することで衝突方向の法線面や衝突の対蹠点で天体表面に亀裂が生じやすくなるのが数値計算で示されています[2]。例えば小惑星ヴェスタの赤道付近にある二つのトラフは、その中心を通る法線が南極付近にある二つのクレーターの中心をそれぞれ通っているため、衝突によって形成されたのではないかと推測されています[3]。まとめると、ある小天体の線状構造の起源を理解しようとす

るときには、それが表面上のクレーターに対して同心円状にあるか放射状にあるか(※)を調べるのが一つの強力な手がかりになっています。

しかし実際に(※)を調べてみてもこれに則らない小天体があります。その場合、起源がよくわからなくなることが多く、不思議な線状構造になります。その反面オリジナリティのある様々な仮説が提唱されやすく、極めて興味深いものになります。前置きが長くなってしまいましたが、今回は面白い線状構造をもつ天体を2つほど紹介したいと思います。

まずは火星の衛星フォボス(大きさ $26.06 \times 22.80 \times 18.28$ km)です。バイキング探査機がフォボスを観測したことで初めて小天体にも線状構造があることが発見されました。フォボスの線状構造の特徴としては線状の溝になっており、その分布は非常に組織的に並んでいるようみえます(図1)。線状構造が互いに平行になっているグループが複数あり、北を上にして正面からみると左右対称となっているため、バロック調のような美しさがあります。もう一つの衛星ディモスには線状構造は確認されていません。さて(※)の関係性を調べた研究によると、線状構造が主要なクレーターと相関があるものは35%程度で、大部分がクレーターとはあまり関連がないことがわかりました[4]。こうしたことや新しい観測データが現在でも取得されているため、毎年のように新しい仮説(例えば(1)火星の潮汐力によってフォボス表面に亀裂が生じた、(2)火星の衝突によって飛来した破片がフォボスに衝突した、(3)フォボスに衝突した破片がフォボスに衝突あるいは転がり跡を付けた、(4)破片が火星を周回して再びフォボスに衝突したなど)が提唱されています。

小惑星エロス(大きさ $34.4 \times 11.2 \times 11.2$ km)にも多

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

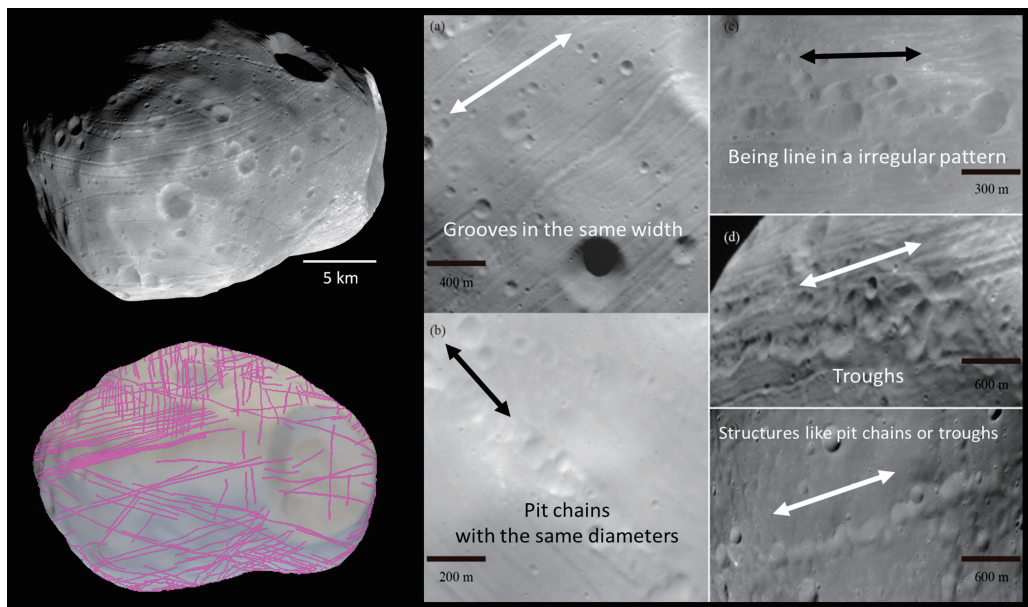


図1：火星の衛星フォボスと線状構造。左上はフォボス全体を撮像した画像（HRSC image h6906_0000_nd2）で、左下は私がマッピングしたフォボスの線状構造で先行面から見たもの。右はフォボスの様々な種類の線状構造 (a) HRSC image h8535_0006_sr2, (b) HRSC image h7937_0003_sr2, (c) HiRISE image PSP_007769_9015_RED, (d) HRSC image h9551_0006_sr2, (e) HRSC image h8974_0000_s12.

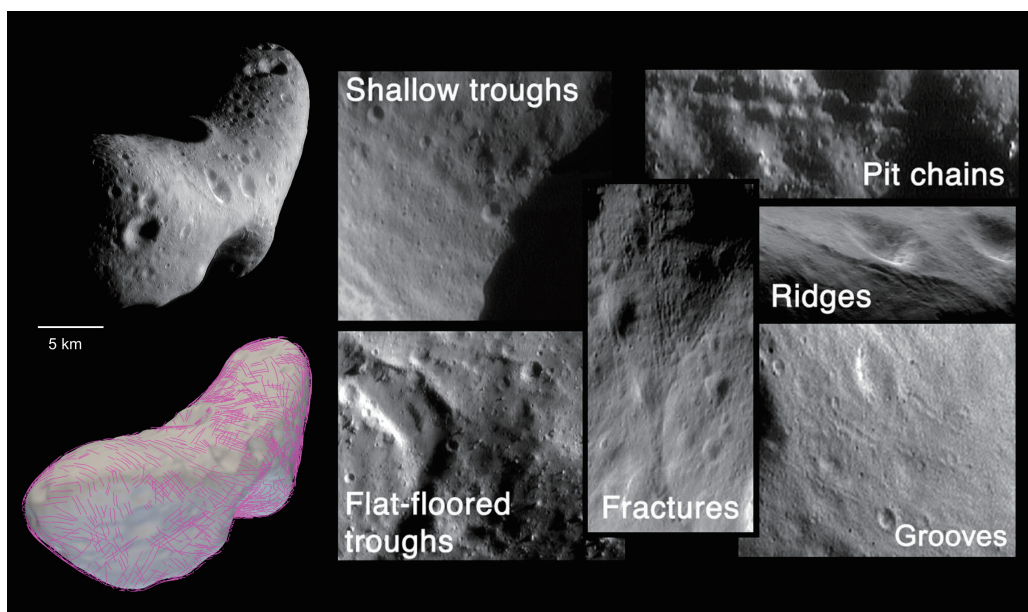


図2：小惑星エロスの線状構造 (NASA/JPL/JHUAPL)。左上はエロス全体を撮像した画像で、左下はエロスの線状構造の分布[6]。右はエロスの様々な種類の線状構造 (NASA/JPL/JHUAPL)。

くの線状構造がみられます。グループ、トラフ、ピットチェーン、リッジがあり種類も豊富です(図2)。エロスには内部構造の影響を受けて多角形になっているクレーターがあり、またエロスの平均密度(約2.7 g/cm³)が普通コンドライト隕石の密度(約3.3 g/cm³)と比べてやや小さいことなどから、エロスの内部構造はラブルパイルではなく、一枚岩のような構造であると考えられています。ここでエロスの線状構造で(※)を調査した研究によると、大規模な線状構造においてクレーターの位置との関連がみられなく、ある平らな領域に対して平行な面に存在していることが観測されました[5]。さらに詳細に線状構造の分布を調査した研究によると、線状構造のいくつかはエロス上のクレーターと相関がみられましたが、これに当てはまらない線状構造のグループが一定数存在していることが判明しました[6]。以上のことからエロスはもともと大きな母天体の一部で、そのときに衝突が起きたことでこのグループの線状構造が形成したのではないかと解釈されました。さらにエロスの内部構造が単なる一枚岩だけでなく、線状構造が形成される程度の強度でファブリック要素をもつか、連星が合体したものになっている可能性も示唆されました。

フォボスとエロスの線状構造のモデルは他にもいくつかあり、いったいどれが正しいのかはまだわかってはいないものの、いずれの仮説も斬新で非常に面白いアイデアで、天体の表層の状態や環境、進化史に新しい解釈を与えています。線状構造はマイナーな地形にみえるけれども、実はその天体の特徴や進化を極めてよく反映している情報になりえ、学生時代は線状構造の論文をたいへん興味深く論文を読んでいた記憶があります。私にとって線状構造は、自分の研究が惑星科学全体の中でどこに位置付けられていて、いったいどこに繋がるかを常に意識しなければならないことを気付かせてくれたものでした。

紙面の都合上紹介できませんでしたが、線状構造をもつ天体はいくつも存在しています。特に土星の衛星エピメシウス(エピメテウス)、小惑星ルテティアなどの線状構造は興味深いものになっています。さらに、小惑星リュウグウに赤道面にリッジ(リュウジン尾根)や南半球に二つのトラフ(トコヨ地溝とホウライ地溝)が観測されました[7]。また小惑星ベヌーでもグループやトラフなどの線状構造があることが報告されて

います[8]。これらが(※)のパターンになっているのか、あるいは別の面白いパターンになっているのかは今後明らかになっていくと思います。今回は線状構造を分布の仕方という側面ではしか捉えていませんが、線状構造の形や長さ、幅なども合わせて調べるとその起源を制約できるかもしれませんし、あるいは思いもよらぬ天体の進化像が浮かび上がるかもしれません。様々な探査機が天体に訪れ続け、その詳細な姿を写した画像は爆発的に増え続けています。みなさんもそうした画像をくまなく見て面白い地形を探して、調べて、どうやってできたのかを考えてみませんか？

参考文献

- [1] Reimold et al., 1998, *Geology* 26, 543.
- [2] Asphaug and Melosh, 1993, *Icarus* 101, 144.
- [3] Jaumann et al., 2012, *Science* 336, 687.
- [4] Simioni et al., 2015, *Icarus* 256, 90.
- [5] Thomas et al., 2002, *GRL* 29, 46.
- [6] Buczkowski et al., 2008, *Icarus* 193, 39.
- [7] Sugita et al., 2019, *Science* 364, eaaw0422.
- [8] Barnouin et al., 2019, *Nature geo.* 12, 247.

宇宙における生命の起源と生命探査： 惑星科学フロンティアセミナー 2018参加報告

野口 克行¹，木村 駿太²

1. はじめに

2019年2月18日から19日にかけて，2018年度の惑星科学フロンティアセミナーが札幌市北海道大学において開催された（図1）．今年度は東京薬科大学の山岸明彦氏を講師に迎え，宇宙における生命の起源と生命探査というテーマでの講演であった．総勢25名の研究者と学生が参加し，2日間とも朝から夕方までの日程であった．講師の山岸氏からはこまめに質問の時間を取っていただくことで，参加者からの活発な質疑応答があった．ここでは，筆者らのメモを元に，講演の内容を振り返りながら本セミナーの様子を簡単に紹介する．セミナーの詳細や講義ノートは，惑星科学会のWebページ（<https://www.wakusei.jp/meetings/fs/2018/2019-02-18/index.html>）を参照されたい．

2. 講演概要

講演は，1日目に主に生命の起源や進化に関する内容，2日目は生命の定義や地球外生命に関する内容であった．

2.1 生命の起源

セミナーの初めに，宇宙の誕生及び元素の生成，太陽系や地球の形成についての簡単な紹介があった後，生命が誕生するにはどのような過程が起こりやすく，どのような過程が困難であるのかという点についての

解説があった．例えば，アミノ酸は自然界での生成が比較的容易で，既に隕石等からも見つかっている．しかし，そのアミノ酸が組み合わさったタンパク質や酵素，さらにはDNA，そして生命となると途端に偶発的な生成が難しくなる（つまり，生命の誕生までの各ステップには，大きなギャップが存在する）．個人的な話であるが，生物学の教科書で触媒としての酵素の解説やその複雑な模式図を初めて見たとき，このようなものが自然に生成し得るのかと，驚きを超えてショックを受けた記憶がある．生命の誕生において，どのような物質の生成過程が困難であるかということを知ることは，取りも直さずそれこそが今後の研究で焦点を当てるべき点であろうと感じた．

生命の起源に関する話題として，RNAが重要な役割を果たしたというRNAワールド仮説の解説も重点的に行われた．この仮説が誕生した背景としては，タンパク質はDNAの情報に元で生成される一方で，そのDNAはタンパク質の触媒機能により生成されるという事実が挙げられる．いわゆる「鶏が先か，卵が先か」の話であるが，この問題を解決し得るのがRNAワールド仮説とのことであった．RNAが遺伝情報とタンパク質機能を兼ねることで，まずRNAによる自己複製系が成立した，という仮説である．この仮説を導入することで，生命誕生における上述のギャップの一つを埋めることができる．遺伝情報と触媒機能を兼ね備えた分子であるリボザイムの発見が鍵となり，RNAワールド仮説は現在では世界中の研究者から広く受け入れられているとのことであった．RNAゲノム生物はその後進化してDNAゲノム生物が誕生した．それらは様々な温度に適応したが，超高熱菌のみが生き残

1. 奈良女子大学自然科学系
2. 東京大学農学生命科学研究科
nogu@ics.nara-wu.ac.jp

り、現在の全地球生命の共通祖先、コモノート(LUCA, 祖先細菌などとも呼ばれる)となったと考えられている[1].

2.2 生命の進化

ダーウィンの進化論、例えばヒトはサル(との共通の祖先)から進化したということは多くの人々が知識として知っていることであるが、形態からだけではなく分子遺伝学という新たな科学的手段によって我々の祖先が何から進化したのかということが明らかになりつつある。遺伝子解析により、すべての地球上生物の共通祖先としてコモノートにまで遡ることができる。コモノートの性質の一つとして好熱性が挙げられることは、現在の海底熱水噴出孔にも好熱菌をはじめとする生態系が存在する事実と併せて大変興味深く感じた。熱水噴出孔であれば、必ずしも大気に覆われた現在の地球のような「生命に優しい」惑星でなくとも、より多くの天体において存在し得ると思われるからである。生命の誕生は地球に限らず宇宙において普遍的に起こり得ることなのではないか、という期待を持たせる。この後の地球外生命探査に関する話題を示唆するような内容であった。

現在の地球生命の分類は、真正細菌(Bacteria)、古細菌(Archaea)、真核生物(Eukaryotes)の3つに分ける3ドメイン説が広く受け入れられているが、どうやら真正細菌と古細菌よりも、我々ヒトが属する真核生

物と古細菌の方が遺伝的には近縁らしい。直観的には受け入れにくい事実であるが、それだけ地球生命の多様さを感じさせる。アミノアシルtRNA合成酵素(ARS)に注目した新しい系統樹として、真核生物を“Subdomain Eukaryotes”として“Domain Archaea”に入れてしまうという最近の論文も紹介され、刺激的であった。非常に複雑な遺伝子の水平伝播も紹介され、昔から馴染みのある“系統樹”から、より複雑な“系統網”として生物の進化を捉え、膨大なデータや情報科学を駆使して研究する時代に到達したことを感じた。生物の分類はこれからも白熱した議論が交わされることが予測される。個人的には、山岸氏の「Bacteriaは原子、Eukaryotesは分子のようなもの。全部を同じ階層の“生物”と思うからいけないのでは」との提案に賛同しつつ、今後の展開に注目したい。

いったん脊椎動物が誕生した後の様々な形態変化による進化過程は、むしろこれ以前の進化過程に比べれば比較的容易ではないかと感じた。その理由の一つとして、収斂進化の例が挙げられる。哺乳類のイルカやクジラが水中で生活しやすいように全く異なった種である魚類と結果的に同じような形態を持つように進化できたことは、脊椎動物の進化の多様性や柔軟性を示唆しているように思われる。そのような事例を見た時、サルからヒト(知的生命体)への進化もそれほど困難ではないのではないかと感じた。つまり、いったんある程度的高等生物が誕生できれば、条件さえ整えば知的



図1：参加者の集合写真。

生命体への進化もそれほど困難ではないのではないか、ということである。この点も、この後の講義内容である地球外知的生命探査につながる内容であった。

2.3 生命の定義

生命の定義としてよく挙げられる条件としては、複製する、代謝する、膜に囲まれている、進化する、などであるが、これら条件の組み合わせによってはコンピュータやコンピュータウイルスも生命と分類されかねない。時代と共に生命の定義が変化しており、定義自体が可能なのか、意味があるのかという意見も存在する。しかし地球外の生命を探査することを考えるならば、何を探査するか決めなければならないため、生命を定義することは必須である。NASAの定義として、「生命とは、ダーウィン進化を行いうる、自己維持できる化学システムである」というジョイスの定義が紹介された。少々ずい言葉づかいのようにも思えるが、これはよくできた定義に感じた。セミナー参加者からも様々な意見が出て、山岸氏とも議論を行うことで理解が深まった。ローソクの炎、赤血球、働きアリ、家畜や人間の保護の下で生き延びている絶滅危惧種は生命なのか、という議論には個人の倫理観や感性も加わり、誰もが納得できる定義を示すことは極めて困難に思えた。必要に応じて考えていくのが中庸であるように思える。

2.4 地球外生命

地球生命が宇宙におけるありふれた元素で作られていることを考えれば、地球外生命と言えども水素、炭素、窒素、酸素を使わない生物は恐らくいないのではないかという前提のもとで、有機生命体探査が有効であろうとのことであった。

生命探査を行う対象としては、水の痕跡やメタンが検出されたことから、まずは火星がもっとも興味深い天体の一つと言えるだろう。火星における生命探査は、サンプルリターンや宇宙飛行士による現地作業を伴わない、探査機を用いた無人探査が簡便である。過去のバイキング計画の生命検出実験は、アタカマ砂漠にいる微生物(土壌1gあたりおよそ 10^4 細胞)を検出「できない」程度の精度しかないものであった。火星地表面で存在が想定される細菌としては、メタン酸化細菌、鉄酸化細菌、硫黄酸化細菌などが挙げられる。このよ

うな細菌を検出することを想定して、日本のチームは水が存在すると思われる領域に焦点を絞り、核酸を選択的に染める試薬と蛍光顕微鏡を用いてバイキングの1000倍の感度で生命を検出する計画を進めている。

火星以外にも直接探査の有望な天体としては、距離を考慮すればまずは太陽系内の天体であろう。地下海が存在が期待される土星の衛星エンセラダス、メタンの大気を持つ土星の衛星タイタンなどが挙げられた。究極的な生命探査として、系外惑星の直接探査が紹介された。具体的な対象としては、地球から最も近い恒星であるプロキシマ・ケンタウリが挙げられた。撮像センサを持つ数グラムの探査機に対して地上から打つレーザー光線で光速の2割程度まで加速し、現実的な探査期間(30年程度)で結果を得ようとする野心的なミッションとのことだった。

一方、現在も行われている宇宙生命探査として、山岸氏が研究グループのリーダーを務める「たんぼぼ計画」が紹介された。地球生命の起源が宇宙由来であるとするパンスペルミア仮説は、広くは支持されていないものの、確かめようがなく、否定されていない。宇宙から地球に生命が移動する可能性があるならば、逆に地球の生命が宇宙へ飛び出し、他の惑星に到達する可能性もありうる。たんぼぼ計画では、地球の微生物が宇宙に飛び出すことはあるだろうか、あるならばどれくらい生き残るであろうか、という問いに答えるために、地球の高度400 kmを周回している国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟(きぼう)の外部曝露部を用いて、微生物・宇宙塵の捕集と微生物・有機物の曝露実験が行われている。捕集実験では、超低密度のエアゲルを用いて8 km/秒という恐ろしい速さで宇宙空間を飛んでいる微粒子を捕まえることが計画された。2015年の打ち上げの後、既に微粒子の採取に見事成功し、今まさに地球帰還後の分析が進められているとのことだった。曝露実験では、乾燥状態の放射線耐性菌やシアノバクテリアが宇宙曝露され、厚みがあった場合や、光を遮った場合、宇宙曝露後に蘇生したとのごく最近の結果が紹介された。これらの結果は、条件を整えば、生命が宇宙空間を移動しようとの考えを支持していた。今後の進展に心から期待したい。

上記の生命探査は比較的単純な生命体を探索する計画である。では地球外に知的生命が存在するかどうかについては、物理学者はやや肯定的、生物学者はやや

否定的な意見が多いとのことだった。その中で山岸氏は「信じているわけではないが、地球外生命が存在することを願っている」としている[1]。液体の水が存在できる星であること、多細胞化できる条件を満たすこと、感覚器官や道具を作るための手をもつこと、音波や電波を用いた意思疎通や情報交換を行うことといった条件は太陽系外の生命にも共通であろうと推測した上で、太陽系外に知的生命がいた場合、おそらく体長は1~20 mで、かなり無理すれば(かつ、悪意が無ければ)握手できるのではと、夢のある(少し楽観的な?)見解を述べられた。

我々が子供のときにはSF小説の域を出なかった観測事実や探査計画が次々と現れていることは、大変感慨深い。生命の起源に関する究極的な答えが自分の生きている間に得られるかも知れない、と感じさせる二日間のセミナーであった。

3. 最後に

二日間の講義と議論を通して、多数の質疑に対してその度毎に山岸氏から真摯な応答を戴いたことに深く感謝したい。専門外の分野における自分の素朴な疑問を思いつくままに質問し、その回答を第一線の専門家から直にいただけるという贅沢な体験を通して、知的好奇心が満たされるという満足感を十分に得ることができた。懇親会ではおいしいジンギスカンを食べる機会を頂いた。にぎやかな雰囲気の中で参加者の親睦を深め、胃袋も満たされるという満足感も十分に得た。本セミナーの影響か、広い宇宙の中、地球で知的生命(ヒト)が高等動物(羊)と発酵産物(ビール)を電気明かりの下で摂取する奇跡に思いを馳せつつも、食は進むのであった。本セミナーを企画いただいた世話人の皆様、会場となった北海道大学の関係者の皆様にも深くお礼を申し上げたい。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 山岸明彦, 2016, アストロバイオロジー:地球外生命の可能性(丸善出版).

2019年日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ

2019年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(京都LOC) 河北 秀世¹

2019年日本惑星科学会秋季講演会は京都産業大学 神山ホールにおいて開催します。昨年度に引き続き「口頭発表付きポスター発表」を受け付けます。詳しくは発表要項をご覧ください。まだ検討中の事項もございますが、以下は、2019年4月末時点での開催案内です。最新情報は随時、講演会ホームページ<https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2019/>に掲載します。

1. 日程と会場

●日 程

2019年10月7日(月) - 10月9日(水)

10月8日(火)に総会と懇親会、および今年最優秀研究者賞受賞講演会を予定しています。

●会 場

京都産業大学神山ホール(「京都産業大学前」バス停を降りてすぐ)

〒603-8555 京都市北区上賀茂本山

https://www.kyoto-su.ac.jp/facilities/cam_map.html

●懇親会

京都産業大学キャンパス・並楽館にて、10月8日(火)18:30頃から行う予定です。皆様ぜひご参加ください。

2. 発表要項

●発表資格

著者に本会の会員(発表申込み時にすでに会員資格を得ていること)を含むこと。著者に会員を含まない申込みは却下します。

●発表形式とプログラム編成

口頭発表、口頭発表付きポスター発表、またはポスター発表。申し込みは、「① ポスター発表希望」、「② 口頭発表付きポスター発表希望」、「③ 口頭発表またはポスター発表希望」、「④ 口頭発表または口頭発表付きポスター発表希望」、または「⑤ いずれでもよい」を選択して申し込んでいただく予定です。なお、第一著者としては①、②、⑤から1件まで、③、④、⑤から1件まで(合計2件まで)の申請とします。スペースが限られておりますので、同じテーマについて2件出すことはご遠慮ください(最優秀発表賞応募者は除く)。発表の採否、発表形式の決定、およびプログラム編成については、実行委員会が決定いたします。予めご了承ください。

●口頭発表

1講演につき12分前後(質疑応答も含む)を予定しています。スクリーンを1面、VGA液晶プロジェクタを一台利用可能です(アナログRGB D-Sub15ピン)。

●口頭発表つきポスター発表

1講演につき2分間の口頭発表(機材は上記の口頭発表と同じ)とポスター発表(スペースと会場は下記のポスター発表と同じ)の両方の講演を行って頂きます。昨年度は3分間の口頭発表時間を設けていましたが、今年度は2分間に短縮されていますので、申込まれる方はご注意ください。

●ポスター発表

一人当たりのポスタースペースはA0用紙(841 mm × 1189 mm)を縦張りできるサイズを予定しています。ポスター会場は講演会場と同じ建物の3階になります。

●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の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

1. 京都産業大学
kawakthd@cc.kyoto-su.ac.jp

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(15分前後)とポスター発表の両方を行って頂きます。別途定める今年の要領に従ってください。詳細は本会メーリングリスト(o ml)および本会ホームページ「2019年秋季講演会のお知らせ」でお知らせいたします。

● 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。

3. 参加および発表の申込み方法

本会ホームページの[参加/発表/予稿登録]よりお申込みください。事前参加申込み、発表申込みは、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、(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、の両方が必要になります。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1日以上、新規入会登録には2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

申込み受付を開始する際に、本会メーリングリスト(o ml)にてお知らせいたします。

4. 本年秋季講演会までの主なスケジュール(予定)

2019年6月25日(火)

事前参加申込・発表申込・事前支払・予稿原稿の受付開始

2019年7月26日(金) 24:00

発表申込(最優秀発表賞申込を含む)の受付締切、最優秀発表賞申込者の予稿原稿の受付締切

2019年8月9日(金)

プログラム発表

2019年9月6日(金) 24:00

予稿原稿(最優秀発表賞申込者を除く)の提出締切、事前参加申込の受付締切、事前支払の受付締切

5. 予稿集について

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を用意し、ダウンロ

ードできるようにする予定です。

6. 参加費用

費用項目		事前支払	当日支払
参加費	一般会員	3,000円	4,000円
	学生会員 ^{*1}	2,000円	3,000円
	非会員 ^{*1}	5,000円	6,000円
懇親会費	一般会員	4,000円	5,000円
	学生会員	2,500円	3,000円
	非会員	4,000円	5,000円

※1 非発表の学部生・M1に限り、参加費を無料とします。

※2 シニア会員の参加費・懇親会費については、一般会員と同額とします。

7. 交通手段・食事など

京都駅から、地下鉄で「国際会館駅」下車→京都バス(40系統)で「京都産業大学前」下車、もしくは地下鉄で「北大路駅」下車→市バス(北3号系統)または京都バスで京都産業大学前下車(<https://www.kyoto-su.ac.jp/access.html>)。これに加えて、講演会当日の朝は国際会館駅から臨時バスを発車予定です。臨時バスの詳細は後ほど本会ホームページでお知らせいたします。昼食等はキャンパス内の学食、および周辺のレストランをご利用ください。

8. 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。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。お待ちしております。
受付締切：8月30日(金)
担当 e-mail: aloc-takuji@wakusei.jp
- (2) このお知らせの内容は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ください。
- (3) その他、京都LOCへのお問い合わせは aloc-ml@wakusei.jp までご連絡ください。

2019年度助成事業2件公募のご案内

公益財団法人 宇宙科学振興会¹

公益財団法人宇宙科学振興会は宇宙科学分野における学術振興を目指し、2019年度も引き続き下記の助成事業を行います。それぞれの応募要項の詳細は当財団のホームページ：<http://www.spss.or.jp>に掲載しています。それぞれの公募に対する応募申請に際してはホームページご参照の上、申請書をダウンロード・作成いただき必要な書類を添付の上、財団宛に電子メール(admin@spss.or.jp)で申請下さい。奮ってご応募いただくようご案内申し上げます。

(1) 国際学会出席旅費の支援

●支援対象

宇宙理学(地上観測を除く)および宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する独創的・先端的な研究活動を行っている若手研究者(当該年度4月2日で35歳以下)、またはシニアの研究者(当該年度4月2日で63歳以上かつ定年退職した者)で、国際研究集会で論文発表または主要な役割などが原則として確定している者。

●助成金額・件数：一件あたり10～30万円程度、年間10件程度

●申し込み受付時期

応募締切り2019年8月31日：

2019年10月1日～2020年3月31日に開催される国際学会出席者対象

応募締切り2020年2月29日：

2020年4月1日～2020年9月30日に開催される国際学会出席者対象

(2) 国際学会開催の支援

●支援対象

宇宙科学研究を推進している国内の学術団体(研究所、大学等)で、宇宙理学(地上観測を除く)及び宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する国際学会、国際研究集会の国内開催を主催しようとする団体。

●助成金額・件数：一件あたり30～50万円程度、年間3～5件程度

●申し込み受付時期

応募締切り2019年8月31日：

2019年10月1日～2020年3月31日に開催の国際学会対象

応募締切り2020年2月29日：

2020年4月1日～2020年9月30日に開催の国際学会対象

●照会先

公益財団法人宇宙科学振興会事務局

<http://www.spss.or.jp>

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

Email: admin@spss.or.jp

Tel: 042-751-1126

1. 公益財団法人宇宙科学振興会 事務局
admin@spss.or.jp

学位論文タイトル紹介

惑星科学関連分野にて博士号または修士号を近年取得された会員の研究内容を学会員に広く知ってもらう目的で、論文タイトルを掲載いたします。項目は、(1)氏名、(2)論文タイトル(現題名)、(3)論文タイトル(和訳名)、(4)論文提出時の所属、(5)学位取得年・月、(6)次の所属、の順です。希望者は、論文の結果を最もよく表す図を1枚掲載できます。

この記事に関するお問い合わせは編集長(chiefeditor@wakusei.jp)までお願いいたします。
※毎年6月号に、過去3年まで遡って掲載可。投稿方法等はomlにて案内いたします(2月頃)。

博士論文

- | | |
|---|--|
| (1) 大村 知美 (おおむら ともみ) | 専攻 |
| (2) 粒子層の圧密特性に関する実験的研究：小天体内部密度構造への影響 | (5) 2019年3月 |
| (3) - | (6) 東京工業大学 地球生命研究所 |
| (4) 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 | |
| (5) 2019年3月 | |
| (6) 名古屋大学大学院環境学研究科 | |
| <hr/> | |
| (1) 杉浦 圭祐 (すぎうら けいすけ) | (1) 野津 翔太 (のつ しょうた) |
| (2) Development of the Numerical Simulation Method for Rocky Body Impacts and Theoretical Analysis of Asteroidal Shapes | (2) Chemical structures of protoplanetary disks and possibility to locate the position of the H ₂ O snowline using spectroscopic observations |
| (3) 固体天体衝突現象を扱う数値計算法の開発と小惑星形状の成因の理論的解析 | (3) 原始惑星系円盤の化学構造と分光観測によるH ₂ Oスノーラインの同定可能性 |
| (4) 名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学 | (4) 京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 |
| | (5) 2019年3月 |
| | (6) オランダ ライデン大学 ライデン天文台 |

修士論文

- (1) **匠 あさみ**(たくみ あさみ)
- (2) 国立天文台50センチ公開望遠鏡と偏光撮像装置PICOを用いた小惑星の偏光観測
- (3) -
- (4) 放送大学大学院文化科学研究科自然環境科学プログラム
- (5) 2017年3月
- (6) 国立天文台天文情報センター

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第130回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第131回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第132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130回運営委員会議事録

期 間：2019年1月18日(金)～1月25日(金)
議 題：第15期専門委員会・部会委員の承認
シニア会員の承認

運営委員会委員：

中本 泰史, 中村 昭子, 倉本 圭, 和田 浩二, 諸田 智克, 関根 康人, 玄田 英典, 中村 智樹, 中島 健介,
寺田 直樹, 田中 秀和, 竹広 真一, 小林 浩, 白井 寛裕, 奥住 聡, 荒川 政彦, 北里 宏平, 佐伯 和人,
関 華奈子, 田近 英一, 平田 成, 藪田 ひかる, 渡部 潤一

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 steering-ml@wakusei.jp 宛に投票

議題 1. 各専門委員会委員の承認をお願いしたい。

(◎の各専門委員会委員長, ○の部会長, グループ長については第129回運営委員会にて承認済み)

1) 総務専門委員会

◎北里 宏平

平田 成, 諸田 智克, 奥住 聡, 谷川 享行, 保井 みなみ, 小林 浩, 藤谷 涉

行事部会

○中島 健介

城野 信一, 木村 勇氣, 木村 淳, 奥住 聡

2) 財務専門委員会

◎佐伯 和人

横田 勝一郎, 竹広 真一

3) 編集専門委員会

◎和田 浩二

杉山 耕一朗(編集幹事)

上相 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉,
関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱野 景子,
本田 親寿, 三浦 均, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

4) 欧文誌専門委員会

◎玄田 英典

大竹 真紀子, 大槻 圭史, 矢田 達

5) 将来計画専門委員会

◎荒川 政彦

北里 宏平, 中島 健介, 佐伯 和人, 寺田 直樹, 平田 成, 林 祥介

将来構想検討作業部会長

○中本 泰史

倉本 圭, 関根 康人

6) 惑星探査専門委員長

◎寺田 直樹

荒川 政彦, 白井 寛裕, 大竹 真紀子, 癸生川 陽子, 齋藤 義文, 千秋 博紀

7) 情報化専門委員会

◎平田 成

千秋 博紀, 伊藤 孝士, 大竹 和生, 石岡 圭一, 荒川 政彦, 小川 和律, 石原 吉明, 納田 明達,
北里 宏平, 黒澤 耕介

8) 対外協力専門委員会

◎田近 英一

伊藤 洋一, 小川 佳子, 小久保 英一郎, 佐々木 晶, 橋 省吾, 宮本 英昭, 矢野 創
濱野 景子(連合大会プログラム委員・正), 堀 安範(同・副)

議題は全会一致で承認された(可23, 否0).

議題 2. シニア会員の承認をお願いしたい.

藤原 顕 (会員番号 001100112)

大谷 栄治(会員番号 001100174)

木村 真 (会員番号 001100556)

山本 哲生(会員番号 001100990)

佐々木 進(会員番号 001101546)
向井 利典(退会：会員番号 001102048)
柴田 裕実(会員番号 001104417)
池田 保夫(会員番号 001104790)
加藤 一孝(会員番号 001104875)
三浦 保範(会員番号 001105254)
大迫 正弘(会員番号 001105452)
留岡 和重(会員番号 001105483)
中川 義次(会員番号 001105490)
花田 英夫(会員番号 001105650)
加藤 學 (会員番号 001105919)
松尾 弘毅(会員番号 001105971)
林 大雅 (会員番号 001112702)

上記申請者がシニア会員の資格を有していることは会員データベースで確認済み。

申請資格

2019年1月1日時点で60歳以上で、通算10年以上の正会員歴を有し、常勤職に就いていない個人(ただし、現在退会していてもよい。

過去に除名経験のある者は不可とする。)

議題は全会一致で承認された(可23, 否0)。

◇日本惑星科学会第131回運営委員会議事録

期 間：2019年3月14日(木)～3月20日(水)

議 題：RFI回答文書改訂2018作業部会の設置提案の承認

運営委員会委員：

出席(22名)

中本 泰史, 中村 昭子, 倉本 圭, 和田 浩二, 諸田 智克, 関根 康人, 玄田 英典, 中村 智樹, 中島 健介,
寺田 直樹, 田中 秀和, 竹広 真一, 小林 浩, 白井 寛裕, 奥住 聡, 荒川 政彦, 北里 宏平, 佐伯 和人,
関 華奈子, 田近 英一, 平田 成, 藪田 ひかる

欠席(1名)

渡部 潤一

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 steering-ml@wakusei.jp 宛に投票。

議題：RFI回答文書改訂2018作業部会の設置提案の承認

提案内容：

惑星探査専門委員会の下に「RFI回答文書改訂2018作業部会」（以下、「作業部会」）を設置する。
 作業部会委員長は、惑星探査専門委員会委員長が兼任する。
 作業部会の活動期間は2019年6月までとする。

作業部会は以下の委員長及び委員から成る。

●作業部会委員長

千秋 博紀(千葉工業大学、第14期惑星探査専門委員会委員長)
 寺田 直樹(東北大学、第15期惑星探査専門委員会委員長)

●作業部会委員

倉本 圭(北海道大学) (主査)	玄田 英典(東京工業大学) (副査)
春山 純一(JAXA/ISAS)	鎌田 俊一(北海道大学)
村上 豪(JAXA/ISAS)	今村 剛(東京大学)
佐藤 毅彦(JAXA/ISAS)	はしもと じょーじ(岡山大学)
臼井 寛裕(JAXA/ISAS)	吉田 二美(千葉工業大学)
堀 安範(国立天文台)	木村 淳(大阪大学)
生駒 大洋(東京大学)	関根 康人(東京工業大学)
岡田 達明(JAXA/ISAS)	岩田 隆浩(JAXA/ISAS)
伊藤 元雄(JAMSTEC)	関 華奈子(東京大学)
荒井 朋子(千葉工業大学)	唐牛 讓(JAXA/ISAS)
古川 善博(東北大)	中村 智樹(東北大学)
木村 勇氣(北海道大学)	瀧川 晶(京都大学)
亀田 真吾(立教大学)	笠原 慧(東京大学)
河原 創(東京大学)	藪田 ひかる(広島大学)
岡崎 隆司(九州大学)	矢田 達(JAXA/ISAS)
三河内 岳(東京大学)	藤谷 渉(茨城大学)
藤田 和央(JAXA/ISAS)	山岸 明彦(東京薬科大学)
小林 憲正(横浜国立大学)	矢野 創(JAXA/ISAS)
林 祥介(神戸大学)	野口 里奈(JAXA/ISAS)
小林 正規(千葉工業大学)	石橋 高(千葉工業大学)
山田 学(千葉工業大学)	木村 宏(千葉工業大学)
平井 隆之(千葉工業大学)	洪 鵬(千葉工業大学)
和田 浩二(千葉工業大学)	臼井 文彦(神戸大学)
中川 広務(東北大学)	宮本 英昭(東京大学)
吉岡 和夫(東京大学)	石橋 高(千葉工業大学)
佐伯 和人(大阪大学)	山田 竜平(会津大学)
小川 和律(神戸大学)	熊本 篤志(東北大学)
長 勇一郎(東京大学)	諸田 智克(名古屋大学)
白石 浩章(JAXA/ISAS)	成田 憲保(東京大学)
長岡 央(JAXA/ISAS)	鹿山 雅裕(東北大学)

石原 吉明(国立環境研究所)
 安部 正真(JAXA/ISAS)
 石丸 亮(千葉工業大学)
 川島 由依(SRON)
 中島 健介(九州大学)
 田中 佑希(東京工業大学)

山本 聡(JSS)
 小郷原 一智(滋賀県立大学)
 小玉 貴則(ボルドー大学)
 谷川 享行(一関工業高等専門学校)
 黒崎 健二(名古屋大学)

●上に加えて、惑星探査専門委員会委員および会長も作業部会委員として参加する。

荒川 政彦(神戸大学) 白井 寛裕(JAXA/ISAS)
 大竹 真紀子(JAXA/ISAS) 癸生川 陽子(横浜国立大学)
 齋藤 義文(JAXA/ISAS) 中本 泰史(東京工業大学)

議題は承認された(可22, 否0).

以上

◇日本惑星科学会第132回運営委員会議事録

期 間：2019年4月5日(金)～4月10日(水)

議 題：RFI回答文書改訂2018作業部会委員の追加承認

運営委員会委員：

出席(23名)

中本 泰史, 中村 昭子, 倉本 圭, 和田 浩二, 諸田 智克, 関根 康人, 玄田 英典, 中村 智樹,
 中島 健介, 寺田 直樹, 田中 秀和, 竹広 真一, 小林 浩, 白井 寛裕, 奥住 聡, 荒川 政彦, 北里 宏平,
 佐伯 和人, 関 華奈子, 田近 英一, 平田 成, 藪田 ひかる, 渡部 潤一

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steering-ml@wakusei.jp宛に投票。

議 題：RFI回答文書改訂2018作業部会委員の追加承認をお願いしたい。

提案内容：

「RFI回答文書改訂2018作業部会」の委員に以下の9名を追加する。

長谷川 直(JAXA/ISAS) 大坪 貴文(JAXA/ISAS)
 阿部 新助(日本大学) 石黒 正晃(ソウル大学)
 伊藤 孝士(国立天文台) 渡部 潤一(国立天文台)
 佐々木 晶(大阪大学) 関口 朋彦(北海道教育大学)
 浦川 聖太郎(日本スペースガード協会)

議題は全会一致で承認された(可23, 否0).

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2019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)

Harris Geospatial 株式会社

株式会社ナックイメージテクノロジー

◇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.

2019/07

7/25-7/27 第47回可視化情報シンポジウム

(a)京都府京都市

(b)可視化情報学会

(c)<http://visualization.jp/symp2019/>

2019/09

9/13-9/15 日本流体力学会 年会2019

(a)東京都調布市

(b)日本流体力学会

(c)<http://www2.nagare.or.jp/nenkai2019/>

2019/10

10/07-10/09 日本惑星科学会 秋季講演会

(a) 京都府京都市

(b) 2019年日本惑星科学会

(c) <https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2019/>**10/23-10/25 第60回高圧討論会**

(a) 北海道札幌市

(b) 日本高圧力学会

(c) <http://highpressure.jp/new/60forum/index.html>

編集後記

高専で2020年卒予定の学生の就職担当をしていますが、求人票・OB訪問・企業面談の多さに驚かされます。就職氷河期だった自分の大学卒業頃と比べると、隔世の感があります。それに加えて、ほぼ全ての企業さんが「ホワイトです」「残業はほとんどないです」「働き方改革です」などを強調されることや、学生もそのような働き方を当然と考えていることも、自分の頃と比べて常識が大きく変化していることを感じます。この「ホワイト」化の流れがどこに行き着くかが気になる今日この頃です。

さて話しを変えますが、毎年6月号に掲載されている「学

位論文紹介ページ」を皆さんにもっとご活用を頂けないかと思っています。これは惑星科学関連分野において博士号もしくは修士号を取得された会員の論文タイトルを紹介するものです。他の学会誌に無い特徴として画像を1枚掲載できます。過去3年に遡って掲載できますので、今回載せ忘れてしまったという方は来年に是非ともよろしくお願ひします。

それでは皆さんからの原稿を心よりお待ちしております。今後ともよろしくお願ひいたします。

(杉山)

編集委員

和田 浩二 [編集長]

杉山 耕一郎 [編集幹事]

上根 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 三浦 均, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2019年6月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第28巻 第2号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社

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

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail: staff@wakusei.jp

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

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

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。