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は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 者ら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てはい 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

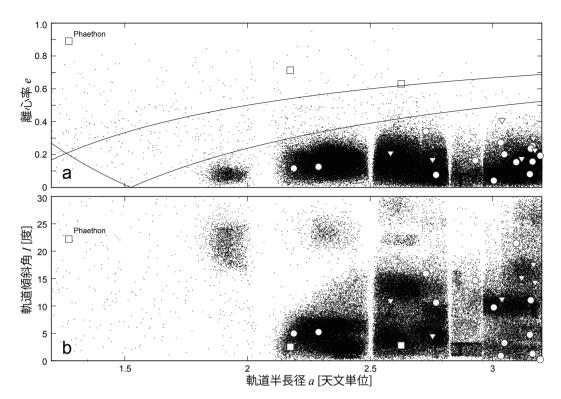


図1:活動的小惑星の軌道要素,具体的には軌道半長径・離心率・軌道傾斜角の分布(軌道要素にはこの他に近日点引数・昇交 点黄経・平均近点離角などがあるが、ここでは扱わない). (a) 軌道半長径 a [天文単位]と離心率 e, (b) 軌道半長径 a と軌 道傾斜角 / [度]. パネル(a) 内に記された二本の実線は小天体の近日点・遠日点が惑星の軌道(地球・火星各々の軌道半長 径ap = 1.0およびap = 1.52368天文単位)と交差する位置を示すものである. 具体的には、e = 1 - ap/a (これ以上の離心 率を小惑星が持つとその近日点位置が惑星軌道と交差する) および $e = -1 + a_P/a$ (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 $T_{\rm u} > 3.00$,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].

に多くの例が挙がっている[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(T₂). 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ので、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T₂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	TJ	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のダストプリュ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)ことからも、ダストプリュ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、ダストプリュ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、過去には彗星的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が活発な彗星的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<math>(q=0.14天

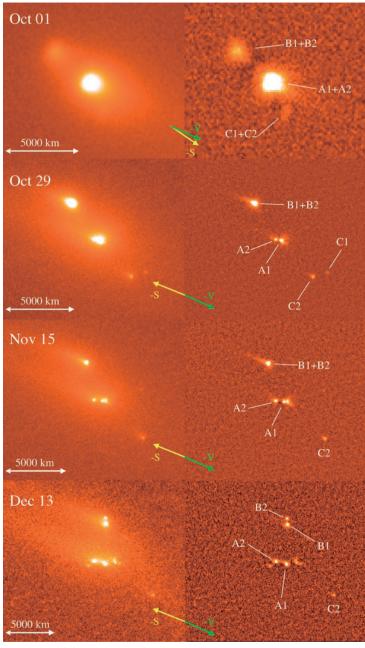


図2:活動的小惑星の典型例であるP/2013 R3の四つの異なる時期における活動を示す画像. 文献[17]の Fig. 1を転載したものであり、著者のDavid Jewitt博士およびAmerican Astronomical Society (AAS) から掲載許可を得ている. 左欄は生画像であり、右欄は拡散したコマを見えにくくするために空間 的フィルタをかけたもの. Oct 01 (2013年10月1日)のデータはKeck望遠鏡から取得され、その他 (Oct 29, Nov 15, Dec 13)のデータはHubble宇宙望遠鏡 (HST) から取得された. 各々の画像は上が北、左が東で、視野の大きさは14"x12". 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的性 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。このことからも、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かの場合がある。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のダストプ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氷が露出して昇華し, それが活動性として観測されるという説もある[5,34]. 氷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付く天体では, 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 付くごとに少しずつ破砕され、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] 天体のこうした破砕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解 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,太陽加熱による破砕,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氷が形成される軌道半長径(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. そうした背景的事 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 イ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こさず成長で 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も繋がる。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氷微惑星(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(その場でのケブラー角速 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(もしくは氷 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 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かれば、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 天体はとても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くださった方々(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
- 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ブラー運動を行うが、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 《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)×(a'/r_2)《1と記される。すなわち仮定(i)より m_2/m_1 《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

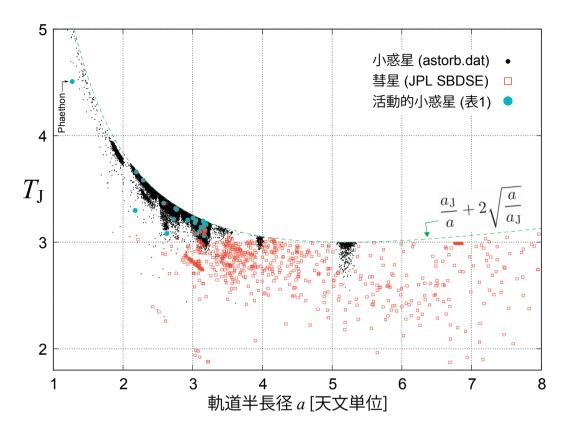


図3:太陽系の小惑星と彗星,そして活動的小惑星のTisserandパラメータ T_1 と軌道半長径aの関係.小惑星の軌道要素は図1を描画した際に使ったものと同一であり,米国Lowell天文台が発行するastorb.datから52,358天体を抽出した.彗星の 軌道要素はJPL Small-Body Database Search Engine (SBDSE) にあるデータ (2019年4月5日現在のもの) から軌道半 長径aが8天文単位未満の684天体を抽出した.図中の黒い丸印は小惑星を表し,灰色 (オンライン版では橙色) の正方形 が彗星である.活動的小惑星はやや大きな灰色 (オンライン版ではシアン) 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 $a_1/a+2\sqrt{a/a_1}$ 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 てある.なお (a, T,a)=(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,a)=(6.8, 3.0) 近辺で水平方向に連なるものはShoemaker-Levy (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 ~ 4.0に集中するヒルダ群天体,およびa ~ 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ので[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際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。

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

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TI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 $T_1 > 3$. 彗星は $T_1 < 3$. 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Ti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したことがな 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 の正方形)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_1 = 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。 $T_1 < 3$ を示す小惑星はたくさんあ るし、 $T_1 > 3$ 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 $(2 < T_1 < 3)$ 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 $T_{\rm J}=3$ 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] Hesih, 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] Kruijer, 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 Satune. Perturbations des petites planetés, 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.