
日本惑星科学会誌 遊・星・人

第26巻 第4号

目次

巻頭言 早川 基	129
<hr/>	
巨大惑星の衛星系形成における微惑星の寄与 末次 竜	130
<hr/>	
火の鳥「はやぶさ」未来編 その13 ～LSS訓練：ひと月で小惑星の特徴を把握し試料採取地点を絞り込み～ 石原 吉明, 渡邊 誠一郎, 田中 智, 山口 智宏, 三浦 昭, その他7名&2チーム	139
遊星百景 その10 ～静かの海 Apollo11号着陸地点～ 山田 竜平	144
惑星ラボからこんにちは！ ～京都大学宇宙総合学研究ユニット～ 佐々木 貴教	146
有人宇宙学の創出と教育的実践 土井 隆雄	149
ExoKyoto太陽系外惑星データベース開発について 山敷 庸亮	152
太陽型星のスーパーフレア 野津 湧太, 柴田 一成	159
歴史文献を用いた天文学研究 磯部 洋明	169
宇宙倫理学プロジェクト ～惑星科学との対話に開かれた探求として～ 呉羽 真	174
2017年度 惑星科学フロンティアセミナー 参加報告 辰馬 未沙子	182
「iSALE講習会2017」参加報告 金丸 仁明	184
木星トロヤ群小惑星探査ワークショップ開催報告 癸生川 陽子, 河井 洋輔, 青木 順, 岡田 達明, 伊藤 元雄	187
研究会開催報告「第5回衛星系研究会：冥王星系の起源」 谷川 享行, 木村 淳, 奥住 聡, 関根 康人, 倉本 圭, 大槻 圭史, 田中 秀和	190
2017年 日本惑星科学会秋季講演会報告 佐々木 晶	192
JSPS Information	195

Contents

Preface	H. Hayakawa	129
<hr/>		
Contribution of planetesimals to formation of satellites systems	R. Suetsugu	130
<hr/>		
Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (13)		
— Landing site selection training of Hayabusa2 Mission —		
Y. Ishihara, S. Watanabe, S. Tanaka, T. Yamaguchi, A. Miura, and 7 authors, 2 teams		139
My favorite topography (10)		
— Apollo 11 landing site in Mare Tranquillitatis —	R. Yamada	144
Hello from planetary labs! — Kyoto University Unit of Synergetic Studies for Space —		
	T. Sasaki	146
Creation of the study of human space activities and its educational exercise		
	T. Doi	149
Development of exoplanet database “ExoKyoto”	Y. Yamashiki	152
Superflares on solar-type stars	Y. Notsu and K. Shibata	159
Historical documents and astronomy	H. Isobe	169
The space ethics research project: an introduction for planetary scientists		
	M. Kureha	174
Report on the Planetary Science Frontier Seminar 2017	M. Tatsuuma	182
Report on the iSALE workshop 2017	M. Kanamaru	184
Report on the workshop for Jupiter Trojan Exploration by Solar Power Sail		
Y. Kebukawa, Y. Kawai, J. Aoki, T. Okada, M. Ito		187
Report of the 5th workshop on satellite systems		
T. Tanigawa, J. Kimura, S. Okuzumi, Y. Sekine, K. Kuramoto, K. Ohtsuki, H. Tanaka		190
Report of 2017 fall meeting	S. Sasaki	192
JSPS Information		195

巻頭言

惑星科学会に思う事

惑星科学会は創立した頃から外から見えていましたが、始めの頃はほとんど中の人との交流はありませんでした。惑星科学会の方と初めて仕事で接したのは1998年に打ち上げた火星探査機「のぞみ」(残念ながら軌道上での不具合で火星周回軌道に投入する事は出来ませんでした)だったと思います。何人かの方にPI, Co-Iとしてプロジェクトに参画をしてもらいました。地球離脱時のトラブルにより火星到着が2003年末~2004年初頭に遅れた事で、「のぞみ」と同時期に火星に到着するESAの火星探査機「Mars Express」と共同観測をしようという話が持ち上がりました。「のぞみ」は火星周辺のプラズマ環境観測がメインなのに対して「Mars Express」は火星そのものがメインターゲットと異なる分野を対象とした衛星の為、どういった共同観測が可能かといった事をワークショップなどを開催して検討を進めました。その過程で「Co-Iの交換を行おう」という話になり、希望者を募る事となりました。それまで日本人が殆どかかわりを持っていなかった衛星に何人もの人がCo-Iとして参加を出来るという、(特に観測器の製作に関わっている人間からすると)「えっ本当? こんな美味しい話が合って良いの?」という話でした。「Mars Express」のCo-Iですから惑星科学会に話を流しました。希望者を絞るのが大変になるくらい応募があると期待していたのですが、実際には既に「のぞみ」プロジェクトに加わっている人からのみという結果でとてもがっかりしたのを覚えています。

その当時は搭載機器開発はおろか衛星のデータ解析すらもしている人が殆どいなかったという事を後から聞きました。それからの20年弱で惑星科学をめぐる環境もそうですが、「来る10年」で探査計画を検討したり、SLIM, MMXなどの計画に多くの観測機器提案が出てきたりと惑星科学会自身も大きく変わったと思います。海外の衛星に搭載機器を載せないかと相手から誘いがかかる物はまだまだあまり多くないと思いますが、今後「この搭載機器を作るなら日本の協力が必要だ」と言われる観測機器が増えると共に、データ解析、理論など幅広い分野で日本の存在感が増していくことを期待しています。

早川 基(宇宙航空研究開発機構)

巨大惑星の衛星系形成における微惑星の寄与

末次 竜¹

2017年7月17日受領, 査読を経て2017年8月7日受理.

(要旨) 巨大惑星の周りには衛星と不規則衛星がある. 前者は巨大惑星の成長過程において惑星まわりにあったとされる周惑星ガス円盤内で形成され, 後者は捕獲された微惑星が起源だと考えられているが, これらの形成過程には不明な点も多く残っている. 本稿では, 不明な点の一つであり, 理解されているようで実は詳細な研究がされてこなかった周惑星ガス円盤からのガス抵抗による微惑星の捕獲過程について, これまでに得た結果をもとに紹介し, 捕獲された微惑星が巨大惑星の衛星系形成にどのように寄与するのかについて述べる.

1. はじめに

近年, 巨大惑星の衛星¹の詳細が探査機の観測, 理論的研究によって明らかにされ, 非常に注目されている. その一方で巨大惑星の周りには不規則衛星と呼ばれる小天体群も存在している. これら二つは衛星という名前こそ共通しているが, 軌道や質量が大きく異なる. こうした違いは起源の違いを反映しており, 衛星は過去に惑星周りにあったガス円盤の中で誕生し, 不規則衛星は捕獲された微惑星が起源と考えられている. そのため, 衛星と不規則衛星は従来分けて議論されてきた.

しかしながら, 最近の研究から一部の不規則衛星は衛星の形成とほぼ同時期に捕獲された可能性が指摘されている. 詳細は2.2節に譲るが, 現在, 有力とされている天体の重力相互作用で不規則衛星を捕獲するモデルでは, 一部の大きな不規則衛星(約100 kmサイズ)の捕獲が困難なため, それらの大きな不規則衛星は惑星周りにあったガス円盤からのガス抵抗で捕獲されたのではないかとされている. この時, ガス円盤内ではガリレオ衛星などの衛星の集積が進行している. そのため多少強引に考えると, 微惑星の捕獲がしばし

ば起こる状況下で衛星が集積したことになる. しかし, 従来の衛星のガス円盤内での集積モデルでは捕獲された微惑星の衛星形成への寄与は考慮されていない.

このように, ガス抵抗による微惑星の捕獲という観点からだと, 衛星と不規則衛星に関連があるように見えてくる. その一方で, 微惑星の円盤からのガス抵抗による捕獲過程自体は詳しく研究されておらず不明な点が多いため, 結局, 衛星と不規則衛星の起源に, 捕獲された微惑星がどのように寄与するのかよくわからないというのが現状である. そこで本稿では, 曖昧にされてきたガス抵抗による微惑星捕獲をこれまで調べてきたので, それらの結果をもとに巨大惑星の衛星系形成において微惑星がどのように寄与するのかを述べたいと思う.

2. 巨大惑星の衛星系

研究結果について述べる前に, 現在提案されているいくつかの衛星の形成モデルと不規則衛星の捕獲モデルについて簡単に紹介しておく.

1. 産業医科大学医学部
ryos@med.uoeh-u.ac.jp

1. 規則衛星とも呼ばれるが, 本稿では衛星と呼ぶ.

2.1 衛星の形成

巨大惑星の周りには数多くの衛星がある。衛星のサイズは100-1000 km, 構成物質もほぼ水できているものもあれば, 岩石が混じるものや木星衛星のイオのように氷を含まず岩石のみできているものもあり, 非常に多様である。衛星は巨大惑星の近傍を公転しており, 軌道長半径は惑星半径の30倍程度の範囲に大半のものが収まる。またそれらの軌道はほぼ円軌道で, 軌道面は惑星の赤道面とほぼ一致している。こうした軌道の特徴から, 巨大惑星の成長時に原始惑星系円盤のガスが惑星へ降着する際に惑星周りに形成されたガス円盤(以後, 周惑星円盤と呼ぶ)において, これらの衛星は誕生したと考えられている [1,2]。つまり, 惑星が太陽周りにあった原始惑星系円盤内で固体が集積し形成されたように, 衛星も惑星周りにできた周惑星円盤内で固体が集積し形成されるのである²。

では惑星形成における太陽系最小質量モデルと同様に, 衛星系における最小質量モデルを作れば衛星の形成を大まかに説明できるかというところではない。単純に当てはめると周惑星円盤の面密度が高くなり, 水氷が気化してしまう [1]。これは多くの衛星が水氷を保持していることと矛盾する。そのため現在, 円盤内の温度の問題を回避するために大まかに二つの周惑星円盤モデルが提案されている。一つがsolid enhanced minimum mass diskモデルで周惑星円盤のガス面密度が惑星の近傍では高いが, 惑星から離れると急激に減少するというものである [2]。このモデルだとガリレオ衛星の水の含有率が衛星によって異なることを説明できる。もう一つはgas-starved diskモデルである [1]。このモデルでは, 惑星形成の間, 周惑星円盤に原始惑星系円盤からガス供給が続いていることに注目し, 一度に衛星の材料を用意するのではなく原始惑星系円盤から継続的にガスとともに供給される固体物質の集積で衛星が形成されるというものである。この円盤モ

デルの場合, 外から供給される材料物質によって形成されるため, 周惑星円盤自体のガス面密度が低下しても問題ない。さらに, このモデルだと, 従来の高い面密度による水氷の気化を回避できるだけではなく, 巨大惑星の質量と衛星系の総質量の比が約 10^{-4} となる観測事実も説明できる [5]。そのため, これまでの衛星形成に関する先行研究では, この円盤モデルをそのまま使用, もしくは一部改良するなどして, 幅広く使用されている。そこで本稿でもgas-starved diskモデルを使って以後, 話を進めていく³。

さて, この円盤モデルでの微惑星の捕獲の取り扱いについて見てみる。上述のように, このモデルでは衛星の材料となる固体物質は周惑星円盤へ流入してくるガスとともに供給されると考えている。これは, 固体物質のサイズはガスの流れと一緒に動けるようなサイズでなくてはならないことを意味しており, 論文中的の見積もりによると1 mより小さいサイズ(ダストサイズ)を想定している [1]。そのため, gas-starved diskモデルにおいて, 微惑星の捕獲の効果は考慮されていないのである。

2.2 不規則衛星の捕獲

巨大惑星には惑星近傍を公転する衛星以外にも, 不規則衛星と呼ばれる小天体群が存在する。大半の不規則衛星のサイズは1-10 km程度で最大でも100 km程度である。また, それらの軌道長半径は惑星半径の100-600倍程度あり, 惑星から非常に離れた場所に分布している。それらの軌道の離心率, 軌道傾斜角は大きいものが多く, 逆行軌道のものも多数存在する。こうした軌道の特徴から, 起源は捕獲された微惑星と考えられている⁴。不規則衛星の捕獲について様々なモデルが提案されているが, おおまかにいうと周惑星円盤からのガス抵抗による捕獲モデルと三天体の重力相互作用による捕獲モデルとに分類できる。さらに後者は, 三天体の構成が, 二つの惑星と一つの微惑星の場

2. 惑星近傍の中型の衛星(約100 kmサイズ)は周惑星円盤からではなく, 地球の衛星である月が地球への天体衝突で地球周りに形成された粒子円盤から誕生したように, 過去に巨大惑星周りにあった粒子円盤から形成されたというモデルが提案されている [3,4]。このモデルの場合でも周惑星円盤に起源を求めるとモデルが棄却されるわけではなく, 衛星の半径が1000 km以上ある大型の衛星(木星のガリレオ衛星, 土星のタイタンなど)は, この粒子円盤モデルから起源を説明するのは難しいため, 周惑星円盤起源と考えられている。

3. しかし最近の研究から従来のダストの集積だけでは衛星サイズまで集積するのが困難であることが示されている [6]。また周惑星円盤内での電離度を考慮した計算では, gas-starved diskモデルで想定されているよりも角運動量の輸送効率が低く, 周惑星円盤の面密度が高くなるという問題点も指摘されている [7]。

4. 海王星のトリトン は代表的な不規則衛星の一つであるが, 半径は1000 km以上あり, さらに惑星のごく近傍を逆行方向に円軌道で公転しており, かなり特異な天体である。

合と一つの惑星と二つの微惑星の場合とに分類できる。簡単にそれぞれのモデルを説明しておく。

(a) ガス抵抗による捕獲[8,9]: 周惑星円盤を通過した微惑星がガス抵抗によってエネルギーを失い捕獲されたという古くから提案されているモデルである。このモデルのジレンマは、微惑星を捕獲できるほどのガス抵抗の場合、捕獲後も微惑星に強いガス抵抗が作用することで急激な軌道進化を引き起こし惑星へ落下してしまうが、その一方で、落下を防ぐためにガス抵抗を弱くすると微惑星の捕獲が困難になることである。また周惑星円盤のガスの散逸が進行し、ガス抵抗が弱くなったとしても、特定の軌道の微惑星であれば捕獲されることがあるが[9]、計算例が少なく、その詳細は不明である(詳しくは3.5節)。

(b) バイナリー微惑星と惑星の三体相互作用による捕獲[10,11]: 連星系の小天体が発見されていることから、惑星に接近したバイナリー微惑星のうち一体がエネルギーを持ち去り、もう一体が捕獲されるというものである。ただ捕獲確率が低いことや、捕獲後の離心率が大きく、現在の軌道にするには結局、ガス抵抗が必要となるなどの問題がある[11]。

(c) 一つの微惑星と二つの惑星の三体相互作用による捕獲[12,13]: 近年、太陽系の惑星は誕生してから数億年後に動径方向に移動した可能性が指摘されている。移動中に巨大惑星同士でしばしば近接遭遇するため、この遭遇時に周囲にあった微惑星と三体相互作用し、捕獲するというモデルである。このモデルだと順行も逆行も捕獲でき、さらに捕獲後の軌道も観測とある程度一致することが知られている。しかし惑星の大移動を起こすために誕生直後の太陽系が現在よりもずっとコンパクトでなければならないことや、木星が不規則衛星を捕獲するために天王星サイズの惑星がもう一天体必要になるといった問題がある[13]。また、このモデルでは微惑星のサイズが大きくなるにつれて捕獲確率が減少するため、直径が100 km以上ある不規則衛星(木星のHimaliaなど)は捕獲が困難とされている。そのため、これらの大きな不規則衛星は惑星移動時に捕獲されたのではなく、惑星が移動する前にガス抵抗などで惑星形成の時期に捕獲されていた不規則衛星の生き残りとしてされている。

2.3 ガス抵抗による微惑星捕獲過程の扱い

巨大惑星の衛星形成及び不規則衛星の捕獲について簡単に説明した。見比べると両者の間で微惑星の捕獲について整合性がとれていないことがわかる。衛星形成のgas-starved diskモデルでは微惑星の効果は考慮されていない。その一方で、三体相互作用による不規則衛星の捕獲モデルではサイズの大きなものの捕獲が困難なため、ガス抵抗による捕獲を必要としている。仮に、周惑星円盤からのガス抵抗によって大きな不規則衛星が捕獲できた場合、衛星形成に寄与するか否は別にしても、100 kmサイズの微惑星が捕獲できるのであれば、より小さな微惑星の捕獲が起こったと考えても不自然ではないだろう。おそらく、こうした不一致が生まれた原因の一つとして、モデルが提案された2000年代はじめには、周惑星円盤の構造について不明な点が多かったことが挙げられる。しかし最近では高解像度の流体計算によって惑星近傍まで見ることが可能となり、ガスが周惑星円盤に降着する様子や、円盤の三次元構造の詳細が精力的に調べられている。このような計算により、周惑星円盤がほぼ軸対称構造であることや、ガスの密度分布等が明らかにされた[14,15]。そこで、周惑星円盤を軸対称の円盤と仮定した太陽、惑星、微惑星の三体問題軌道計算を用い、以下では周惑星円盤によって微惑星は捕獲されるのか、また捕獲された場合どのような軌道進化をするのか(3.2節)、捕獲された微惑星は円盤のどこに分布するのか(3.3節)、それらが衛星の形成に寄与するのか(3.4節)、ガスの散逸が進行しガス面密度が減少した周惑星円盤に微惑星の捕獲は可能なのか、また捕獲された微惑星の軌道は実際の不規則衛星の軌道と一致するのか(3.5節)について述べることにする[16-19]。

3. 捕獲された微惑星の衛星系形成への寄与

3.1 微惑星の捕獲

これまでも「捕獲」という言葉が出てきたが、今後も頻出するのでガス抵抗に限らず衝突や重力相互作用によるものも含めた一般的な捕獲現象についてはじめに説明する。話を簡単にするために中心星の周りを

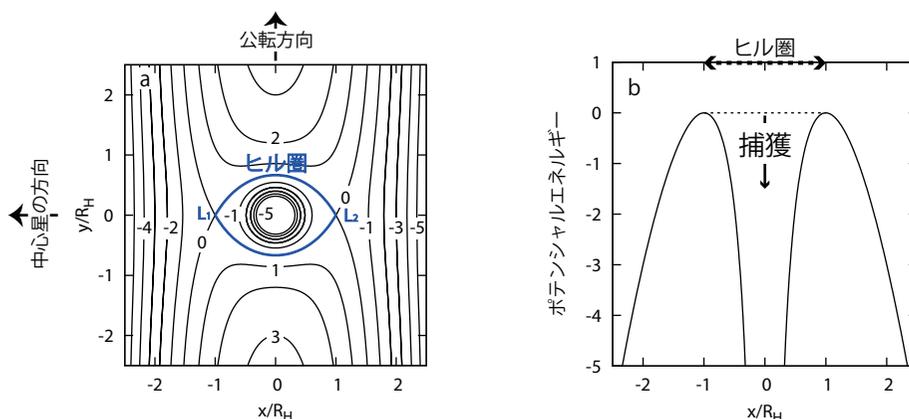


図1：(a) 惑星を原点においた回転座標系における惑星周りのポテンシャルエネルギーの様子。ポテンシャルエネルギーが0の等値線上のレモン型の領域(太線)は惑星のヒル圏である。長さはヒル圏の半径 R_H で規格化されている。 L_1 , L_2 はラグランジュ点である。(b) $y=0$ における図1aの断面図。

惑星と微惑星が公転している三体で成り立つ系について考える。ただし、惑星と微惑星の質量は中心星の質量よりもずっと小さいとする。この時、系は中心星の重力によって支配されるが、惑星のごく近傍では中心星の重力よりも惑星の重力が卓越する領域が存在する。この領域のことを惑星のヒル圏とよぶ。図1aは惑星を原点とした回転座標系における惑星周りのポテンシャルエネルギーの様子を示しており、レモン型の領域がヒル圏である。惑星と中心星を結んだ直線状に存在するヒル圏の出入り口をラグランジュ点(L_1 , L_2)と呼ぶ。微惑星が捕獲されるには、兎にも角にもまず微惑星は惑星のヒル圏に入らなければならない。そのためには微惑星のもつエネルギーが最低でもラグランジュ点のポテンシャルエネルギーよりも高いことが要求される。高いエネルギーをもつ微惑星だとあらゆる場所からヒル圏内に侵入でき、ラグランジュ点でのポテンシャルエネルギー程度のエネルギーしか持たない微惑星だと L_1 もしくは L_2 の近傍から入ることになる。次にヒル圏に入った微惑星を捕獲するためには、今度は微惑星のエネルギーをラグランジュ点のポテンシャルエネルギーより何らかのエネルギー散逸(本稿ではガス抵抗)によって減少させなくてはならない。十分なエネルギーの散逸が起これば、微惑星のエネルギーがラグランジュ点のポテンシャルエネルギーよりも小さくなるとその微惑星は捕獲されたという(図1b)。一方で、エネルギー散逸が無い、もしくは散逸が十分ではなく

微惑星のエネルギーが高いままの場合、微惑星はヒル圏から脱出し、再び太陽周りを公転するようになる。

3.2 周惑星円盤による微惑星の捕獲及び軌道進化

では具体的に、周惑星円盤からのガス抵抗による微惑星の捕獲現象について見ていく。周惑星円盤からのガス抵抗による捕獲はヒル圏に入った微惑星が惑星近傍のガス密度の高い領域を通過した時に、周惑星円盤から撃力的にガス抵抗をうけ、エネルギーを急速に失うことで起こる。こうした捕獲は gas-starved disk モデルの場合でも十分起これ、サイズが大きくなるにつれて捕獲頻度は減少するが、約10kmの微惑星でも捕獲可能である。また捕獲頻度は微惑星の捕獲前の軌道(太陽中心の軌道)にも依存する。微惑星が初期に大きな軌道傾斜角を持っている場合、微惑星は周惑星円盤の上空からほぼ垂直に侵入するようになる。こうした軌道で周惑星円盤を通過する場合、円盤と相互作用する時間が非常に短くなるため十分なエネルギー散逸が起これず、捕獲が困難になる。そのため初期の軌道の離心率、軌道傾斜角が高くなるにつれて周惑星円盤による捕獲頻度は減少する。

また周惑星円盤は、円盤を構成するガス自体が惑星周りをほぼケプラー速度で公転している。このことが捕獲過程及び、その軌道進化を多様なものにする(図2)。周惑星円盤の公転方向と逆方向から微惑星が惑星

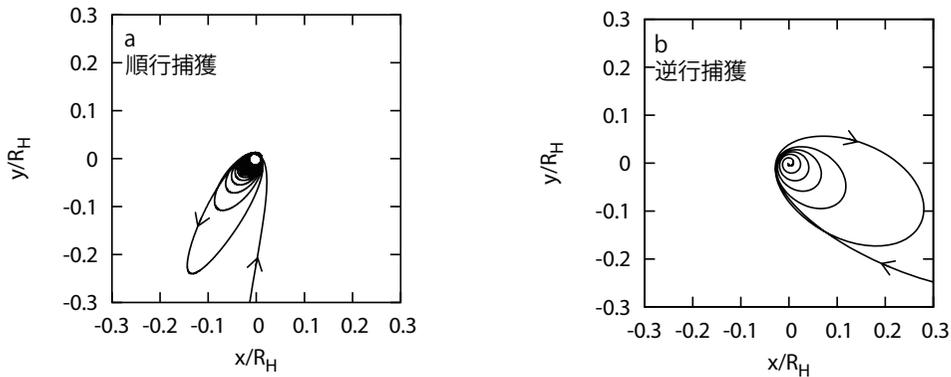


図2：周惑星円盤からのガス抵抗によって捕獲された微惑星の軌道の例。原点に惑星があり、周惑星円盤は惑星の周りを反時計周りに公転している。座標は惑星のヒル半径 R_H で規格化されている。(a) 順行捕獲, (b) 逆行捕獲。[16]より引用・改変。

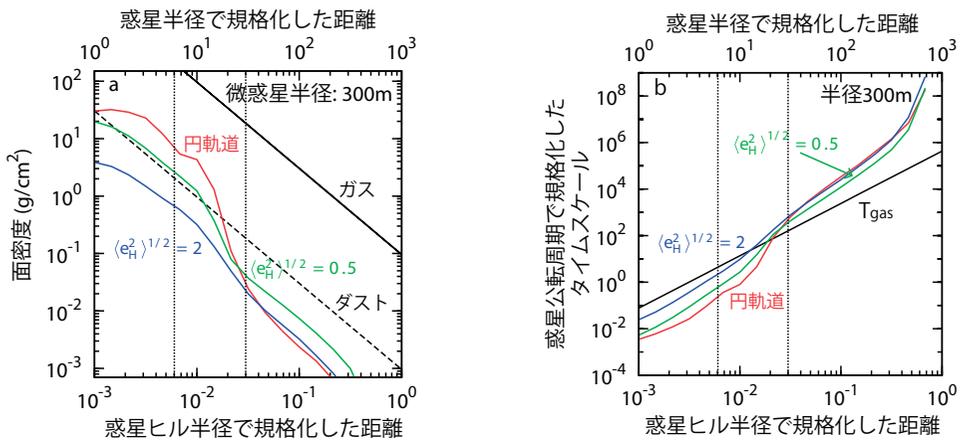


図3：(a) 周惑星円盤内の捕獲された微惑星の面密度。微惑星のサイズは300 m。微惑星が初期に太陽周りを公転した時の離心率と軌道傾斜角はレイリー分布に従うと仮定(ただし $\langle e_H^2 \rangle^{1/2} = 2 \langle i_H^2 \rangle^{1/2}$, e_H , i_H は離心率, 軌道傾斜角を R_H/a (a : 惑星の軌道長半径)で規格化したもの)。黒の実線と黒の破線はそれぞれガスとダストの面密度($\propto r^{-1.5}$ (r は惑星からの距離))。 (b) 捕獲された微惑星同士が衝突するタイムスケール。黒の実線はガス抵抗によって惑星に落下するタイムスケール(T_{gas})。垂直の点線に囲まれた領域は現在のガリレオ衛星のある領域。[18]より引用・改変。

に接近した場合(以後、逆行捕獲ということにする)、微惑星とガスとの相対速度は大きくなり、微惑星のエネルギー散逸も大きくなる。そのため周惑星円盤の公転方向と同じ方向から接近したもの(以後、順行捕獲)に比べ捕獲されやすい[16,17]。捕獲後の軌道進化も順行捕獲と逆行捕獲で異なる。捕獲直後は順行でも逆行でも惑星を中心とした軌道の離心率と軌道傾斜角は大

きい。しかし逆行で捕獲された微惑星は捕獲後も常に向かい風をうけることになる。そのためエネルギーが急速に失われ、軌道長半径が減衰し、らせん状に惑星へ落下してしまう。一方、順行方向から捕獲されたものは近点通過時にエネルギーを失い円軌道化し、その後はガスとの相対速度が小さくなるため軌道進化は逆行にくらべ長くなる。

3.3 周惑星円盤内での捕獲された微惑星の分布

前節では個々の微惑星の捕獲と軌道進化を述べたので、この節では周惑星円盤をもつ惑星の軌道近傍に一樣分布している微惑星が捕獲された後、周惑星円盤のどこに分布するのかを述べる。軌道計算の結果から、周惑星円盤内にある微惑星は、惑星周りを順行方向に公転するもの、逆行方向に公転するもの、そして捕獲されず円盤を通過していくものの三種類に分類できることが明らかとなった[18]。上述のように順行の微惑星は軌道進化が進むと円軌道化し軌道進化が緩やかになる一方、逆行捕獲の微惑星は急激な軌道進化で惑星に落下する。また捕獲されていない微惑星は惑星に接近しすぎると円盤内側の高いガス密度からのガス抵抗で捕獲されてしまうため、周惑星円盤の内側には存在しない。そのため、周惑星円盤の外縁には三種類の異なる運動状態の微惑星が存在しているが、惑星の近傍、つまり現在の衛星があるような領域では基本的には順行方向に運動しているものが多く存在する。また捕獲された微惑星の周惑星円盤内での面密度は、捕獲頻度と軌道減衰に依存する。捕獲前の微惑星の離心率や軌道傾斜角が大きい場合は、前節で述べたように捕獲頻度が小さくなり、その結果、周惑星円盤における捕獲された微惑星の面密度も小さくなる傾向にある。さらに、惑星軌道付近の微惑星の分布は実際には一樣ではなく、惑星による重力散乱により惑星軌道近傍の微惑星が取り除かれたような非一樣分布になると考えられている。この散乱による微惑星の除去は、微惑星の供給源が減少することを意味するため、捕獲された微惑星の面密度にも大きな影響を与える。特に捕獲後、周惑星円盤内を逆行方向に公転する微惑星は、もともとは惑星の軌道のごく近くで太陽周りを公転していたものが多いため、非一樣分布になると急激に減少してしまう。このため、非一樣性が強く効く場合には、周惑星円盤に捕獲された微惑星の大半は順行方向に公転することになる。

3.4 捕獲された微惑星の衛星形成への寄与

ここまでで、捕獲された微惑星の周惑星円盤内での振る舞いが大まかに理解できた。そこで、従来、gas-starved disk モデルで衛星形成の材料物質として想定されているガスと共に流入してきたダストと捕獲され

た微惑星の面密度を比較し、どちらが材料物質になりうるのかを調べる。周惑星円盤内のダストの動径方向依存性はガスと同じと仮定し、ガスに対するダストの比は0.01とする⁵。一方、微惑星は、ガスと微惑星の比が0.01の原始惑星系円盤から捕獲されたとする。その結果を示したのが図3aである。捕獲前の微惑星の運動状態に関係なく、外縁部分ではダストが卓越している。一方、微惑星の捕獲される前の軌道が円軌道に近い場合、現在のガリレオ衛星領域では、捕獲された微惑星の面密度がダストの面密度を上回る。しかし、捕獲前の微惑星の軌道の離心率が大きくなるにつれて面密度が減少し、衛星のある領域においてもダストの面密度が卓越するようになる[18]。

次に捕獲された微惑星が集積できうるのかを調べる。図3bはガス抵抗による軌道減衰のタイムスケールと捕獲された微惑星同士の衝突のタイムスケールを比較したものである。周惑星円盤の外縁では衝突のタイムスケールよりも軌道減衰のタイムスケールが短いため、衝突する前に微惑星は落下してしまう。一方、ガリレオ衛星領域において捕獲された微惑星の面密度は増加するので衝突のタイムスケールが軌道減衰のタイムスケールより短くなる。そのため惑星近傍領域では、捕獲された微惑星は落下するより前に衝突できると考えられる。ただ、この領域での衝突速度を見積もると脱出速度の1.2-1.4倍程度あるため実際に集積できるかという問題は残る。しかし最近の空隙率、物質強度、粉体摩擦の効果を入れた衝突シミュレーションによると数キロメートルサイズの小天体が、脱出速度よりも幾分高い速度で衝突した場合でも衝突合体できることが示されており[21]、集積できた可能性が高い。

さて、この節の最後に微惑星のサイズを変えた場合についても述べておく。実は微惑星のサイズを変えたとしても、周惑星円盤内にある捕獲された微惑星の数は捕獲頻度と捕獲後の軌道減衰率のつりあいで決まるため、ほとんど変化しない。つまり微惑星のサイズが小さいとガス抵抗の効果が大きくなるので捕獲頻度と軌道減衰率の両方が高くなり、サイズが大きいとガス抵抗の効果が弱くなり捕獲頻度と減衰率が低くなってしまうため、結果的に微惑星のサイズへの依存性は小

5. ダストとガスの比は一定ではなく動径方向に依存することも指摘されているが、簡単のため本稿では0.01で一定としている[20]。

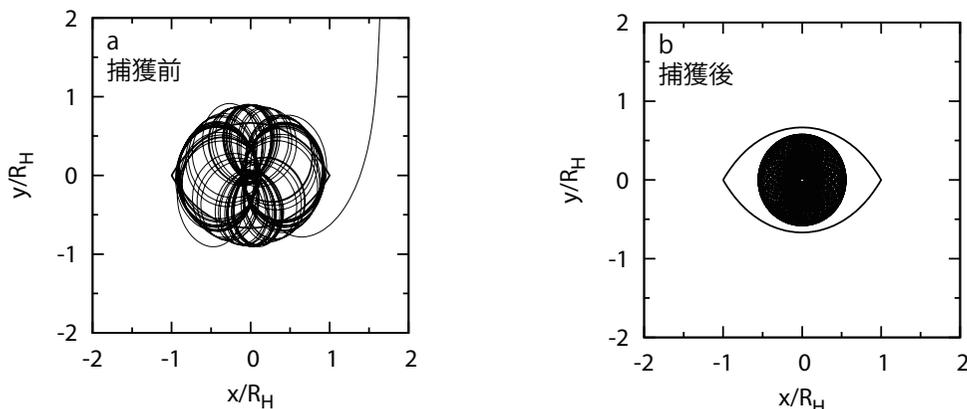


図4：ガス抵抗が弱い時の微惑星の捕獲軌道の例(逆行捕獲)。(a)捕獲される前の様子 (b)捕獲後の様子.レモン型の領域は惑星のヒル圏である。[19]より引用・改変。

さくなるのである⁶。捕獲された微惑星の面密度の傾向も微惑星サイズが変化してもほぼ同様である。ただし、捕獲された微惑星の面密度の増加する位置(図3aにおける惑星ヒル半径の0.004-0.02倍の位置での増加)は、微惑星が捕獲される位置の推移に依存する。微惑星サイズが大きくなると、捕獲に必要なガス抵抗も大きくなるため、より惑星近傍で捕獲されることになり、面密度の増加する位置も内側に推移する。一方、サイズが小さい場合はその逆で周惑星円盤の外側で捕獲されることになるため、面密度の増加位置は外側に推移する。推移した面密度の増加位置では微惑星サイズが300 mの時と同様に、捕獲前の軌道が円軌道に近いとダストの面密度よりも卓越するため、捕獲された微惑星が衛星形成に寄与できた可能性がある。ただし、捕獲前の軌道が円軌道に近いものになるためには、原始惑星系円盤のガス抵抗が十分効く必要がある。解析的な見積りによると[22]、捕獲前の軌道が円軌道に近かったと予想される微惑星のサイズは100 m以下であり、それ以上のサイズは比較的大きい離心率と軌道傾斜角をもっていたと考えられる。そのため衛星の材料物質として主に寄与できるのは数十メートルサイズ以下のものであった可能性がある。

6. 微惑星サイズが10 kmを超えると、捕獲に非常に強いガス抵抗が必要となるため、惑星の物理半径付近を通過しなくてはならない。そのため捕獲前に衝突するものが増加するため、周惑星円盤内の微惑星の総数は10 kmサイズ以下の場合に比べ減少する。

3.5 散逸している周惑星円盤による微惑星捕獲

これまで衛星形成期における周惑星円盤による微惑星の捕獲について見てきた。しかし巨大惑星の成長の最終段階になると、周惑星円盤のガスの源である原始惑星系円盤の散逸によるガス供給の減少もしくは、成長した巨大惑星の重力によって原始惑星系円盤に形成されたギャップによるガスの供給の減少が起こるため、周惑星円盤のガス面密度はさらに減少し、いずれ散逸する[20]。ガスの供給が減少することでガス密度が低下した周惑星円盤では微惑星捕獲が困難になる。そのため、これまでの接近した微惑星がたえず捕獲され、それらが周惑星円盤内に分布するという3.2節-3.4節のような描像ではなくなると考えられる。では捕獲が起こらないかといえばそうではなく、円盤通過時の撃力的なガス抵抗による捕獲(3.2節)とは異なる捕獲過程で微惑星は断続的に捕獲されるようになる。図4は gas-starved disk モデルのガス面密度の0.01倍まで散逸した周惑星円盤による10 kmサイズの微惑星捕獲の様子である。惑星に接近した微惑星はしばしばカオス的な運動を示し、微惑星のエネルギーはラグランジュ点でのポテンシャルエネルギー以上で捕獲されていないにもかかわらず、惑星の周りを公転することがある。図4aを見ると、ヒル圏の外に軌道がはみ出しておりエネルギー的には捕獲されていないが、惑星の周りを公転している様子がわかる。このようなカオス的

な軌道で微惑星が惑星周りをしばらく公転すると、ガス散逸によってガス密度が低下し弱まったガス抵抗でも、公転中に小さいエネルギー散逸が継続的に起こるため、最終的に小さいエネルギー散逸の蓄積で微惑星は捕獲される[9,19]。この捕獲軌道の特徴として、惑星中心軌道の近点が惑星から離れているということが挙げられる。そのため順行、逆行問わず、微惑星の軌道進化は遅く、長いもので惑星公転周期の 10^4 - 10^5 倍の間、周惑星円盤内で生き残ることができる[19]。これは従来の捕獲軌道が惑星の公転周期程度かそれ以下で落下していたことを考えると、いかに長いかがよくわかる。

では最後に、捕獲された微惑星が軌道減衰している最中に周惑星円盤が完全に散逸した場合を考え、散逸直後の微惑星の軌道長半径と、実際の不規則衛星のものとを比較する。離心率や軌道傾斜角分布は円盤散逸のタイムスケールや散逸開始時のガス面密度によって影響されてしまうが、パラメータ依存性がほぼ無い一つの興味深い結果は、ガス抵抗によって捕獲された微惑星の惑星中心軌道の軌道長半径には上限があり、惑星のヒル半径の約0.3倍以上の軌道長半径をもつものはほぼ存在しないということである[19]。この結果は、ガス密度が高い場合に起こる撃力的な捕獲においても同様にみられた[17]。実際の不規則衛星の軌道長半径分布を見てみると順行の不規則衛星はヒル半径の0.1-0.3倍の軌道長半径をもつものが大半であるが、逆行の不規則衛星は軌道長半径が大きいものが多くヒル半径の0.2-0.6倍の範囲に分布している[23]。そのため0.3倍以上の軌道長半径を持つ逆行の不規則衛星をガス抵抗の捕獲のみで説明するのは困難であり、捕獲後に摂動によって外側に移動する、もしくは別の捕獲モデルの寄与など、なんらかの解決策が必要である。その一方で、惑星移動による捕獲モデルでは捕獲困難とされるHimaliaの軌道長半径はヒル半径の0.2倍程度なので、軌道長半径に関してはガス抵抗による捕獲で説明可能である。

4. まとめと今後の課題

本稿の内容をまとめると以下ようになる。(1)巨大惑星形成時に惑星周りにあったとされる周惑星円盤からのガス抵抗によって、惑星軌道近傍にあった微惑

星は捕獲され、さらに周惑星円盤内の広範囲に分布する。(2)捕獲された微惑星が衛星の材料物質として寄与するか否かは、微惑星の捕獲前の軌道に依存し、円軌道に近ければ衛星形成に寄与した可能性が高い。

(3)周惑星円盤へのガス供給が減少し、ガス抵抗が弱くなったとしても微惑星の捕獲は起こり、そうしたものの一部は軌道長半径が幾分小さい不規則衛星になった可能性がある。

最後に、これらの結果の不定性についても述べておく。これらの研究は三体軌道計算によって得たものであり、微惑星同士の重力は考慮していない。そのため、本稿で紹介した微惑星の分布は重力を考慮した場合、変化する可能性は高い。またダストの分布についても単純にガス面数密度と同じ動径方向依存性と仮定しているが、実際にダストの流入過程を計算し周惑星円盤内での分布を調べると捕獲された微惑星とダストのどちらが寄与するのか、より明確になると考えられる。

謝辞

本稿で紹介した研究に携わっていただいた共同研究者の大槻圭史氏、谷川享行氏、藤田哲也氏に感謝いたします。本稿の査読者である田中秀和氏には有益なコメントをいただきました。感謝いたします。

参考文献

- [1] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, *Astron. J.* 124, 3404.
- [2] Estrada, P. R. et al., 2009, *Europa* (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press).
- [3] Crida, A. and Charnoz, S., 2012, *Science* 338, 1196.
- [4] Hyodo, R. et al., 2015, *Astrophys. J.* 799, 40.
- [5] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2006, *Nature* 441, 834.
- [6] Shibaiki, Y. et al., 2017, *Astrophys. J.* 846, 81.
- [7] Fujii, Y. I. et al., 2011, *Astrophys. J.* 743, 53.
- [8] Pollack, J. B. et al., 1979, *Icarus* 37, 587.
- [9] Cuk, M. and Burns, J. A., 2004, *Icarus* 167, 369.
- [10] Agnor, C. B. and Hamilton, D. P., 2006, *Nature* 441, 192.
- [11] Philpott, C. M. et al., 2010, *Icarus* 208, 824.
- [12] Nesvorný, D. et al., 2007, *Astron. J.* 133, 1962.

- [13] Nesvorný, D. et al., 2014, *Astrophys. J.* 784, 22.
- [14] Tanigawa, T. et al., 2012, *Astrophys. J.* 747, 47.
- [15] 谷川享行ほか, 2011, *遊星人* 20, 262.
- [16] Fujita, T. et al., 2013, *Astron. J.* 146, 140.
- [17] Suetsugu, R. et al., 2016, *Astron. J.* 151, 140.
- [18] Suetsugu, R. and Ohtsuki, K., 2017, *Astrophys. J.* 839, 66.
- [19] Suetsugu, R. and Ohtsuki, K., 2016, *Astrophys. J.* 820, 128.
- [20] Sasaki, T. et al., 2010, *Astrophys. J.* 714, 1052.
- [21] Jutzi, M. and Asphaug, E., 2015, *Science* 348, 1355.
- [22] Tanigawa, T. et al., 2014, *Astrophys. J.* 784, 109.
- [23] Jewitt, D. and Haghighipour, N., 2007, *Annu. Rev. Astron. Astr.* 45, 261.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その13

～LSS訓練：ひと月で小惑星の特徴を把握し試料採取地点を絞り込め～

石原 吉明¹・渡邊 誠一郎²，田中 智¹，山口 智宏¹，三浦 昭¹，
山本 幸生¹，平田 成³，諸田 智克²，坂谷 尚哉⁴，北里 宏平³，
松本 晃治⁵，藪田 ひかる⁶，はやぶさ2LSSデータ解析・検討チーム，
はやぶさ2LSSデータ作成チーム

(要旨) 「はやぶさ2」は、C型小惑星リュウグウ(Ryugu)にランデブーし、母船からのリモートセンシング観測及び小型着陸機によるその場観測を行うとともに、最大3回の表面物質サンプリングを行うこととなっている。サンプリング地点には、リュウグウそのものや母天体、さらには太陽系形成時の惑星集積過程と物質進化について、最大の情報を得られる場所を選定する必要があるが、選定のために必要となる情報はランデブー後取得されるリモートセンシング観測の結果を待たねばならない。そのため、限られた時間の中で小惑星の特徴を把握し、安全性と科学価値の評価を行い着陸地点選定(Landing Site Selection, LSS)を行う手順を確立しておくことは必須である。本稿では、来年に迫ったLSS本番に向けて、はやぶさ2プロジェクトが実施したLSS訓練について概説する。

1. はじめに

小惑星探査機「はやぶさ2」は、C型小惑星リュウグウ(Ryugu)にランデブーし、母船搭載機器によるリモートセンシング観測(ONC, NIRS3, TIR, LIDAR)、小型着陸機によるその場観測(MINERVA 及びMASCOT)、母船のサンブラを接地(TD)させて行う表面物質サンプリング、衝突装置(SCI)と分離カメラ(DCAM3)を用いた小惑星衝突実験、さらに(可能なら)高精度TDによるSCI生成クレータ周辺の地下物質についてもサンプリングを行ったのち、リュウグウを離脱して地球に帰還し、取得したサンプルを格納したサンプルコンテナをリエントリーカプセルを用いて地球に送り届け、持ち帰ったサンプルの各種地上分析を実施する予定である。探査機に搭載した各種のリモートセンシング機器のデータと地上でのリターンサンプルの詳細分析から、C型小惑星がもつ太陽系スノー

ライン(氷凝縮境界)付近での惑星集積過程と物質進化(特に水質変成や有機物多様化)の情報を読み出し、地球への水・有機物供給に関して制約を与えることを目的としている。この目的を達するためには、ただ闇雲にリュウグウからサンプルを採取すれば良いということではなく、リモートセンシング観測により取得した各種のデータから「リュウグウ上のどの場所の物質を持ち帰るべきか」を判断しなければならない。また、サンプリング時の探査機の運用計画・安全性評価を行うにも、現地でのリモートセンシング観測データを用いる必要がある。

一般に月や火星における着陸探査では、事前に取得された他ミッションによるリモートセンシング観測データを用いて、この種の安全性評価や科学評価が、場合によっては数年にわたって行われた後に着陸地点が決定される。一方、「はやぶさ2」のような小惑星探査の場合、地上望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた観測データは存在しても、事前にその場リモートセンシングデータが存在しないため、全てはランデブーし観測データを取得し始めてからのタスクとなる。「はやぶさ2」の場合、リュウグウの近傍観測は2018年7月に開始されるが、最初のひと月余りの内に、観測運用と並行して

1. 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

2. 名古屋大学

3. 会津大学

4. 明治大学

5. 国立天文台

6. 広島大学

ishihara.yoshiaki@jaxa.jp

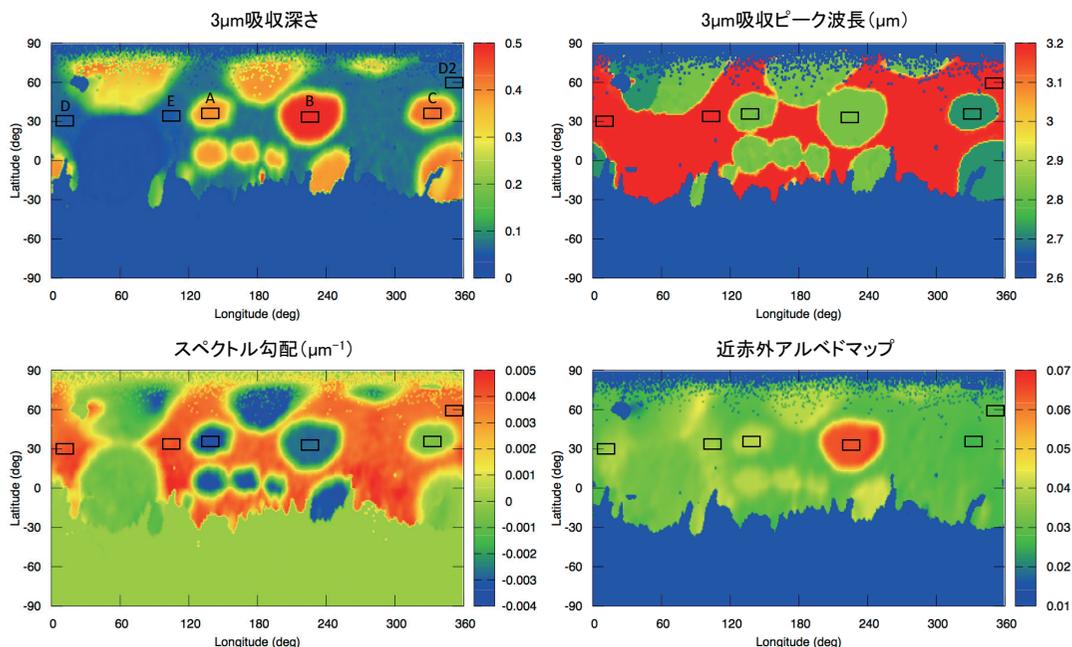


図1：近赤外分光計(NIRS3)によるスペクトル特徴量マップ。

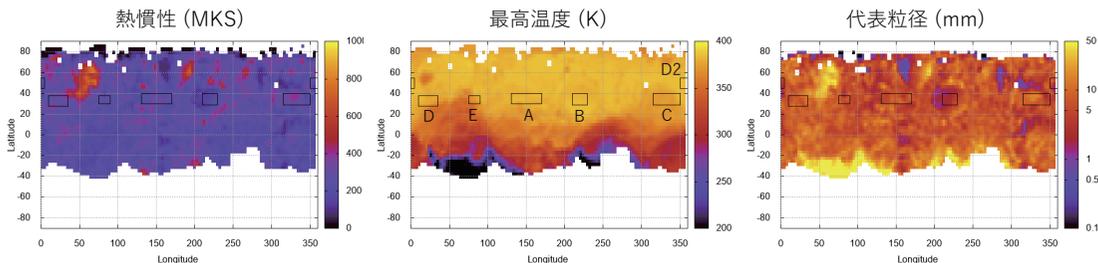


図2：中間赤外線カメラ(TIR)による熱慣性・最高温度・代表粒径マップ。

観測に基づく安全性と科学的価値の評価を行い、1回目のTD(TD1)候補点とMASCOT投下候補点の選定を行う必要がある。これら一連の着陸候補地点選定の過程をLanding Site Selection(LSS)と呼ぶ。このような極めてタイトなスケジュール(評価に必要なデータが全てダウンリンクされ、機器チームの手元に揃ってから結論を出すまでの猶予は数日程度!)の中で確実にLSSプロセスを進めるため、はやぶさ2プロジェクトでは、データ解析のプロセスと体制の確認、作業時間の見積り、ツール群のI/F確認等を目的として大規模なLSS訓練を2017年度晩春から盛夏にかけ実施した。本稿では訓練の概要についてまとめる。

2. LSS訓練準備

「はやぶさ2」におけるLSS訓練の特徴は、仮想小惑星(以下Ryugoid)モデルを作成し、「はやぶさ2」に搭載された各種の観測装置によるRyugoidの観測で得られた仮想データの解析という形で、LSSにおけるデータ解析・選定プロセスをほぼ全て実施している点である。つまり、我々はリュウグウ探査に先立ってRyugoid探査を実施し、LSSプロセスの訓練・検証を行ったわけである。その為、訓練実施に先立ち、2016年8月より模擬データ作成チーム(LSSDP)、データ解

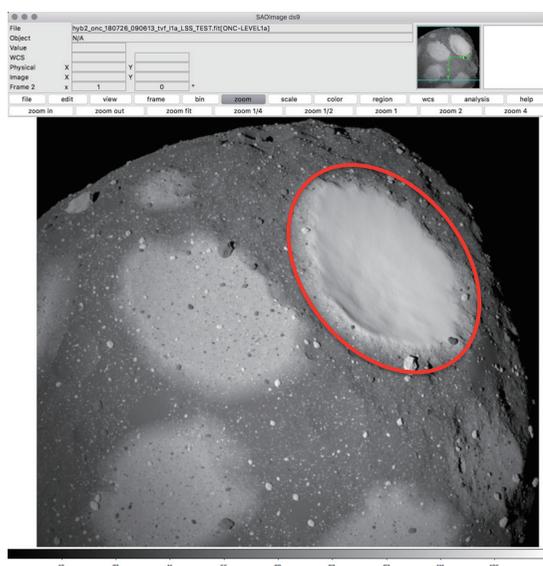


図3：光学航法カメラ(ONC)による安全性(ボルダー数)調査の例。この例では精円で囲われた白くスムーズなクレータ様の地域(Zone Bに相当)に直径3mを超えるボルダーはないと評価された。

析・検討チーム(LSSAA)に別れ、訓練本番に向けての準備が開始された。

LSSDPチームは約3.69億ポリゴンから成る非常に高精細な形状モデルを作成し、その上に仮想形成史コンテキスト(母天体での水質変性・熱変性、さらには母天体の破壊と再集積によるRyugoid形成など)と隕石分光データに基づく地質分布(粒径や宇宙風化の影響などは別途考慮して付与)、熱物性分布、クレータやボルダーを配置したRyugoidを作成した。さらにそれを「はやぶさ2」搭載の観測装置で観測した場合の模擬観測データを作成するツール群を準備した。

LSSAAチームでは、科学評価に必要な項目を網羅すべくLSSで使用するデータプロダクト(LSSプロダクト)と科学評価フローを定義し、作成ツールの開発・パイプライン化、依存関係のあるプロダクト間でのI/F確認、作業体制と手順の確認などを進めるとともに、各機器チームの作成するLSSプロダクトのチーム内共有・交換に用いる専用データディレクトリ等のインフラを作成した。

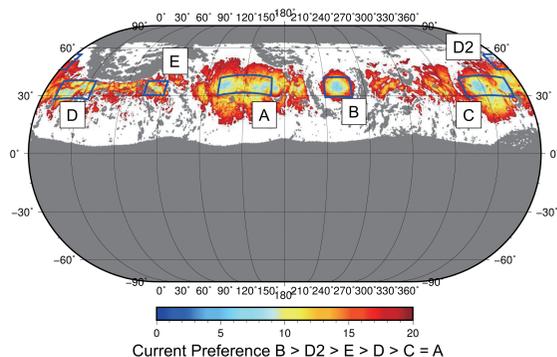


図4：システム側解析による安全スコアと候補領域。

3. LSS訓練の経過

訓練では、LSSDPチームにより作成された各種の模擬観測データ(ダウンリンクされた生データ相当)が提供され、LSSAAチームは設定された期日までに予定のLSSプロダクト群を作成・解釈し候補地点を選定するという形で行われた。なお本番ではおよそひと月の間に行うことになる作業を、訓練では約3倍に引き伸ばして実施した。そのため、フォーマットを定めた一次報告書という形で記録に残し、プロダクト作成の実作業に要した時間や人的リソースの把握を行なった。また毎週定例会を開いて各機器チームの解析状況の確認や発生した問題の把握・解決・スケジュール調整等を行い、当初LSSプロダクトとしては定義されていなかったプロダクトの作成についても、必要であれば対応するという対処を行なった。

LSSDPから提供される模擬観測データは、実際の「はやぶさ2」のリユグウ近接運用時の観測を模擬し、

- ・高度～20 km付近に設置されたBox Aからの観測
- ・高度5～7 kmに設置されたBox Cからの観測
- ・高度5 km付近に精密軌道制御された探査機からの中高度観測

の3種類の観測が設定され、実際のサイエンス観測運用のタイムラインと同様に作成された各観測機器の観測シーケンスに基づいて観測データが作成された。また探査機の位置・姿勢等についても、想定される誤差が付与されたのちLSSAAへ提供された。

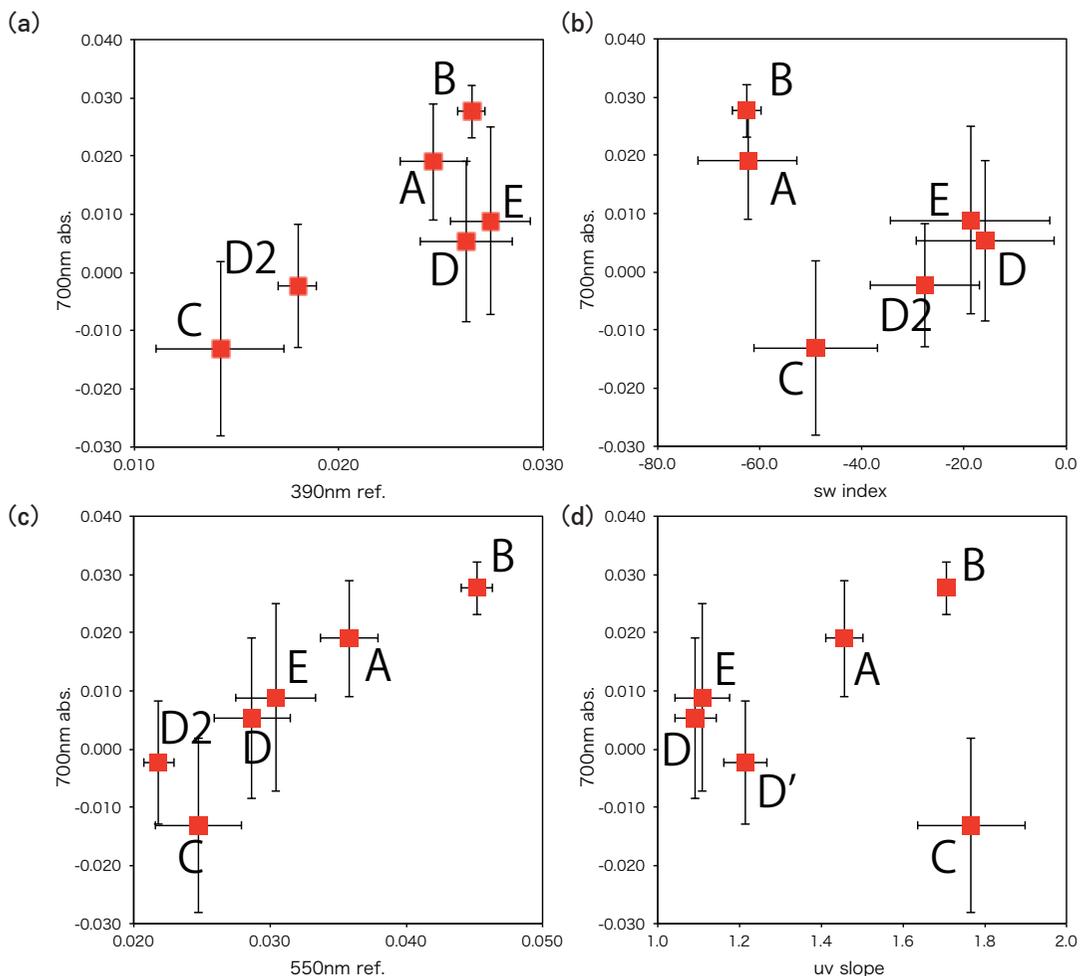


図5：TD1候補ゾーンのONC各種評価指標の比較：縦軸は共通で700 nmの吸収深さ（深い方が正）横軸は (a) 390 nm絶対反射率, (b) 宇宙風化度指標（注：隕石サブタイプが違う場合、この指標での比較は困難）, (c) 550 nm絶対反射率, (d) 紫外領域勾配。

表1：TD1ゾーンの科学評価と順位。

Potential LS	Meteorite group	High aqueous alteration	Low thermal alteration	Low space weathering	High total Carbon	High IOM contents	Low Boulder density	Total evaluation
Zone A	CM+dehydrated	○ (high T)	◎	○	△	○	×	
Zone B	CM	◎ (high T)	◎	◎	△	△	◎	1 st candidate
Zone C	CI	○ (low T)	○	△?	◎	○	×	3 rd candidate
Zone D	dehydrated CM?	×	×	×	△	○	×	
Zone D2	dehydrated CM?	×	×?	×?	◎	◎	○	2 nd candidate
Zone E	dehydrated CM?	×	×	×	△	○	×	

◎ : strong abs	◎ : few	◎ : strong abs	◎ : very low	◎ : very low	◎ : < 500
○ : weaker abs	○ : weak	○ : weak abs	○ : low	○ : low	○ : 500-10000
×		△ : normal	△ : high	△ : high	△ : > 10000
		×	×		

LSSAA チームは、これらのLSSDPから提供された模擬観測データを事前に準備した解析ツールを用いて解析し、形状・自転軸・自転周期を始めとするRyugoidの基礎的な情報を始めとして、多様なLSSプロダクト群(例えば図1, 図2など)を作成し、Ryugoid表層物質の同定並びにボルダー密度調査等の安全評価(図3)を実施した。さらにはLSSデータから読み取れるRyugoidの進化の推定を行い、LSS本番と同様にサンプリング候補地点及び評価結果を英文で科学評価書としてまとめプロジェクトに提出している。今回の訓練では、システム側の運用安全評価の結果残った6候補地点(図4)についてONC評価批評(図5)などをもとに科学面の評価を行なった結果、Zone Bが第一候補となった(表1)。

4. 訓練の効果(まとめにかえて...)

本稿を執筆している時点でLSS訓練の主要部分は終了し、LSSDP チームから提供されたRyugoidの真値とLSSAAチームの解析結果を比較しての精度検証や、訓練で把握されたデータ解析ツールの問題点等の対処を各チームで進めている。

例えば小惑星の自転軸・自転周期や探査機の精密な軌道は、形状モデルチームがONC画像から小惑星形状を復元するツールとして使用するSPC(stereo photoclonometry) [1]により同時推定される想定であったが、LSS訓練中の作業では想定された精度で推定出来ていないことが明らかとなった。これはツールの使い方の習熟が足りなかったためであったことがわかり、ツール開発元に問い合わせた問題解決を図っている。また、本訓練を通じてSPC処理で十分な精度の探査機精密軌道が得られなかった場合の対策が講じられ、LSS本番に向けてのデータ処理のロバストネスが向上した。さらに、ツールへの習熟不足だけでなく、短時間で簡便にデータ処理を行う必要があるために採用された解析法自身の限界が訓練で明らかとなった点も複数あり、これらについてはLSSの限られた時間内でより精度の出る解析を行うべく手法の見直しを進めている。

これらは実際にRyugoidという模擬小惑星を作成し、擬似的な小惑星探査を実施するという大規模なLSS訓練を行ったからこそ事前に把握出来た点である。もし、

今回のLSS訓練を行わずに来年のLSS本番を迎えていたら、今回LSS訓練で遭遇したツールや解析法の不具合に初めて遭遇した可能性が高く、その事態を想像すると肝が冷える思いである。

最後に、「はやぶさ2」に続いて、火星衛星サンプルリターン計画(MMX)では火星衛星フォボスからのサンプルリターンが計画されている。フォボスはNASAやESAの火星周回探査機により撮像されたデータがあるため、「はやぶさ2」程は事前情報がない中で短時間でのサンプリングサイト決定を求められるわけではない、しかし解析ツール群への習熟や体制の確認などを含め、今回「はやぶさ2」で行ったようなLSS訓練を実施し、実運用・解析・各種判断への備えを万全とすることが望ましいだろう。

参考文献

- [1] Gaskell, R. W. et al., 2008, Meteoritics and Planetary Science 43, 1049.

遊星百景 その10

～静かの海 Apollo11号着陸地点～

山田 竜平¹

1969年7月21日2:56(UTC), 一人の男が荒涼とした真空の大地に降り立ち, 一つのセリフを言い放った.
[*That's one small step for a man, one giant leap for mankind.*]

(これは一人の人間にとっては小さな一歩だが, 人類にとっては大きな一歩である.)

人類で最初に月面に降りたった男 Apollo 11号の船長ニール・アームストロング氏による極めて著名なセリフである. まさしく, この言葉通り, この時, 人類が初めて地球以外の天体に足をつけた瞬間であり, 人類にとって大きな一歩であることに疑いようがない. その一方, この Apollo 11号の着陸では, 人類が初めて科学観測機器を地球外天体に設置し観測データを得る事に成功している. アームストロング船長の一歩は, 月の科学者, ひいては惑星科学者達がその歩みを本格的に始めた大きな一歩といっても過言ではないだろう.

「静かの海(Mare Tranquillitatis)」は月表側の北東部, 北緯10度, 東経30度辺りに広がる巨大なバズン(「海」)である. 面積は約42万km²で, 俗にいう「東京ドーム単位」で約9000個分, ここ福島県の広さに換算すると福島約30個分の広さを持つ. 月の海は主に衝突クレータの深内部から噴き出したマグマが冷え固まった玄武岩からできており, 地球から見ると黒く見える部分に当たる. 形成年代は約38-32億年前とされており, 月の形成時期が約45-46億年前である事を考えると, 比較的若い地域と言えるだろう. 特に, 一度, マグマにより表層がならされているため, 月の「高地」と比較しても表層がなだらかであり, 月の着陸船が降りやすい地域となっている. Apollo11号が着陸した地

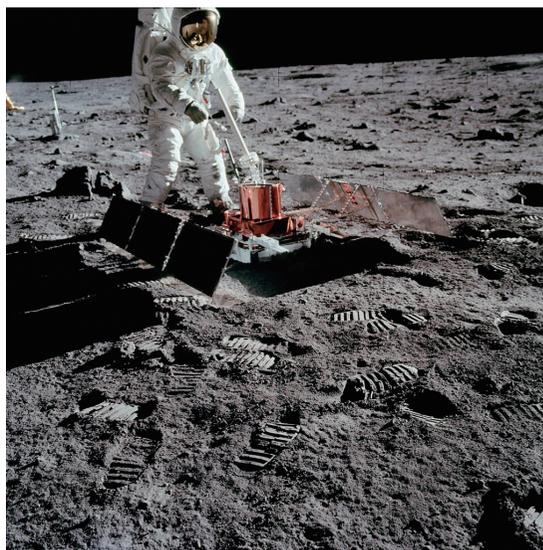


図1: Apollo 11号着陸点にオールドリン宇宙飛行士が地震計を設置した図. ((C)NASA/Apollo11 Image Library)

点は北緯0.8度, 東経23.5度であり, 静かの海の南西端に位置する. 図1はアームストロング氏と共に月面に降り立ったバズ・オールドリン氏が観測装置を設置している写真であり, この写真を見ると, 宇宙飛行士の目からは, 月の海は地球の溶岩台地とは異なる灰褐色の砂漠のような風景に見えただろう. (これは月表層が隕石衝突による破碎砂礫, レゴリスに覆われている事による.)

さて, この人類が最初に月面に設置した観測機器群であるが, Early Apollo Scientific Experiments Package (EASEP) と呼ばれる. これらの機器は後のアポロ着陸点に設置される Apollo Lunar Surface Experi-

1. 会津大学コンピュータ理工学部
ryamada@u-aizu.ac.jp

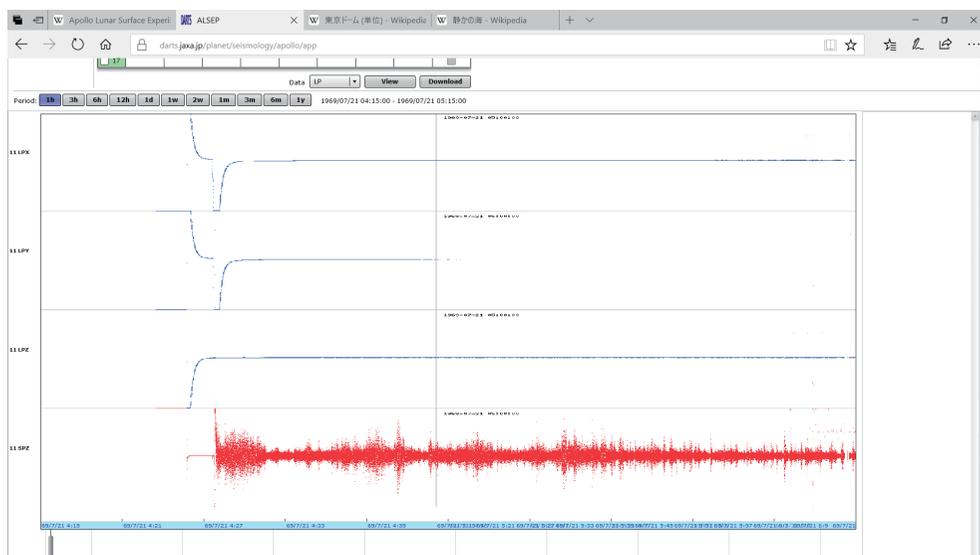


図2：Apollo 11号の地震計で最初に観測された波形。上から長周期計LPX, LPY, LPZ, 短周期計SPZの観測波形を示す。
(画像はJAXA/C-SODAのPlanetary Seismologyのサイトより <https://darts.jaxa.jp/planet/seismology/index.html>)

ment Package (ALSEP)の前身であり、最初の月面着陸が限られたものである事を考慮して、簡単に設置できる(とされる)装置が選ばれている。設置された機器はレーザー測距用の「月面反射鏡」と「地震計」である。これらが簡単に設置して良いものかどうかは別として、どちらも月惑星における固体地球物理学においては主要な観測機器である。特に15年近く「月の地震学」に携わってきた私にとっては、このオールドリン氏が月に地震計を設置したこのシーンこそ、「惑星地震学」という学問が本格的に始まった瞬間であり、感慨深い「一景」と言える。図2は1969/7/21午前4時20分頃にApollo 11号の地震計で観測した最初の地震計記録である。Apollo 11号の地震計は太陽電池で駆動していたため、残念ながら合わせて21日程度の運用でその寿命を迎えてしまったが、この波形こそが我々の分野にとっての「全ての始まり」となる。

Apollo 11号の後であるが、Apollo計画では12, 14, 15, 16, 17号とそれぞれ地震計が設置され、月の内部構造や月内部のダイナミクスを紐解く主要な観測データが得られている(Apollo 17号では爆弾を使用した能動地震観測が実施された)。しかし、1977年9月30日にApollo地震計の運用を止めた後は、惑星地震学は艱難辛苦の連続である。NASAのVikingミッションでは、1976年に2台の地震計が火星表面に設置された

が、1台は機能せず、機能したもう1台も、そもそも地震計が着陸機の上に搭載されていたため、有効に火星表面の振動を捉えていたかは不明である。また、引き続き、日本のLUNAR-Aミッションや、ESAのNetLanderミッション等、惑星地震探査計画は立ち上がってはいるものの、なかなか実行までには至らない。この分野に二十そこそこで入り、月に地震計を置こうといていた私も、もはや四十を迎えようとしている。惑星着陸物理探査がいかに困難であるかを物語っているだろう。

ただし、光明も差しつつある。来年2018年にはNASAのInSightミッションで、一点ではあるが火星表面に地震計が設置され、Apollo以降、約40年ぶりに新たな惑星地震観測データが取得される事が期待されている。また、日本や米国で月面有人探査の機運が高まりつつあり、地震計を設置する機会も伺える。そして、LUNAR-Aで地震計を設置する貫入装置であったペネトレータを使った探査も少しずつであるが復活の兆しを見せつつある。惑星地震学にとって新たな「一景」を加えられるよう、ふさぎこんでもいられないのである。

惑星ラボからこんにちは！ ～京都大学宇宙総合学研究ユニット～

佐々木 貴教¹

(要旨) 本記事では、京都大学宇宙総合学研究ユニットの概要を紹介します。また、本ユニットの活動内容をより深くお伝えするため、5名のユニットメンバーが各々の活動内容について紹介します(本号掲載の土井氏、山敷氏、野津・柴田氏、磯部氏、呉羽氏の記事をご覧ください)。

1. 京都大学宇宙総合学研究ユニットについて

京都大学宇宙総合学研究ユニット(以下、宇宙ユニット)は、宇宙に関連した異なる分野の連携と融合による、新しい学問分野「宇宙総合学」の構築を目指して、2008年に設置されました。工学、理学、環境エネルギー科学、医学、生命科学、情報科学、さらには人文社会科学系学問まで含む、学際的・総合的な新しい宇宙研究を開拓することが、宇宙ユニットの大きな目標です。

また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)や和歌山大学、京都精華大学など、学外機関との連携において、京都大学の宇宙分野を束ねた窓口としての機能も果たしています。また、大学・学術コミュニティ外の様々な方との対話を通じた、科学コミュニケーション活動・社会連携活動についても積極的に行っています。

宇宙ユニットは、特定の研究テーマを推進するだけでなく、様々な関心と専門知識を持った研究者が出会うことで、新しい研究が生まれてゆく場となることを目指しています。

2. 研究紹介

宇宙ユニットには70余名の併任教員が様々な部局

から参加しています。そのため、宇宙ユニット参加教員が主導する研究プロジェクトは、理系から文系まで様々なテーマのものがあります。以下に、研究内容の一部について、開催されている研究会ごとに簡単に紹介します。

- ・有人宇宙計画研究会：有人宇宙輸送の技術的課題、科学・経済・社会的意義、民間有人宇宙活動の可能性、法的・倫理的課題など、有人宇宙活動のあり方について様々な側面から総合的な検討を行っています。(詳しくは同号記事「有人宇宙学の創出と教育的実践」をご参照ください。)
- ・宇宙生物学研究会：宇宙生物学に関わる話題を網羅的に取り扱い、様々な議論や情報交換を行っているほか、系外惑星カタログ作りなども行っています。(系外惑星カタログについては、同号記事「ExoKyoto 太陽系外惑星データベースの開発について」をご参照ください。)
- ・BBT宇宙天気予報研究会：太陽表面で発生するフレアなどを中心に、宇宙環境に関する観測データの整備や、データに対しビッグデータ解析手法・人工知能を応用することによる宇宙天気予報研究を進めています。(フレアについては、同号記事「太陽型星のスーパーフレア」をご参照ください。)
- ・歴史文献天文学研究会：天体・自然現象に関する歴史文献の記録を自然科学者と歴史学者が共同で読み解くことにより、新たな知見を見出すなど、広く自

1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室
takanori@kusastro.kyoto-u.ac.jp



図1：宇宙ユニットが行っている多種多様な活動の様子。「お寺で宇宙学」や「宇宙箱舟ワークショップ」など、バラエティ豊かなイベントを開催している。

然科学への歴史文献の活用を進めています。（詳しくは同号記事「歴史文献を用いた天文学研究」をご参照ください。）

- ・宇宙倫理学会：人間と宇宙との関わりにおいて生じうる、既存のシステムでは対応できないような倫理的・法的・社会的・道徳的問題について、体系的な仕方での取り組み、宇宙を生存圏とする生物として我々がどう生きるべきか、を理解することを目指しています。（詳しくは同号記事「宇宙倫理学プロジェクト～惑星科学との対話に開かれた探求として～」をご参照ください。）
- ・宇宙人文学研究会：地球観測衛星の技術と、古文書や日本書紀などの人文科学を融合し、地殻変動や古代地形の情報を抽出するなどの新しい試みを行っています。

この他にも、宇宙とアートや伝統文化を融合した企画、小型飛翔体を通した教育体験プロジェクト、宇宙学関連の学術資料に関するアーカイブ構築など、多種多様な活動を行っています(図1)。



図2：宇宙総合学の講義の様子。理系から文系まで、幅広い学部の大生が受講している。

3. 教育と研究テーマ

京都大学の大学院生は誰でも、宇宙ユニットが提供する新しい大学院教育「宇宙学」を受講することが可能です(図2)。宇宙学のカリキュラムには修士コースと博士コースがあり、受講生は自分の所属先での教育

研究に加えて、宇宙学の教育プログラムや研究プロジェクトに取り組むことになります。各受講生には、宇宙ユニットの教員が担当アドバイザーとしてサポートし、履修要件を満たした受講生には履修認定も発行しています。

また、宇宙学の受講生は自らの研究関心・計画に基づく自由な出張・活動の費用がサポートされます。国際学会参加だけでなく、海外での共同研究やフィールドワークの実施などにも活用できます。さらに、サマースクールやワークショップ、国際シンポジウムなど、様々な発想とアドバイスのあふれる環境で、自らの研究を前進させる仕組みも整えています。

宇宙ユニットの担当教員との研究テーマについては、宇宙開発利用に関する意識調査、ビッグデータ分析手法を用いた宇宙天気アルゴリズムの開発、極端宇宙天気現象に伴う放射線被曝評価、衛星地球観測データを用いた人文考古学研究、教育・科学コミュニケーションプログラムの開発と実践、などが予定されています。ただし、こうした内容に限らず、自ら研究テーマを設定し、宇宙ユニット教員と連携することで、一つの専門に留まっていたはできない新しい研究を進めていくことも可能です。自分の研究を宇宙につなげてみたい、と思う方であればどなたでも、宇宙ユニットの活動への参加は大歓迎です。

研究室ウェブページ：

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

連絡先：

住所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

北部総合教育研究棟403号室

電話番号 075-753-9665

メールアドレス usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp

有人宇宙学の創出と教育的実践

土井 隆雄¹

(要旨) 有人宇宙学は「人間-時間-宇宙」を繋ぐ総合科学であり、4つの進化過程：宇宙の進化/生命の進化/文明の進化/宇宙開発の進化より導かれる。有人宇宙学は人類が宇宙に持続的的社会基盤を構築することを主主題とし、人類の宇宙への展開の意義を明らかにすると同時に、その方法論も与えることが期待される。

1. はじめに

1961年のガガーリンによる人類初の宇宙飛行以来、宇宙は人類にとって進出可能な新世界となった。図1は世界の有人宇宙ミッションの動向を示す。世界の有人宇宙活動は、1960年代のアポロミッション(アメリカ主導)、1970年代のサリュートステーション(ロシア主導)、1980-90年代のスペースシャトル(アメリカ主導)の時代を経て、2000年代の国際宇宙ステーションによる国際協力の時代へと発展して来た。国際宇宙ステーションは、2024年までの運用が国際間で定められている。また、2003年以降、中国も有人宇宙活動を積極的に展開している。

図2は日本の有人宇宙ミッションの動向である。

1985年に国際宇宙ステーション計画への参加決定及び第一次材料実験に参加する日本人宇宙飛行士の選抜により、日本の「第一期有人宇宙活動」は始まった。日本は短期有人宇宙ミッションを通じて、宇宙実験技術、ロボットアーム操作技術、船外活動技術など有人宇宙活動に必要な技術を獲得した。「第二期有人宇宙活動」は、2008年「きぼう」日本実験棟を宇宙ステーションに取り付けるミッションを契機に始まった。これより日本人宇宙飛行士による長期ミッションが開始され、宇宙飛行士訓練技術、有人宇宙施設の運用、長期宇宙実験の実施、宇宙貨物船の運用などの技術を獲得した。しかしながら、これら30年以上にわたる有人宇宙活動の間、有人宇宙活動全体を系統立てて理解し、有人宇宙活動を担っていく人材育成が大学レベルで行

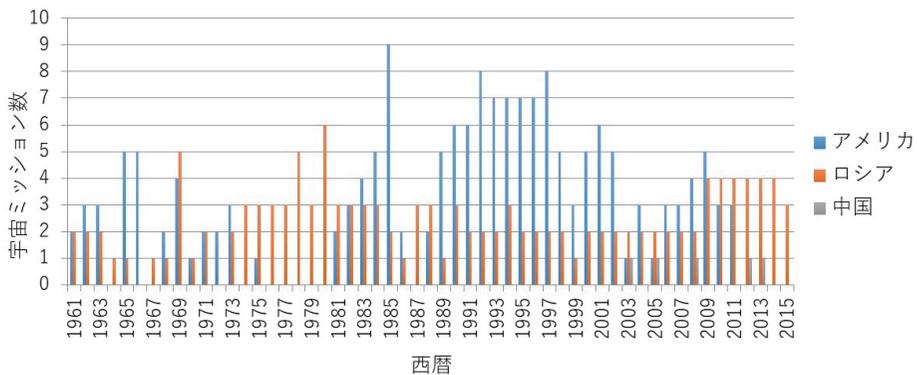


図1：世界の有人宇宙ミッションの動向。

1. 京都大学 宇宙総合学研究ユニット
doi.takao.8w@kyoto-u.ac.jp

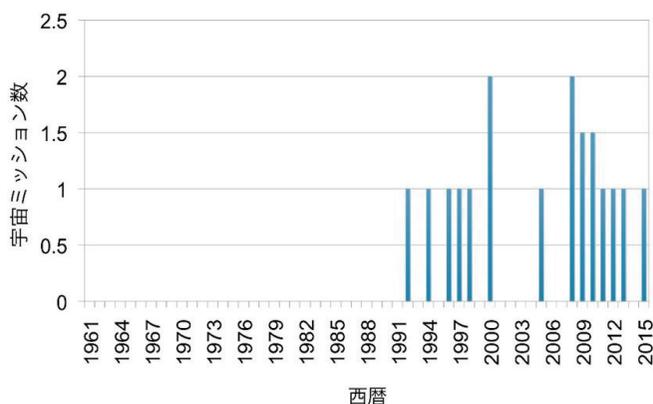


図2：日本の有人宇宙ミッションの動向(打上げ・帰還を各0.5回と数える)。

われることはなかった。現在の多様化していく有人宇宙活動を支え、さらに宇宙産業を発展させていくための若い人材の育成が急務である。

有人宇宙活動に関わる学問は、飛翔体工学・通信工学・ロボティクス・建設工学・宇宙科学といった理工学だけでなく、微小重力・閉鎖空間・真空といった極限空間における生理学などの生命科学、さらには国際協力体制の実施のための宇宙法、商業といった社会科学、巨大科学に対し正当性を問う倫理的考察といった人文科学など、あらゆる学問・専門領域に及ぶ。これらの学問分野の有機的結合による有人宇宙活動に必要な総合科学を創出する必要がある。

2. 有人宇宙学

京都大学宇宙総合学研究ユニット(宇宙ユニット)では平成29年度に有人宇宙学部門を新設し、有人宇宙活動に必要な学問の創出に取り組んでいる。有人宇宙学は、「人間-時間-宇宙」を繋ぐ総合科学であり、時間スケールの違いにより4つの進化過程に大別できる(図3：有人宇宙学概念図)。

<100億年スケール>宇宙の進化、太陽系、そして地球の海の形成：人類が住める宇宙環境はどのように実現されたか、また実現していくかを調べる(宇宙を知る)。

<1億年スケール>生命の進化、生命の海から陸、遂には宇宙に至る進化：人類が宇宙で生存するために、食料となる植物が宇宙で生存できるかを調べる(宇宙を生きる)。



図3：有人宇宙学概念図。(c) NASA

<1万年スケール>文明の進化、知能を持った人類が村・町から巨大都市を形成していく過程：宇宙という特異な重力環境下で人類の知的作業がどのように変容し、その結果として人間の作る社会がどのように変貌して行くかを調べる(宇宙を考える)。

<100年スケール>宇宙開発の進化、ロケット・人工衛星を作り、将来的には月・火星に到達する過程：人類が安全に宇宙に行き、恒久的に生活・仕事をする技術を開発する(宇宙を作る)。

有人宇宙学はさらに上述の4つの分野を融合することにより、人類が宇宙に持続的社會基盤を構築するための基礎理論と方法論を与える。有人宇宙活動が総合科学になることによって、人類の宇宙への展開が論理的に解析できるようになり、宇宙における人類社会の設計が可能になる。

3. 有人宇宙学の教育的実践

宇宙ユニットでは、有人宇宙学の教育実践活動を平成29年度4月より開始している。その活動の一環として、2017年9月11－16日にかけて学部1・2・3回生9名が参加し、京都大学大学院理学研究科附属花山天文台にて有人宇宙学実習を実施した(図4：花山天文台で行われた有人宇宙学実習)。有人宇宙学実習は、短期有人宇宙ミッションを模擬し、天体観測実習、模擬微小重力実験、閉鎖環境実習を計6日間かけて体験することによって、分野横断型学習から有人宇宙活動に関する包括的な視点と基礎知識を身につけることを目的としている。また、参加学生は3人が1チームとなり、共同生活をすることによって、チームワーク(小社会)がどのように形成されていくのかを体験してもらった。

天体観測実習では、系外惑星天体の講義の後、望遠鏡を使い系外惑星天体のトランジット観測を行った。観測データ解析によりホットジュピター型系外惑星の特徴を調べることで、太陽系外の惑星系の存在を確認

した。模擬微小重力実験では重力の植物に与える影響の講義の後、クリノスタット(模擬微小重力発生装置)を使い、植物の初期成長実験を行った。実験結果の解析により、植物の持つ重力感知機構の特性を明らかにした。また顕微鏡による重力感知機構の直接観察も行った。閉鎖環境実習では、閉鎖環境が人間に与える影響の講義の後、与えられたスケジュールに沿って各実習・実験を行うことにより、自分のストレスレベルがどのように変化するかを生理的・心理的に調べた。また、時間経過に従って増大するストレスによって、チームがどのように変化するかを記録した。

有人宇宙学実習は、宇宙・生命・社会に関する活動を模擬宇宙ミッションというカリキュラムの中に凝縮させた体験学習であり、今年が初めての試みであった。学生全員が積極的に実習課題に取り組み、各チームがチームワークの形成に成功した。本実習は、宇宙環境の認識を深め、微小重力の影響を理解し、閉鎖環境における人間関係の形成など、宇宙に人類が展開したときの包括的な模擬演習ともいえ、まさに有人宇宙学の教育的側面を象徴していると考えている。



図4：花山天文台で行われた有人宇宙学実習。

ExoKyoto太陽系外惑星データベース開発について

山敷 庸亮¹

(要旨) ExoKyotoデータベースは、既存のデータベースとの相互比較参照モジュールや、トランジット法のみで確認されている惑星についての質量推定モジュール、Stellar画面を用いた系外主星・周辺恒星・メシエ天体等の表示や、Google Skyを用いた天球上での惑星系の位置表示などを有し、過去のデータベースを包括した上位互換的なデータベースとなっています。すでに発見されている系外惑星だけではなく、12万個以上の恒星データや、ケプラーフィールドの恒星群、さらには京都大学や国立天文台で発見されたフレア星や突発天体のリストを取り込んでおり、様々な定義のもとでのハビタブルゾーンの計算も行っています。本総説では、このデータベース開発の背景や仮定、用いられている考え方と、今後の活用、問題点などについて紹介します。

1. 背景

太陽系外惑星データベース、といっても、開発しようとした時点ですでに複数公開されており¹、今更わざわざつくる必要をそもそも疑問視されました。実は開発仲間でも、二番煎じのデータベースなどつくっても、労多くして、得るものは少ないだろう、というのが大勢でした。それでは、なにが、ExoKyotoをここまで突き進ませようという原動力であったのでしょうか？また、果たしてできたものは役に立っているのでしょうか？

筆者がそもそも自分でデータベースをつくってみようと思ったきっかけの一つは、太陽系外惑星のハビタビリティの議論が、ほとんど欧米主体であったことがあります。すでに2008年ごろから様々な欧米の科学番組で系外惑星特集が組まれていたのに、我が国ではほとんど話題にのぼることはありませんでした。中でもホットジュピターやハビタブル惑星に関しては、National GeographicやNaked Scienceやそれに類する欧米の番組が数多く出回っていたにもかかわらず、我が国の番組ではほとんど目にすることはありませんで

した。情報発信があってもそれは惑星科学専門家に限るもので、一般の人々への浸透は遅かったといえるでしょう。また、そのようなハビタブルな系外惑星の分類を、NASAを始めとする欧米の機関が独自で行なっており、我々は彼らが<決めた>ハビタブルかどうか、という結果を疑いもなく追従するだけである、ということが、国単位での研究の遅れを感じさせました。さらにNASAは、Keplerなどで惑星を発見する際、独自のイラストを同時に公開し、それ以降その惑星の姿はNASAのイラストで固定される、という点に大きな問題意識を持ちました。まずはそれらを理解するために、当初、京都大学国際高等教育院で開講している学部生向けのILASセミナー(旧ポケットゼミ) ハビタブル・アースでExcelを用いてハビタブル判定を行い、すでに見つかった惑星に適用し、それを京都大学の宇宙生物学ゼミで「(式や判定結果が)あっている、あっていない」というような議論をする、ということをやっていました。それが我々の間でなかなか面白くなり、「それならデータベースを作ってみよう」とい

1. 京都大学 大学院総合生存学館
yamashiki.yosuke.3u@kyoto-u.ac.jp

1. Exoplanet Transit Database <http://var2astro.cz/ETD/>
The Extrasolar Planets Encyclopaedia <http://exoplanet.eu>
Open Exoplanet Catalogue
<http://www.openexoplanetcatalogue.com>

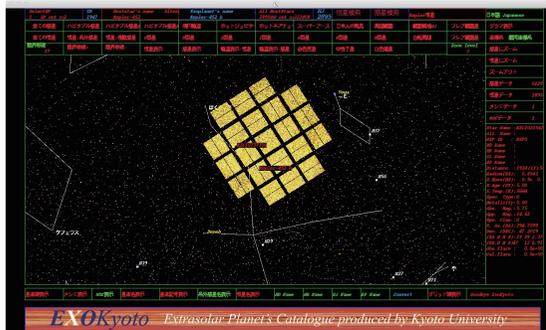


図1：Stellar Windowを用いて表示したKepler-452b, 限界等級17等, ズームレベル3.

う話になりました。当初は、自分たちの「自己学習用」として作り出したのですが、まず佐々木貴教氏が「初めての日本語データベースをつくろう」と言い出しました。私は日本語で作る意味がさっぱりわからず、かつ日本語は面倒臭いので、できればやめたかったのですが、最終的に受け入れることとなり、日本語での「意義」がのちにわかるのでした。また、それから3ヶ月後、宇宙飛行士の土井隆雄氏が京都大学特定教授に就任され、系外惑星の観測と関連してデータベースに興味を示されました。そのような流れの中、データベースを本格的に公表しよう、ということになりました。でもやはり、やるからには、何か違ったものを出したいと考え、最低限の目標として(1)自分たちで独自のハビタブル基準を用いること、(2)系外惑星のイラストを自分たちのものにする、および(3)日本語でのデータベースの作成、を掲げました。(2)についてはプロのイラストを頼もうとも考えましたが、これも学生を含めたチームでの一つの目標として一つ一つ描きあげることにしました。

2. ExoKyotoの特徴

ExoKyotoは、C++で記載されたunix上で動作する系外惑星データベースアプリケーションで、このデータベースを用いて生成したWeb上での公開惑星データベースも含んでいます(図1)。本体は、データベースモジュール(惑星・恒星・メシエ・NGC)、質量推定モジュール、運動解析モジュール、表示モジュール(Stellar Window)に大きくわかれています。(ただ、そもそもなぜC++でプログラムを書いたのか、というと、

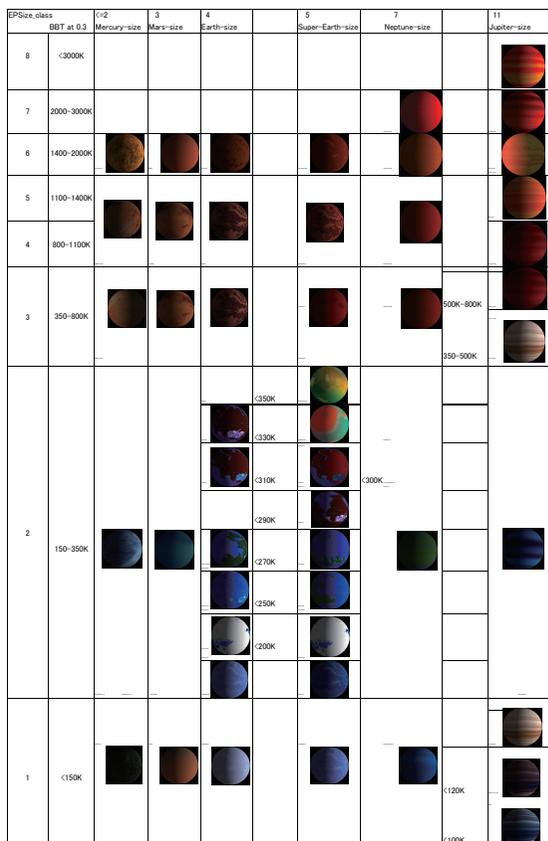


図2：用いたテクスチャの一覧、左から右へ、水星サイズ～超木星サイズへと大きさが大きくなり、下から上へ、150ケルビン以下から3000ケルビン以上まで、アルベド0.3にて計算された黒体温度にて分類している。

私ができる言語で書いたから、というしかありません。「データベース」をつくる、と「決まった」ものの、放っておいたらだれかがやるか？と期待したのですが、仲間の誰も始めなかったため、結局私が一から全部書き始めてしまいました。最初は表示モジュールまで作るつもりはなかったのですが、これもX-Window/XLibを用いて作ってしまいました。細野七月氏からOpenGLへの移行を勧められ、OpenGL版もモジュール単位においては作成しつつあるのですが、現時点のものはXlibを用いたものです。(ただ、Python版などは作ってゆこうと考えています。)

(1) 自分たちで独自のハビタブル基準を用いる

現在記載されているのは、[1]における判定式であり、これも論文のものと、惑星の大きさを考慮した2種類

が記載されています。同時に、太陽系相当天文単位として、太陽系における金星・地球・火星における平均太陽定数と同じ位置を記載した線を表示しています。金星が赤、地球が緑、火星が青、スノーラインは明るい青となっています。これによって、太陽系においてはどのあたり、という「感覚」が明確になると考えました。現在、[1]以外のパラメータやフレア影響を考慮したハビタブルゾーンをテストしており、それらについても順次公開してゆく予定です。

(2) 系外惑星のイラストを自分たちのものにする

まずはNASAのイラストではない自分たち独自のイラストセットの作成を試みました。これは大学院生で元々地球物理を専攻していた黒木龍介氏と一緒に、太陽系における惑星のテクスチャを参考に、他の惑星系において一般的に受け入れられているテクスチャ集の作成を行いました(図2)。特にホットジュピターにおいては、様々な想像される色とパターンを作成しました。次に地球・スーパーアースですが、ハビタブルな温度域のテクスチャをいくつか作成し、海惑星、陸惑星と、海陸比において海が多い惑星の標準とした。惑星のテクスチャ選定において、アルベドを0.3と仮定して計算した黒体温度を用いていますが、これで地球と同じくらいの温度(255ケルビン)のものから、20ケルビン毎にイラストパターンを変更しています。やや温度の高い惑星の海洋に、(地球における貧酸素の兆候を示す) H_2S 過多のPink Waterの色をつけたりしました。が、このように海を描くと、固定観念からか海は青色、陸は基本的に緑色になってしまいます。学部学生でイラストに携わっている高木風香さんと、イギリスプリマス海洋研究所でリモートセンシングによる海洋色の判別を行なっているMarie-Funny氏によって、いくつかの海惑星の絵を描いてもらいました。その結果がかなり衝撃的だったのですが、海洋プランクトンの専門家は他の惑星系での海の色を緑や黄色が卓越したものと想像し、また大陸棚より浅い領域でサンゴが発達している様子をイラストに加え、我々が想像するものを越えた系外惑星の画像の執筆がありました。

現在はテクスチャ判定を惑星の大きさと黒体温度で決めています。大きな問題点があります。それは、潮汐ロックに関する明確な基準を定めていないことです。そのため、潮汐ロック惑星のイラストも準備して

いますが、それらの採用に関しては現在自動判別にはなっていません。だから、カタログの自動生成の想像図と個別記事の想像図は随分異なります。

また、ホットジュピターの絵はすでに広く想像図が描かれており、それらの色の根拠もあまりはつきりしていませんでしたが、我々はまずはSudarsky's Gas Giant Classification [2]を元に、いくつかのパターンを作成しました。ただし、例えばケイ素で青いと言われているHD189733bなどの色はあらかじめわかるわけではないので、一般的には(多くの人のイメージに合致した)赤系統の色を用いました。

さらに、主星からのスペクトルに伴って系外惑星の色(見え方)も変えようと、例えばM型星のスペクトルに近い光を与えると、系外惑星がハビタブルであっても青色系の光はほとんど見えなくなり、青がベースだと真っ暗になってしまう、というような「事件」もあり、これだとProxima Cen bも何もかも青系統が消え去って赤いか黒い惑星になり、あまりにもイメージが異なるので、これは結局採用しませんでした。(未だにデータベースの中ではProxima Cen bは青くしています。)

また、このようなテクスチャ作成とOpenGLによる画像作成ではできない、直接の系外惑星の絵画を、SGH守山高校ハビタブル研究会所属の高校生に依頼し、今までのところ5人のメンバーがそれぞれの系外惑星の想像図を描いてきました(図3)。これらの画像は非常に評判が高く、また作成グループで十分に議論されながら想像図を示し、それをネット上でのデータベースで公開していることから「NASA 顔負けの」ク

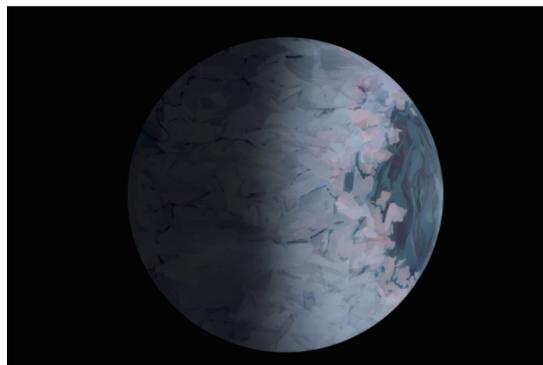


図3: TRAPPIST-1 fの想像図。アイボールアースを想定。(SGH守山高校ハビタブル研究会、稲垣遙さん画)

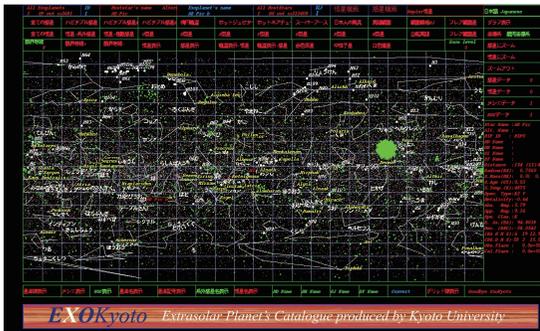


図4：ExoKyotoの惑星表示画面(日本語モード)。

オリティのものもいくつかあり、実際に筆者がNASA/GSFCで発表した際のこれらの図の評判も非常に高かったです。

(3) 日本語でのデータベースの作成

目標の3番目、これは佐々木貴教氏がそもそも掲げた目標でしたが、開発者の私は最後まで嫌がっていました。なぜなら、私はviユーザーだったからです。そこで、初期バージョンはホームページだけ日本語対応にし、データベースは英語でした。しかし、それではいろいろな問題がでてきて、メディアや利用者などから問題点を指摘され、日本語を導入「せざる」を得なくなりました。そこで、ちょうどデータベース公開1周年を記念して、ホームページ上のデータページと、アプリ版を日本語対応としました(図4, 5)。実際に日本語を導入してみるとしかしながら、我々にとっても、ようやく「自分たちのための」データベースができたことが「実感」できるとともに、系外惑星に関わる単語が、いかに日本語として馴染みが無いかについても確認させられました。また、SGH守山高校ハビタブル研究会の図と、日本語での解説を組み合わせた系外惑星に関する記事は評判がよく、今のところデータベース本体よりもアクセスが多い状況です。もともと佐々木貴教氏のアイデアですが、当初このような解説記事を書くのは恥ずかしくて皆躊躇していましたが、今では学部生も高校生も堂々と解説記事を書いており、それを教員や大学院生の野津兄弟(翔太・湧太氏)が修正して公開する、という方法をとっています。記事作成中に想像図をよりそれらしくするために、東工大の芝池論氏にも参戦していただき、いろいろなアドバイスや解説記事を書いていただいております。

今年度に発表したアプリでは、メシエカタログの掲

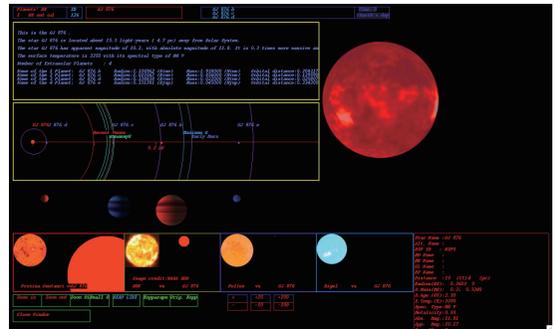


図5：ExoKyoto Hoststar Databaseを用いて表示したGJ876恒星系4つの系外惑星(GJ876 b, c, d, e)と中心星GJ876, 下の4枚の図はそれぞれその大きさの比較が、下の段の4つに記載されています。左からハビタブルプラネットが見つかったProxima Centauri星との比較、二番目が太陽との比較、三番目がふたご座のボルクス(Pollux)との比較、一番右側がオリオン座のリゲル(Rigel)との比較。

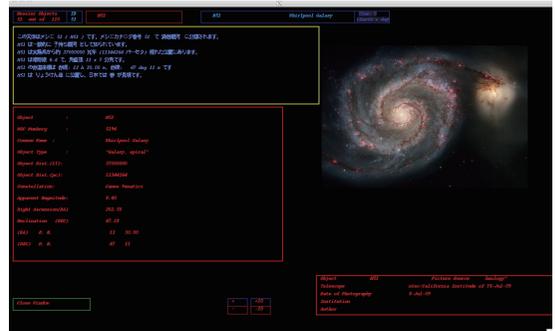


図6：メシエカタログM51。

載とNGC天体の掲載を行なっています(図6)。特にメシエ天体に関しては、ExoKyoto開発に参加している学部生の坂東日菜さんの意図と努力によりその制作が開始され、筆者がプログラムを組み、星図に組み入れました。ただし、フリーの写真が限られており、現在のところNASA/Hubble画像と、Wikicommonsのものをアプリ版では引用つきで用いています。さらにNGC天体については、そのデータの inputs は済んだものの、ほとんど写真が体系的に集められていないことから、可能な天体に関してのみ写真を集め掲載しており、大半は説明のみになっています。また、銀河座標系の導入も行いました。簡単なことでしたが、全てプログラミングをするので、思った通りに変換できない場面もありましたが、無事完了しました。学部生の梨元昂くんにも随分手伝ってくれました。

ExoKyoto を利用することで、現在までに蓄積してきた恒星観測の情報や結果をもとに、新たなハビタブルゾーンの判定基準を加えたり、星や惑星系の進化に関する観測・議論に役立てたりすることができるように、様々な研究機関での観測データを融合して、今後重点的に観測すべき天体を選定・提案することができると期待されます。各大学やアマチュア天文家の方々が、系外惑星の観測を行ってゆく上での重要なツールとして、ExoKyotoを利用していただけると幸いです。

3. 様々なモジュール群

現在公開されている系外惑星データベースでは、もともとトランジット法・視線速度法で独自に計測されている惑星が多いため、質量か半径のどちらかのパラメータが欠落しています。通常のデータベースでは、これらの値を空欄にしたまま公開するのですが、我々のデータベースではすべての惑星に関して図を表示する必要があります。その際、ホットジュピターに関しては推定半径を、またケプラーで観測された地球型惑星については質量を推定値として掲載しています。質量推定については現在[3]の方法を利用していますが、ホットジュピターに関しては統一的な推定式は提案されておられません。そこでExoKyotoでは、データベースに収録されており、かつ系外惑星の推定温度(アルベドを0.3として仮定した黒体温度)と惑星の推定質量毎に、惑星密度を推定し、これを利用して惑星半径を仮に決めています。

ExoKyoto のコアモジュールは C++ で記載され、「系外惑星」「ホスト星」などをはじめとする様々なクラスが定義されており、比較的シンプルなクラスになっていたのですが、ケプラーデータを挿入する際、複数のクラスの導入が必要になりました。例えば Kepler (ケプラー望遠鏡による観測対象星を ID 毎に並べたクラス)、KeplerName (Kepler ID と Kepler 名との関連クラス) と、Kepler 観測対象恒星と、見つかった惑星群を別々のクラスとして管理し、かつその関連性を定義する必要がありました。さらにメシエ天体・NGC 天体などをクラスとして導入しており、どんどん増えそうな勢いですが、このようにすると、プログラム内部での統一的処理に障害をきたすなど問題も散見さ

れ、改良も必要になっています。

もう一つ、本データベースの特徴として、地球上での位置表示があります。開発当時公開されていたデータベースでは、系外惑星の位置がよくわからず、人に説明しようと思っても困る状況でした。そこで最初のバージョンでは、kml ファイルを生成して Google Sky 上に情報とともに表示するようにしました。これで目的を達成できたように見えたのですが、Google Sky 自身を自分たちで触ることができなかったため、例えば星図全体での表示ができない、系外惑星を有している恒星情報が欠落しているなどの問題点にぶつかり、自分たちで表示モジュールを開発することとなりました。この開発には学部学生たちが随分貢献してくれました。

4. ExoKyotoの惑星科学的貢献

ExoKyoto 自体が系外惑星を発見するものではないですが、いろいろと考えてゆく上で、ExoKyoto が「惑星科学」の発展に貢献しうるのは以下の2点かと考えられます。

(1) 恒星・惑星相互作用

現在突発的天体のほか、フレア星のデータを組み入れており、かつ前原裕之氏、野津湧太氏、そして柴田一成氏らの貢献により、フレア発生頻度や強度が算定できるようになりました。さらに、惑星大気を仮定した場合の、恒星から飛来する高エネルギー粒子や電離放射線による被曝量の推定ができるモジュールを組み入れております。このような試みは初めてであり、このモジュールの公開に向けた論文投稿を行っています。ただし、問題点もあり、そもそも恒星の自転に関するパラメータがほとんどデータとしてとられていないことです。そのため、ほとんどの惑星をもつ恒星のアクティビティは正確に計測されていないのが現状です。そのため、恒星のアクティビティを測定する必要性に関して統合的にメッセージを発信しつづけるという使命が考えられると言えるでしょう。さらに考えられるのは、ホットジュピターと恒星との関連性の整理です。現在準備中のトランジット予測モジュールとあわせて、特に周期が短い惑星系に関するパラメータを計算し、必要な観測につなげることが重要かと思われます。

(2) 新しい観測対象天体の選定

銀河面からの位置関係などが明らかになり、恒星のタイプもわかるので、特に地上からの観測対象天体の選定には役に立つと言えます。また、ExoKyotoは惑星や恒星を様々な条件で検索し、望みの天体を検索することができます。ただし、恒星データベース(数億)に比較すると登録されている恒星が少ないので、現在それらを入れる準備をしております。

なお、開発を行っているのは私を中心としたチームですが、開発や公開にあたって佐々木貴教氏の存在と貢献は非常に大きいといえます。どの程度の精度を備えれば良いか、またどのような項目が望まれているか、また絵の描写においても様々な観点からのアドバイスをいただきました。そもそもデータベースを公開してそれが「惑星科学」でどの程度の意義があるのかは我々にはわからず、ひたすら作り込んでいった中を、うまく現在の学問のトレンドをつかんでアドバイスをさせていただきました。また同時に、宇宙飛行士の土井隆雄氏が、本データベースを用いての小口径望遠鏡での系外惑星観測システムを立ち上げたことも大きなモチベーションになりました。メディアでの発表においても、その注目度をあげていただき、こちらとしても、本物の宇宙飛行士とともに「開発」できるということが一つの大きな喜びとなりました。同時に、山崎直子宇宙飛行士のパソコンでも本データベースを使っただき、いろいろアドバイスをいただいています。

またこの9月に筆者は初めてNASA/GSFCを訪問し、Airapetian博士の紹介のもと、Kopparapu博士本人にもExoKyotoを披露してきました(図7)。ハビタブル判定をつかった本人の元に我々が「手作りで」



図7：Kopparapu博士(左)と筆者(右)。NASA/GSFCにて。

つくったExoKyotoを見せるのは非常に感慨深いものであり、今後、本当に「NASAと協力」して、このアプリを充実させてゆけるように、現在様々な準備をすすめているところです。

5. 「ExoKyoto」のご利用について

系外惑星データベース「ExoKyoto」をご利用された方は、氏名、所属、メールアドレス、ご利用の目的を記載して mail@exoplanetkyoto.org までお送りください。(無償です;現在 Mac OS X上でのみ作動します)

ExoKyotoのご利用は無料ですが、ExoKyoto開発基金については寄付を受け付けております。小口(千円単位)も歓迎します。賛同いただける方は、以下の「宇宙ユニット基金」にてご寄付をお願いします。

<http://www.kikin.kyoto-u.ac.jp/contribution/space/>

参考文献

- [1] Kopparapu, R. K. et al., 2013, *Astrophysical Journal* 765, 131.
- [2] Sudarsky, D. et al., 2000, *Astrophysical Journal* 538, 885.
- [3] Weiss, L. M. and Marcy, G. W., 2014, *Astrophysical Journal Letters* 783, L6.

*系外惑星データベース

ExoKyotoアプリケーション開発メンバー*

- 山敷庸亮(京都大学大学院総合生存学館;開発責任者)
全体モジュールデザインおよびC++コード作成
- 細野七月(京都大学大学院総合生存学館) 3D表示モジュール, 惑星軌道モジュール作成
- 黒木龍介(京都大学大学院総合生存学館) 系外惑星・恒星テキストチャー作成
- 村嶋慶哉(京都大学理学部) 惑星軌道ディスプレイモジュール設計
- 佐藤啓明(京都大学工学部)
ハビタブル判定式確認, データ確認
- 真柳和也(京都大学理学部)
Stellarモジュール開発補助
- 野津翔太(京都大学大学院理学研究科) ハビタブル判

定式提案, 恒星パラメータ推定

野津湧太(京都大学大学院理学研究科) ハビタブル判定式提案, 恒星パラメータ推定, フレアモジュール開発

芝池諭人(東京工業大学理学院) 惑星科学専門の立場からの記事執筆とアドバイス

伊藤岳陽(京都大学理学部) Kopparapu 判定式導入

嶋田侑治(京都大学農学部) 質量推定式(Larsen & Geoffrey, 2014)導入

高木風香(京都大学農学部) 惑星・恒星テクスチャ作成

梨元 昂(京都大学理学部) 座標変換補助, NGC モジュール

坂東日菜(京都大学理学部) メシエモジュール補助

下崎紗綾(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

藤田汐音(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

稲垣 遙(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

清水海羽(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

前田理那(滋賀県立守山高校)

系外惑星イメージ図描画

佐々木貴教(京都大学理学研究科) 惑星科学専門の立場から全体開発計画のアドバイス及びデザイン

*** ExoKyoto を用いた系外惑星観測推進メンバー ***

土井隆雄(京都大学宇宙総合学研究ユニット)

ExoKyoto 観測モジュール設計およびテスト

三木健司(京都大学大学院農学研究科) 観測実施

木原孝輔(京都大学理学部) 観測実施

太陽型星のスーパーフレア

野津 湧太¹，柴田 一成²

(要旨) 私たちの身近な太陽は、実は爆発(フレア)だらけの恐ろしい天体で、地球や社会へも影響が及ぶこともあります。太陽フレアとはどのような現象で、なぜ発生するのでしょうか？さらに最近、私たちの研究グループでは、系外惑星探査望遠鏡ケプラーのデータを用いて、太陽型星においてスーパーフレアという巨大フレア現象を多数発見しました。本稿では、その発見の過程と得られた統計的な性質について述べ、「私たちの太陽でもスーパーフレアは起きるのか？」という問いについて、どのような結果が得られてきたのかをご紹介します。さらに、フレアが惑星へ及ぼす影響など、その後の興味深い研究の一端についてもご紹介したいと思います。

1. 太陽フレア

太陽と聞いて何を連想するでしょうか？一見、ただ穏やかに燃え続けている星に見えます。数ある宇宙の星の中で、私達の最も身近にある星であり、その姿を私達は完全に理解していると思われるかもしれませんが、実は、太陽の表面では様々なスケールの爆発現象が頻繁に起こっており、その最大のが「太陽フレア」です[1]。フレアは、黒点の近くで発生し、典型的には1-10万km四方の面積が、突然H α 線やX線で明るく輝き、数分～数時間にわたって続きます(図1)。解放される全エネルギーは、 10^{29} - 10^{32} erg。水素爆弾に例えると10万個～1億個に相当するような、非常に大きなエネルギーです。

太陽フレアの研究はこの100年で著しく進展してきました。さかのぼること約400年前、ガリレオ・ガリレイ達が望遠鏡で太陽を観測して以来、太陽黒点のスケッチ観測が行われるようになり、19世紀には、11年周期で黒点数が変動することがわかってきました。そして1859年、英国のキャリントンが眼視(白色光)による黒点スケッチ中に、黒点の一部が光輝いていると

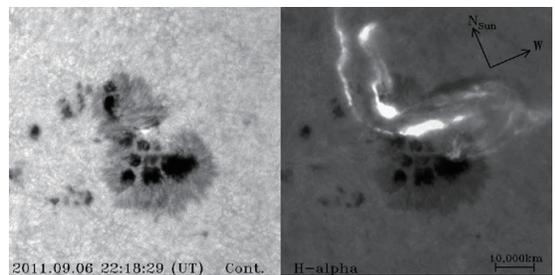


図1：太陽フレアの典型例(2011年9月7日JST)。京都大学飛騨天文台にて撮影。左図：可視連続光(白色光)、右図：H α 単色像。これはいわゆるXクラスフレアと分類される大フレア(エネルギー 10^{31} erg程度)。白色光で輝点が見えており、白色光フレアと呼ばれる。

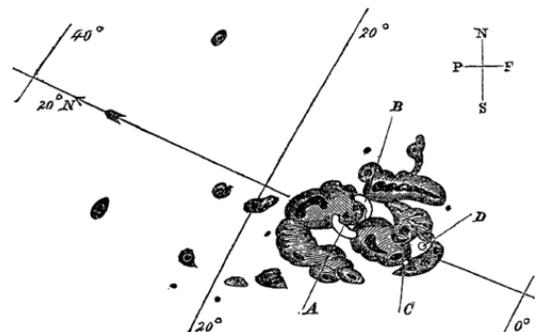


図2：キャリントンによるフレアのスケッチ (Carrington 1859 [2])。图中、A、B、C、Dと示されている所で、白く光っている部分がフレア。白色光観測。

1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室
2. 京都大学 大学院理学研究科 附属天文台
ynotsu@kwasan.kyoto-u.ac.jp

の報告をしました(図2) [2]。これが太陽フレアの最初

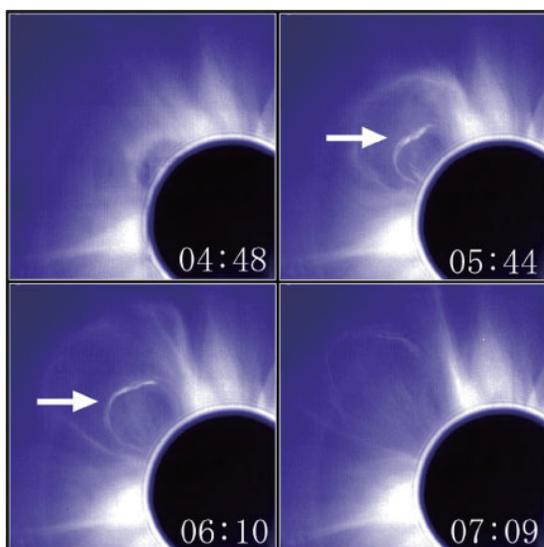


図3：SMM衛星が観測した1980年4月14日のコロナ質量放出(CME)。矢印の先がプロミネンス、その上方にCMEの先端が見える。07:09UTにはCMEの先端は視野の外まで飛んでいる。

の発見になります。翌日、世界各地でこの200年で最大とされる磁気嵐が発生し[3]、世界各地で巨大なオーロラが現れましたが、当時はフレアとの関係は不明でした。現在では、白色光で見えるフレア(白色光フレア)は大フレアの時のみ観測できることが知られており、キャリントンの見たこのフレアは史上最大のフレアだったと考えられています。しかし、このような巨大な白色光フレアの発生は稀なので、19世紀の間はフレア研究はあまり進展しませんでした。

フレア観測が急速に発展したのは、20世紀初頭、 $H\alpha$ 線などの彩層から放射されるスペクトル線の分光観測が発展したことによります。フレアは彩層のような太陽の上空大気で起こる爆発現象であるため、 $H\alpha$ 線などで彩層に着目すると、小さなフレアも検出できるようになり、フレアは黒点の発生と密接に関連していることが明らかになりました。また20世紀初頭に、黒点の正体は強い磁場であることが判明し、20世紀半ばにはフレアのエネルギー源は黒点近傍に蓄えられた磁気エネルギーであることが確立しました。

20世紀後半になると、急速に進歩した大気圏外での人工衛星による観測(特に、日本が打ち上げた「ようこう」衛星の軟X線観測の貢献が大きい)によって、フレアのエネルギー解放過程は、太陽の上空大気(特にコロナ)中での磁気リコネクションという機構によ

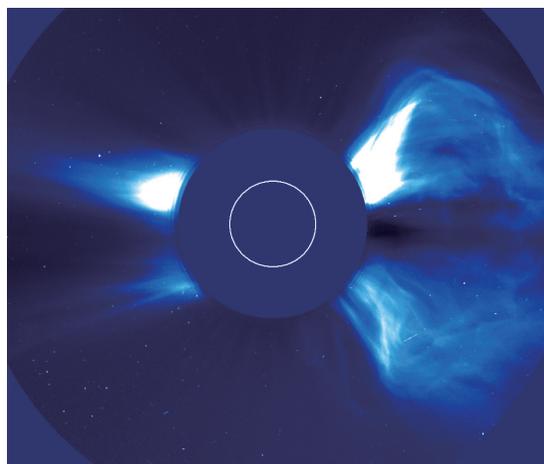


図4：SOHO衛星搭載のコロナグラフ装置LASCOによって観測された、1997年11月6日のX9.4クラスフレアに伴うコロナ質量放出(CME)。中央の白い円は太陽表面の大きさを表している。CMEは太陽直径の数倍(時として10倍以上)にも及ぶ大きさを持っていることが分かる。

って生じていることも確立しました[1]。そして現在は、磁気リコネクションを含む電磁流体機構に基づくフレアモデリングが太陽物理学の中心課題の一つとなっています。

太陽フレアが起きると、それに伴って、あらゆる電磁波が電波から紫外線、X線、ガンマ線に至るまで突発的に放出されます。さらに大量の高エネルギー電子や陽子が加速され、いわゆる放射線粒子となって、地球の方へと飛んでくる可能性があります。大気があるため、これらの放射線は、地上にはほとんど影響はありませんが、精密機器を積んだ人工衛星の故障や宇宙飛行士の被ばくなどの懸念があります。日本のX線天文衛星「あすか」は2000年に起きた太陽フレアの影響で膨張した地球大気によって、空気抵抗を受け軌道を維持できなくなり、最終的に大気圏に突入するという運命を辿りました。

また、フレアが起これるとしばしば、惑星間空間に向けて、磁場を帯びたプラズマ噴出現象(コロナ質量放出：図3、図4)が発生します。巨大なコロナ質量放出が、地球に衝突すると、地球上部の磁気圏が激しく乱され、磁気嵐が発生、通信障害や送電網へダメージを与える懸念もあります。例えば1989年に、太陽フレアの影響によって、カナダのケベック州の変電所の変圧器に障害が起これり、大停電が起きるといった事例もありまし

た。また最近でも、2017年9月前半に複数の巨大太陽フレアが発生し、磁気嵐の発生などが懸念され、報道等でも多数取り上げられたことは、記憶に新しいことかもしれません。この意味で、私達の社会(特に宇宙利用も始まった現代社会)は、太陽によって引き起こされる「災害」とは無縁ではないだろうということも言えるかもしれません。そのため、フレアの地球環境への影響の予報(宇宙天気予報)が緊急の課題となっています[4]。

2. スーパーフレア発見

さてここまで、太陽フレアによって、我々の社会も影響を受ける可能性があるということを見てきました。しかし広い宇宙に目を向けてみると、例えば生まれたばかりの星などでは、私達が今まで遭遇したこともないような巨大なフレア(スーパーフレア)が起きている事が知られています[5, 6]。その様なスーパーフレアが、我々の太陽で起きる可能性はあるのでしょうか？長年の太陽研究により、フレアの発生頻度は、「フレアのエネルギーが10倍上がると、発生頻度は約10分の1になる」という経験則に従うことが分かってきました(図5)。これは興味深いことに、地震の発生頻度の統計と似ています。その関係を単純に延長すると、最大級の太陽フレア(10^{32} erg)の100-1000倍の大きさのスーパーフレアは、1000年から10000万年に1回程度の頻度になります。頻度は非常に小さいですが、ひょっとしたら数千年前には、現代の我々がまだ知らないほど大きなフレアが起っていたのかもしれない。

もし本当だとしたら、大変重要で興味深い話です。しかし、いったいどのようにしたらこの頻度分布を調べることが出来るのでしょうか？太陽の近代観測の歴史は数百年ほどにすぎないので、千年以上前はもちろん望遠鏡も人工衛星もなく、科学的記録から探るのは困難です。そこで私たち、京都大学附属天文台のグループでは、太陽を昔に遡って調べるのではなく、太陽とよく似た星(太陽型星)を沢山観測するという方法を考え始めました。太陽型星を1万個1年間観測すれば、太陽を1万年観測したデータと同様のデータが得られるのではないかと。そして、スーパーフレアが太陽で起きるかどうかの手掛かりを得る事が出来るかもしれない、と言う訳です。

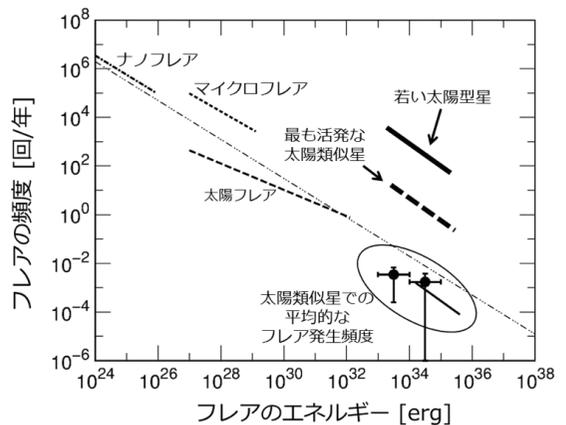


図5：フレアのエネルギーと発生頻度。太陽の(ナノ・マイクロを含む)フレアはエネルギーのべき乗則で頻度が下がる。最大級の太陽フレアの1000倍のエネルギー(10^{35} erg)のフレアは、太陽とよく似た星では1万年に1度程度の頻度で起きる。一方、若い星では1年に100回程度起きる。

このようなスーパーフレア探索のアイデアが検討されていた2010年夏頃、2017年の現在に至るまで、系外惑星探査で革命的な業績を挙げ続けることになる、「ケプラー宇宙望遠鏡」が本格的に成果を発表し始めました(打ち上げは2009年3月)。はくちょう座近くの領域にある16万個の星(そのうち、太陽型星は約8万個)の明るさを、30分に1回の間隔で、4年の長期にわたり常時観測し続けるという観測を行います。星の明るさの僅かな変化も捉える事ができ、データはインターネットで世界中にすぐに公開されます。スーパーフレアによって星が僅かに明るくなる現象も捉えられると期待できる、ということが分かり、早速ケプラーのデータを使おう！ということになりました。

しかし、8万個の太陽型星のデータはあまりに膨大です。そこで当時学部1年生だった5名(柴山拓也・野津湧太(本稿著者)・野津翔太・長尾崇史・草場哲)も加わり、ある種の人海戦術でフレア探索を開始したところ、メンバーの1人の柴山さんが早速、太陽型星の光度曲線から、フレアの候補となるデータを発見。それを受けて、当時京都大学附属天文台研究員だった前原裕之さんの指揮のもと、より体系だったフレアの検出手法の構築に着手し、本格的な研究が開始されました。

図6は検出された太陽型星のフレアの一例です。数日から数十日の準周期的な変動の上に、スパイク状

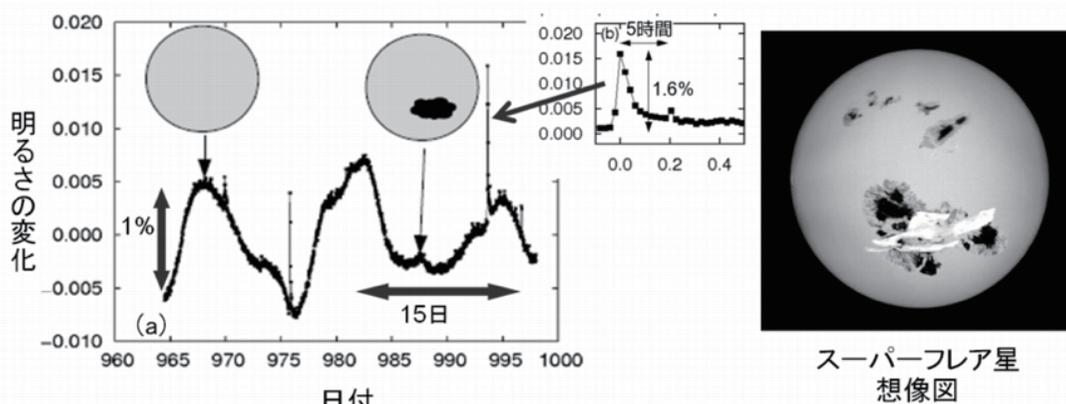


図6：左図：太陽型星のスーパーフレアの明るさの時間変化(ケプラー衛星の観測データ)。フレアでの突発的な増光の他に、周期15日程度のゆっくりとした明るさの変化が見られる。これから黒点のサイズと自転の周期が推定できる。
右図：太陽型星のスーパーフレアの想像図。巨大な黒点群でスーパーフレア(白色)が起こっている。

の増光が何度も起きており、その部分を拡大すると、急速な増光とその後の緩やかな減光が見られることが分かります。近くに別の天体があるケースや、継続時間が短く増光点が1点しかないなど、疑わしいイベントについては最終的に個々の光度曲線を目で見て排除を徹底的に行い、148個の太陽型星で365個のフレアイベントを検出するに至りました(2012年にNature誌に発表[7])。フレアを起こした星自身の明るさとフレアの振幅、継続時間からエネルギーを推定すると、 10^{33} - 10^{36} ergという値になることが分かりました。前章で述べたキャリントンフレアのエネルギーが 10^{32} erg程度だと推定されているので、まさにここで発見されたフレアは、最大級の太陽フレアの10~10,000倍に相当するような、「スーパーフレア」であることが判明しました。

3. スーパーフレアの発生頻度

このスーパーフレア発見で最も重要な意義は、非常に沢山の数のイベントを発見したことだと言えます。この発見以前は、過去の地上の写真乾板のデータや眼視観測から、太陽型星においては、わずか9個のフレアイベント「候補」が報告されているだけでした[8]。わずか9例という少数であったこと、またデータ自体の精度も眼視観測などである点を踏まえると、統計的な研究は困難です。しかしケプラーのデータの登場以後、私達のグループでは、2012年の最初の報告(ケプ

ラー宇宙望遠鏡の最初の90日間のデータを利用)に引き続き、さらに長期間(約500日)のデータを解析したところ、現在までに279個の太陽型星で1547個のスーパーフレアを発見するに至っています[9]。このように非常に沢山のイベントを発見したことにより、太陽型星のスーパーフレアについて、統計的な議論をすることが初めて可能となりました。

発生頻度について考えてみると、よりエネルギーの大きなスーパーフレアほど発生頻度は下がっていく関係(べき分布)が見られました。そして、図5に現れている通り、スーパーフレアの発生頻度分布は、太陽フレアの発生頻度分布を延長したものと非常によく合っています。太陽とよく似た性質を持つ星(太陽類似星)について、スーパーフレアの頻度を換算してみると、最大級の太陽フレアの100倍の大きさのスーパーフレアで約800年に1回、1000倍の大きさのフレアで約5,000年に1回という値になりました[10]。

4. スーパーフレア星の巨大黒点と、すばる望遠鏡での分光観測

スーパーフレアを起こした星を詳しく見てみると、フレアによる増光とは別に、数日から数十日の準周期的な変動が多く星で見られました。このような変動の原因は何なのでしょう？私たちは、表面に黒点を持つ星の自転によって引き起こされているのではないかと考えています(図6) [11]。もしこの仮定が正しい

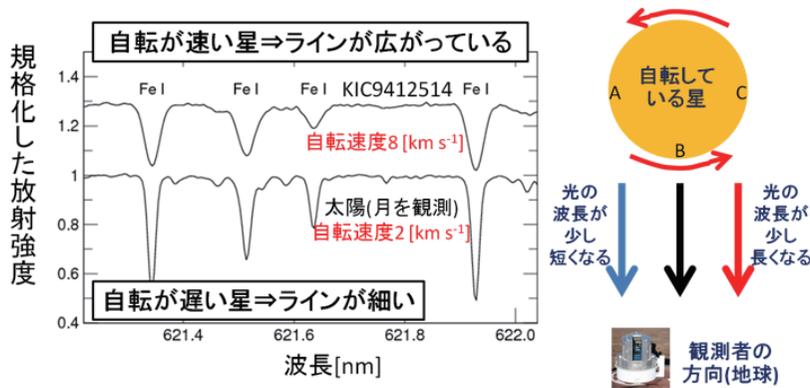


図7：(右) 自転している星の表面の各場所から放射される光は、光の「ドップラー効果」の影響で、波長に僅かな変化が生じます最終的に地球でスペクトル線を観測する場合、A、B、C点など星表面の各場所からの、波長が少しずつずれた光の足し合わせとなるので、スペクトル線が波長方向に広がって観測されます。(左) 星の自転速度とスペクトル線の広がり。ここでは、中性鉄(Fe I)の吸収線を4本示しています。上記の通り、自転している星表面から放射される光の「ドップラー効果」による波長ずれの影響で、吸収線には広がりが見られます。そして、太陽のように自転の遅い星は、ドップラー効果による波長ずれが小さいためにラインが比較的細い一方で、自転の速い星は波長のずれが大きくなり、ラインがより広がって観測されます。このラインの広がりを測定する事で、星の自転速度を求めることができます。

とすると、明るさの変動の周期は星の自転周期、変動の振幅は黒点の大きさに対応します。変動の振幅は典型的には0.1~数%なので、スーパーフレアを起こす星の多くは、図6のように太陽よりも大きな黒点を持つと考えられます。巨大な黒点があれば、磁場のエネルギーを沢山蓄えることができるので、スーパーフレアを起こすのに都合が良くなります。

しかし、この解釈はあくまで仮定であり、本当に巨大な黒点が星の表面に存在するのか？また、明るさ変動が自転で説明できるのか？そして、スーパーフレアを起こした星々は、本当に太陽とよく似た星なのか(連星である可能性などはないのか)？これらの点について、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測だけで答えを出すことは困難です。

そこで私たちは、ケプラー宇宙望遠鏡データで発見したスーパーフレア星のうち50星について、すばる望遠鏡HDSを用いて可視光高分散分光観測を行い、その波長スペクトルの詳細な分析を行い、以下の結果を得ました[12, 13].

1. まず、観測の結果、観測した50星のうち半数以上では、二つの星の吸収線が重なっていたり視線速度の大きな変動があるなどの連星の兆候は見られなかった。そして、温度等も太陽型星(G型主系列星)の範囲にあることを分光的に確認できた。
2. 上述の、「明るさ変動=自転」という解釈が正し

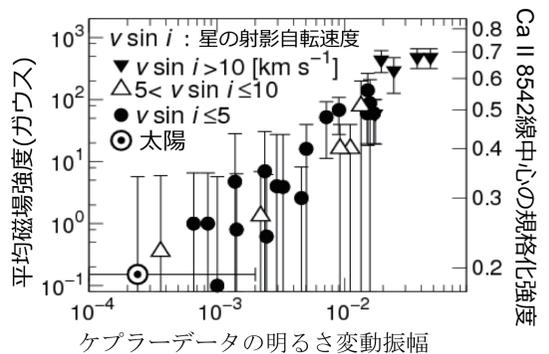


図8：ケプラーで観測された明るさの変動振幅(横軸)と、Ca II 8542線中心の規格化強度から推定された、星の平均磁場強度(縦軸)。Ca II 8542線強度と平均磁場強度の関係式は、太陽観測で得られた関係式を用いている。

この図から、黒点の大きさに関して、ケプラー宇宙望遠鏡の測光観測による指標(横軸)と、分光観測による指標(縦軸)の間に相関があり、よく対応しているということが分かる。

ければ、明るさの変化のタイムスケールは、星の自転の速さに対応することになる。「分光観測」を行うと、スペクトル線の広がり幅から、星の自転の速さを測定する事ができるが(図7)、今回の観測結果は、上記の明るさの変化から求めた値とよく対応しており、上記の予想が正しいことを提示している。

3. 大きな黒点が存在して星表面の平均磁場が強くなると、上空の彩層が加熱され彩層由来のスペクト

ル線の放射が強くなり、Ca II 8542 Å(電離カルシウム)の吸収線が浅くなるのが、太陽の観測から知られている。このことを応用し、スーパーフレア星のCa II 8542 Åの吸収線の深さを測定し、星の他の性質と比較した。その結果、ケプラーのデータでの明るさの変動振幅との間に相関が見られた(図8)。そして、スーパーフレア星は太陽と比較して、非常に大きな黒点を持つ事が確認された。

以上の結果から、スーパーフレアの示す準周期的な明るさ変動が、巨大黒点の自転で説明できると考えて矛盾ない、そしてスーパーフレア星は巨大な黒点を持つ、ということが分かりました。

5. スーパーフレアと星の性質

さて、上記で述べた分光観測によって、スーパーフレア星の明るさ変動が自転に説明可能だと考えて矛盾ないと言うことができました。これを踏まえ以下では、図6のような明るさ変動の周期がその星の自転周期であると仮定して、もう少し詳しく、スーパーフレアが星の性質、特に星の自転とどのような関係があるのか見ていきたいと思います(9-11)。

図9(b)は一定規模(5×10^{34} erg)以上のエネルギーを解放するスーパーフレアの発生頻度と自転周期の関係です。この図から、スーパーフレアの発生頻度は自転周期が長くなると低くなるのがわかります。星の自転周期は星の年齢と良い相関にあることが知られており、例えば若い年齢数億年の星は太陽と比べると1桁ほど速く自転しています。太陽と同じ自転周期(約25日)の太陽型星では、周期数日の若い太陽型星と比べると、スーパーフレアの発生頻度は1-2桁も低いと分かりました。1章で述べた通り、フレアは星の上空大気(コロナ)中での磁気エネルギーの解放現象であり、その磁気的な活動の源は、星の自転と対流によるダイナモ機構だと考えられています。若くて自転周期が短い星ほどフレアの発生頻度が高いのは、自転周期が短い星ほどダイナモによる磁場生成が活発であるためと考えることができます。

一方で、自転周期が2-3日より短くなるとスーパーフレアの発生頻度はほぼ一定の値になることも分かりました。太陽型星では、定常的なX線強度やCa II

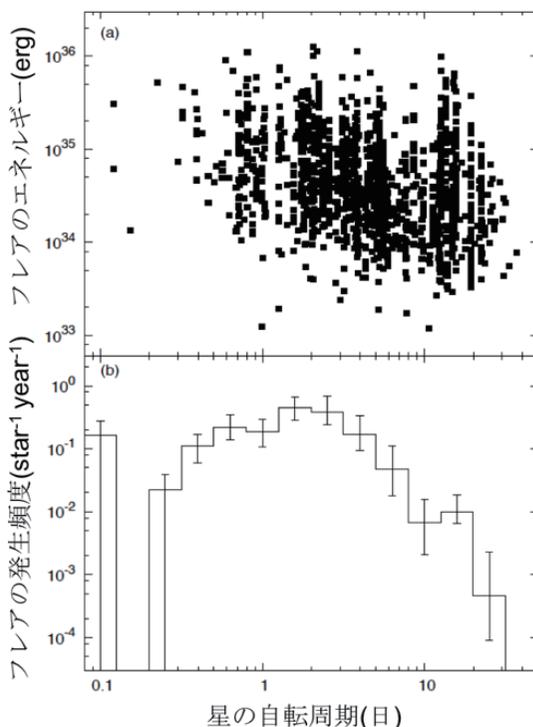


図9: (a) 個々のスーパーフレアのエネルギーとそのフレアを起こした星の自転周期の関係。
(b) エネルギーが 5×10^{34} erg以上のスーパーフレアの発生頻度と星の自転周期の関係。

線などの彩層から放射される輝線と自転周期の間にも、同様の関係が知られています。

発生頻度については自転周期との相関が見られましたが、フレアのエネルギーについてはどうでしょうか? 単純に考えると、自転周期の短い星の方が大きなフレアを起こせるのではないかと考えられます。しかし、図9(a) スーパーフレアのエネルギーと自転周期の散布図を見てみると、その予想とは異なることが分かります。スーパーフレアのエネルギーの上限値と自転周期の間には強い相関はなく、周期20日程度の自転の遅い星でも、 10^{35} ergの巨大フレアが生じています。

以上の結果をまとめると、太陽のような自転の遅い星であっても、頻度は低いものの、巨大なスーパーフレアが起こりうることを意味していると言えます。

6. スーパーフレアと惑星の存在・スーパーフレアの痕跡

私たちの研究の以前に、太陽型星のスーパーフレアについて議論をしたSchaeferらは、太陽ではスーパーフレアが観測された形跡がないことから、スーパーフレアを起こす天体は、ホットジュピターをもち、それによって恒星の磁場活動が高められ、スーパーフレアを起こすのではないかと考えました[14]。私たちの太陽には、太陽のすぐ近くを公転する巨大惑星がないために、スーパーフレアを起こさない、というわけです。もしこの説が正しければ、ケプラーで発見されたスーパーフレアを起こす太陽型星の大部分はホットジュピターをもつはずで、ホットジュピターがトランジットを起こす確率を考えると、279個のスーパーフレアを起こす太陽型星の20個弱はケプラーによってトランジットが見つかっていてもよさそうです。しかし現在までに、この279個のスーパーフレア星の周りで見つかっている惑星は、Kepler-491bという0.1木星質量の星たった1つのみです(スーパーフレアを起こす星は大きな黒点による変光が見られることから、小さな惑星であれば自転による変光に隠されて見つからない可能性もありますが、ホットジュピターのような大きくかつ星の近くを公転する惑星であれば十分検出可能です)。この結果から、ホットジュピターをもつスーパーフレア星の数は、すべてのスーパーフレア星がホットジュピターをもつと仮定した場合に予想される数よりもずっと少なく、少なくともホットジュピターの存在が、太陽型星でスーパーフレアを引き起こすための必要条件だということではできなと分かりました。この結果は、従来の説では太陽ではスーパーフレアが起らないと考えられていましたが、「起らない」理由の一つである「太陽にはホットジュピターがない」という理由が成り立たないことを意味します。

では、太陽でスーパーフレアが起こった証拠は本当にないのでしょうか？私たちのスーパーフレア発見論文がNature誌に掲載された2週間後、驚くべき論文が同じくNature誌に掲載されました[15]。名古屋大学の三宅美沙さんらの研究結果で、屋久杉の年輪を使って炭素14(^{14}C)の量の時間変化を調べたところ、西暦774-775年に急激な増加を示していたというものです。

^{14}C は宇宙線が地球の上層大気中の原子に衝突してきた中性子が窒素14(^{14}N)と衝突し、その後 ^{14}N が崩壊することで生成します。 ^{14}C の量が急激な増加を示したということは、宇宙からの放射線量が増えていたことを意味します。三宅さんらはさらに長期間の ^{14}C の量の時間変化を調べ、西暦993-994年にも同様のイベントがあることも発見しました[16]。これらの宇宙線量の原因としては、近傍の超新星爆発やガンマ線バースト、巨大な太陽フレアなどいくつかの可能性が挙げられます。2012年の発見以来、屋久杉以外の世界各地の樹木を用いた ^{14}C 濃度の測定や、氷床コアのベリリウム10(^{10}Be)濃度(^{10}Be は ^{14}C と同様に宇宙線由来)の測定が行われ、現在では太陽の爆発現象が最有力と考えられているようです[17]。

また、巨大なオーロラの報告が過去の文献に残っていないかを探る試みなども進んでいます([18, 19])。もしこれらのイベントが本当に太陽におけるスーパーフレアの痕跡であるとしたら、1000年オーダーの時間スケールでは、太陽でもスーパーフレアが起きることを示唆しているのかもしれない。

7. 惑星への影響

ここまで、スーパーフレアについて述べてきました。この章では、少し話題を転じて、スーパーフレアが惑星にどのような影響を与えるのか？少し掘り下げて、最近出てきた一つの興味深い新説[20]を紹介したいと思います。

7.1 faint young Sun paradox

私たちの住む地球は現在、温暖で液体の水が表面に安定に存在し、さらに私たち生命の体を形づくっている有機物が豊富に存在するという、生命の存在に非常に適した環境となっています。岩石など地質学的な証拠を紐解くと、地球に生命が誕生した約40億年前の昔から、地球上には海洋が存在し、現在のような温暖な環境がすでに形成されていたことが示唆されています。しかしその一方で、標準的な太陽の進化モデルでは、40億年前の太陽の明るさは、いまの約70%程度であったと考えられており、地球大気が現在と同じ組成であったと仮定すると、地球表面の温度は0℃を下回り、液体の海は存在できないことになってしまいま

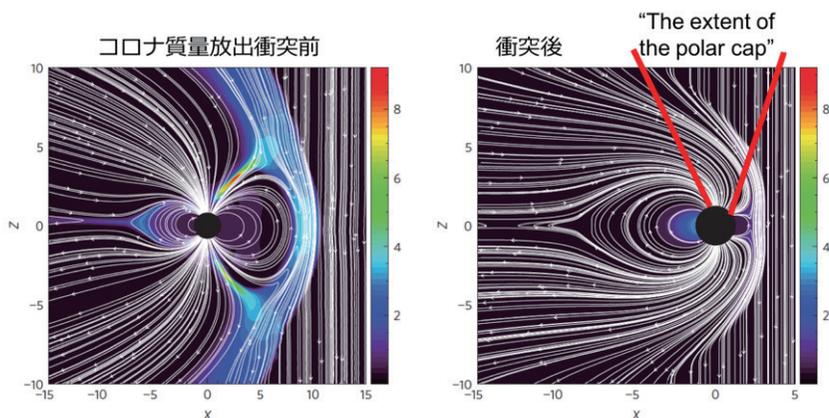


図10：スーパーフレアによって放出されたコロナ質量放出が、約40億年前の地球の磁気圏に衝突した際の想像図(Airapetian et al. 2016[20]の図を改変)。白線は磁力線、カラーバーはプラズマの圧力を表している。地球磁気圏が圧縮され、極地域から高エネルギー粒子が大気中に侵入する経路(図中の赤線で示された領域)が形成される。

す。この矛盾を、「若い太陽のパラドックス(faint young Sun paradox)」といい、1972年にCarl Saganらによって提唱されました[21]。

この矛盾を解決するために、さまざまな説が提唱されてきました(cf. [22])。これらの説では、昔の地球大気では温室効果ガスの量が、現在よりはるかに多かったことを仮定しています。たとえば、アンモニア(NH_3)とメタン(CH_4)の量が多くその温室効果が効いていたという説や、現在の1000~1万倍ほどの二酸化炭素(CO_2)が存在していたという説があります。しかしどの説も、たとえば地質学的に過去の CO_2 濃度を調べた結果と一致しないなど、定量的な妥当性が確立されているとはいえ、現状このパラドックスについて、確定的な解決策は得られていないという状況です。

7.2 若い太陽のスーパーフレアの地球への影響

さて、約40億年前の若い太陽は、現在よりも30%も暗かったわけですが、前章までで述べてきた「太陽フレア」の視点でみてみると、太陽はどのような星であったのでしょうか？

ケプラーのデータを用いた統計的研究によると、太陽と比べると自転が10倍ほど速い若い星では、スーパーフレアの頻度ははるかに高く、1日に1回を超えるような頻度で起こっていることがわかります(図5)。この結果から、40億年前の若い太陽は、自転が速く、フレアに必要な大量の磁場のエネルギーを簡単に蓄えられる状況にあり、スーパーフレアが頻発し現在と比

べて非常に活発な状態であった、ということができません。

1章でご紹介したように、巨大なフレアが発生すると、巨大なコロナ質量放出も発生し、地球の方へ飛んでくる可能性が考えられますが、太陽でスーパーフレアが頻発している状況下で、約40億年前の昔の地球には、どんな影響があったのでしょうか？

2016年、Vladimir Airapetian氏らの研究チームは、上述の「ケプラー宇宙望遠鏡」での観測結果を基に、若い太陽でのコロナ質量放出のエネルギーと地球への衝突頻度を推定し、1日に1回以上地球に衝突するという結果を得ました[20]。そして、その高頻度のコロナ質量放出が地球へと衝突した際の地球磁場との相互作用について、数値シミュレーションを行ったところ、地球の磁気圏が圧縮され、極地域から高エネルギー粒子が大気中に侵入する経路が形成されることがわかりました(図10)。

高エネルギー粒子が大気中に侵入すると何が起こるのでしょうか？ Airapetian氏らは、初期地球の大気成分(窒素が豊富： N_2 80%， CO_2 20%)を仮定し、化学反応計算を行いました。その結果、これらの高エネルギー粒子は地球大気の中に豊富に含まれる窒素分子(N_2)と化学反応を起こし、さまざまな中間生成物を経ながら、亜酸化窒素(N_2O)とシアン化水素(HCN)が大量に生成されることが強く示唆されました。

7.3 生命誕生に適した環境の形成

大量に生成される N_2O とHCN.この2つの物質が、原始地球が生命誕生に適した環境であったかを考える上で、重要な役割を担う可能性があります。

実は N_2O は強力な温室効果ガスであり、頻発するスーパーフレアの影響で大量の N_2O が生成され、地球大気中へ拡散していくことを考えると、最初に述べた「若い太陽のパラドックス」は十分に解決できてしまう可能性が示唆されます。生命誕生に必要な液体の水を持つ温暖な地球環境が、初期地球においては、スーパーフレアのおかげで形成および維持されたのかもしれない。

一方HCNは、別の重要な役割を担います。より複雑な化合物の生成の起点となり、アミノ酸をはじめとする生物分子の供給源となる可能性があります。すなわち、私たち生物の体を形づくる物質の起源ともなった可能性があるわけです。

7.4 系外惑星系へのフレアの影響

「若い太陽での活発なスーパーフレアの影響により、原始地球の大気が温暖になり、さらに生命誕生に必要な環境と材料がつけられた」とする新説が提唱されました。今後より定量的な検討が必要ですが、太陽のフレアが単に地球に被害をもたらすだけでなく、初期地球での生命発生という、私たちの起源にもかかわっている可能性があるとは、非常に驚くべき結果といえます。

ここで述べたのは、約40億年前の地球・太陽間で起こりうる現象でしたが、この新説は、近年多数発見されている太陽系外の地球型惑星でも適用できるかもしれません。さらに、物質が生成されるだけでなく、巨大フレアに伴う高エネルギーに陽子によって、オゾンが破壊されるというような計算結果も報告されるなど[23]、この分野の研究は、少しずつ増えてきています。

現在、「第2の地球」を探そうという試みが、多数の宇宙・地上の望遠鏡を用いて、盛んに行われています。たとえばその際に、「活発なフレアによって惑星の大気にどんな影響が出ているのか？」をもっと詳しく調べていく必要があります。

8. 今後の展開 ～太陽でスーパーフレアは起こるのか？

本記事の2～4章では、ケプラーのデータに基づいて、スーパーフレアを起こす星の性質について見てきました。自転周期の遅い太陽のような星でも、巨大な黒点が生じれば、頻度は低いものの巨大なスーパーフレアが発生するという描像が見えてきました。しかし、「太陽でスーパーフレアが起こるのか？」という問いに迫るには、まだまだ明らかにすべき点がたくさん残されています。例えば、太陽のような星で巨大な黒点はどのようにできるのか？そのような黒点の寿命はどれくらいか？例えば、私たちのグループでは、理論的な考察によって、太陽で巨大な黒点は作れる可能性を示した研究も行いましたが[24]、観測的な理解もまだまだ不十分です。

京都大学大学院理学研究科の宇宙物理学教室と附属天文台は、天体爆発現象の観測や系外惑星探査を目的とした東アジア最大の3.8 m望遠鏡(図11) [25]を、岡山県浅口市(現・国立天文台岡山天体物理観測所構内)に開発・建設し、2018年から共同利用観測も開始の予定です。この望遠鏡は、まさに太陽型星のスーパーフレアを解明するのに世界で最も適した望遠鏡です。「占有望遠鏡」の強みを最大限に生かし、多数の観測時間を集中的に投下することによって、スーパーフレア星は巨大な黒点をもっているのか？スーパーフレアの発生機構は太陽フレアと同じなのか？太陽フレアと同様にプロミネンス噴出やコロナ質量放出を起こして



図11：3.8 m望遠鏡完成予想図。18枚の鏡を組み合わせる分割鏡方式で、独特な構造の軽量架台となっている。

いるのか? などの重要問題の解決に挑むことを目指しています。そして太陽型星を詳しく解明することにより、私たちの太陽の活動の未来と過去を解明したいと考えています。

3.8 m望遠鏡は京都大学の望遠鏡開発チームの頑張りで、10年がかりでいよいよ完成し、いよいよ稼働しようとしています。多くの皆さまのご支援をいただけたら幸いです[26].

参考文献

- [1] Shibata, K. and Magara, T., 2011, Living Review Solar Physics 8, 6.
- [2] Carrington, R. C., 1859, MNRAS 20, 13.
- [3] Tsurutani, B., 2003, JGR 108, 1268.
- [4] 柴田一成, 上出洋介(編), 2011,「総説宇宙天気」(京大学術出版会).
- [5] Koyama, K. et al., 1996, PASJ 48, 87.
- [6] Gershberg, R. E., 2005, Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars (Berlin: Springer).
- [7] Maehara, H. et al., 2012, Nature 485, 478.
- [8] Schaefer, B. E. et al., 2000, ApJ 529, 1026.
- [9] Shibayama, T. et al., 2013, ApJS 209, 5.
- [10] Maehara, H. et al., 2015, Earth, Planets and Space 67, 59.
- [11] Notsu, Y. et al., 2013, ApJ 771, 127.
- [12] Notsu, Y. et al., 2015, PASJ 67, 32.
- [13] Notsu, Y. et al., 2015, PASJ 67, 33.
- [14] Rubenstein, E. P. and Schaefer, B. E., 2000, ApJ 529, 1031.
- [15] Miyake, F. et al., 2012, Nature 486, 240.
- [16] Miyake, F. et al., 2013, Nature Communications 4, 1748.
- [17] Miyake, F. et al., 2015, Geophys. Res. Lett. 42, 84.
- [18] Hayakawa, H. et al., 2017, Solar Physics 292, 12.
- [19] 磯部洋明, 早川尚志, ほか, 2017, 天文月報 110, 「特集: 歴史書から探る太陽活動」.
- [20] Airapetian, V. S. et al., 2016, Nature Geophysics 9, 452.
- [21] Sagan, C. and Mullen, G., 1972, Science 177, 52.
- [22] Kasting, J. F., 2010, Nature 464, 687.
- [23] Segura, A. et al., 2010, Astrobiology 10, 751.
- [24] Shibata, K. et al., 2013, PASJ 65, 49.
- [25] 京大岡山3.8m望遠鏡 <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>
- [26] 京大天文台基金 <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/kikin/>

歴史文献を用いた天文学研究

磯部 洋明¹

(要旨) 京都大学宇宙総合学研究ユニットの歴史文献天文学研究会では、太陽-地球環境に関心を持つ自然科学者と、様々な地域、時代を専門とする歴史研究者との共同研究により、歴史文献中の太陽黒点や中低緯度オーロラの記録を用いた過去の太陽活動の研究を2014年頃から行っている。本稿では太陽活動に関するいくつかの成果とともに、8世紀のシリア語の文献から、彗星にイオンテイルとダストテイルと思われる二つの尾あることを記述した例についても紹介する。また、自然科学系と人文系の学際的共同研究の難しさと魅力についても述べる。

1. 歴史文献を使った自然科学

古来、人々は天体の規則的な運行を記録して暦を作るだけでなく、時折出現する異常な現象も観測し、そこから様々なメッセージを読み取ろうとしてきた。歴史的な文献に記録されているそれらの天変の記録を探しだし、現代の天文学や地球惑星科学に役立てようというのが、私たち歴史文献天文学研究会の狙いである。

歴史上の記録を現代天文学に用いたのはもちろん私たちが最初ではない。よく知られているのは超新星爆発の記録だろう。例えば藤原定家の明月記には、当時の天文博士である陰陽師が観測した超新星爆発が、「客星」すなわち夜空に突如出現した新しい星として記録されている。そのうちの一つ、西暦1006年に起きた超新星爆発の残骸を、千年後の2006年に京都大学の小山勝二らがX線天文衛星「すざく」で観測した。千年前の記録により正確な発生年月日が分かっていたことでより多くの科学的知見を得ることができたこの成果は、いわば陰陽師と現代の科学者による千年越しの共同研究である [1]。

天文学以外に目を向ければ、古い文献の記録を現代科学に活用する手法は地震や津波などの災害の研究でも長い蓄積があるし、気候や生態系の長期的な変動の

研究にも活用されている。筆者が大好きな研究の一つは、京都の貴族の日記に残された花見の記録から桜の開花時期を推定して、それを元に京都の局所的な気候の長期変動を再現するというものである [2]。今私たちが日々 SNS にアップしている何気ないつぶやきも既にマーケティングなど様々な目的で利用されているとのことで、それは何だか居心地の悪いことであるが、千年後の科学者にとっても貴重なデータになる日が来るのかもしれないと思えば、そう悪くないかなとも思えてくる。

太陽物理学、地球惑星物理学、歴史学研究者が集まった私たちのグループは、2014年頃から歴史的な文献の中に残された中低緯度地域のオーロラや肉眼で見える巨大黒点の記録を用いて、過去の太陽活動やその地球への影響を調べる研究を始めた。以下ではこれまでの成果や研究の経緯を紹介する。

2. 過去の太陽活動を知りたい理由

太陽では「フレア」と呼ばれる大規模な爆発が頻繁に起きている。フレアが起きると、電磁波の急激な増光、高エネルギー粒子の加速、プラズマ塊の惑星間空間への噴出(コロナ質量放出)が起き、人工衛星の故障や通信障害、地磁気嵐による大規模停電など様々な影響が出る。太陽フレアとその影響については本号の野

1. 京都大学 大学院総合生学存学館
isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp

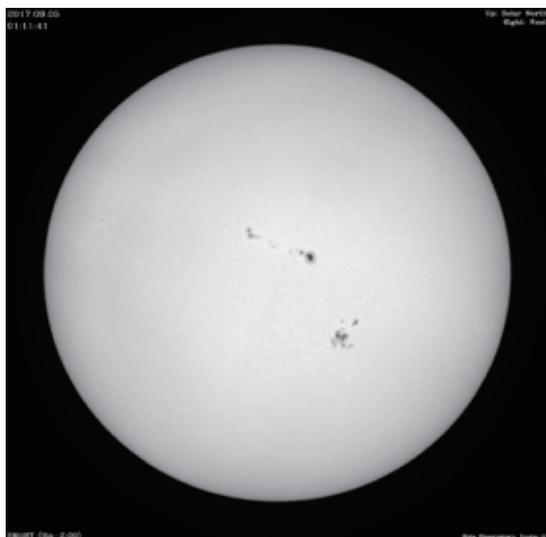


図1：(左) 京都大学大学院理学研究科付属飛騨天文台の太陽磁気活動観測望遠鏡 (SMART) が観測した2017年9月5日の太陽全面像。

津・柴田による記事で詳しく解説しているのをそちらも参照して頂きたい。

野津・柴田の記事で紹介されているように、京都大学のグループは2012年に太陽型の恒星で、知られている太陽フレアの100倍から1000倍ものエネルギーを持つ「スーパーフレア」を発見した。もしこれが現在の太陽で起きれば影響は甚大である。太陽フレアの頻度分布は地震など多くの自然現象と同じようにべき乗を示し、規模が大きいほど頻度は小さい。しかし、太陽フレアの観測はたかだか150年程度であり、人類が持つ最も長期の科学データとされる黒点数の観測もたかだか400年である[3]。2011年に起きた東日本大震災は千年に一度の規模だったそうだが、そのような低頻度で起きる太陽活動についての知見を得るためには、望遠鏡による近代観測が始まる前の太陽活動についての情報を得る必要がある。

過去の太陽活動について知りたいという科学的欲求は、長期的な変動とその地球気候への影響についての関心が先行していた。太陽黒点数は約11年の周期で変動しているが、もっと長い時間スケールの変動もあり、地球の気候との間に相関があることが知られている。例えば17世紀後半にはマウンダー極小期と呼ばれる数十年にわたってほとんど黒点が出なかった時期があったが、この時期地球は全体的に気温が低かった。詳しくは参考文献[4]などをご覧頂きたい。

3. 文献に刻まれた太陽活動の記録

歴史文献に記録されている太陽活動の指標には2種類ある。1つ目は肉眼で見えるような巨大黒点である。2017年9月に10年ぶりの大フレアが起きた時の太陽全面像が図1である。これくらいのサイズの黒点になると専用グラスを使えば肉眼でも確認できる。昔の人は恐らく、日没直前や薄雲がある時などに太陽の中に黒点を発見したのだろう。例えば中国・宋の天文志には以下のような記録がある[5]。

元豊元年十二月丙午、日中有黒子如李大、至丁巳散
筆者訳：西暦1077年1月11日、太陽の中に李(すもも)ほどの大きさの黒子があり、22日に消滅した。

太陽活動の指標となるもう一つの有力な記録が、中低緯度で見られるオーロラの記録である。一般に地磁気嵐が強い(地磁気変動の振幅が大きい)ほどオーロラは低緯度で見られるので、オーロラ観測の下限は地磁気嵐の強さの指標となる。太陽フレアと磁気嵐の強さの関係は複雑だが緩い相関はあり、大雑把にいった中低緯度でオーロラが見られれば大きなフレアが起きたことが示唆され、従って大きな黒点が出たと推察される。

オーロラの色は高度によって異なり、高度100～200 kmでは主に酸素原子の波長557.7 nmの輝線が出す緑色が、それより上空では酸素原子の波長630.0 nmの赤色が光る。離れた場所から見れば幾何学的効果で上空の方だけが見えるため、通常、中低緯度で見られるオーロラは高緯度側の方向の空が赤く光って見える。オーロラが観測者の緯度にまで下がってくれば、緑やピンクなどの色が空に拡がることになる。

漢字文化圏の文献では、オーロラと思われる現象は、ひろがりを持った発光現象を表す「赤氣」「赤雲」「白氣」といった言葉で記述されている。例えば、上の黒点の例と同じ宋の天文誌には以下のような記述がある[5]

景德三年三月丙辰、北方赤氣互天。

筆者訳：1006年4月14日、北の空を赤氣がよぎった

もちろん、オーロラの正体を知らなかった先人達によるこれらの記録が本当にオーロラだったかどうかは自明ではない。例えば「白氣」とされるものは、月量のような大気の散乱現象か彗星であったかもしれない。

ある記録がオーロラであることを示す最も強力な証拠は、日本と中国、東洋と西洋など、離れた2点間の同時観測である。このような例を見つけるには、漢字の文献とラテン語の文献など、異なる文化圏の記録を照合する必要がある。また自然科学側からは、観測時間や方角、形状、色などの記述がオーロラという解釈と矛盾がないか確認したり、観測日の月齢を計算して月光の散乱現象の可能性を吟味したりといった作業を行う。さらには、文献に書かれていることが、実際に観測したことの直接的な記録なのか、一般的な事象を述べたことなのか、フィクションなのかも確認する必要がある。このような検証には、文献の書かれた文脈や時代背景などを読み解くことができる人文系の研究者と、自然現象をよく理解している自然科学者の密接な協働が不可欠である。

4. 京大宇宙ユニットから始まった歴史文献天文学研究の進展

京都大学宇宙総合学研究所(宇宙ユニット)は、理工学から人文社会科学にわたる学際的な新しい宇宙研究の開拓を意図して2008年に発足した。設立時最初の専任教員だった筆者は、人文社会系の研究者を誘って宇宙倫理学[6]や宇宙人類学[7]といった複数の共同研究の立ち上げに携わりながら、「お寺で宇宙学」「宇宙落語会」「宇宙茶会」のような学問以外のコラボ企画も手がけていた。こういう変わった活動を生暖かく許容する京大の雰囲気为本プロジェクトが生まれた背景にある。

本研究を立ち上げたのは筆者ではなく、宇宙ユニットの活動に何かと顔を出していた京大文学研究科の早川尚志氏(現在は大阪大学の博士後期課程)と理学研究科の玉澤春史氏の二人の大学院生である。百万遍の居酒屋で思いついたという彼らの最初のアイデアは、専門の観測官による定常観測によって多くの黒点・オーロラの記録が残されている中国歴代王朝正史の天文志が、現在は全文デジタル化されてテキスト検索できるので、刊本とデータベースの照合で徹底したサーベイができるのではということだった。

中国や日本のオーロラ記録をまとめた記録はこれまでもある[8-10]。しかし原文や参照した文献の書誌情報が不十分なことが多く、後世の研究者による検証

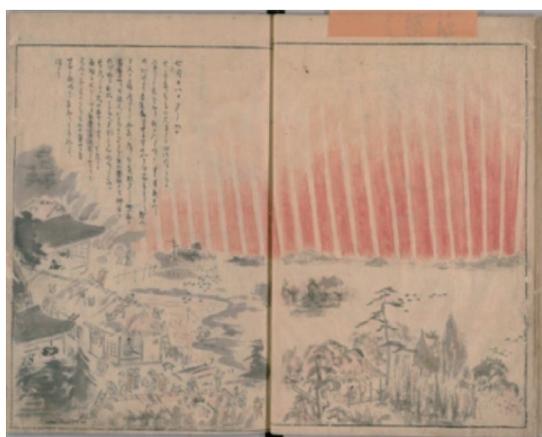


図2：1770年に日本全国で観測されたオーロラを描いた図。国立国会図書館所蔵「猿蓑庵随観図絵」より。

することが困難な形でしか提供されていないケースもあった。このため私たちは、キーワード検索に見つけた候補となる記録をから記述の吟味により明らかに黒点やオーロラでないものをのぞいて、書誌情報まで含めてデータベースとしてインターネットで公開することにした[11]。これまでに隋、唐、五代十国、宋、元、明、清の歴代王朝の天文志のサーベイを終えて論文として出版している[12-15]。

その過程で科学的に面白いこともいくつか分かってきた。中でも興味深いのは大学院生の河村聡氏が主導した清代のケースで、マウンダー極小期に対応する17世紀後半に、中低緯度オーロラの可能性がある記録が見つかった[15]。太陽活動が極めて低調と考えられているマウンダー極小期に本当に中低緯度オーロラが起きていたとすれば極めて興味深い。今後、対応する同時観測を中国以外の文献から見つけ出したいと考えている。

歴史文献を使ったアプローチに関心を持ってくれたオーロラ研究者である極地研究所の片岡龍峰氏を通じて、極地研と同じビルにある国文学研究資料館の岩橋清美氏や、宇宙線由来の放射性同位体解析をしている武蔵野美術大の宮原ひろ子氏とも共同研究をすることができた。片岡氏主導で明月記のオーロラ記録を用いた論文[16]を書いた際には、国文学研究資料館の研究者が、虚構性が高い文章を書くと思われていた藤原定家が、自然現象の正確な記述をしていたことは意外な発見であったとコメントしている[17]。本研究のアプ

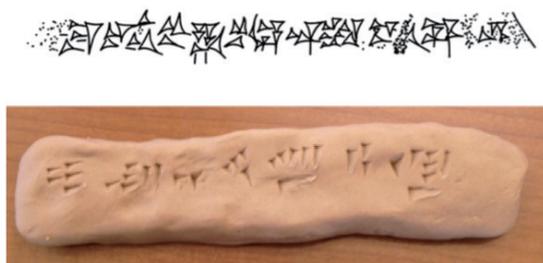


図3：(上)バビロン天文日誌に楔形文字で書かれたオーロラの記録[20,21]。三津間康幸氏によるコピーに基づく。(下)粘土に楔型文字(アッカド語)で書いた筆者の名前。

ローチが人文科学研究へも貢献できた一つの例だと考えている。

また日本史研究者の岩橋氏はその後日本各地の日記等から未発見の史料を次々に発見しており、今や世界屈指の古典・古文書オーロラハンターである。特に、京大生圏研究所で宇宙ユニットにも参加しているオーロラ研究者の海老原祐輔氏とも協力して、1770年に日本全国で観測されたオーロラの史料をまとめ、それがこれまで近代観測最大と言われていた1859年の地磁気嵐に匹敵する規模であったことも明らかにした[18, 19]。なお1770年のオーロラはいくつか図表も知られており、有名なものの一つが図2である。

漢字文化圏以外の文献も活用している。共同研究に加わって下さった東京大学の三津間康幸氏は、粘土板に楔型文字で書かれた「バビロン天文日誌」の刊行も手がけているこの分野の専門家で、三津間氏の参加により「バビロン天文日誌」から紀元前6世紀～1世紀のオーロラの記録を発見することができた[20, 21]。図3はその一例である。読者の中にこれが読める方はおられるかどうか分からないが、上記論文の共著者である筆者は、論文の根幹をなすデータ=楔型文字のテキストについて全く何も分からないのはさすがに問題だと考え、三津間氏に教を請うて自分の名前だけは楔型文字(アッカド語)で書けるようになってみた。無論、それで「バビロン天文日誌」が原文で読めるようになったわけではないのだが、

最後に、歴史文献中の彗星の記録についても面白い



図4：StellaNavigatorによる760年5月25日の夜空のシミュレーション。

インセットがズークニーン年代記中の彗星のスケッチ(MS Vat. Sir. 162: f. 136v; Chabot II 217)。牡羊座の3つの星と火星、土星も描かれている。(c)2017 Biblioteca Apostolica Vaticana, reproduced by permission of Biblioteca Apostolica Vaticana, with all right reserved.

発見があったので紹介したい。これは上述の三津間氏に加えて、古代ローマ史の研究者である小坂俊介氏や流星の研究をしている総合研究大学院大学の藤原康徳氏との共同研究で、後775/776年にシリア語(現在のシリア語ではなく中東の一部キリスト教徒が用いたアラム語に近い言語)で書かれたズークニーン年代記という文献を解析した研究である[21, 22]。論文の主要な結果は、世界最古の日付の分かっているオーロラの図表の発表と分析というもののだが、同じ文献には彗星に関する記述とそのスケッチも残されていた。記述ではおひつじ座の α 星、 β 星、 γ 星、そして火星と土星が並んでいる横に彗星が見えたとあり、その様子がスケッチに描かれている。試しにStellar Navigatorというソフトウェアでその日の夜空をシミュレーションしてみると、確かにスケッチの通りの配置になっていることが確認できた(図4)。興味深いことに、この彗星に関する記述では、2本の尾が見えたと書き残されている。スケッチからは判然とはしないが、もしかしたらこれはイオンテイルとダストテイルに関する世界最古の記述なのかもしれない。

5. おわりに

歴史研究者と自然科学研究者の共同研究である本プロジェクトは典型的な文理融合型研究と言うことができるだろう。それなりにより成果は上がっていると自負しているが、そこに至るには専門的知識のギャップ

だけでなく、データの扱いやオーサーシップなど研究における文化の違いに起因する様々な困難があった。それを克服するために大切なことは、専門的な内容を分かりやすい言葉で説明したり、お互いの文化を尊重したりといったことももちろんだが、何よりも異分野の研究者が何を「面白い」と思っているかを理解して、自分もそれを「面白い」と思えるようになることだと思う。

本プロジェクトは上にお名前を上げた方々以外にも多くの方々の協力の上に成り立っている。一応「歴史文献天文学研究会」と名付けてはいるが、別にPIや決まったメンバーがいるわけではなく、出てきた史料や科学的疑問に応じて、お互いの知見を持ち寄って自然発生的に研究チームができるような、緩やかなネットワークができていると言った方が正しいが、これは京大宇宙ユニットの特徴的なスタイルかもしれない。ただその中でも、中心になってプロジェクトを引っ張っているのが、早川、玉澤の二人の大学院生であることは強調しておきたい。研究機関であると同時に教育機関でもある京都大学(宇宙ユニット)にとって、個別の研究成果もさることながら、このような分野横断型の研究に主体的に取り組む学生が出てきてくれたことが最大の成果と呼べるのではないかと考えている。最後に、図4に用いたVat.Sir.162の画像の使用を許可頂いたVatican Apostolic LibraryのDr. A.M. Piazzoni, Dr. D.V. Proverbio, そしてこの原稿をチェックして下さった早川氏をはじめ共同研究者の方々に感謝を申し上げて筆を置く。

引用文献

- [1] Koyama, K., 2008, AIP Conference Proceedings 1016, 361.
- [2] 青野靖之, 2012, 地球環境 17, 21.
- [3] Owens, B., 2013, Nature 495, 300.
- [4] 宮原ひろ子, 2014, 「地球の変動はどこまで宇宙で解明できるか: 太陽活動から読み解く地球の過去・現在・未来」(化学同人).
- [5] Hayakawa, H. et al., 2015, Earth, Planets and Space 67, 82.
- [6] 呉羽真, 伊勢田哲治, 磯部洋明, ほか, 2016, JAXA-SP-15-017, 37.
- [7] 岡田浩樹, 木村大治, 大村敬一 編, 2014, 「宇宙人類学の挑戦」(昭和堂).
- [8] 慶松光雄, 1969, 史林 52, 62.
- [9] 神田茂, 1933, 天文月報 26, 204.
- [10] 中沢陽, 1999, 天文月報 92, 94.
- [11] データはここからダウンロードできる <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~palaeo/>.
- [12] Tamazawa, H. et al., 2017, PASJ 69, 22.
- [13] Hayakawa, H. et al., 2015, Earth, Planets and Space 67, 82.
- [14] Hayakawa, H. et al., 2017, PASJ 69, 65.
- [15] Kawamura, A. D. et al., 2016, PASJ 68, 79.
- [16] Kataoka, R. et al., 2017, Space Weather 15, 392.
- [17] 京都大学プレスリリース, 2017年4月10日 http://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research_results/2016/170227_1.html.
- [18] Ebihara, Y. et al., 2017, Space Weather, 15, doi:10.1002/2017SW001693.
- [19] Hayakawa, H. et al., 2017, ApJL, 850, L31.
- [20] Hayakawa, H. et al., 2016, Earth, Planets and Space 68, 195.
- [21] 三津間康幸, 早川尚志, 2017, 天文月報 110, 472.
- [22] Hayakawa, H. et al., 2017, PASJ 69, 17.

宇宙倫理学プロジェクト ～惑星科学との対話に開かれた探求として～

呉羽 真¹

(要旨) 本稿では、京都大学宇宙総合学研究ユニット(以下では「宇宙ユニット」と略記する)が中心になって推進している「宇宙倫理学」という学問分野を紹介する。まず、同ユニットにおける宇宙倫理学プロジェクトの概要を述べる。次いで、惑星科学と関係の深い宇宙倫理学の具体的な話題として、惑星保護に関連した宇宙環境の価値の問題と、宇宙科学と社会のコンフリクトに関連した科学の価値の問題について解説する。最後に、宇宙倫理学が惑星科学との間に築きうる関係性について、筆者の期待を交えつつ論じる。

1. 宇宙倫理学プロジェクトの概要

宇宙倫理学プロジェクトは、宇宙人類学などと並ぶ宇宙の人文社会科学の一つの柱として、宇宙ユニットが京都大学内外の研究者と連携しつつ推進している研究プロジェクトである。2015年には宇宙ユニットと京都大学大学院文学研究科応用哲学・倫理学教育研究センターが共同で「宇宙倫理学研究会」を設立し、読書会や講演会、ワークショップなどの企画を不定期に開催している。

同研究会ウェブサイト¹では「宇宙倫理学」を、「人間と宇宙との関わりにおいて生じうる様々な道徳的問題を検討する分野」と規定している。このような宇宙倫理学の取り組みには、二つの側面がある。第一にそれは、宇宙開発や宇宙科学の進展に伴って生じた新しい道徳的問題の解決を試みる、という側面をもつ。第二にそれは、この作業を通して、地球のみに目を注いできた従来の倫理学における思考法の刷新を図る、という側面をもつ。つまりそれは、地球上の道徳的問題に対処するために用いられてきた思考法をそのまま宇宙に関わる問題に適用するわけではなく、むしろそれが通用しない場面で新しい考え方を考案することに重点を置いているのである。

宇宙倫理学の研究は1980年代に始まって以来細々

と続けられてきたが(e.g. [1]), 2010年代に入ってから何冊もの研究書や論文集(e.g. [2-4])が出版されてにわかには活況を呈してきている。日本でも2016年には宇宙倫理学研究会メンバーの稲葉振一郎がこの分野における日本初の書籍である『宇宙倫理学入門』[5]を出版している。(宇宙倫理学に関するより詳しい紹介は、[5]の第1章、[6], [7]の第1節を参照せよ。)

宇宙ユニットでは、宇宙倫理学を単独で推進するのではなく、それと隣接分野との融合を模索している。特に現在は、宇宙法や宇宙政策・科学技術政策、そして宇宙科学コミュニケーション論といった諸分野と宇宙倫理学を接合することで、今後の宇宙科学や宇宙開発の進展に伴う社会的課題を明らかにし、宇宙科学技術と社会の望ましい関係を構想する学際的な学術領域(これを筆者は「宇宙科学技術社会論」と呼んでいる)を創設することを目指している²。

さて、宇宙科学や上記の宇宙の人文社会科学の諸分野と比べて、宇宙倫理学は「価値」(特に道徳的価値)

1. <http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/research/spaceethics.html> (最終閲覧: 2017年10月22日)

2. 宇宙ユニットでは、宇宙倫理学研究会のほかに、「宇宙科学コミュニケーション論研究会」を運営している。また、宇宙探査・開発・利用に伴う倫理的・法的・社会的課題に関する研究調査報告書の作成を進めており、2017年9月には、関連する諸分野の専門家を招いて当該報告書の内容を検討するワークショップを開催した。

参考サイト: http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/etc/space_elsi/workshop.html (最終閲覧: 2017年10月21日)

1. 京都大学 宇宙総合学研究ユニット
kureha.makoto, 7r@kyoto-u.ac.jp

を扱う分野だという特徴がある³。倫理学は、様々な価値を分類し、問題を整理するためのツールを提供する。無論それは、もっぱら哲学者自身の価値観に基づいて独断的な主張を行うのでない。むしろ、科学者を含む人々の価値判断をもデータとして用いながら、理論の批判的検討や理論間の優劣比較を行うことで、研究を進めていくのである。

以下では、こうした価値に関わる宇宙倫理学の諸問題の中から、特に惑星科学と深い関わりをもちうるものとして、宇宙環境の価値および宇宙科学の価値とその位置づけを巡る倫理的問題とその議論状況について解説を加える。

2. 宇宙環境の価値

本節では、惑星保護の話題を中心に、地球外環境の価値を巡る「宇宙環境倫理学」の議論を紹介する。

環境倫理学と宇宙

まず、環境倫理学にとって宇宙の興味深い点はどこにあるのかを説明しよう。環境倫理学とは、環境問題を扱う応用倫理学の一分野だが、従来は「環境問題」と言ってももっぱら地球環境に関わるものを扱ってきた。そこで環境を保護すべき理由とされてきたものには、将来世代の権利や自然の内在的価値を引き合いに出すものがある。（「内在的価値」とは、あるものが他の事柄に役立つかどうかに関わらずそれ自体でもつ価値を指し、あるものが何か他の価値ある事柄を達成するための手段として「道具的価値」と対比される。）前者の論点からは、地球上の資源は有限であり、現代世代は将来世代の幸福な生活を保証するために環境の搾取を控えなければならない、と言える。また後者の論点からは、環境はそれ自体で価値をもっており、人間の役に立つかどうかに関わりなく保護されなければならない、と言われる。

だが、宇宙を視野に入れるならば、これらの論拠は必ずしも当てはまらない。まず、宇宙には事実上使い

尽くせないだけの資源が存在しており、技術の発展次第でそれらが入手可能になりうる。このため、資源の有限性という従来の前提が揺らぐ。さらに、地球上の環境にはどこでも生態系が存在しており、それが価値の源泉だと考えられるが、宇宙はそうでない。このため、生態系の存在しない環境の道徳的地位という新しい問題が生じる。こうして、宇宙環境を環境倫理の射程に含めることで、「なぜ環境を保護すべきなのか」が改めて根本的に問われることになるのだ。

さて、一口に宇宙環境の倫理と言っても、その射程は、われわれが今まさに直面している地球軌道上のスペースデブリの問題（デブリ対策において誰がどんな責任を負うべきか）から、遠い将来の火星移住を見据えたテラフォーミングの問題まで、多岐にわたる⁴。ここでは特に、「惑星保護」に関する倫理的問題を取り上げることにする。

惑星科学者の間では周知のことだろうが、「惑星保護」とは、惑星間汚染（特に生物汚染）を防止する取り組みであり、惑星探査において、他の天体に由来する生物による地球環境の汚染を阻止すると同時に、地球由来の生物による地球外環境の汚染を阻止するという二つの側面をもつ。実際に宇宙空間研究委員会（COSPAR）が、各国宇宙機関に対し、宇宙探査の際に従うべき措置（生命のいる可能性のある天体に向かう宇宙探査機の殺菌消毒など）を定めている。しかし、（特に有人の場合には）完全な殺菌消毒は不可能である。

こうした取り組みの法的根拠になっているのは、宇宙条約（『月その他の天体を含む宇宙空間の探査及び利用における国家活動を律する原則に関する条約』）第9条である。そこでは、以下のように述べられている。「条約の当事国は、月その他の天体を含む宇宙空間の有害な汚染、及び地球外物質の導入から生ずる地球環境の悪化を避けるように月その他の天体を含む宇宙空間の研究及び探査を実施、かつ、必要な場合には、このための適当な措置を執るものとする」。しかしこの条文は明快とは言い難い。特に、ここで言われる「有害な汚染 harmful contamination」とは何を指すのだろうか。それは、わたしたち人間にとって害があるということだろうか、地球外環境に生息する生物にとってだろう

3. 倫理学以外の哲学分野にも、美的価値を扱う美学や認識的価値を扱う認識論・科学哲学など、価値を扱う分野はある。そして宇宙倫理学は「宇宙環境美学」や「宇宙科学の哲学」、「哲学的宇宙論」といった諸分野と密接な結びつきをもっている。宇宙環境美学や宇宙科学の哲学の問題を本格的に扱った研究はまだ存在しないが、哲学的宇宙論に属する優れた著作としては宇宙のファインチューニングの問題を扱った[8]がある。

4. ただし、スペースデブリ問題に対する倫理的考察はまだほとんど行われていない。これと対照的に、テラフォーミング問題については幾つもの研究がある（e.g. [9, 10]）。

か、それともその環境自体にとってだろうか。第二の選択肢は、地球以外の太陽系天体に生命がいたとしてもせいぜい微生物だと考えられているが、そんなものも考慮すべきなのだろうか、という疑問を提起する。また最後の選択肢は、地球外生命だけでなく、生命のない天体も惑星保護の対象に含めるべきなのか、という疑問を投げかける。以下では、これら二つの問題について、順に検討を加えることにする。

地球外生命体の道徳的地位

まず、地球以外の天体の生物汚染を防止すべき理由を整理しておこう。一つは科学的理由である。すなわち、元々その天体にいた生物と地球から持ち込まれた生物の見分けがつかなくなり、地球外生命探査を阻害することを避けるために、汚染を阻止しようというのだ。これは結局のところ人間のためだと言ってよい。もう一つの理由は倫理的なものである。すなわち、その天体にいる生物が危害をこうむることを避けるために、汚染を阻止しようというのだ。これは(まだ見ぬ)地球外生命のためである。

これまでのところ惑星保護の取り組みの原動力になってきたのは科学的理由の方だが、倫理的理由についても議論されている。2010年のCOSPARワークショップでまとめられた勧告では、「地球外生命を含む生命は、内在的価値と道具的価値の両方をもつがゆえに、特別な倫理的地位をもち、適切な配慮に値する」[11]と述べられている。また、惑星科学者のセーガンは、より率直に、次のように述べている。「もし火星に生物がいたら、私たちは火星に対して何もするべきではない、と私は信じる。そのときには、火星は火星人のものである。かりに火星人が微生物にすぎなかったとしても、やはりそうだ」[12]。

これは一見、奇妙な考えである。と言うのも、われわれは地球上で微生物のことを気遣ってなどいないからだ。例えば、「火星」を(あなたの家の)「風呂」に置き換えてみよう。あなたの家の風呂には大量の微生物が生息しているはずだが、だからと言ってあなたは微生物の大量殺戮をもたらす風呂掃除を思い止まらなければならないだろうか。もっと言えば、惑星保護のために探査機を殺菌消毒することは、存在するかどうかも分かっていないよその天体の生命を守るために地球上の生命を殺すことになる。これのどこが倫理的だと

言えるだろうか。

確かに、地球上の微生物と地球外の微生物の間には、われわれは前者に危害を与えずに生きていくことは不可能だが、後者に関してはそうではない、という相違がある。「できないことはしなくてよい」という原則は、倫理学においても(‘ought imply can’ という呼称の下で)広く受け入れられている。これは地球上の微生物と地球外の微生物を異なった仕方であらう一つに理由になる。しかしそもそも、微生物などが道徳的地位をもつもの(道徳的配慮を与えられるべきもの)なのか、という点に疑問の余地がある。ここで、道徳的地位を巡る倫理学の議論を紹介しよう。

事実上、社会において採用されているのは、人間だけが道徳的地位をもつ、という「人間中心主義」である。動物愛護が叫ばれていても、人間以外の動物は法律の上では人間の所有物として扱われており、環境保護への関心が高まったとはいえ、それは主として将来世代も含めた人間社会の存続のためである。しかし倫理学においては、人間だけを特別扱いすることを正当化する根拠は不十分だと言われ、人間中心主義に代わる理論が幾つも提案されている。動物倫理で広く受け入れられている考え方は、快楽や苦痛を感じる能力(「有感性 sentience」と呼ばれる)をもつすべての生物が道徳的地位をもつ、というものだ。この考え方では、人間以外の動物の多くは道徳的配慮に値するが、植物や微生物はそうではない。しばしばこの考え方に反発して、「ありとあらゆる生命は平等に道徳的地位をもつ」と主張する人がいる。これは植物や微生物にも道徳的配慮を与えるべきだと説く立場であり、ジャイナ教などの宗教思想にしばしば認められるが、倫理学においても「生命中心主義」の名で提唱されている。環境倫理ではさらに、生物種や生態系といった生物個体以外の存在者にも道徳的地位を認める様々な立場が提出されており、これらは「生態系中心主義」と総称される。

これらの諸理論のうち、生命中心主義の考え方では地球外環境にいる微生物個体、生態系中心主義の考え方ではその生物種や生態系を保護すべきとは言える。ただし前者では、地球上の微生物を殺す探査機の殺菌消毒は倫理的と認められはしないだろう。また、生命中心主義は現実味がないという意見や、種のような抽象物に道徳的な配慮をしなければならない理由は不可解だという意見も存在している。

以上のような次第で、惑星保護に最近注目が集まっているものの、従来の倫理学の諸理論に照らすならば、その倫理的根拠は考えられているほど強固ではないと言える。ただしこれは、もっぱら地球のみに目を注いできた従来の倫理学の限界を示すものでもあるかもしれない。惑星保護を巡る倫理学の議論の結論というよりは、むしろ出発点と見なされるべきだろう。

生命のいない地球外環境の道徳的地位

次に、生命の存在しない地球外環境をわれわれは保護しなければならないか、そしてしなければならないとすればそれはなぜか、という問いについて検討を行う。ここでもまず、生物のいない地球外環境を保護すべき理由を整理しておこう。その理由としては、狭い意味で倫理的なもの他に、科学的・文化的・審美的なものが考えられる。

科学的観点からは、アポロ計画やかぐや計画が月・惑星科学の発展に大きく貢献したことからも明らかのように、生物のいない天体も、地球や太陽系の起源と進化を探る上で重要な手がかりを提供すると言える。こうした科学的目的からすれば、他の天体に生物がないからと言ってそれを改変することは望ましくない。

文化的観点からは、太陽や月をはじめとする他の天体は人類の生活において大きな役割を演じることから、様々な文化的意味を付与されてきたという事実を指摘できる。これは、それらの天体に改変を加えることに反対する理由になる。例えば、日本の企業などが企画した「ロンギヌスの槍を月に刺すプロジェクト」は、クラウドファンディングで目標額を集められず実施されなかったが、月が文化的重要性をもち、信仰の対象にもなっていることから、多くの批判が集まった。

また、審美的観点からは、地球外環境の美しさがそれを保護すべき理由として挙げられる。例えば、探査機キュリオシティの撮影した火星の荒涼たる砂漠の画像は見る者を魅了するし、エベレスト山の3倍の標高をもつオリンポス山や、グランドキャニオンと比べてすら桁違いの規模を誇るマリネリス峡谷の景観は、人類がこれまで目にしたことのない壮大さをもって見る者を圧倒するだろう。

以上の論点はいずれも、生命の存在しない地球外環境も人間にとって何らかの道具的価値を有するというを示すものだが、その内在的価値を示すには十

分でない。そして、前項で紹介した道徳的地位に関する既存の理論のどれを採用しても、生命のいない環境に対しても道徳的な配慮をすべきだという結論は必ずしも出てこない。

しかし、前出のCOSPARワークショップの勧告は、「地球外のものを含む無生物もまた、[生命と]同様に価値をもち、その内在的価値、美的価値、あるいは人間や地球外生命にとってのそれ以外の価値に適した配慮に値する」[11]と述べて、生命のいない環境の道徳的地位をはっきり認めている。ここで考慮に入れなければならないのは、地球外環境がいわゆる「原生自然」、すなわち人間の手つかずの環境だということである。地球上には厳密な意味での原生自然などほぼ存在しないと言ってよいが、宇宙空間では事情がまったく異なる。地球上から原生自然が消えたことに胸を痛める人が、いまだ誰の手も及んでいない天体を人間の都合で作り替えることに抵抗を覚えてもおかしくはない。だが、こうした価値判断は合理的根拠によって支持されるものだろうか。

ここで、生命のいない環境の価値を説明するという難題に挑む宇宙倫理学者ミリガン[3]の議論を紹介しよう。彼はそれを、天体の「統合性integrity」（損なわれていないという性質）とその「ユニークさ」に求める。ミリガンによれば、例えばグランドキャニオンのように複雑な歴史によって形成された対象は、単なる岩や鉄の塊と違って統合性をもち、またその歴史的位置づけに応じたユニークさをもつ。月のような天体もまた複雑な歴史によって形成された対象であり、これらの性質をもつので、生命がいないとしても、人間の都合で無暗にそれを損なってはならない。

さて、以上の説明はどれほどの説得力をもつだろうか。一つ難点を挙げれば、この論法によって生命のいない天体にも一定の内在的価値があるとは言えても、どれだけの価値があるかは分からない。惑星探査のような他の重要な価値をもたらず活動を制限するべきだと言えるほどの価値がそれに認められるかは疑問である。

まとめ

宇宙環境倫理は今まさに研究が進展しはじめているところだが、本節で見てきたように、地球外生命の問題と生命のいない地球外環境の問題のいずれに関して

も、その議論は成熟しているとは言いがたい段階にある。実践的な教訓を述べるならば、それらの道徳的地位がどうであれ、今後の太陽系探査において、科学的・文化的などの様々な理由から、他の天体の汚染を最小限に抑えることが望ましいとは言える。しかし、環境の価値を巡る知的探究を深めるためにも、また宇宙進出がより本格的に展開される将来に備えるためにも、宇宙環境倫理の議論を洗練させていくことは重要だと言えるだろう。

3. 宇宙科学の価値とその位置づけ

本節では、宇宙科学が直面する社会とのコンフリクトを取り上げて、倫理学の視点から何が言えるかを示そう⁵。

宇宙科学と社会のコンフリクト

惑星科学を含む宇宙科学は、他の科学分野に比べて社会から高い支持を受けていると言われるが、その一方で様々な場面で社会とのコンフリクトに直面している。こうしたコンフリクトの類型を整理しよう。

第一に、公的資金の配分を巡る問題がある。宇宙科学は「巨大科学 big science」であり、宇宙探査機の打ち上げ、大型望遠鏡の建設、国際有人火星探査計画への参加など、その研究には莫大なコストがかかる。しかし宇宙科学は、純粋な知的好奇心を主要な動機とする「純粋科学 pure science」であり、社会に対して目に見える利益をもたらさない。それでは、なぜ市民はそのコストを負担しなければならないのだろうか。公的資金は、例えば貧困問題などの社会問題や気候変動などの環境問題の解決といった、よりプライオリティの高い事業のために使われるべきではないのか。

第二に、施設建設を巡る問題がある。例えば、ハワイ島マウナケア山における30 m望遠鏡(TMT: thirty meter telescope)建設計画では、マウナケア山を神聖視するハワイ先住民を中心とした現地住民によって激しい建設反対運動が展開されている。2015年には、

ハワイ州最高裁判所の決定により、2013年にハワイ州土地・天然資源委員会(BLNR)が出した建設許可が無効化された。その後、再審査を経て、2017年9月に、BLNRがマウナケア山頂域の利用許可を決定した。しかし、反対派住民は最高裁判所への上訴を検討中であり、騒動が収束する見通しは立っていない。この問題を安易に「科学と伝統文化のどちらが重要か」といった二項対立に切り詰めてはならないが([13])⁶、こうした衝突を生み出してまで宇宙科学の研究を進めるべきなのか、と問うことは可能だろう。

第三に、将来に起こりうる問題として、地球外環境の保護を巡る問題がある。例えば、火星旅行や小惑星資源開発が可能になった場合に、基地建設や資源採掘によって地球外環境が改変されることは避けられないが、これは惑星科学の研究を阻害することになりうる。しかし、科学研究を阻害するからという言い分は、人々に富やエンターテインメントをもたらす民間事業をやめさせる理由になるだろうか⁷。

あらかじめ言い訳を述べておくと、以上のような問題は、その性質上、簡単な答えが見つかるものではない。しかし、多少なりとも議論を整理するために、次項で、宇宙科学を含む科学の営みにどのような価値があり、それは社会の価値体系全体の中でどのように位置づけられるのか、という点に関する倫理学の議論を紹介しよう。

科学の価値とその位置づけ

科学の価値に関する一つの極端な考え方は、数学者のポアンカレ[14]が表明したものである。彼によれば、人間の究極の行動目的は真理の探究を推進することにあるのであって、例えば人々を苦悩から解放するといった他の目的はそれに従属する。ここには、科学の営みに代表される認識活動が人間の多種多様な活動の中で特別に高尚だとする見方が表明されている。しかし、このような見方は、現代の人文社会科学ではほとんど支持者がいない。誤解のないように述べておくと、こ

5. 第3節で扱う問題は、「宇宙科学倫理」と呼ぶべき分野に属するものだが、科学倫理自体が応用倫理学の中でメジャーな分野ではなく、そこで宇宙科学を集中的に扱った研究があるわけではない。しかし、宇宙科学はその巨大さと純粋性、高い人気などの点で、科学倫理の話題として非常に興味深いと筆者は考えている。

6. TMT建設計画に反対する人々は決して天文学研究に反対しているわけではなく、建設地の変更を要求しているものであり、またBLNRが建設を許可したのは両者が両立可能(すなわち、TMTがマウナケアに建ててもハワイ先住民文化を損なうことにはならない)と判断したからである。

7. 火星旅行や小惑星資源開発といった新興の宇宙ビジネスを巡っては、ビジネス倫理に属す問題も数多く提起されているが、本稿では取り上げない。

これは決して科学が信頼できる知的営為であることを否定するものではない。ただ、人間の複雑さと多様性を考慮すれば、他の様々な人間の活動を圧倒するほどの特別な価値がそれに認められるという考え方は一面的である、ということだ。科学者が科学の特別な価値を主張するとき、自らを人類の存在意義を代表する特権階級と見なす傲慢なエリート主義に陥っている懸念がある。「人類」というものを、「真理の探究」のような単一の究極目的に向けて行動する一枚岩の集団と見なしてはならない。それはむしろ多様な価値観とニーズをもった人々の雑多な寄せ集めにすぎず、それを正しく代表できる人間などどこにもいはいはしないのだ。以上の点を考慮すれば、科学の価値に関する考え方としては、哲学者のレッシュャーが述べた「知識は多くの人間の価値の中の一つにすぎず、科学的知識は知識の一つのあり方にすぎない」[15]というものが妥当だと考えられる。

より詳しく、科学的知識の価値に関する倫理学の議論を見ていこう。この話題に関する立場には、「内在説」と「外在説」がある。前者は、知識には内在的価値がある、すなわち何かを知ることは、それがどう役立つかに関わらずそれ自体で価値がある、という説である。これに対して後者は、知識には道具的価値しかない、すなわち何かを知ることはそれとは別の何らかの目的に役立つからこそ価値がある、という説である。

前出のポアンカレははっきりと内在説に与しており、筆者の知る範囲でも、「道具」という言葉への反発からか、内在説に賛同する科学者が多い。しかし、倫理学ではしばしば、内在説は擁護しがたいと考えられている。科学の価値の説明としてよく見られるのは、何かを知ること喜びが得られる、人間は知的好奇心をもっている、といった論拠である。しかし、これらの理由で科学的知識はよいものだという場合、知識そのものではなく、それがもたらす喜びや好奇心の充足に価値を認めていることになる。知識が内在的価値をもつというのは、誰も知りたがっておらず、それを知ること誰も喜ばないような知識にも価値がある、ということだが、そんな例は思い浮かばないのである⁸。

従って、純粋科学であっても、そこで得られる知識の価値は道具的なものだと考えられる。しかし、それ

は決して短期的な経済的価値に限られるものではない、と言うのも、科学的知識の利用者(潜在的利用者を含む)である人々は、目先の経済的ニーズや関心だけに突き動かされて生きているわけではないからだ。そこで、惑星科学を例にとり、純粋科学の知識にどのような価値があるかをより具体的に考察しよう。

第一に、すでに述べたことだが、純粋科学の知識の主要な道具的価値は、知的好奇心の充足という点に認められる。日本惑星科学会のウェブサイト⁹では、惑星科学とは、「ここは何処で私は誰か」という素朴な疑問に答えること、すなわち、私達が自然界にどのように位置づけられているのかを考察する学問分野のひとつ」と規定されている。興味深いのは、その目的が宇宙の普遍的構造などではなく、われわれ人間の存在に向けられていること、そして、生命科学や認知科学が人間そのものの特性を(しばしば他の生物のそれと比較しつつ)解明しようとするのと対照的に、惑星科学は人間の住む世界の特性を解明することにより、そこにおける位置づけという観点から「人間とは何か」に迫ろうとする、という点である。自分が何かかなどといった思弁的な問題に関心をもつのは(これまで知られている限りでは)人間だけだが、自分の存在をその世界の中での位置に基づいて理解したがるという点も、人間の興味深い特徴だと言えるだろう。こうした好奇心のあり方が——すべてではないとしても——多くの人間に共有されるものである限りで、惑星科学には一定の社会的意義がある。

第二に、より実用的な価値としては、長期的な人類の福祉への貢献というものが純粋科学の知識にも認められる。近年の惑星科学では、「ハビタビリティ」、すなわち生命が惑星上で発生し、生存していくための条件の理解が中心的目標となっているが、そこで得られた知見は、今後人類が地球を守っていく上で、あるいはことによると他の惑星へと進出していく上で、役立つかもしれない。これは短期的な経済的利益のような狭い意味での「実用性」からは外れるが、将来世代を含めた人々の福祉に貢献するというより広い意味で、やはり「実用的」であると言える。

以上のような惑星科学の価値の整理からも伺われるように、純粋科学といえども、豊富な社会的意義を有

8. 知識の価値の内在説/外在説の区別と、内在説への批判としては、[16]を参照せよ。

9. <https://www.wakusei.jp/>(最終閲覧：2017年10月22日)

している。科学的知識は、人間のもつ最も信頼性の高い信念体系であるだけでなく、将来の人々を含めて誰もがアクセスしうる財産でもあるのだ。それは特定の誰かが占有してよいものではないため、公的支援の下で追求される。しかしその一方で重要なのは、この財産にどれだけの価値が認められるかは、それを利用する人々の関心やニーズ、現在および将来の社会を取り巻く状況次第だということである。

以上の考察は、前項で紹介した宇宙科学と社会のコンフリクトについて考える上で一定の含意をもつ。少なくとも、「科学の進歩のため」という名目が、すべてにおいて優先されるわけではないことは明白である。これは、宇宙科学が重要な価値をもつことを否定するものではない。科学は確かに重要な価値をもたらすが、それ以外にも多種多様な価値が存在する。そして、これらの価値を実現するためのリソース(資金や土地)に限りがある以上、社会の様々なニーズを考慮に入れて、様々な事業の間でのバランスやプライオリティに配慮しながらリソースを配分しなければならないのだ。

より重要な論点は、上述のように科学の価値が様々な人間的価値の一つであり、また種類の異なる価値の間で優先順位をつけることは(明らかに誰かの権利を侵害するといった場合を除いて)事実上不可能に近いということだ¹⁰。従って、上記のようなコンフリクトにおいても簡単な答えは期待できず、様々な価値の共存を模索することが最も現実的な道となる。この際には科学者も、自らの研究の価値を説明すると同時に、他の価値を理解しようと努めるべきであろう。

4. 終わりに

最後に、宇宙倫理学が惑星科学との間に結びうる関係について、筆者の期待を述べたい。

宗教と倫理学の相違点の一つに、宗教の教義がしばしば固定されたものであるの対照的に、倫理学の学説は原則的に対話へと開かれている、という点が挙げられる¹¹。実際に歴史上、倫理学を含む哲学は、科学

の進歩と絡み合いながら展開してきた。例えば、伊藤[17]が論じるように、西洋近世における自然哲学は、ニュートン力学に代表される近代科学の成立を受けて、そうした科学の営みを可能にしている人間の認識能力の本性や限界への反省として展開された。また倫理学の領域においても、例えば、比較認知科学の明らかにした人間以外の動物の驚くべき認知能力に関する諸事実が、それらの動物の扱い方に関する反省を迫っている、という事例がある。

銘記してもらいたいのは、倫理学という学問が、何らかの行為を禁止することをはじめから目的とするものではない、ということである。むしろそれは、本稿で事例を示してきたように、どんな根拠に基づいてある行為が正しい／不正であるとされるか(あるいはある物事が価値をもつ／もたないとされるか)を理解することを目指す。そのことを通して、正義や価値といった難解なテーマに関わる話題を、合理的議論に耐えうるものへと昇華させることを旨とするのである。

ここに、哲学者・倫理学者と惑星科学者が協働で議論していく可能性が開かれる。惑星科学を含む諸科学は、倫理学に対して、単に議論の前提となる経験的知見を提供するだけではない、と言うのも、哲学的思考は哲学者の専売特許ではなく、様々な学問分野の根底に浸透しているからだ。例えば前節で、科学的知識は誰かに占有されてはならないものであると述べたが、これは科学に関する一つの哲学的理念と見なせる。そしてそれは、外から誰かに押し付けられたものではなく、科学者たちがその歴史の中で自ら作り上げてきたものなのである。ただし、科学の根底にあるこうした哲学的思考は普段あまり自覚されていないため、それを明るみに出し、異分野間の対話を促進することは、哲学者の重要な役割となる。

そうした対話が行われる場として、大学、特に京都大学宇宙ユニットのような学際的研究拠点は、今後重要な役割を果たしていくだろう¹²。本稿を読んでくれた惑星科学の研究者たちの中に、宇宙倫理学者との対話に積極的に取り組んでくれる方が現れることへの期待をここに述べて、本稿を終えることにする。

10. 種類の異なる価値の間で比較を行うためにほとんどの社会が採用してきた手段として、貨幣がある。しかし、例えばTMT建設を巡る問題で、TMTを用いた天文学研究の価値やハワイ先住民文化におけるマウナケア山の価値を貨幣換算した場合、天文学者と反対派住民の双方を怒らせるだけで、それによってコンフリクトが解決されることはまずないだろう。
11. 外部との対話に開かれた宗教が存在することを、筆者は否定

するわけではない。しかし、こうした対話を拒絶する原理主義的な宗教/宗派もまた存在していることは事実であり、宗教が「原則的に対話へと開かれている」とまでは言いがたいだろう。

参考文献

- [1] Hargrove, E., 1986, *Beyond Spaceship Earth: Environmental Ethics and the Solar System* (San Francisco: Sierra Club Books).
- [2] Arnould, J., 2011, *Icarus' Second Chance: The Basis and Perspectives of Space Ethics* (New York: Springer).
- [3] Milligan, T., 2015, *Nobody Owns the Moon: The Ethics of Space Exploitation* (Jefferson: McFarland).
- [4] Schwartz, J. S. J. and Milligan, T., 2016, *The Ethics of Space Exploration* (New York: Springer).
- [5] 稲葉振一郎, 2016, 宇宙倫理学入門—人工知能はスペース・コロニーの夢を見るか? (ナカニシヤ出版).
- [6] 呉羽真ほか, 2016, in 宇宙航空研究開発機構特別資料: 人文・社会科学研究活動報告集: 2015年までの歩みとこれから, 37.
- [7] 呉羽真, 2017, 現代思想 45, 226.
- [8] 伊藤邦武, 2002, 偶然の宇宙 (岩波書店).
- [9] Sparrow, R., 1999, *Environmental Ethics* 21, 227.
- [10] Schwartz, J. S., 2013, *Ethics and the Environment* 18, 1.
- [11] Rummel, J. D. et al., 2012, *Astrobiology* 12, 1017.
- [12] カール・セーガン, 2013, *COSMOS* (木村繁訳, 朝日新聞出版).
- [13] Karube, N., 2016, *Journal of Cultural Anthropology* 11, 55.
- [14] ポアンカレ, 1977, 科学の価値 (吉田洋一訳, 岩波書店).
- [15] Rescher, N., 1999, *The Limits of Science (Revised Edition)* (Pittsburgh: University of Pittsburgh Press).
- [16] 内井惣七, 2002, 科学の倫理学—現代社会の倫理を考える6 (丸善).
- [17] 伊藤邦武, 2007, 宇宙を哲学する (岩波書店).

12. こうした異分野間の対話の実践として、宇宙ユニットは、2016年の「宇宙学セミナー」にて、筆者の司会の下、太陽物理学者の柴田一成氏(京都大学大学院理学研究科)と哲学者の伊勢田哲治氏(京都大学大学院文学研究科)の公開対談「宇宙の道と人の道—天文学者と倫理学者の対話」を行った。その内容は、宇宙ユニットのウェブページ(http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/etc/161024_Shibata-Iseda_Seminar.pdf、最終閲覧: 2017年10月22日)にて公開している。

また2017年には、応用哲学会第九回年次研究大会にて、筆者の企画で、文化人類学者(軽部紀子氏/早稲田大学大学院文学研究科)、天文学者(栗田光樹夫氏/京都大学大学院理学研究科)、哲学者(伊勢田哲治氏)を提題者とした、TMT建設の問題に関するワークショップ(「科学の価値と社会におけるその位置づけ—ハワイ島マウナケア山における30m望遠鏡建設計画から考える」を開催した。

2017年度惑星科学フロンティアセミナー参加報告

辰馬 未沙子¹

北の大地に向かうということで、私は長袖を着て上着の準備をして行きました。しかし、バスを降りてみると思っていたよりも暑く、すぐに上着を脱いでしまいました。それでも灼熱の東京に比べれば随分と涼しく、同じ日本なのにここまで格差があるものかと驚きました。後から北海道の人に「最近はずいぶん暑いよ」と言われ、大変羨ましく感じました。

今年の惑星科学フロンティアセミナーは9月6日から9日にかけて、北海道札幌市南区定山渓温泉の溪流荘において開催されました(図1)。テーマは「惑星系と衝突の歴史」で、名古屋大学大学院理学研究科の小林浩氏を招待し、2日間の講義をしていただきました(図2)。源泉かけ流しの露天風呂や食べきれないほどの豪華な食事のおかげで、大変リラックスした状態で講義を受けることができました。また、溪流荘は平成30年10月末に閉館してしまうということで、最後の貴重な機会に泊まることができました。余談ですが、札幌駅からバスで1時間強もかかるということにまだ札幌市内だということに気づき、北海道の広さを実感しました。

講義の内容は、現在の太陽系と原始惑星系円盤やデブリ円盤、ダストから微惑星へ、秩序成長と暴走成長、天体の成長とサイズ分布、その後の惑星形成、太陽系の形成条件という順で、小林氏の研究と絡めたものでした。詳しく見てみたい方は今後公開されるビデオやノートを参照していただければと思います。理論に慣れていない人には概念を、慣れていない人には式を用いて理解することができる授業で、大変面白かったです。途中わからないことが出てきても非常に質問のしやすい



図1：溪流荘前での参加者集合写真。



図2：講義中の様子。写真奥が講演中の小林氏。

い雰囲気でも、学生の質問にも丁寧に答えてくださり、とても勉強になりました。その後の天文学会での小林氏の講演は、今回の講義の内容の一部でもある「微惑星から惑星への乱流円盤中での成長」であり、まさに

1. 東京大学大学院理学系研究科
misako.tatsuma@nao.ac.jp

「フロンティア」セミナーだと実感しました。

今回私は初めて惑星科学フロンティアセミナーに参加し、初めて会った人ばかりで緊張していましたが、参加者の皆さんは大変親切ですぐに打ち解けることができました。また、学生の参加者も多く、学部生の参加もあったようで、同年代の知り合いがぐんと増えました。個人的には女性参加者が6人ということで、普段とは異なる環境で楽しく過ごすことができました。来年度以降の惑星科学フロンティアセミナーも、ぜひ参加してみたいと思いました。

お忙しい中、丸2日間にわたる講義を行っていただいた小林氏に改めて感謝いたします。また、セミナーの企画や運営をしてくださった実行委員会の皆様にも感謝いたします。さらに、私は参加費の補助をいただいたので、日本惑星科学会にも感謝いたします。私のように個人研究費が潤沢でない学生には、参加費の補助は大変有り難いものです。ありがとうございました。

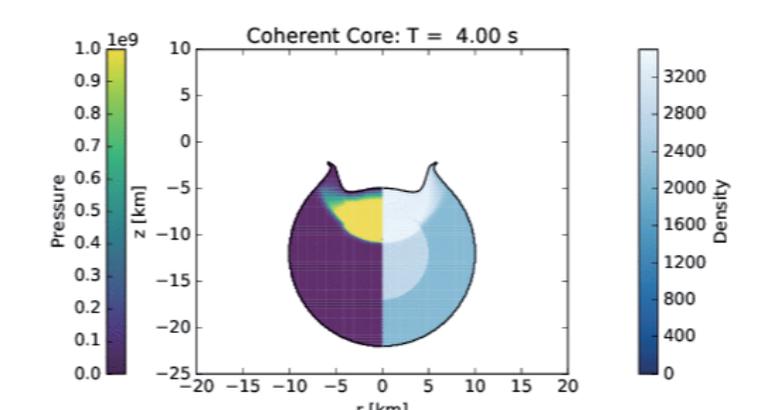


図3：直径6 kmの微惑星が、直径20 kmの微惑星に衝突して4秒後のスナップショット。標的天体内部の空隙率を変えて、二層構造を仮定してある。カラーで見たい方は、電子版をご覧ください。

プロジェクト (Center for Computational Astrophysics; CfCA) が運用する計算サーバの見学を行った(図2)。今回の実習では、CfCAの計算サーバおよび解析サーバ上でiSALEを利用させていただいた。CfCAはスーパーコンピュータから中小規模のPCクラスまで幅広く運用しており、共同利用も募集している。

三日目は、参加者それぞれが各自の興味に応じて課題を設定し、iSALEによる衝突シミュレーションを行った。上述したように、iSALEは初学者にもやさしく、考えたアイデアを比較的簡単に実行に移すことができる。とはいうものの、初めて利用するときには、多くのエラーに直面することになった。黒澤氏、脇田氏、末次氏の親切な指導のおかげで、一通りの計算を完成することができた。例として、筆者の行った計算例を示す。小惑星ベスタの巨大クレーター、レアシルヴィアの対蹠点には、特徴的な高地が存在する。巨大衝突による衝撃によって、対蹠点付近で地形の変化が起こりうるかどうか、マンツルの強度や空隙率、音速を変えながら調べた研究例がある[5]。もう少し小さな未分化の小惑星でも、そうした衝突の影響を受けた地形が形成されうるかどうかを調べようと考え、天体内部の空隙率を変えて衝突シミュレーションを行った(図3)。今後、衝突によって表層物質が受ける加速度などを解析し、実際の小惑星の地形との比較を行えばとぼんやり考えているところである。参加者によっては、普段行っている室内実験をiSALEによって再現しようと試みるなど、多様な課題が取り組まれている。

最後に、本講習会を開催するにあたり、ご尽力くださった全ての方に感謝申し上げます。特に、講習会を主催いただいた世話人の黒澤耕介氏、脇田茂氏、末次竜氏には重ねて御礼申し上げます。加えて、懇親会後の途方もなく長く感じた駅から天文台までの道のりを楽しく先導していただいた国立天文台の瀧哲朗氏にも感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 103.
- [2] iSALEウェブページ (<http://www.isale-code.de/redmine/projects/isale>).
- [3] iSALE国内ユーザグループのウェブページ (<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/?1.+iSALEとは?#目次>).
- [4] Wakita, S. et al., 2017, The Astrophysical Journal 834, 125.
- [5] Bowling, T. J. et al., 2013, Journal of geophysical research 118, 1821.

木星トロヤ群小惑星探査ワークショップ開催報告

癸生川 陽子¹, 河井 洋輔², 青木 順², 岡田 達明^{3,4},
伊藤 元雄⁵

1. はじめに

2017年9月30日(土)に大阪大学豊中キャンパスにて木星トロヤ群小惑星探査ワークショップを開催した。本研究会は、現在計画審査段階にあるソーラー電力セイル探査機による木星トロヤ群小惑星探査計画の意義をより深めること、また、広くコミュニティの方々に関心を持っていただくことを目的とし、日本惑星科学会秋季講演会の後日、同会場にて行われた。本ワークショップの参加者(ご記名頂いた方)は37人であった。木星トロヤ群小惑星の探査は、世界初のD/P型小惑星の着陸探査であり、惑星形成論の制約や始原的小天体の形成・進化を読み解く鍵となることが期待されている。したがって、本研究会では、木星トロヤ群小惑星だけでなく太陽系における物質進化や始原的小天体の形成なども含めた幅広い専門の研究者に講演を依頼し、議論を行った。また、本ミッションは片道10年以上と、非常に長い期間となるため、積極的な後進の育成を念頭においており、若手の参加を促すため、鳥居・井上基金の援助のもと大学院生及び若手研究者に旅費の援助を行った。本ワークショップ費用の一部はJAXAの支援を受けた。

2. プログラム及び講演内容

本ワークショップのプログラムを表1に示す。初めに、岡田氏が木星トロヤ群探査計画の概要について講演を行った。

吉田氏は、木星トロヤ群小惑星の観測事実について講演した。サイズ頻度分布や自転周期分布について最新の研究成果について述べ、メインベルトのD型小惑星との差異や水氷の存在などについての議論が行われ、地下試料の調査の重要性が強調された。

野村氏は、原始惑星円盤の有機分子の観測及びこれらにより明らかになった反応機構について講演した。円盤内の位置による化学反応の違いについて議論し、木星トロヤ群の物質分析からダストの水マントル反応前の初期状態がわからないかという提案がなされた。

生駒氏は、巨大惑星形成についての理論研究について講演し、最新の研究成果も織り交ぜて、初期太陽系における微惑星の広範囲な混合について議論した。希ガスを含んだ氷の分析や小惑星の形成場所(温度)とその多様性を調べることの重要性が強調された。

平田氏は、クレーター数密度と空間分布について講

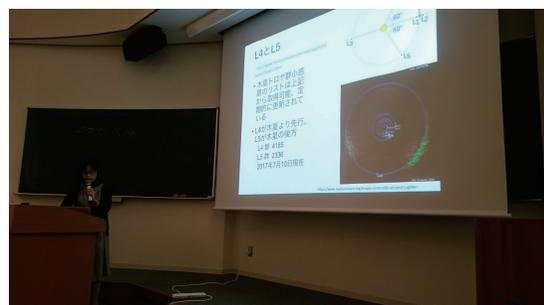


図1: ワークショップの様子。

1. 横浜国立大学 大学院工学研究院
2. 大阪大学 大学院理学研究科
3. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
4. 東京大学 大学院理学系研究科
5. 海洋研究開発機構 高知コア研究所
kebukawa@ynu. ac. jp

表1: 木星トロヤ群小惑星探査ワークショッププログラム.

9:00-	受付
9:30-9:45	挨拶・趣旨説明
9:45-10:15	岡田達明 (JAXA) 「ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群の探査計画概要」
10:15-10:45	吉田二美 (千葉工大/神戸大) 「これまでに地上観測で分かっているトロヤ群小惑星についてのレビュー」
11:00-11:30	野村英子 (東京工業大学) 「原始惑星系円盤における有機分子生成」
11:30-12:00	生駒大洋 (東京大) 「巨大惑星形成に関する未解決問題」
12:00-13:30	昼休み
13:30-14:00	平田直之 (神戸大) 「小天体のクレーター数密度と空間分布」
14:00-14:30	野口高明 (九州大学) 「微隕石から想像するトロヤ群小惑星の構成物質」
14:45-15:15	橋口未奈子 (九州大学) 「炭素質コンドライト中有機物の水素・窒素同位体異常と水質変質」
15:15-15:45	藪田ひかる (広島大学) 「コンドライトの高強度レーザー圧縮実験: 衝突物質の初期地球への寄与」
16:00-16:30	総合議論・まとめ
16:30-	ラボツアー (希望者)

演し、これらの観測による年代や衝突履歴の推定について解説した。また、D型に分類されている火星衛星 Phobos・Deimosと同じくD型(またはP型)の木星トロヤ群小惑星との比較の重要性についても述べられた。

野口氏は、地上における観測や地球外物質分析から推定されるトロヤ群の物質について講演した。木星トロヤ群小惑星と惑星間塵や超炭素質南極微隕石との類似性が指摘され、宇宙風化や水質変質の影響についての議論がなされた。

橋口氏は、有機物の水素・窒素同位体について講演し、これらの小惑星における水質変質による変化について議論した。有機物の起源や進化のトレーサーとしての水素・窒素同位体の重要性が強調された。

藪田氏は、レーザーを用いた隕石の衝突模擬実験から、衝突物質の初期地球への寄与について講演した。質量分析を用いた物質分析における高質量分解能の装置への期待、質量分析装置へ導入する前に試料を分離するガスクロマトグラフィーの重要性が述べられた。

3. 総合討論

最後に総合討論の時間を設けた。惑星形成論の制約については、たくさんの天体を調査することが重要であること、しかし、局所的な氷の存在を調べるために

はランデブーが必須であることなどが議論された。なお、木星トロヤ群探査におけるマルチランデブーはオプションとして検討されている。また、水質変質の有無を調べることは、微惑星の起源や進化過程の問題と密接に結びついている²⁶Alの放射壊変の寄与について制約を与えることができるという点において重要であることが議論された。

ターゲット天体については、木星トロヤ群にはその位置によりL4・L5に分けられることや、スペクトルタイプによりRed(≒D型)・Less red(≒C/P型)の2タイプあることから、どの天体をターゲットとするのが良いかが議論となった。L4とL5の両方を調べる必要はないが、RedとLess redは両方とも調べるべきとの意見があった。木星トロヤ群小惑星のマルチフライバイミッションであるNASAのLucyとの協力の重要性が確認された。また、トロヤ群天体同士の衝突・合体があった場合、その天体を何箇所か調べることができれば、1つの天体からRed・Less red双方の情報を得られるのではないかと意見があった。

タッチダウンポイントについては、氷が存在するとされるクレーターの壁や極付近にタッチダウンすることができるかどうか議論の焦点となった。工学側からオービターによる観測は可能だが、クレーターの壁へのピンポイントタッチダウンは難しく、極について

は自転軸の向きによるとの回答があった。

同位体については、有機物の同位体比のバリエーションは非常に大きく、実際に分析を行っても木星トロヤ群の起源への制約が難しいのではないかという懸念が挙げられた。バリエーションが大きい以上、サンプル数を増やすしかなく、その場分析でも分析する試料量をできる限り大きくする必要あるとの議論がなされた。地上での惑星間塵などの分析はそもそも量が少ないため、比較対象として不確定要素が多い。これらについてもサンプル数を増やし、平均値で議論することの必要性が挙げられた。

トロヤ群小惑星の着陸探査においてはサンプリングのためのガス銃やスラスタなどのガスに希ガスを使うことを検討しているが、希ガスの分析への影響を最小限にするためにはどのようなガスを使うのが良いかが議論となった。重要なのは主に Ar, Kr, Xe の量比であるためそれ以外が望ましいとの意見があった。

4. 終わりに

限られた時間のワークショップであったが、活発な議論を行うことができた。今回は参加できないが、次回は是非と一言いただいた方も何人かおり、興味を持っていただける方がこのように多く存在していることは励みになると共に、今後これらの方々に加わって頂くための体制作りが急務であるとも感じられた。最後に、お忙しい中講演を引き受けてくださった方々、日本惑星科学会 公開講演会やフットサル大会の誘惑に負けずに本ワークショップに参加して頂いた方々に感謝したい。

研究会開催報告 「第5回衛星系研究会：冥王星系の起源」

谷川 享行¹, 木村 淳², 奥住 聡³, 関根 康人⁴, 倉本 圭⁵,
大槻 圭史⁶, 田中 秀和⁷

衛星系研究会を2017年1月25 - 26日の日程で、東京工業大学にて開催した。今年で第5回となる本研究会は、衛星(系)を対象とした研究を行う様々な分野の研究者が相互に交流することを目的として、2012年に発足したものである。

今回は、「冥王星の起源」というテーマを設定した。1930年の発見以来これまで謎に包まれていた冥王星だが、2015年に探査機New Horizonsが通過したことで一気に詳細な情報が得られた。地表の様子からは、活発な活動が遠くない過去に起こっていることを示しており、数多くの研究結果が既に発表されている。さらに、巨大衛星Charonおよび4つの小衛星からなる衛星系の姿も明らかになってきた。Charonは、冥王星との質量比からすると衛星というよりは連星として考えてもよく、その形成起源について活発に研究が行われている。近年発見された他の4つの小衛星についても、形状・表層の色や自転などの情報まで得られつつあり、連星周りの衛星形成という力学的観点からも興味深い。このように、準惑星としての冥王星は、太陽系外縁部の天体の中で最もよく研究がなされており、太陽系外縁部の進化、ひいては太陽系形成過程を紐解く重要な鍵となりうる。そこで今回は、冥王星(系)についての研究を主なテーマとして開催し、衛星(系)に関わるあらゆる話題についても広く講演を募集した。

1. 一関工業高等専門学校総合科学自然科学領域
2. 大阪大学 大学院理学研究科
3. 東京工業大学 理学院
4. 東京大学 大学院理学系研究科
5. 北海道大学 大学院理学研究科
6. 神戸大学 大学院理学研究科
7. 東北大学 大学院理学研究科
tanigawa@.ichinoseki.ac.jp



図1：研究会中の様子。

そこで、冥王星の起源・進化・現在の様子について、3名の招待講演者にそれぞれの専門領域についてレビューを行って頂いた。まず東工大の小南淳子氏に、太陽系外縁部における微惑星群の進化・惑星形成、および微惑星連星の形成について、ご自身による大規模N体計算の結果を中心にご講演頂いた(図1)。大きな衛星Charonと連星を成している見なせる冥王星を代表例として、TNOsには多くの連星が発見されている。そこで、太陽系外縁部における外縁部の微惑星群の力学進化のシミュレーションを行い、連星形成のメカニズムおよび連星形成率について系統的に説明して頂いた。さらに、この力学進化により必然的に起こる惑星移動についても最新の知見を詳しく説明して頂いた。次に北大の鎌田俊一氏には、自転の極の位置が移動する「真の極移動」のメカニズムと冥王星のテクトニクス・地形・内部海・地表物質分布の関連について、それらを統合的に説明可能な冥王星進化シナリオを、ご自身の研究を中心に解説して頂いた。衝突盆地への

揮発性物質の移動・凝縮やテクトニクスによって冥王星の質量分布が変化し、それに伴って自転軸の極が力学的に移動し、さらにその移動の痕跡が様々な地質学的特徴として残っていることが示唆しているという、冥王星の活発さをリアルに感じさせられる講演だった。東大の関根康人氏には、クジラ型で知られている赤道付近の赤い領域について、Charonを生み出した巨大衝突を原因とするご自身による仮説をご紹介頂いた。まずSPHシミュレーションを行い巨大衝突後の表面温度分布とその継続時間を調べ、さらに地表模擬物質の加熱実験を行い模擬物質の色変化の温度・時間依存性も調べ、その両者が調和的となるような条件を求めることにより実際に起こったであろう巨大衝突の衝突パラメータを絞り込んだ。さらに、このメカニズムを大型TNOsの表層色多様性の起源にも適用し、巨大衝突の確率論的多様性まで話を一般化した話をされ、外縁天体の色についての理解が大きく進んでいることを感じさせられた。

以上の招待講演に加え、一般講演・ポスター講演も、(個別に触れることはしないが)今回のテーマに直接的に関係するしないにかかわらず、招待講演の内容の間をつなぐものもたくさんあり、充実したものだった。本研究会での各講演テーマが今後さらに進展することで、衛星系を鍵とした太陽系・惑星系形成史の統合的に理解が進むことを願っており、また本研究会がその一助となれば幸いである。

最後に、招待講演者の皆さんをはじめ、すべての発表者の方々、および参加して会を盛り上げて頂いたすべての参加者の皆様に感謝したい。また、研究会の準備を積極的に手伝って頂いた東工大・地惑の皆さんに感謝したい。参加申込システム及び講演資料の保管・公開にはCPSのサーバを使わせて頂いた。

//////////////////////////////////// プログラム¹ //////////////////////////////////////

▶ 1/25

● 13:00-15:00

- ・小南淳子「微惑星連星の進化、集積から探る冥王星や円盤外側の惑星の形成・起源」
- ・道越秀吾「Charikloの二重環の構造と衛星との相互作用による長期進化」

● 15:00-16:40 ポスター紹介&ポスターセッション

ン

● 16:40-18:00

- ・土屋史紀「衛星イオの火山活動と磁気圏へのガス散逸」
- ・関口朋彦「あかり衛星によるトリトンとエリスの赤外線観測」

▶ 1/26

● 09:30-11:00

- ・鎌田俊一「冥王星の進化」
- ・木村淳「冥王星地下海の安定性と進化」

● 11:30-13:00 ポスターセッション&昼食

● 13:00-14:20

- ・関根康人「冥王星の暗いクジラ模様を生み出したカロン形成巨大衝突」

● 14:20-14:40 休憩

● 14:40-16:00

- ・芝池論人「ダストの合体成長による周惑星円盤内での微衛星形成」
- ・青山雄彦「1次元放射流体計算による集積期巨大ガス惑星からの水素輝線強度の推定」

● 16:00-17:00 総合討論

▶ ポスター講演

- ・中嶋彩乃「土星中型衛星の軌道進化とエンケラドスの潮汐加熱」
- ・柴田翔「成長中の原始巨大ガス惑星による固体物質の後期集積過程」
- ・丹秀也「1000気圧超熱水環境でのメタン生成・硫酸還元反応実験 - 巨大水衛星・火星での物質循環・進化の理解に向けて -」



図2：集合写真。石川台2号館前、背後の建物はELSI-1棟。

1. 講演資料は<https://www.cps-jp.org/~satellite/>で公開している。

2017年日本惑星科学会秋季講演会報告

2017年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(大阪大学LOC) 佐々木 晶¹

2017年9月27日(水曜)から9月29日(金曜)にかけて、大阪大学豊中キャンパスにて2017年日本惑星科学会秋季講演会が行われました(図1)。大阪大学では1993年に創立間もない日本惑星科学会の第1回秋季講演会が開かれおり、今年、24年ぶりに第25回秋季講演会を開催させていただきました。

会場は、講演会場として今年完成したばかりの理学研究科教育研究交流棟・南部陽一郎ホールを使用しました(図2、図3)。また、ポスター会場には基礎工学国際棟の会議室を使用しました。南部陽一郎ホールは、通常は使用料が必要なのですが、今回は、学部生及び修士1年の非発表の学生を参加費無料とするということで、理学部学生に有益と判断され、無償で借りることができました。演台を取り囲むように円錐形に座席が配置されたコンパクトな会場は、よい雰囲気講演・議論ができたこと、好評をいただきました。

参加者は、211名(うち事前参加申込者139名、当日参加者72名)と大変多くの方にご参加いただくことができました。また、学部生及び修士1年の非発表の学生を参加費無料としたところ、45名の参加者がありました。大阪大学だけでなく、神戸大学や京都大学等近隣の大学からの無料参加者も多く、都市部での開催では、無料制度は多くの学生に惑星科学に触れる機会を提供することができるよい方法だとあらためて感じました。無料参加学生も入れた全参加人数は、おかげさまでここ10年の秋季講演会で最高人数を記録しました。

発表数は、口頭発表110件、ポスター発表72件で、両者のうちそれぞれ9件は、口頭発表とポスター発表



図1：受付前看板。



図2：南部陽一郎ホール。



図3：秋季講演会受付。

1. 大阪大学大学院理学研究科
sasakisho@ess.sci.osaka-u.ac.jp



図4：懇親会惑星焼きブース前。

の両方が義務付けられている最優秀発表賞のエントリー講演でした(プログラムは前号に掲載済)。二日目の総会にて、発表賞受賞者の表彰式が行われ、京都大学の野津翔太会員が受賞されました。また、総会後に最優秀研究者賞特別講演が行われ、国立天文台の秋山永治会員が「観測が明かす原始惑星系円盤と惑星系の姿」というタイトルで講演をされました。

口頭発表の一人当たり持ち時間は10分(質疑応答2分を含む)で行いました。秋季講演会計画当初は発表時間を確保するために、口頭発表を2会場並行で行う案も検討されましたが、「すべての発表を聴講できる」というメリットを重視する意見が多く、また議論をする十分な時間もなかったため、従来通り1会場で行うこととしました。ただし、同じテーマを同じ発表者が口頭とポスターの両方で発表することはご遠慮いただきました(最優秀発表賞エントリー者は除く)。また、同一発表者による発表は、口頭1件+ポスター1件までとさせていただきます。座長はLOC以外の会員にお願いしましたが、座長の皆様の適切な進行により、大きな遅延も生じず、無事にプログラムを進行することができました。

懇親会は二日目の夜に豊中キャンパス内にあるカフェテリア「らふおれ」を貸し切って行いました。懇親会参加者数は136名(事前参加申込87名、当日参加49名)と盛況でした。カフェテリアに無理を言って持ち込み自由としていただき、各種お酒類を大量に持ち込むことができました。その分、食事を多めに注文できたため、ご来場の方々には「たっぷり飲食できた」と



図5：惑星焼きを焼くLOC委員長。

好評をいただきました。また、懇親会企画として、惑星焼き(惑星の内部構造やカラフルな外観を模した、たこ焼き)をLOC有志がその場で焼いて提供しました(図4、図5)。惑星焼きを片手に惑星形成論を語り合う様子があちこちで見られ、惑星科学会ならではの楽しい企画となりました。

3日間の講演会日程を無事終えて、翌日の9月30日(土曜)には一般講演会が、京阪電車なわ橋駅コンコースのアートエリアB1で行われました。アートエリアB1は大阪大学とNPO法人ダンスボックスと京阪ホールディングス(株)が共同で運営しているアートコミュニケーション広場です。一般講演会は、主催：日本惑星科学会、大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、アートエリアB1、共催：大阪大学21世紀懐徳堂という形で開催されました。一般の方々への広報や、参加申し込みから会場の準備まで、大阪大学21世紀懐徳堂という、市民と大阪大学をつなぐ社会学連携や社会貢献活動の窓口となる組織に全面的に協力していただきました。「月の科学の最前線」というテーマで、寺田健太郎会員(大阪大学)が分析・観測研究の側面から、玄田英典会員(東京工業大学)がモデル計算の側面から、佐伯和人会員(大阪大学)が探査の側面からそれぞれ月科学の最前線を語り、その後3者で対談しつつ来場者の質問に答えるというコーナーを設けました(図6)。事前申し込み定員70名の枠は申し込み開始後すぐに埋まり、当日立ち見覚悟でいらっしゃった方々も含めて100名近くの来場がありました。



図6：一般講演会のオープニング。

今回の秋季講演会を開催するにあたって、多くの皆様のご協力をいただきました。LOCの構成は、佐々木晶(委員長)、佐伯和人(総務)、木村淳(会計)、寺田健太郎(一般講演会)、近藤忠(懇親会)、西谷隆介(WEB)、山中千博(プログラム、案内)、植田千秋(ポスター主)、河井洋輔(アルバイト管理)、佐野孝好(ポスター副)の各氏で、体制をしっかりと組めたことが成功につながったと思います。大会運営について様々

な情報を提供していただき相談にのっていただいた、前大会岡山LOCのみなさま、惑星科学会各委員会のみなさま、秋季講演会運営に協力していただいたセッション座長のみなさま、アルバイト学生のみなさま、大阪大学21世紀懐徳堂のみなさま、そして、大阪に集まって熱い発表と議論を交わしていただいた参加者のみなさまに、LOCを代表して厚く御礼申し上げます。

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第121回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第122回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第48回総会議事録
- ◇日本惑星科学会第123回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

◇日本惑星科学会第121回運営委員会議事録

日 時：2017年9月13日(木)15：00 - 17：00

場 所：TV会議

運営委員：

出席者 15名

荒川 政彦, 中本 泰史, 中村 昭子, 渡邊 誠一郎, 千秋 博紀, 和田 浩二, 生駒 大洋, 諸田 智克,
林 祥介, はしもと じょーじ, 竹広 真一, 中島 健介, 寺田 直樹, 佐伯 和人, 上野 宗孝

欠席者 8名

倉本 圭, 田近 英一, 平田 成, 田中 智, 中村 智樹, 藪田 ひかる, 小久保 英一郎, 橘 省吾
(委任状：議長5通)

議 題：

1. 将来惑星探査検討委員会設置について(将来惑星探査検討グループ)

- ・千秋将来惑星探査検討グループ長から専門委員会化についての提案があった。
- ・RFIへの回答文書やロードマップの改定が必要などときには、新たな作業部会をおく。
- ・将来計画専門委員会との担当がボーダーな作業に関しては、今後、様子を見ながら作業を割り振る。
- ・名称は「惑星探査専門委員会」とする。
- ・委員会の設置が承認された。
- ・会長から委員長は千秋博紀が選任された。
- ・委員は下記が選出され、承認された。

田中智(宇宙科学研究所)

大竹真紀子(宇宙科学研究所)

寺田直樹(東北大学)

佐伯和人(大阪大学)

関根康人(東京大学)

2. RFI改定作業について(将来惑星探査検討グループ)

- ・千秋将来惑星探査検討グループ長からRFI文書の改定が提案された。

- ・部会の設置を提案され、承認された。
- ・寺田会員を中心にsgepssとの連携を行う。
- ・体制については次回の運営委員会で承認する。
- ・次回の総会で活動について説明予定である。
- ・部会委員の公募も行う予定である。

3. EPS分担金について(欧文誌専門委員会)

- ・生駒欧文誌専門委員会委員長より現状の説明があった。
(経緯は第119, 120回運営委員会議事録を参照)
- ・来年度、科研費が採択されなかった場合を想定して分担金が算出されている。個人会員数×和文誌計数により算出している。
- ・投稿料の値上げも検討している。
- ・移行期間に必要となる分担金の増分は現在の分担金に係数をかけたものにすべきとの意見がでた。
- ・EPSを維持することのメリットとデメリットを勘案して、EPSから抜けることも考えるべきとの意見がでた。

4. シニア会員制度について(将来計画専門委員会)

- ・中村将来計画専門委員会委員長より現状の検討状況について説明があった。(これまでの議論の詳細は第120回運営委員会の議事録を参照)
- ・終身会員制度の検討を行っている。

5. 運営委員の改選に関して(将来計画専門委員会)

- ・中村将来計画専門委員会委員長より、運営委員会メンバーのリフレッシュを促すために多選を妨げる規則を追加することが提案された。
- ・過去3期にわたり運営委員会の構成メンバーであった会員は運営委員の被選挙人名簿から外れる規則の追加が提案され、承認された。
- ・次回運営委員会で役員選挙規定の改定案を。
- ・次回の総会で会員に意見を求め、次々回の総会で承認を得ることとする。

6. パルスパワー科学研究所の共同研究拠点申請への要望書について(衝突研究会)

- ・熊本大学のパルスパワー科学研究所から衝突研究会へ応援の要望書を出して欲しいとの依頼があった。荒川衝突研究会世話人より要望書を提出することとしたいとの提案があり、承認された。

7. 国際宇宙探査専門委員会について(荒川会長)

- ・荒川会長より国際宇宙探査専門委員会で説明された月探査のシナリオについて説明された。
- ・SELENE-R, HLEPP(Human Lunar Exploration Precursor Program)で資源探査・技術探査への科学的な貢献がコミュニティに期待されている。
- ・佐伯委員、千秋将来惑星探査検討グループ長らがサポートし、RFIの記載を踏まえ意見をまとめる。

8. 用語研究会設置要望書について

- ・天体名称についての研究とその成果の発信については科学的意義が認められるが、強制力があるとの認識については多くの反対意見が出た。
- ・運営委員からの意見を踏まえ回答をまとめることとなった。

9. その他

- ・荒川会長より連合の代議員選挙について案内があった。

◇日本惑星科学会第122回運営委員会議事録

日 時：2017年9月27日(水)18：20 - 21：00

場 所：大阪大学豊中キャンパス 理学研究科F棟 F313

運営委員会委員：

出席者 18名

荒川 政彦, 倉本 圭, 中本 泰史, 中村 昭子, 渡邊 誠一郎, 千秋 博紀, 田近 英一, 生駒 大洋, 諸田 智克, 林 祥介, 平田 成, 竹広 真一, 中島 健介, 田中 智, 寺田 直樹, 佐伯 和人, 上野 宗孝, 藪田 ひかる

欠席者 5名

和田 浩二, はしもと じょーじ, 中村 智樹, 小久保 英一郎, 橘 省吾
(委任状：議長4通)

オブザーバー：

春山 純一 会員

門野 敏彦 学会賞選考委員長

関口 朋彦 2018年秋季講演会組織委員長

議題・報告事項：

1. 国際宇宙探査専門委員会の設置について(春山会員)

- ・春山会員から委員会の設置の経緯と役割・具体的なタスクについて説明があった。
- ・国際宇宙探査推進チームへの科学的な提言するための専門機関として理学・工学委員会の下に設置された。
- ・荒川会長も委員として参加している。

2. 第1回, 第2回国際宇宙探査専門委員会の報告(荒川会長)

- ・荒川会長よりこれまでの専門委員会の議論の内容が報告された。
- ・SELENE-Rに対する荒川会長のスタンスについて説明があった。
- ・シンポジウムなどを開催し多様な意見を集めることとする。

3. 会計第14期上期中間報告(竹広財務専門委員長)

- ・竹広財務専門委員長から会計第14期上期中間報告があった。
- ・順調に執行している。

4. 会計第14期下期予算案(竹広財務専門委員長)

- ・竹広財務専門委員長から会計第14期下期予算案について報告があった。
- ・EPS分担金の増加の可能性がある。増加分は予備費として計上している。
- ・予算赤字, 決算黒字を解消するために遊星人印刷費を例年の180万から150万と減額した。編集専門委員会とは合意している。

- ・ 72万円の赤字(昨年予算より13万円赤字増).
- ・ 寄付金で若手育成などに当てられないか. 財務を中心に検討する.
- ・ 賛助会員を増やす努力をする. 宣伝が足りないと思われる.

5. EPS分担金について(生駒欧文誌専門委員長)

- ・ 荒川会長より10月初めに5学会長会議があり, EPSについて議論予定であることが報告された.
- ・ 生駒欧文誌専門委員長より現状の説明があった.
- ・ 科研費が切れることへの緊急措置, 学会間の均等化が増額の目的である.
- ・ 均衡をとることについては学会間の覚書に基づいている.
- ・ どのような基準で均衡と考えるかについての交渉の余地がある.
- ・ これまでの経緯を踏まえての均衡化が必要である.
- ・ 惑星科学会としては48万への増額は出せないと伝える.
- ・ 27万円までは会長の判断で了承して良い旨, 合意された.

6. 自然災害に伴う会費免除措置等について(竹広財務専門委員長)

- ・ 今年度も免除措置を実施する.

7. 運営委員の改選に関して(中村将来計画専門委員長)

- ・ 前回の運営委員会で承認された, 多選禁止について再度説明があった.

8. 役員選挙規定改定案(諸田総務専門委員長)

- ・ 改定案について議論した. 告示日の時点で正会員であるものを選挙人, 被選挙人の資格とする. 告示日以降に入会が認められた会員には入会時に選挙人, 被選挙人になれないことを伝えることで対応する.
- ・ 会則の修正と合わせて, 春の総会で改定案を会員に提示できるように進める.
- ・ 総会では, 運営委員会で多選禁止が承認されたこと, 会則, 選挙規定を改定することを報告し, 会員から意見を求める.
- ・ omlにより本件について周知し, 1~2か月程度steeringへ意見を求めることにする.

9. 入退会について(諸田総務専門委員長)

- ・ 諸田総務専門委員長より会員数の報告があった.
- ・ 非会員の承認手順について, 入退会担当が手作業で行なっているメール送信は省略することとなった.
- ・ 佐伯委員から, 退会者の意見が紹介された. 理学・工学者が参加している学会がある中で, 惑星科学会は少数の理学者が運営していることで魅力を感じないためである, とのこと.
- ・ 多選禁止により, より広い会員からの意見が反映できるようにする予定である.
- ・ 工学とのセッションを積極的に進めては, との意見がでた.
- ・ 今後, 秋季講演会でセッション提案を受け付けることを含めて行事部会で検討する.

10. その他総務からの案件(議長・書記等)(諸田総務専門委員長)

- ・ 総会の議長として, 濱野景子会員, 書記として, 山本幸生会員が推薦されることとなった.

11. RFI改定作業のための部会設置について(千秋惑星探査専門委員長)

- ・主査を東工大の臼井会員にお願いした。
- ・前回のRFIを基にして、1月末までにJAXAに提出できるように進める。
- ・委員は応募している。10/13締め切り。その後、委員を運営委員会で承認を得る。

12. 遊星人の発行状況報告(和田編集専門委員長)(メール報告)

- ・遊星人はつつがなく発行されている。とくに秋季講演会プログラムが掲載されている最新号(9月号)は三浦編集幹事の尽力と印刷所・事務局のご協力により、秋季講演会開催前に、会員の手元に届けることができた。
- ・J-STAGE上での公開作業も粛々と進めている。2011年以降の記事はすでにJ-STAGEにて公開中。それより過去(2010年と、それ以前)のものは、査読の有無が確認できないので、J-STAGEでの掲載予定は今のところないが、何らかの方法で確認でき次第掲載することとする。
- ・国立情報研究所から頂いた過去記事のPDF版も順次学会サイトへ掲載予定である。現在、掲載担当者を検討中。

13. 2017年秋季講演会報告(佐伯2017年秋季講演会組織委員)

- ・秋季講演会の参加者についての報告があった。
- ・通常参加197名+無料参加30名で、初日終了時点で227名の参加者があった。

14. 日本地球惑星科学連合の報告(田近対外協力・連携専門委員長)

- ・代議員選挙が始まる。
- ・2020年大会はAGUジョイント大会となった。
- ・フェローの募集がある。

15. 2018年秋季講演会実施案(関口2018年秋季講演会組織委員長)

- ・2018/10/16-19を予定している。
- ・会場は旭川市科学館サイバルを予定している。
- ・一般講演会すれば会場費は無料となる見込みである。

16. 最優秀発表賞受賞者の決定(門野学会賞選考委員長)

- ・門野学会賞選考委員長から、選考委員での議論の経緯を含めて説明があり、野津翔太会員が推薦され、承認された。

17. 用語研究会設置要望書について

- ・前回の申請時に回答した内容が今回の要望書に十分に反映されていない。
- ・これを踏まえ回答をまとめることとなった。

◇日本惑星科学会第48回総会議事録

日 時：2017年9月28日(木)16:40 - 18:00
 場 所：大阪大学豊中キャンパス 理学研究科J棟 南部陽一郎ホール
 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1

正 会 員：614
 定 足 数：62
 参加人数：102名(開会時) (これに加えて非会員の傍聴者6名)
 > 106名(議事3.1採択時) > 106名(議事3.2採択時)

委 任 状：112(ただし、内0通分は提出者が総会に参加したため無効)
 議 長：109通
 佐々木晶会員：2通
 林祥介会員：1通

1. 開会宣言

諸田総務専門委員長が開会を宣言。

2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に濱野景子会員，書記に山本幸生会員が選出された。

3. 議 事

3.1. 第14期上期(2017年度)中間報告

3.1.1 会計報告(竹広財務専門委員長)

特に問題なく順調であったことが報告された。

3.1.2 各種専門委員会報告

・運営委員の改選に関して(中村将来計画専門委員長)

委員の再任を妨げる規則を設ける提案について，他の学会の例，想定される質問に対して報告された。

・会則・役員選挙規定の改定(諸田総務専門委員長)

改選についてomlで意見を集う予定であることが報告された。

・質疑応答及び討論

適用時期は，次の選挙から適用可能なよう準備を進める。

・惑星探査専門委員会の設置とRFI改定作業について(千秋惑星探査専門委員長)

惑星探査専門委員会の設置が運営委員会で承認されたことが報告された。RFI回答文書とは，2014年にJAXAから発出された情報提供の依頼に対して，惑星科学会長の諮問委員会で作成した回答である。回答から3年近く経つ現在，現状に合う形で改定を行う予定であることが報告された。10/13(金)までにRFI改定作業チームに参加したい人は連絡する旨報告された。

・質疑応答及び討論

公募型小型の応募(1月末)について，公募書類にRFI文書を引用できるよう進める必要があるが間に合うかという質問に対して，RFI文書は12月末に改定作業チームで作成を行い，1月中旬にJAXAに提出する予定である旨報告された。

- ・採択

第14期上期活動報告の採択が行われ、賛成：218(うち出席者106)、反対：0、保留：0により採択された。

3.2. 第14期下期(2018年度)予算案

- ・説明(竹広財務専門委員長)

遊星人の印刷費の減額(180⇒150万円)、原稿起こし+カラーページの増額(15⇒30万円)の再査定を行い、トータル15万円の減額とした。一方EPS分担金増加の可能性(最大47.6万円)が発生しており、予算は例年通り20万円とし、残る28万円を予備費として計上した。提案予算としては約72万円の赤字となり、昨年度より13万円赤字が増加した。

これに対し「会費の維持」「賛助会員の増加」「EPS分担金増額に対する交渉」の努力を進めていく予定である。寄付金の案もあるが用途を明確にするなど議論を深める必要がある。

- ・質疑応答及び討論

「秋季講演会への予算が減額されているが問題はないか?」という質問に対して「秋季講演会に関しては秋季講演会の中で閉じた会計となっておりLOCの意向を反映している」と回答された。

- ・採択

第14期上期予算案の採択が行われ、賛成：217(うち出席者105)、反対：0、保留：1により採択された。

4. 報告事項

4.1. 自然災害に伴う会費免除措置について(竹広財務専門委員長)

自然災害で「災害救助法適用地域」に該当される方へ周知する旨を報告された。

4.2. 学会賞授賞式：2016年度最優秀研究者賞および2017年度最優秀発表賞(門野学会賞選考委員長)

9名の方々が午前中に口頭発表、午後にポスター発表が行われ、選考委員8名で慎重に審査した結果、最優秀発表賞に京都大学の野津翔太会員が選ばれた。また、最優秀研究者賞に国立天文台の秋山永治会員が受賞したことが報告された。

4.3. 2017年秋季講演会の報告(佐々木2017年秋季講演会組織委員長)

LOCの皆様への感謝と、第1回惑星科学会秋季講演会(1993年)が実は阪大で行われた驚愕の事実を報告された。講演会及び懇親会の参加人数、9/30(土)に開催される「月の科学の最前線」のアナウンスがなされた。

4.4. 2018年秋季講演会の案内(関口2018年秋季講演会組織委員長)

来年度の秋季講演会2018年10/16(水)から10/19(金)の間、旭川市科学館サイバルで実施予定である旨の報告がなされた。

4.5. 国際宇宙探査専門委員会の設置について(春山会員)

政策レベルで有人宇宙探査に関する対話が進められている。宇宙科学コミュニティとして科学情報の助言・提言、探査情報の共有を行うことの必要性についての報告がなされた。国際宇宙探査の実施する科学とそれを可能にする技術シナリオにコミュニティの意見を反映する必要がある。

4.6. その他

宇宙惑星科学セッションでの代議員選挙があるため、投票を促進する旨の報告がなされた。

5. 議長団解任

6. 閉会宣言

◇日本惑星科学会第123回運営委員会議事録

日時：2017年10月18日(水)～10月24日(火)

議題：RFI回答文書改訂作業部会委員と総務専門委員、情報化専門委員の新任の承認

運営委員会委員：

出席者 22名

荒川 政彦, 倉本 圭, 中本 泰史, 中村 昭子, 渡邊 誠一郎, 千秋 博紀, 和田 浩二, 田近 英一, 生駒 大洋,
諸田 智克, 林 祥介, 平田 成, はしもと じょーじ, 竹広 真一, 中島 健介, 寺田 直樹, 佐伯 和人,
中村 智樹, 上野 宗孝, 藪田 ひかる, 小久保 英一郎, 橋 省吾

欠席者 1名

田中 智

成立条件：期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす

議決方法：上記期間内にe-mailにより投票

議題1. RFI回答文書改訂作業部会の活動期間と委員の承認

作業部会の活動期間は2018年3月までとする。

●作業部会長

千秋博紀(千葉工業大学)

●主査 臼井寛裕(東工大 ELSI)

●作業部会メンバ：

山岸明彦(東京薬科大), 春山純一(ISAS/JAXA), 生駒大洋(東大), 倉本圭(北海道大学),
諸田智克(名古屋大), 古川善博(東北大), 藪田ひかる(広島大学), 伊藤元雄(JAMSTEC), 亀田真吾(立教大学),
藤田和央(JAXA), 小河正基(東大), 癸生川陽子(横浜国立大学), 笠原慧(東京大学), 吉岡和夫(東京大学),
吉田二美(千葉工大), 岡田達明(ISAS/JAXA), 岩田隆浩(ISAS/JAXA), 村上英記(高知大),
北里宏平(会津大学), 玄田英典(東工大 ELSI), 鎌田俊一(北海道大学), 渡邊誠一郎(名古屋大学),
大竹真紀子(ISAS/JAXA), 田中智(ISAS/JAXA), 佐伯和人(大阪大学), 寺田直樹(東北大),
関根康人(東京大学)

議題は承認された(可22, 否0)。

議題2. 総務専門委員の新任の承認

北里宏平(会津大学)

議題は承認された(可22, 否0)。

議題3. 情報化専門委員の新任の承認

北里宏平(会津大学)

議題は承認された(可22, 否0)。

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2017年12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）

有限会社テラパブ
Exelis VIS株式会社

編集後記

今号より、新連載「惑星ラボからこんにちは！」が始まりました。企画名のとおり、惑星科学の研究室を紹介していく企画です。インターネットが普及している現在、「惑星科学 研究室」で検索すれば多くの研究室が見つかります。ネット上なら誌面の制限がないので、内容も充実しています。ですが、あまりの情報量にどこから眺めてよいか分からない…。そういった思いを持たれている方のために、まったりと研究室の様子を紹介していければ、と考えています。「うちの研究室も紹介したい！」という方の投稿をお待ちしています。本企画が、日本の惑星科学業界の横断的交流を活性化させる一助となれば嬉しく思います。

さて、本号を以って私は編集幹事を退任します。初めて

編集を担当した2015年3月号から早3年。先輩たちが築き上げてきた編集システムに沿って作業をするだけの簡単な（だが地味に時間と精神力が削られる）お仕事でしたが、それまで何気なく目を通していた『遊星人』の制作過程に関わることができたのは良い経験でした。「遊星百景」「学位論文タイトル紹介」「惑星ラボからこんにちは！」などの企画の誕生にも立ち会うことができました。J-STAGEへの参加に伴う、過去記事データをひたすら右から左へ移行するという終わりの見えない作業に忙殺されたこともありました。今となっては良い思い出です。

後任は杉山耕一郎さんです。今後とも、『遊星人』をどうぞよろしく願います。 (三浦)

編集委員

和田 浩二 [編集長]

三浦 均 [編集幹事]

生駒 大洋, 上相 真之, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 白石 浩章, 杉山 耕一郎, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2017年12月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第26巻 第4号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社

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

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail : staff@wakusei.jp

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

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

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

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

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