

遊



日本惑星科学会誌

**Planetary
People 3**

September 2022 vol31 no

星

人

- 原始惑星が駆動するガス流
- はやぶさ2ミッションを振り返って
- New Face

日本惑星科学会誌「遊・星・人」投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

- ①学会誌に投稿できる記事内容は、
 - (a) 原著論文：惑星科学に関する研究のオリジナルな報告
 - (b) 解説論文：専門外の人にも分かりやすく解説した研究成果の総説や論説
 - (c) 解説記事：広く会員の関心をひく事柄についての解説
 - (d) 報告記事：学科、研究所、海外機関等の紹介、国内外の研究会の報告、New Face (博士号取得者の自己紹介)、インタビュー記事
 - (e) 情報記事：各種の情報記事
 - (f) エッセイ：上記の形式にとらわれず、惑星科学に関する話題を論じた文章など、広く会員の知的好奇心をみたすもの。
- ②投稿記事の長さについてはとくに制限をもうけない。ただし、標準的には上記 (a)～(c) については6～8ページ(1ページ2000字とし、タイトル、300字程度の概要、図表を含めたページ数)、(d) については4～6ページ、(e)、(f) は1ページとする。

2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認めた者。

3. 投稿原稿及びその送付

- ①原則として、投稿原稿はワープロなどにより電子的に作成されたものであること。
また、原稿のファイル形式については「学会誌原稿作成の手引」に従うこと。
- ②投稿に際しては、原稿を日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に送付すること。(連絡先は「学会誌原稿作成の手引」参照。) 送付方法は、E-mail による送付が望ましい。但し、プリントアウトした原稿2部の郵送による送付も可とする。なお郵送された原稿は原則として返却しない。
- ③編集委員会が原稿を受領すれば、その日を受領日として、受領した旨投稿者に通知される。

4. 査読及びその後の取扱い

- ①投稿原稿は編集専門委員長が受領した後、原著論文や解説論文または編集専門委員会が必要と認めた記事については査読者が選定され査読に付される。

- ②査読終了後、査読者の意見を参考に編集専門委員会が掲載の可否を決定する。その際編集専門委員会は投稿者に論文の修正を求めることができる。
- ③査読に付されない記事についても、編集専門委員会が掲載の可否を決定し、必要があれば投稿者に修正を求めることができる。
- ④掲載が決定すれば直ちにその旨投稿者に通知される。
- ⑤編集専門委員会の求める修正が完了した最終稿は、WORD、PDF、テキストファイル、いずれかのファイル形式にて、E-mail などにより編集幹事宛に送付すること。(図表については、「学会誌原稿作成の手引」参照)
- ⑥査読に付された掲載記事については、査読を経た旨記事内に記載される (vol.24, no.3から適用)。

5. 校正

校正は投稿者の責任において行う、また、校正は原則として誤植の訂正に限る。

6. 別刷り

論文の PDF ファイルを提供する。

7. 著作権

投稿された記事の著作権は、会誌に掲載された時点で、著者から日本惑星科学会に移転されるものとする。

8. 倫理規定

学会誌に掲載される全ての記事は、「遊星人の記事掲載にあたっての倫理規定」について原稿投稿時に念書を提出し編集専門委員会に了承されなければならない(念書は投稿原稿送り状に記載)。

9. 投稿料・出版費

原則として無料。

ただし、カラーページの印刷を希望する場合は、著者が印刷費を負担する。なお、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、カラーの図は白黒印刷される。電子版は費用負担無しでカラーの図を掲載する。

日本惑星科学会誌 遊・星・人
第31巻 第3号
目次

巻頭言 橋爪 光	187
<hr/>	
原始惑星が駆動するガス流: その3次元形態と性質について 桑原 歩	188
原始惑星が駆動するガス流: ペブル集積への影響 桑原 歩	203
<hr/>	
火の鳥「はやぶさ」未来編 その27 ～はやぶさ2ミッションを振り返って～ 佐伯 孝尚	220
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その51 ～多波長撮像で探る金星のメソスケール気象～ 今村 剛, 成田 穂, あかつきプロジェクトチーム	233
遊星人の海外研究記 その8 ～世界の中心で研究する～ 癸生川 陽子	236
<hr/>	
「第7回iSALE講習会」参加報告書 黒崎 健二	242
第14回月惑星探査データ解析実習会を終えて 出村 裕英, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同	247
New Face 荒川 創太	255
2022年度宇宙科学奨励賞公募のご案内 公益財団法人 宇宙科学振興会	258
遊星人2019年28巻3号における英文タイトルの訂正とお詫び 前編集長 和田 浩二	259
JSPS Information	260

Contents

Preface	K. Hashizume	187
<hr/>		
Gas flow induced by protoplanets: The three-dimensional morphology and the nature of the flow field	A. Kuwahara	188
Gas flow induced by protoplanets: Influences on pebble accretion	A. Kuwahara	203
<hr/>		
Phoenix “Hayabusa”: A tale of the future (27) - Looking back on the Hayabusa2 mission -	T. Saiki	220
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (51) - Mesoscale processes on Venus revealed by multi-wavelength imaging -	T. Imamura, M. Narita, Akatsuki Project Team	233
Letter from planetary people working abroad (8) - Working in the center of the world -	Y. Kebukawa	236
<hr/>		
A report on the 7th iSALE short course	K. Kurosaki	242
Report of 14th workshop for data analysis in lunar and planetary explorations H. Demura and Workshop Facilitators for Data-Analysis in Lunar and Planetary Explorations		247
New Face	S. Arakawa	255
Announcement of public offering for Space Science Incentive Award	Society for Promotion of Space Science	258
Correction and apology for the English title in Planetary People 2019, Vol.28, No.3	K. Wada	259
JSPS Information		260

巻頭言

まるで砂漠だ - 今から半世紀以上前、初めて月面に降り立った宇宙飛行士が、そして、地上に送られた映像を見た多くの人がそう思った。地球に持ち帰られた月試料から水の検出も試みられたが、それは、砂漠の砂をわざわざ海の底に持って行って水があるかどうかを調べるようなものだった。結局、強烈な第一印象と、すべて地球水で上書きされた分析結果を受け、月面はもちろん、月岩石も完全に無水だと長らく信じられてきた。

21世紀になり、リモートセンシング技術と試料分析技術の進歩のおかげで、この常識が覆されつつあるのは、惑星科学会の皆さんは既にご存じの通り。今、極域月面に降り立ち水を検出しようとする、日本主導の探査計画LUPEXの準備が急ピッチで進んでいる。

私ごとだが、私はこの計画に参画している。実は、宇宙探査計画に立ち上げから参画するのは初めてだ。長らく宇宙探査の恩恵に浴してきたにも関わらず、だ。私は分析屋。アポロ計画で持ち帰られた表土試料に打ち込まれた太陽風の同位体分析は、私のキャリアの中で大きな位置を占める。太陽風の同位体組成を求めようとするのだが、なぜか組成が月試料ごとにばらばら。太陽風の同位体組成が太陽の年齢と共に変化? という仮説も出されていたがその根拠は薄かった。結局、月面に降着する惑星物質に含まれる水・有機物を始めとした揮発性成分が様々な割合で太陽風と混合した可能性が高いことがわかった。

私は、これまで探査計画から逃げ回ってきた。私は孤独に研究するのが好きだ。常に大人数でやる探査はちょっと、という訳だ。でも、とうとう捕まってしまった。今回のミッションと縁浅からぬ課題に取り組んだのが運の尽き。まあ、いい。腹をくくって、月砂漠の水探しに励みたい。

橋爪 光 (茨城大学)

原始惑星が駆動するガス流： その3次元形態と性質について

桑原 歩^{1,2}

2022年3月22日受領, 査読を経て2022年5月2日受理

(概要) 原始惑星系円盤内に埋もれた成長途中の惑星は、自身の重力によって周囲のガスの流れを乱す。高解像度の3次元流体シミュレーションから、原始惑星周りに複雑な3次元ガス流れ場が存在していることが明らかになった。原始惑星が駆動するガス流れ場には、シア一流卓越形態と向かい風卓越形態の2つの形態が存在する。本稿では、筆者がこれまで行ってきた研究に基づき、原始惑星が駆動するガス流についての紹介を行う。特に、原始惑星周りのガス流が、惑星質量及び惑星が受ける円盤ガスからの向かい風にどのように依存するかを解説する。更に、原始惑星が駆動するガス流がペブル集積に及ぼす影響を調べ、惑星形成過程への示唆についても議論する。

1. 系外惑星分布： スーパーアース普遍性

今日に至るまで、数千を超す太陽系外惑星が発見されている。見つかった系外惑星の中で、とりわけ豊富に存在しているものが短周期スーパーアースである。短周期スーパーアースの半径及び質量は、ケプラー宇宙望遠鏡を用いたトランジット観測や視線速度観測によって制約されており、半径は地球の約1-4倍程度、質量は地球の約2-20倍程度と推定されている[1, 2]。太陽型星の約半数は短周期スーパーアースを保持していることがわかっており[1]、現状、これらの天体は宇宙で最も普遍的に存在する惑星である。

しかし、宇宙における短周期スーパーアースの普遍性は、従来の惑星形成理論の予測に反する。惑星は若い星周りに形成されるガスとダストからなる原始惑星系円盤(以下、円盤)内で形成される。1次元静的な円盤ガス捕獲モデルによると、円盤内で形成されたスーパーアース質量天体は円盤ガスが散逸する前に暴走的なガス捕獲を引き起こし、木星の

ような巨大ガス惑星へと成長すると考えられる[e.g., 3]。ところが、系外惑星分布における巨大ガス惑星の存在頻度は約1-10%程度であると推定されており[4, 5]、短周期スーパーアースの普遍性は惑星形成理論における大きな謎の一つとなっている。

短周期スーパーアースの形成過程を知る上で重要になるのは、これらの天体がいかにして暴走的なガス捕獲を免れたか、という点である。大まかに2つの形成仮説が存在する[6]。1つは、後期コア形成説と呼ばれるもので[7]、スーパーアースの形成は円盤ガスが散逸しきる直前に完了したとするモデルである。スーパーアース形成時点において周囲に円盤ガスがほとんど残っていなければ、暴走ガス捕獲を免れることができる。

一方、近年盛んに議論されているペブル集積モデル[8, 9]によると、スーパーアースが多数存在しているような中心星近傍の領域では、成長途中の原始惑星に多量のペブル(~mm-cmサイズの粒子¹)が集

¹ここでは、典型的な円盤モデルを仮定した際の大まかな換算サイズを記載した。惑星科学分野における「ペブル」は、粒径ではなくガスの流れに対する追従度合いによって定義される((25)式)。一方、堆積学の分野における「ペブル」とは、径が4-64mmのものとして定義されている。

1.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

2.東京工業大学 地球生命研究所(ELSI)
kuwahara.a.aa@m.titech.ac.jp

積することで惑星が急速に成長する可能性がある。そのため、後期コア形成説の実現可能性は惑星の成長率に強く依存する。

もう1つは大気リサイクリング説と呼ばれるものである[10]。これは、原始惑星系円盤ガスが豊富に残っているような円盤進化の早期段階を想定しており、円盤ガス中に埋没した原始惑星が自身の重力によって周囲のガスに影響を及ぼすことで生じる流体力学的機構に着目している。近年の高解像度等温3次元流体計算から、成長途中の原始惑星大気には、円盤ガスが恒常的に流入・流出していることが明らかになった[e.g., 10, 11]。このリサイクリング機構によって、惑星大気の冷却・収縮が抑制され、その後の暴走的な降着が妨げられる可能性がある。

ところが、輻射冷却を考慮した現実的な非等温流体シミュレーションから、リサイクリング流れとは孤立した大気が原始惑星周囲に形成されることが明らかになった[12]。非等温条件下では、等温モデルの推定よりもリサイクリング効率が低下し、惑星大気の冷却・収縮、及び暴走的なガス捕獲を抑制できない可能性が示唆された。したがって、スーパーアースの形成は円盤ガスが散逸する直前に完了する必要があることを意味する。

ここまでの流れを踏まえた上で、スーパーアース形成シナリオを再考する。なお、本稿では原始惑星系円盤ガス中に埋もれた原始惑星はペブル集積によって成長するという立場をとることとする。前述の2つのシナリオのそれぞれの課題をクリアするためには、何らかの機構によってペブル集積を抑制し、後期コア形成を達成する必要があると言える。この点について、我々は円盤ガスの流れがペブルの運動に及ぼす影響に着目する[13]。円盤ガス中に埋没した原始惑星はそれ自身の重力によって周囲のガスの流れを乱し、特徴的なガス流れ場を形成する[e.g., 10, 11]。ペブルは円盤ガスからのガス抵抗を強く受けながら運動するという性質を持つため、原始惑星によって駆動されるガスの流れがペブル集積に影響を及ぼす可能性がある。原始惑星が駆動するガス流によるペブル集積抑制説を検証するために、調査すべき課題として以下の2点が挙げられる: (1)原始惑星が駆動するガス流れ場の性質は、惑星質量や円盤パラメータにどのように依存するのか。(2)原始惑星が

駆動するガス流れ場がペブルの運動に及ぼす影響は、ペブルサイズに応じてどのように変化するのか。

本稿では、筆者らの近年の研究[13]に基づき、特に前者についての解説を行う。後者の点については、筆者らによる研究[14, 15]、または本号の解説記事[16]を参照されたい。以降、本稿を論文I、ガス流れ場がペブル集積に及ぼす影響を解説する記事を論文II [16]と呼ぶことにする。2節では、本稿で取り扱う座標系の導入を行うとともに、まずは惑星重力の影響を無視した場合における原始惑星系円盤ガスの流れを考える。実際は、円盤内に存在する惑星は周囲のガスに影響を及ぼす。3節では、惑星重力に対するガス円盤の応答についての定性的な振り返りを行う。(1)惑星質量が十分小さく、したがって惑星重力が周囲のガスの流れに及ぼす影響は依然として無視できる場合、(2)惑星が成長し、大気を獲得し始める段階、そして(3)惑星質量が十分大きく、惑星軌道付近からガスが取り除かれるようになる段階の3つに大別し簡単なまとめを行う。その後、本稿で特に着目する円盤ガス中に埋もれた小質量の惑星(原始惑星)が駆動するガス流の3次元構造について解説する(4.2小節)。そして、原始惑星が駆動するガス流の円盤パラメータ依存性(4.3小節)、惑星質量依存性(4.4小節)について解説し、最後に惑星形成への示唆及びスーパーアース普遍性への示唆を議論する(5節)。

2. 非摂動状態における原始惑星系円盤ガスの流れ

惑星によって駆動されるガス流についての詳細に踏み込む前に、円盤ガスへの惑星重力の影響は無視した状態(非摂動状態と呼ぶことにする)を考えると、ところから始めよう。図1に本稿で取り扱う座標系を示した。円軌道に固定された惑星を中心とする局所共回転座標系を考え、 x, y, z 軸は、それぞれ円盤動径方向、方位角方向(円盤回転方向)、鉛直方向を表す。

まず簡単のために、円盤ガスは中心星重力と遠心力が釣り合った状態、すなわちケプラー角速度 Ω_K で回転していると仮定する。ケプラー角速度は中心星からの距離の $-3/2$ 乗に比例するので、円盤の曲率が無視できるような惑星の近傍領域を考えると、

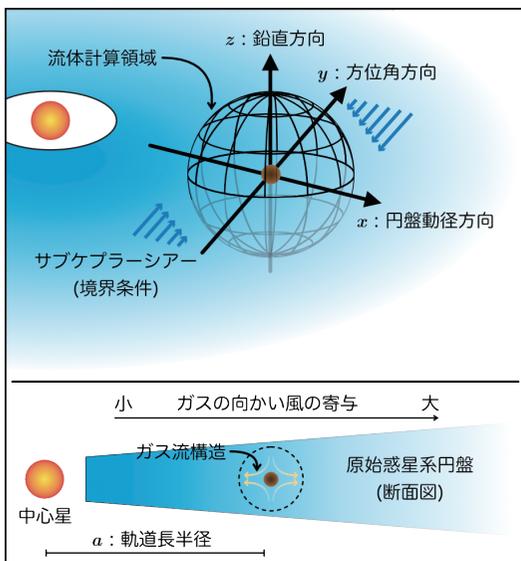


図1: 計算設定の概念図。円軌道に固定された惑星を中心とした局所共回転座標を考える。惑星周囲のガスの流れを詳細に解像するため、惑星に近づくほどグリッドが細くなるような球状の流体計算領域を採用する。外側境界条件としては、サブケプラーシアア流(ケプラーシアア流+ガスの向かい風)を与える。

ケプラー回転は線型速度シア(中心星周りの公転半径が異なることによって生じる速度差)で近似でき、 $-3/2\Omega_K x$ と表せる。実際には、円盤ガスの圧力勾配力が働くことにより、ガスはケプラー回転とは僅かに異なる速度で回転する。ケプラー回転からのずれを考慮した回転角速度は $\Omega = \Omega_K(1 - \tilde{\eta})$ と書ける。ここで、 $\tilde{\eta} = -1/2(c_s/v_K)^2 d \ln P / d \ln a$ であり、 $v_K = a\Omega_K$ はケプラー速度、 c_s は等温音速、 P は円盤ガスの圧力、 a は惑星の軌道長半径である。圧力分布が滑らかであるような典型的な円盤モデルでは通常 $dP/da < 0$ となり、ガスはケプラー回転よりも少し遅い速度で回転する(サブケプラー回転)。

惑星は円盤内をケプラー速度で回転しているので、 $dP/da < 0$ のとき惑星はガスからの向かい風を受けることになる。向かい風の速さは

$$v_{hw} = \tilde{\eta}v_K, \quad (1)$$

で与えられる。よって、惑星を中心とする共回転座標系から見ると、非摂動状態における円盤ガスの速度は

$$\mathbf{v}_{g,\infty} = \left(-\frac{3}{2}\Omega_K x - v_{hw} \right) \mathbf{e}_y, \quad (2)$$

で表される。 \mathbf{e}_y は円盤回転方向の単位ベクトルである。惑星とガスの軌道速度が一致する点を共回転半径と呼ぶ。共回転半径の x 座標は(2)式において $\mathbf{v}_{g,\infty} = 0$ とすることによって得られ、 $x_{g,\text{cor}} = -2v_{hw}/(3\Omega_K)$ である。

3. 惑星が原始惑星系円盤ガスに及ぼす影響

原始惑星系円盤内に存在する惑星は、周囲のガスに影響を及ぼす。本節では、惑星重力に対するガス円盤の応答について、(1) 惑星周囲のガスの流れに対する惑星重力の影響が依然として無視できるほど惑星質量が小さいとき、(2) 惑星が成長し大気を保持できるようになったとき、そして(3) 惑星質量が十分大きくなり、周囲のガスを押しよけるようになるときの3つに大別し簡単なまとめを行う。ここで重要となる長さスケールとして、惑星重力圏の大きさと円盤の典型的な厚みであるガススケールハイトがある。

惑星重力圏の大きさは、大気が束縛される領域の目安として考えることができる。本稿では、惑星重力圏の大きさをボンディ半径またはヒル半径で定義する。ボンディ半径とは、惑星表面からの脱出速度がガスの熱運動速度(音速)になる半径で、

$$R_{\text{Bondi}} = \frac{GM_{\text{pl}}}{c_s^2}, \quad (3)$$

と表される。 G は万有引力定数、 M_{pl} は惑星質量である。ヒル半径は、中心星-惑星-粒子の3体運動を考えた際、中心星重力よりも惑星-粒子間に働く重力の方が支配的になる領域の半径で、

$$R_{\text{Hill}} = a \left(\frac{M_{\text{pl}}}{3M_*} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

と表される。 M_* は中心星質量である。以降、惑星重力圏の半径を $R_{\text{grav}} = \min(R_{\text{Bondi}}, R_{\text{Hill}})$ で表すこととする。図2に惑星の物理半径、ボンディ半径、及びヒル半径をそれぞれプロットした。

ガススケールハイトは、円盤ガスの密度が中心面

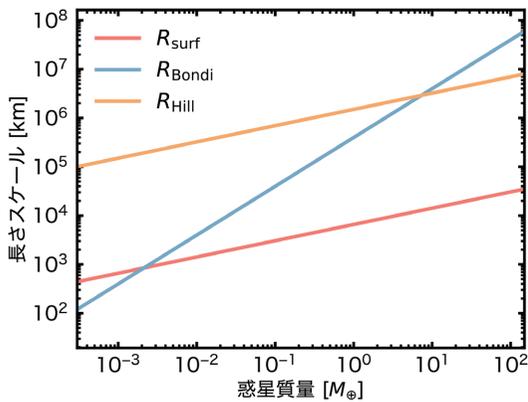


図2: 1 au における惑星の物理半径 R_{surf} , ボンディ半径, ヒル半径. 惑星の内部密度を 5 g/cm^3 , 音速を $c_s = 10^5 \text{ cm/s}$ とし, 太陽質量の中心星を仮定した. 横軸は地球質量で規格化.

の $1/e$ になる高さを表し,

$$H = \frac{c_s}{\Omega_K} \simeq 0.03 \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^{5/4} \text{ au},$$

$$\simeq 4.5 \times 10^6 \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^{5/4} \text{ km}, \quad (5)$$

と表される. なお, 円盤の温度構造が

$T = 270(a/1 \text{ au})^{-1/2} \text{ K}$ で与えられる円盤モデル[e.g., 17] を仮定し, $c_s = 10^5 \text{ cm/s} (a/1 \text{ au})^{-1/4}$ とした. また, 太陽質量の中心星を仮定した.

惑星重力圏の大きさ及び円盤ガススケールハイトの大小関係を元に, 惑星が円盤ガスに及ぼす影響について簡単に振り返る. 2節において, 非摂動状態における原始惑星系円盤ガスの流れを導入した. 円盤ガスへの惑星重力の影響は, ガスの熱運動速度が惑星表面からの脱出速度よりも大きければ無視できる. これは, ボンディ半径が惑星の物理半径よりも小さい状況に相当する ($\lesssim 10^3 \text{ km}$ サイズ, または $\lesssim 10^{-3} - 10^{-2} M_{\oplus}$ の天体; 図2).

惑星が成長し, 惑星重力圏の大きさが物理半径を上回るようになると, 惑星の周りには重力によって引きつけられた円盤ガスによる大気(1次大気)が形成される ($\gtrsim 10^{-3} - 10^{-2} M_{\oplus}$; 図2). なお本稿では, 惑星重力圏の大きさが円盤の典型的な厚みであるガススケールハイト H よりも小さいとき, 惑星は円盤内に「埋没」していると呼び, そのような関係を満たす質量範囲に特に着目する. 4節以降は

$R_{\text{surf}} < R_{\text{grav}} < H$ なる小質量惑星(成長途中の原始惑星)を取り扱う ($M_{\text{pl}} \sim 10^{-3} - 10^1 M_{\oplus}$; 図2).²

惑星が円盤ガス中に埋没しているとき, 円盤ガスと惑星の間の重力的な相互作用の結果, 惑星のごく近傍のガスは惑星に引き付けられる. 一方, 惑星から離れた場所には密度波が励起され[e.g., 18], その反作用によって惑星は円盤内を動径方向に移動することが知られている. 惑星が励起する密度波が伝搬する領域 ($> R_{\text{grav}}$) を解像した流体シミュレーションも行われており[e.g., 19], 円盤ガス中に埋没した惑星の重力圏スケールよりも外側の領域のガスの流れはよく調べられてきている. そして近年, 原始惑星が纏う大気スケール ($\lesssim R_{\text{grav}}$) を細かく解像できるような高解像度の3次元流体シミュレーションが行われてきている[e.g., 10, 11]. それにより, 円盤内に埋没した原始惑星の近傍には複雑な3次元ガス流れ場が存在していることが明らかになった. これは, 1節で簡単に触れたように, 原始惑星へのペブル集積過程に影響を及ぼす可能性がある. しかし, 原始惑星周りの3次元ガス流れ場が見出された当初は, ガス流れ場の性質が惑星質量や円盤パラメータにどのように依存するかという点や, ペブル集積過程への影響については詳細に調べられていなかった(4節以降で議論する).

惑星重力圏の大きさが円盤ガススケールハイトよりも大きくなると, 重力トルクによって円盤ガスが惑星軌道周辺から取り除かれ, ガス面密度が低下した領域(ガスギャップ)が形成される[20]. また, 原始惑星系円盤から周惑星円盤への3次元的なガス降着流が生じることが3次元数値流体シミュレーションから明らかになっている[21]. 円盤ガスにギャップを開けるような巨大惑星周りのガス流れ場については, 谷川氏らによる解説記事を参照されたい[22].

次節以降は, 筆者らの近年の研究成果を踏まえ, 円盤ガス中に埋没した惑星 ($R_{\text{surf}} < R_{\text{Bondi}} < H$) の重力によって摂動を受け, その構造が複雑に変化したガスの流れ場についての解説を行う. そして, 原

²5 節で議論するペブル集積過程もまた同様にある程度成長した惑星 ($\gtrsim 10^{-4} M_{\oplus}$) を想定している. そのため, 円盤ガス中に埋没した惑星が駆動するガス流れ場とペブル集積過程を同時に考えることが極めて重要になる. 詳細については論文 II [16] を参照されたい.

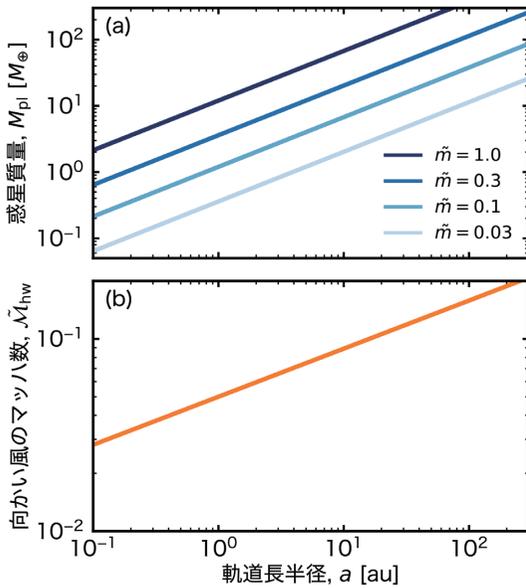


図3: 惑星質量((10)式)と向かい風のマッハ数((11)式)の軌道長半径依存性.

始惑星が駆動するガス流が惑星形成に及ぼす影響を議論する.

4. 原始惑星が駆動するガス流

近年の高解像度3次元流体計算から, 円盤内に埋没した成長途中の惑星周りには複雑な3次元ガス流れ場が形成されることが明らかになった[e.g., 10, 11]. このガス流れ場は, 原始惑星へのペブル集積過程に影響を及ぼす可能性がある. しかし, 原始惑星周りのガス流れ場の性質が惑星質量や円盤パラメータにどのように依存するかという点や, ペブル集積過程への影響についてはこれまで詳細に調べられていなかった. 本節では, 3次元流体計算によって得られた惑星周りのガス流れ場の性質について紹介する.

4.1 無次元単位系の導入

以降の議論のため, 無次元量を定義する. 本稿では長さ・時間・速度をそれぞれ円盤の典型的な厚みであるガススケールハイト H , 惑星位置におけるケプラー角速度の逆数 Ω_K^{-1} (ケプラー時間), 等温音速 c_s で規格化した無次元単位系を導入する. 本稿では, 無次元量には全てチルダ記号を付けて表記する. こ

の単位系において, 無次元化した惑星質量

$$\tilde{m} = \frac{R_{\text{Bondi}}}{H}, \quad (6)$$

を定義する. 惑星は円盤内をケプラー回転するので, 円盤ガスからの向かい風を受ける((1)式). よって, 向かい風のマッハ数

$$\tilde{M}_{\text{hw}} = \frac{v_{\text{hw}}}{c_s} \propto \frac{c_s}{v_K}, \quad (7)$$

を定義できる. 図3に無次元量と実次元量の対応を示した.

また, その他に無次元化したヒル半径

$$\tilde{R}_{\text{Hill}} = \left(\frac{\tilde{m}}{3}\right)^{1/3}, \quad (8)$$

無次元化したガスの共回転半径の x 座標

$$\tilde{x}_{\text{g,cor}} = -\frac{2}{3}\tilde{M}_{\text{hw}}, \quad (9)$$

をそれぞれ定義できる.

本稿では, 太陽質量の中心星を仮定し, 円盤の温度構造が $T = 270(a/1 \text{ au})^{-1/2} \text{ K}$ で与えられる円盤モデルを仮定する[e.g., 17]. このとき, $c_s \propto T^{1/2} \propto a^{-1/4}$ より

$$M_{\text{pl}} \simeq 12\tilde{m} \left(\frac{a}{1 \text{ au}}\right)^{3/4} M_{\oplus}, \quad (10)$$

及び

$$\tilde{M}_{\text{hw}} \simeq 0.05 \left(\frac{a}{1 \text{ au}}\right)^{1/4}, \quad (11)$$

と表される[12](図3).

本稿では円盤ガス中に埋没した小質量の惑星に着目する. したがって, 主に $\tilde{m} \lesssim 1$ ($R_{\text{Bondi}} \lesssim H$) なる惑星を取り扱う. また, 原始惑星系円盤の典型的な半径は $\sim 100 \text{ au}$ であるとし, (11)式より $\tilde{M}_{\text{hw}} \lesssim 0.1$ の場合のみを考える.

4.2 流れ場の構造

ここでは, 惑星重力圏スケールを細かく解像したグリッドを用い, 輻射冷却を考慮した現実的な3次元非等温流体計算から得られた結果[12, 14, 15]を元に解説を行う. ガス是非粘性・圧縮性の理想気体であるとし, 円軌道に固定された惑星を中心とする局所共回転座標系から見た流れ場を考える(図1).

シアー流卓越形態の流れ場

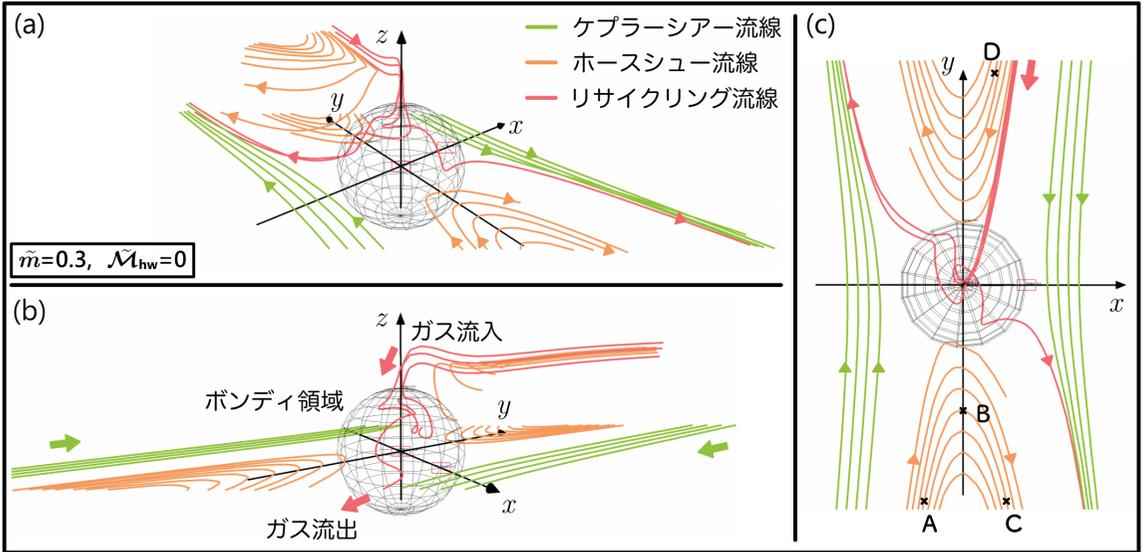


図4: 惑星が駆動するガス流(シアー流卓越形態)の3次元構造. 無次元化惑星質量及びマッハ数は $\dot{m} = 0.3$, $\dot{M}_{hw} = 0$ の場合. 色付きの実線はそれぞれ特徴的な流線を表す. みやすさのため, 主に円盤中心面を流れるガスの流線をプロットした. 孤立エンベロープの流線はプロットしていない. ガスは図中に示した矢印の方向にむかってながれる. 軸のスケールは省略したが, 図中のボンディ領域の半径は $0.3 [H]$ である. 図中のA, B, C, D 点はそれぞれホースシュー流線上の特徴的な点に対応する (本文参照). $\dot{M}_{hw} = 0$ ゆえ, ガスの共回転半径は図のy軸と一致する. 流体計算データはKuwahara & Kurokawa [14] で得られたものを使用.

惑星近傍の流れ場は, 後述するリサイクリング流線の構造に応じて, 「シアー流卓越形態」と「向かい風卓越形態」の2つに分類される(図4及び5). まずは, それぞれの形態に共通する特徴から見ていこう.

(a) 孤立エンベロープ³

惑星の周囲には, 孤立したエンベロープ(大気)が形成される. これは, 惑星近傍のガスと円盤ガスとの間のエントロピー勾配に由来する浮力障壁によってエンベロープ深部へのガス流入(後述するリサイクリング流れ)が妨げられ, 惑星近傍のガスが周囲のガスの流れから孤立するためである[12].

惑星周囲のガスの圧力構造は惑星重力との静水圧平衡によって決まる. 輻射冷却によって温度構造

は均され, 背景場の温度に近づいていく. その結果惑星周囲のエントロピーは低下する. 惑星重力圏内に流入するガスを構成する流体素片を考える. シミュレーション結果の解析から, 惑星重力圏に流れ込むガスは亜音速の流れであることが分かっている. そのため, 流入する流体素片の圧力は背景場のガスの圧力と変わらない. 一方, 惑星に近づくほど流体素片の温度は増加するので(断熱圧縮), 流体素片の密度は低下する. それによって生じた浮力障壁によって, 惑星重力圏深部へのさらなるガス流入が抑制され, 孤立エンベロープが形成される. 孤立エンベロープの大きさは, 大気サイズは惑星重力圏の大きさと等しいという仮定をおいていた従来の1次元モデル[e.g., 23]とは異なり, $\sim 0.3\text{--}0.5R_{\text{grav}}$ 程度の大きさになる[12, 24, 25].

(b) ケプラーシアー流線

惑星軌道の内外に存在する(図4及び図5の緑線). 惑星とともに回る局所座標系から見たとき, 原始惑

³惑星が孤立大気を獲得するかどうかは温度についての条件によって異なる. 等温条件下では, 孤立した静的な大気は形成されず, 後述するリサイクリング流によって常に惑星重力圏内のガスが入れ替わり続けるという描像が得られている[10]. 等温流れ場の解析結果については, 4.4小節で紹介する.

星系円盤ガスのケプラー回転を線形速度シアで近似できることは2節で述べた通りである。惑星に近い場所では重力の影響を受けてやや歪んだ形状をしているが、いずれも惑星に降着することなく通り過ぎていくガスの流れを表している。

(c) ホースシュー流線

惑星の軌道運動の方向(円盤の方位角方向)に存在する(図4及び図5の黄色線)。円盤一周に渡って一続きの構造を持っており、馬の蹄のような形状をしていることからホースシュー流線と呼ばれる。

例として、惑星軌道の内側かつ軌道運動方向の後方の点Aからスタートした流体素片の運動を追跡してみよう(図4)。A点を出発したガスは惑星軌道よりも内側に存在するため、惑星よりも大きな軌道速度を持ち、惑星を追い越そうとする。惑星重力によってその場を流れているガスに正のトルクがかかり、ガスを構成する流体素片の軌道角運動量が増加する。このため、流体素片の軌道長半径は増加し、軌道速度は減少する。

やがてガスの軌道速度と惑星の軌道速度が一致する位置(B点: 共回転半径, (9)式)を超えると、ガスの軌道速度は惑星の軌道速度よりも遅くなり、惑星から見るとガスはUターンカーブを描きながら遠ざかっていくように見える(C点)。A→B→Cを辿るような流体素片の運動を、本稿ではホースシューターンと呼ぶことにする。

共回転半径の外側を流れるガスは、1会合周期を経て今度は惑星の前方から近づいてくることになる(D点)。以下、同様の過程を繰り返す。

ホースシュー流線は、ほぼ一定の幅を保ったまま鉛直方向に連なった柱状の構造をしている。図4a及び4bに鉛直構造の一部を示した。これは、テイラー・ブラウドマンの定理によって部分的に理解される[11, 24]。惑星とともに回る共回転座標系において(図1)、ガスの運動方程式(オイラー方程式)は

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \nabla \Phi_{\text{grav}} - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}) - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}, \quad (12)$$

と書ける。 \mathbf{u} , ρ はそれぞれガスの速度及び密度、 Φ_{grav} は重力ポテンシャル、 $\boldsymbol{\Omega} = (0, 0, \Omega_K)$ は系の

回転角速度ベクトル、 \mathbf{R} は位置ベクトルである。右辺第3項は遠心力、第4項はコリオリ力を表す。

ここでは、以下の手順に従い(12)式右辺第4項(コリオリ力項)が左辺第2項(移流項)よりも支配的であるとみなして移流項は無視しよう。典型的な速度、長さのスケールをそれぞれ V, L とすれば、移流項とコリオリ力項の比は $R_o = V/\Omega_K L$ と書ける⁴。

まず、ホースシュー領域を運動するガスの典型的な速度を見積もる。ホースシュー領域の幅は惑星質量に依存し、係数などを無視すれば $\sim \sqrt{m}$ と表されることが先行研究の3次元流体計算結果から明らかになっている[26]。したがって、本稿で着目する惑星質量範囲($m \lesssim 1$)では、ホースシュー領域の幅は $\lesssim 1[H]$ となる。(2)式で $x \sim H$ とすることにより、ホースシュー領域を運動するガスの典型的な速度は $V \sim c_s$ 程度と見積もれる。ホースシュー領域は円盤一周に渡る大規模な構造を持っているので、典型的な長さスケールは円盤の直径としよう。以上より $R_o \sim c_s/(\Omega_K \times 2\pi a) \sim H/a \ll 1$ (\because (5)式)となつて、コリオリ力が支配的であることが分かる。

次に、惑星重力によるガス密度への摂動が無視できる、すなわちガスの非圧縮性を仮定する⁵。非圧縮近似は、惑星重力圏外における亜音速の流れを考える場合は良い近似として用いることが出来る。更に定常を仮定すると、(12)式は

$$-\nabla \left(\frac{P}{\rho} + \Phi_{\text{grav}} - \frac{1}{2} |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}|^2 \right) - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} = 0, \quad (13)$$

と書き直すことができる⁶。上式の両辺の回転を取ることで

$$\nabla \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}) = (\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{u} = 0, \quad (14)$$

が得られる⁷。(14)式は、速度 \mathbf{u} が $\boldsymbol{\Omega}$ の方向には変化しないことを意味している。今、 $\boldsymbol{\Omega}$ は鉛直成分しか

⁴ R_o はロスビー数と呼ばれる無次元量である。

⁵このとき、 $\nabla P/\rho = \nabla(P/\rho)$ となる。

⁶遠心力項について $-\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}) = 1/2 \nabla |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}|^2$ を用いた。

⁷ベクトル解析の公式

$\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = -(\mathbf{A} \cdot \nabla) \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{A} + \mathbf{A}(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{A})$ を用い、更に非圧縮性、及び $\boldsymbol{\Omega}$ が一定であることを用いた。

向かい風卓越形態の流れ場

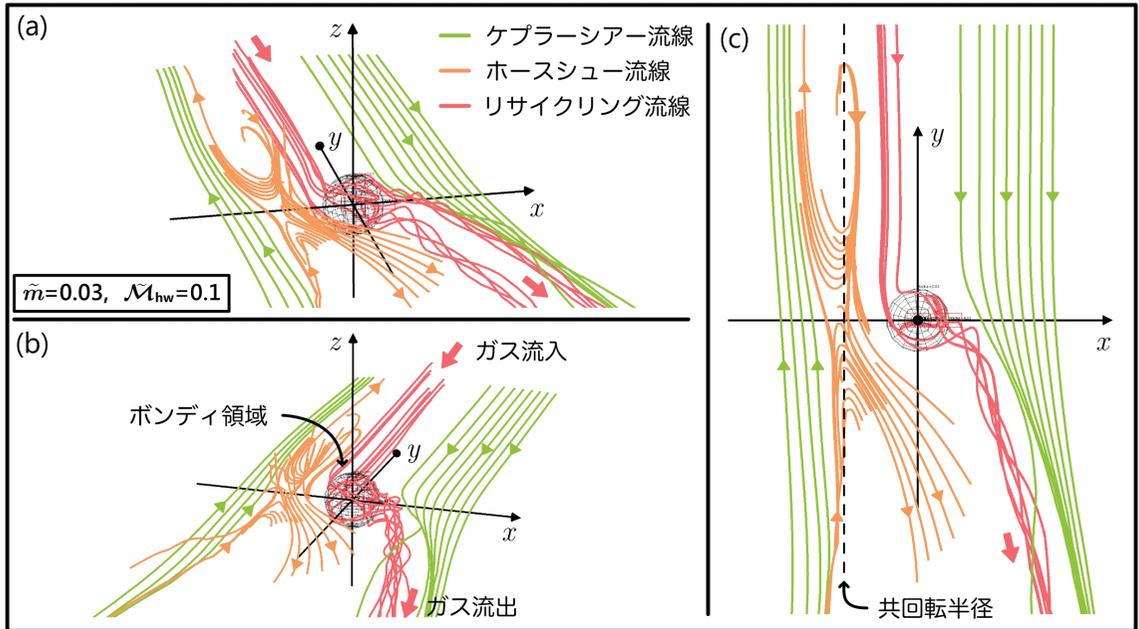


図5: 図4と同様. ただし向かい風卓越形態の流れ場の3次元構造を表す. みやすさのため, 主に円盤中心面を流れるガスの流線をプロットした. 孤立エンベロープの流線はプロットしていない. 無次元化惑星質量及びマッハ数は $\dot{m} = 0.03$, $\dot{M}_{hw} = 0.1$ の場合. 図中のボンディ領域の半径は $0.03 [H]$ である. パネルcに示した破線はガスの共回転半径の位置を表す. 流体計算データはKuwahara & Kurokawa [15] で得られたものを使用.

持たないので, ホースシュー流線に沿ったガスの運動を考えたとき, 惑星重力による密度への摂動が無視できるような領域では, 鉛直方向の速度変動が生じないという結果が導かれる. 故にホースシュー流線は高さによらず共通の構造を持つ. しかし, 惑星重力の影響が無視できなくなるような惑星重力圏の近傍領域では密度一定という仮定が破綻し, ホースシュー流線に沿ったガスの流れには鉛直方向の変動が生じることが知られている[11, 24].

次に, 「シアー流卓越形態」及び「向かい風卓越形態」を特徴づけるリサイクリング流線を見る.

(d) リサイクリング流線

惑星周りを流れるガスの一部は, 惑星重力圏に流入した後, 孤立エンベロープ(4.2小節(a))の表面をなぞるようにして流出する. 本稿では, これをリサイクリング流と呼ぶことにする⁸(図4及び図5の赤線). リサイクリング流線の構造は, 円盤ガスの圧力勾配

に由来する向かい風の寄与の大きさに応じて変化する[10, 12]. 本稿では, リサイクリング流線の構造に応じて, 流れ場をシアー流卓越形態(図4) または向かい風卓越形態(図5) にそれぞれ分類する.

流れ場の形態変化についての詳細は後述するが(4.3小節), 事前に定性的な説明を与えておく. 本稿で仮定した円盤モデルでは, 向かい風の寄与は軌道長半径の増加に伴って大きくなる((11)式)⁹. したがって, 向かい風が弱い円盤内側領域では流れ場はシアー流卓越形態に分類されやすく, 向かい風が強

⁸4.2小節(a)で述べた通り, 非等温条件下ではリサイクリングしない孤立エンベロープ(大気)が形成される. そのため, リサイクリング流という名称には違和感を覚えるかもしれない. 本稿では, 等温を仮定(孤立エンベロープが形成されない)して行われた先行研究[10, 13]においてリサイクリングという言葉が用いられていたという経緯に基づき, 惑星重力圏に流入・流出するガスの流線をリサイクリング流線と呼ぶことにする.

⁹より一般的には, 円盤の温度分布が $T \propto r^{-q}$ と表せるとき, $q < 1$ となる円盤モデルであれば同様のことが言える.

い円盤外側領域では流れ場は向かい風卓越形態に分類されやすい。

まずはシア一流卓越形態の流れ場におけるリサイクリング流線を見ていく(図4)。重力圏高緯度からのガス流入、及び円盤中心面からのガス流出が生じている。このとき、リサイクリング流線の大本は円盤中心面よりも高高度を流れるホースシュー流線につながっている[11]。

ホースシュー領域の高高度を流れるガスを考える。密度一定の定常状態であれば、ガスは高度を保ったままホースシューターンを経験するのみだが(4.2小節(c))、実際には惑星重力による密度ゆらぎの影響を受け、ホースシューターンの途中で急激に高度が低下し、惑星重力圏の高緯度領域から流れ込む。このとき、ガスがもともと持っていたポテンシャルエネルギーが運動エネルギーに変換され、ガスはラグランジュ点L1, L2¹⁰付近から円盤中心面を通して惑星重力圏外へと流出する。

次に、向かい風卓越形態の流れ場におけるリサイクリング流線に着目する(図5)。シア一流卓越形態の流れ場とは異なり、円盤中心面からのガス流入、及び惑星重力圏の中～高緯度領域からのガス流出が生じている。

4.2小節(b)で述べたように、ホースシュー領域にあるガスは共回転半径の内外において惑星に対する相対運動の向きを変える。すなわち、ホースシューターンの頂点の位置は共回転半径と一致する(9式)。惑星に対する向かい風の影響が強く、共回転半径が惑星軌道から十分離れたところにある場合、孤立エンベロープは向かい風に直に晒されることになる(後述; 4.3小節)。また、ホースシュー流線が惑星軌道から遠ざかることで、シア一流卓越形態において実現していた重力圏高緯度からのガス流入が生じなくなる。そのため、向かい風卓越形態においては支配的なガス流入は向かい風が担い、円盤中心面付近で流入フラックスが最大となる。更に、惑星付近にやってきた向かい風はコリオリ力によって運動方向を曲げられ、惑星近傍で旋回するようにして惑星軌道の外側へと流れていく。このとき、惑星付近でガ

スが圧縮され、これを減圧するために円盤中心面よりも上空、惑星重力圏の中～高緯度からの流出が実現する。

4.3 流れ場の遷移質量

ここでは、前小節において定性的な説明に留めていた流れ場の形態変化に関して、筆者らの研究[15]に基づき定量的な見積もりを与える。向かい風のマッハ数の増加に伴い、ガスの共回転半径の x 座標、ひいてはホースシュー領域が中心星側に移動していく。共回転半径が惑星軌道から十分に離れた位置まで移動し、孤立エンベロープ(惑星大気)が完全に向かい風に晒されるような状況になったとき、流れ場は向かい風卓越形態に遷移するとみなす[15]。

惑星軌道から見てホースシュー領域が惑星大気に重ならなくなるのは

$$\tilde{x}_{g,\text{cor}} + \tilde{w}_{\text{HS}} = -0.5\tilde{R}_{\text{grav}}, \quad (15)$$

のときである。 \tilde{w}_{HS} はホースシュー領域の幅であり、数値計算結果から $\tilde{w}_{\text{HS}} \sim 2\tilde{R}_{\text{Bondi}}$ と見積もられる¹¹。上式の右辺は孤立エンベロープの大きさに対応し、シミュレーション結果から $0.5\tilde{R}_{\text{grav}}$ であるとした[12]。なお、4節の冒頭で述べたが、本稿では $\tilde{M}_{\text{hw}} \lesssim 0.1$ の範囲のみを考えている。このとき、共回転半径の x 座標は $\tilde{x}_{g,\text{cor}} \gtrsim -0.1[H]$ となるので、流れ場の遷移は $\tilde{m} \lesssim 0.1$ の場合のみ生じると考えて差し支えない。このとき、常に $\tilde{R}_{\text{Bondi}} < \tilde{R}_{\text{Hill}}$ であるから、(15)式において $\tilde{R}_{\text{grav}} = \tilde{R}_{\text{Bondi}} = \tilde{m}$ とすることにより、流れ場遷移質量

$$\tilde{m}_{\text{t,flow}} = \frac{4}{15}\tilde{M}_{\text{hw}}, \quad (16)$$

が得られる[15]。

$\tilde{m} \leq \tilde{m}_{\text{t,flow}}$ のとき、流れ場は向かい風卓越形態に分類される。(16)式は局所流体シミュレーションの結果をよく説明できることがわかった[15]。今、 \tilde{M}_{hw} は軌道長半径の増加に伴って増加する状況を考えているので、無次元化惑星質量 \tilde{m} を固定した場合、

¹⁰円制限三体問題における直線平衡解。中心星と惑星を結ぶ線上に存在し、L1は惑星軌道内側、L2は惑星軌道外側に位置する。

¹¹ $\tilde{m} \lesssim 0.1$ のとき、本研究の局所流体計算から得られたホースシュー領域の幅は、円盤の方位角方向1周を考慮した先行研究[e.g., 26]のグローバル流体計算に基づく見積もりよりもファクターで2倍程度小さくなることがわかった。そのため、後述する流れ場遷移質量(16式)は上限を与えている可能性がある。

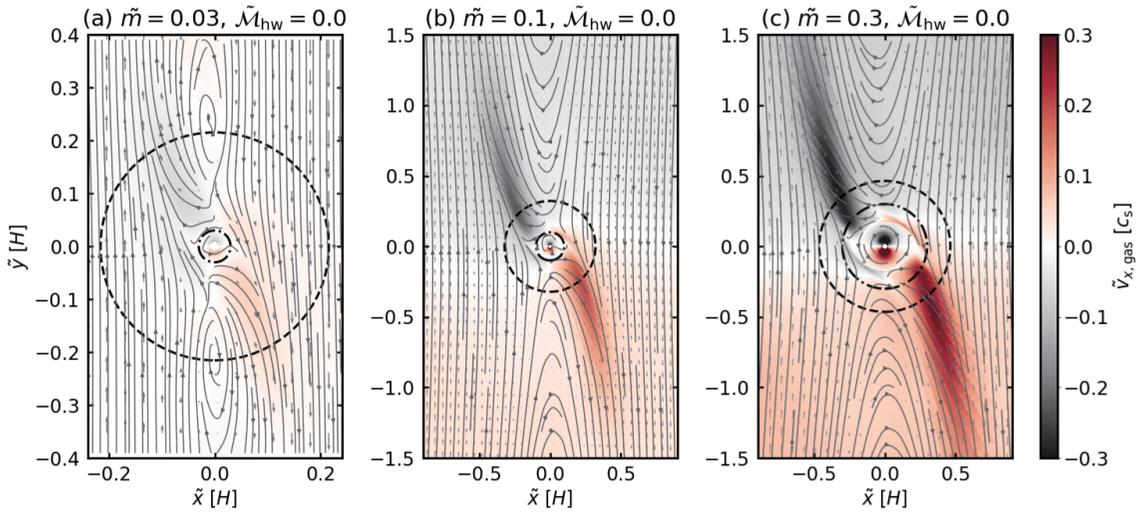


図6: 円盤中心面における x 方向のガスの速度. 周囲の流れに比べて色が際立っている部分が惑星重力圏からのガス流出を表す. ガスの向かい風の影響は無視し, 無次元化惑星質量のみを変化させた. 実線はガスの流線を表す. 点破線はボンディ半径を表し, 破線はヒル半径を表す. このときの流れ場はすべてシア一流卓越形態に分類される. 流体計算データはKuwahara & Kurokawa [14] で得られたものを使用.

円盤外側ほど向かい風卓越形態になりやすいことがわかる. (10)式と同様に, 最小質量円盤を仮定して次元付きの惑星質量に換算すると,

$$M_{t,\text{flow}} = 0.16 \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right) M_{\oplus}, \quad (17)$$

と書ける.

4.4 ガス流出速度の惑星質量依存性

本小節では, 筆者らが行った研究[13]を元に, 惑星重力圏からのガス流出速度の惑星質量依存性について解説する. 以降, 簡単のため等温を仮定¹², またガスの向かい風の影響は無視する($\tilde{M}_{\text{hw}} = 0$). すなわち, シア一流卓越形態における流れ場のみに着目する(図4).

図6に, 円盤中心面における x 方向(円盤動径方向)のガスの速度を示した. ガスの向かい風の影響は無視しているので, 流れ場は全てシア一流卓越形態に分類され, その3次元構造は惑星質量によらず

共通している. 一方, 惑星重力圏からのガス流出速度は, 惑星質量の増加に伴って増加している様子が見て取れる.

このことを理解するために, 筆者らはガス流出速度の解析的な見積もりを行った. ガス流出速度は, ベルヌーイの定理を用いて定量的に見積もることができる. 今, 惑星が駆動する流れ場は定常状態に達しているとみなすと, 流線に沿って以下のベルヌーイ関数が保存する:

$$B = \frac{u^2}{2} + c_s^2 \ln \rho_g(z) + \Phi_{\text{eff}}. \quad (18)$$

ここで, u はガスの速度である. $\rho_g(z)$ はガスの質量密度で,

$$\rho_g(z) = \rho_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right], \quad (19)$$

である. ρ_0 は円盤中心面における値を表す. Φ_{eff} は有効ポテンシャルを表し,

$$\Phi_{\text{eff}} = -\frac{\Omega_K^2}{2} (3(x^2 + a^2) - z^2) - \frac{GM_{\text{pl}}}{R}, \quad (20)$$

である. 第一項は潮汐ポテンシャル, 第二項は惑星の重力ポテンシャルを表す. R は座標中心にある惑星からの距離を表し, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ である.

¹²4.2節(a)の脚注2において触れたが, 等温・非等温計算の違いは孤立エンベロープの存在の有無にある. ガスの流入・流出を考える上で重要になるのはリサイクリング流線なので, 孤立エンベロープの有無は後述するベルヌーイ関数を用いた解析手法に大きく影響しないと考えられる.

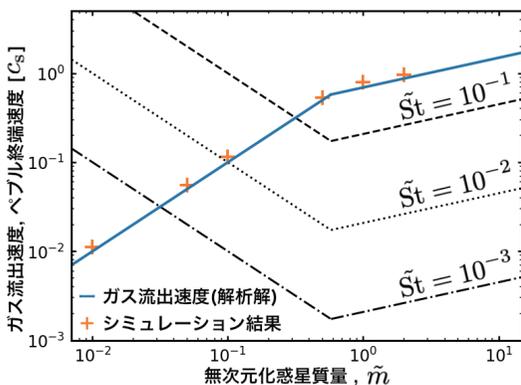


図7: シアー流卓越形態におけるガス流出速度とペブルの終端速度の比較. 実線: ガス流出速度の解析解((22), (23)式). クロスシンボル: 等温流体シミュレーションから得られた円盤中心面におけるガス流出速度の最大値. 破線, 点線, 点破線: 異なるストークス数に対するペブルの終端速度((27), (28)式). Kuwahara et al.[13] を元に改変して掲載.

惑星重力圏の極から流入し, 円盤中心面から流出するリサイクリング流線を考える. このリサイクリング流線上に2点 P_1, P_2 を取り, $P_1 = (0, 0, z_1)$, $P_2 = (x_2, y_2, 0)$ とする. P_1 はガスの流入点であり, P_2 は流出点である. P_1, P_2 におけるガスの速度を u_{in}, u_{out} とすると, 各点におけるベルヌーイ関数より,

$$|u_{out}| = \left\{ |u_{in}|^2 + 2c_s^2 \ln \frac{\rho_g(z_1)}{\rho_g(0)} + 3x_2^2 \Omega_K^2 + z_1^2 \Omega_K^2 + 2GM_{pl} \left(\frac{1}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} - \frac{1}{z_1} \right) \right\}^{1/2}, \quad (21)$$

が得られる. このうち, 等温流体シミュレーション結果の解析に基づき, P_1 におけるガスの運動エネルギーは無視できることが分かったので, $|u_{in}|^2 \ll c_s^2$ として(21)式の右辺第一項は無視する. 右辺第二項と第四項は $\ln \rho_g$ と恒星重力ポテンシャルとの釣り合い(静水圧平衡)によって打ち消し合う. 更に, 質量フラックスの解析から, ガスはボンディ領域またはヒル領域のどちらか小さい方(惑星重力圏)から支配的に流入及び流出している事がわかった[13]. そのため, P_1, P_2 をそれぞれ惑星重力圏半径上にとると, 右辺第5項も消える.

よって(21)式のうち, 潮汐ポテンシャルの寄与である第三項のみが残る. 等温流体シミュレーション

結果の解析から, $x_2 \sim R_{grav}/\sqrt{2}$ において最も速いガス流出が生じていることがわかった. よって, この点をガスの流出点と定義すれば, ガス流出速度は

$$|u_{out}| \simeq \begin{cases} \sqrt{\frac{3}{2}} \tilde{m} c_s & (\tilde{R}_{Bondi} < \tilde{R}_{Hill}), \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{\tilde{m}}{3}\right)^{1/3} c_s & (\tilde{R}_{Bondi} \geq \tilde{R}_{Hill}), \end{cases} \quad (22)$$

と表される.

図7に(22), (23)式と等温流体シミュレーションから得られたガス流出速度を示した. 得られたガス流出速度の解析解は, シミュレーション結果をよく再現できる事がわかった. ガス流出速度は惑星質量と共に増加し, ボンディ半径とヒル半径の大小関係に応じて霧が変化する.

5. 惑星形成への示唆

本節では, 筆者らが行った研究[13]で得られたガス流出速度の解析解を元に, 惑星形成への示唆を議論する

5.1 ガス流出障壁によるペブル集積抑制

近年, kmサイズの微惑星集積による惑星形成モデルに代わり, ~mm-cmサイズの固体物質(ペブル)集積による新たな惑星形成モデルが盛んに議論されている[e.g., 8, 9]. 微惑星集積とペブル集積, 両者の間の大きな違いは, ペブルが惑星との重力相互作用の他に, 円盤ガスからの抵抗を受けながら運動するという点にある. 粒子に働くガス抵抗は,

$$F_{drag} = \frac{m_p \Delta v}{t_{stop}}, \quad (24)$$

と書ける. m_p は粒子の質量, Δv は粒子と周囲のガスとの相対速度, t_{stop} は粒子の運動がガスの流れに馴染むまでの時間(制動時間)である. 制動時間を円盤ガスのケプラー時間で割った(ケプラー角速度をかけた)無次元量として, 粒子のストークス数

$$\tilde{St} = t_{stop} \Omega_K, \quad (25)$$

を定義する. 惑星科学分野における「ペブル」とは, $10^{-3} \dots 10^0$ の粒子として定義される[27].

kmサイズ微惑星の集積による惑星形成モデルと

ペブル集積モデルの大きな違いは、集積時におけるガス抵抗の寄与の有無にある。ガス抵抗というブレーキがかかることによって、惑星重力圏付近を通過するペブルを多数集積できることから、ペブル集積は効率的な惑星成長に繋がる可能性がある[8, 9]。これまで、ペブル集積モデルの大半は、円盤ガスは惑星からの重力による影響が反映されていない非摂動流れ、すなわち単なるケプラーシアー流れ(+円盤ガスの圧力勾配に由来する向かい風)であるという仮定のもとで議論されてきた[8, 28]。ところが、ペブルは円盤ガスからの抵抗を強く受けるため、原始惑星が駆動するガス流がペブル集積に影響を及ぼす可能性がある。

ここでは、簡単のためにペブルに働くガス抵抗と惑星重力とが釣り合った状況(終端運動)を考え、原始惑星が駆動するガス流の影響を見積もってみよう。このとき、

$$\frac{\Delta v}{t_{\text{stop}}} = \frac{GM_{\text{pl}}}{R^2}, \quad (26)$$

が成り立つ。筆者らの研究[13]から、円盤内に埋没した原始惑星の重力圏付近では、音速程度のガス流出が生じることがわかった(図7)。(26)式において $R = R_{\text{grav}}$ とすることにより、惑星重力圏の位置におけるペブルの終端速度は、それぞれ

$$v_{\text{term}} = \begin{cases} \frac{\tilde{St}}{\tilde{m}} c_s & (R = R_{\text{Bondi}}), \\ 3^{2/3} \tilde{m}^{1/3} \tilde{St} c_s & (R = R_{\text{Hill}}), \end{cases} \quad (27)$$

と表される[13]。図7に、様々なストークス数に対するペブルの終端速度((27)及び(28)式)を重ねて示した。

図7、及び $|u_{\text{out}}|$ と v_{term} の比較から、

$$\tilde{m} \gtrsim \sqrt{\tilde{St}}, \quad (29)$$

のとき、惑星重力圏の位置におけるガス流出速度が、同じく惑星重力圏の位置におけるペブルの終端速度を上回ることがわかる。したがって、原始惑星が駆動するガス流がペブル集積を阻害する可能性が示唆された[13]。筆者らはこれを「ガス流出障壁」と名付けた。

5.2 スーパーアース普遍性への示唆

前節までの内容を踏まえ、1節で触れたスーパーアース普遍性について議論する。(29)式から、ガス流出障壁によってペブル集積が抑制される可能性が示唆された。ガス流出障壁によるペブル集積抑制が生じるか否かは、ペブルのストークス数(ペブルサイズ)に依存する。スーパーアースが多数発見されている領域 ($\lesssim 1$ au) では、ペブルは主にシリケート粒子として存在していると考えられている。シリケート粒子は衝突によってくっつきにくく成長しにくい性質を持つため、ペブルのストークス数は小さくなる ($\tilde{St} \sim 10^{-3}$) [e.g., 29]。

このことから、次のようなシナリオが考えられる。原始惑星は原始惑星系円盤内側の領域において、 $\tilde{St} \sim 10^{-3}$ の小さなペブルの集積によって次々成長すると仮定する。(29)式から、原始惑星の質量が $\tilde{m} \sim 0.03$ ($\sim 0.3 M_{\oplus}$ ($a/1 \text{ au}$)^{3/4}) に達すると、ガス流出障壁によるペブル集積抑制が機能し始め、原始惑星の成長は止まる。暴走的なガス降着は惑星コア質量が $\sim 10 M_{\oplus}$ 程度に達すると生じると考えられているため[3]、これらの小質量原始惑星は暴走ガス降着を免れることができる。小質量の原始惑星が円盤内側領域でいくつか形成された後、円盤ガスが散逸し始める段階でそれらが軌道不安定を引き起こし、巨大衝突を経験することによって最終的にスーパーアース質量天体が形成される。

6. まとめと今後の展望

本稿では、筆者らが行った研究に基づき、原始惑星系円盤内に埋没した原始惑星が駆動するガス流に関する解説を行った。近年の高解像度3次元流体シミュレーションによって、円盤ガス中に埋もれた成長途中の惑星周りには複雑な3次元ガス流れ場が形成される事が示された。原始惑星の重力圏には、ガスが流入・流出する。また、原始惑星周りのガス流れ場には2つの形態が存在し、これらは原始惑星が受けるガスの向かい風の寄与によって「シアー流卓越形態」及び「向かい風卓越形態」に分類することができる。

近年、小質量惑星周りの流れ場に関する研究は多

数行われている。筆者らが中心となって行った研究で初めて明らかになった点を改めてまとめておく：

(a) 流れ場遷移質量の導出

シア一流卓越形態及び向かい風卓越形態を分類するための遷移質量は、(16)式で記述される。 $\dot{m} \leq \dot{m}_{t,flow}$ のとき、流れ場は向かい風卓越形態に分類される。

(b) ガス流出速度の惑星質量依存性の解明

シア一流卓越形態の流れ場について、シミュレーション結果と整合的な解析解を導出することができた。惑星重力圏からのガス流出速度は、惑星質量と共に増加することがわかった((22)及び(23)式)。

(c) 原始惑星が駆動するガス流がペブル集積に及ぼす影響の解明

原始惑星が駆動するガス流出速度とガス抵抗を受けやすい小さな粒子(ペブル)の相対速度とを比較することにより、原始惑星が駆動するガス流がペブルの運動に影響を及ぼす可能性が示唆された((29)式)。これは、近年盛んに議論されているペブル集積モデルに影響を及ぼす可能性があり、系外惑星分布におけるスーパーアース普遍性に関する説明の一助となるかもしれない。

なお本稿では、原始惑星が駆動するガス流が惑星形成に及ぼす影響を考えるにあたり、シア一流卓越形態の流れ場を想定した上で円盤中心面におけるガス流出速度とペブルの終端速度の比較を行い、その影響を議論した。しかし、図4及び5に示すように、流れ場は3次元的な構造を有しているだけでなく、ガスの向かい風の寄与によってその形態を変化させる。したがって、ペブル集積への影響を定量的に見積もるためには、原始惑星が駆動するガス流の影響を考慮したペブルの3次元軌道計算が必要であろう。この点については、筆者らが行った研究[14, 15]、及び論文II [16]を参照されたい。

惑星によって駆動された流れ場の影響は、単にペブルの集積率(ひいては惑星の成長率)に影響を及ぼすだけにとどまらない。本稿では円軌道に固定された惑星を考えたが、原始惑星系円盤内に埋没した惑星は周囲のガスと重力的に相互作用し、円盤内を

動径方向に移動することが知られている[18]。移動にかかる時間は円盤の典型的な寿命よりも短くなると見積もられており、形成された惑星が中心星に落下してしまうことから「惑星落下問題」と呼ばれている[30]。惑星移動に関する従来研究では、惑星が駆動するガス流の影響は取り入れられていない。近年の3次元流体シミュレーションから、惑星が駆動するガス流の影響を考慮することによって惑星の軌道移動にかかる時間が従来研究の見積もりよりも遅くなる可能性が示唆された[11]。これにより、惑星を円盤内にとどめておくことができるかもしれない。しかし、惑星が駆動するガス流れ場が軌道移動時間に及ぼす影響の惑星質量及び円盤パラメータ依存性は未解明である。更に、惑星が離心率を持っている場合にも特徴的な流れ場を形成することがわかってきている。先行研究の2次元流体シミュレーションから、惑星の軌道運動方向の後方に卵型の流線の特徴づけられるガスの流れが存在することが明らかになった[31]。離心率を持った天体へのペブル集積過程について調べた先行研究は僅かであり[28]、流れ場を考慮した場合の影響についても未解明である。

更に、ガスの流れ場があることによって惑星とペブルのぶつかり方そのものが変化するため、ペブルが惑星に与える自転角運動量にも影響が出る可能性がある。惑星が駆動するガス流れ場が円盤内に存在するダストのグローバルな空間分布に影響を及ぼす可能性も浮かび上がってきている。本稿で解説したガス流れ場は惑星重力圏付近の局所スケールで生じる現象だが、この局所スケールで生じる物理が惑星形成における様々な素過程に影響し得ることが次々と明らかになってきている。したがって、惑星周りのガスの流れの詳細を理解することは惑星形成過程を調べる上で極めて重要であると言える。今後も幅広い視点からその影響を考慮していく必要があるだろう。

7. 謝辞

本稿を執筆するにあたり、お声がけくださった編集委員の荒川創太氏、及び野津翔太氏に感謝いたします。本稿は、筆者が第一著者である参考文献[13]、

[14], 及び[15] の内容から主に構成されています。これらの研究の共同研究者である井田茂氏, 黒川宏之氏の両氏に深く御礼申し上げます。そして, 本稿の査読者である武藤恭之氏には, 極めて丁寧な査読をして頂きました。この場を借りて感謝致します。流体計算については国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの共同利用計算機Cray XC50 を用いて行われました。本研究はJSPS科研費15H02065, 16H04073, 17H01175, 17H06457, 18K13602, 19H01960, 19H05072, 20J20681 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Fressin, F. et al., 2013, *Astrophys. J.* 766, 81.
- [2] Weiss, L. M. and Marcy, G. W., 2014, *Astrophys. J.* 783, L6.
- [3] Mizuno, H., 1980, *Prog. Theor. Phys.* 64, 544.
- [4] Johnson, J. A. et al., 2010, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 122, 905.
- [5] Fernandes, R. B. et al., 2019, *Astrophys. J.* 874, 81.
- [6] 黒川宏之, 2019, *遊星人* 28, 266.
- [7] Lee, E. J. et al., 2014, *Astrophys. J.* 797, 95.
- [8] Ormel, C. W. and Klahr, H. H., 2010, *Astron. Astrophys.* 520, A43.
- [9] Lambrechts, M. and Johansen, A., 2012, *Astron. Astrophys.* 544, A32.
- [10] Ormel, C. W. et al., 2015, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 446, 1026.
- [11] Fung, J. et al., 2015, *Astrophys. J.* 811, 101.
- [12] Kurokawa, H. and Tanigawa, T., 2018, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 479, 635.
- [13] Kuwahara, A. et al., 2019, *Astron. Astrophys.* 623, A179.
- [14] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., 2020a, *Astron. Astrophys.* 633, A81.
- [15] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., 2020b, *Astron. Astrophys.* 643, A21.
- [16] 桑原歩, 2022, *遊星人* 31, 203.
- [17] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, 1100.
- [18] Goldreich, P. and Tremaine, S., 1979, *Astrophys. J.* 233, 857.
- [19] Paardekooper, S. -J. and Papaloizou, J. C. B., 2009, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 394, 2297.
- [20] Lin, D. N. and Papaloizou, J., 1986, *Astrophys. J.* 307, 395.
- [21] Tanigawa, T. et al., 2012, *Astrophys. J.* 747, 47.
- [22] 谷川享行ほか, 2011, *遊星人* 20, 262.
- [23] Ikoma, M. and Genda, H., 2006, *Astrophys. J.* 648, 696.
- [24] Lambrechts, M. and Lega, E., 2017, *Astron. Astrophys.* 606, A146.
- [25] Cimerman, N. P. et al., 2017, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 471, 4662.
- [26] Masset, F. S. and Benítez-Llambay, P., 2016, *Astrophys. J.* 817, 19.
- [27] Ormel, C. W., 2017, *Astrophys. Space Sci. Lib.* 445, 197.
- [28] Liu, B. and Ormel, C. W., 2018, *Astron. Astrophys.* 615, A138.
- [29] Okuzumi, S. and Tazaki, R., 2019, *Astrophys. J.* 878, 132.
- [30] Tanaka, H. et al., 2002, *Astrophys. J.* 565, 1257.
- [31] Mai, C. et al., 2020, *Astrophys. J.* 899, 54.

著者紹介

桑原 歩



東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 及び 東京工業大学 地球生命研究所 博士後期課程3年. 日本学術振興会特別研究員 (DC1). 専門は惑星形成論. 日本天文学会, 日本惑星科学会, 日本

地球惑星科学連合に所属.

原始惑星が駆動するガス流： ペブル集積への影響

桑原 歩^{1,2}

2021年12月9日受領, 査読を経て2022年5月2日受理

(概要) 近年、 \sim mm-cmサイズの粒子(ペブル)が多数集積することによって惑星が成長するという新しいモデル(ペブル集積モデル)が盛んに研究されている。ペブルは惑星との重力相互作用の他に、原始惑星系円盤ガスからの抵抗を受けながら運動するため、原始惑星系円盤ガスの流れ場が極めて重要な役割を果たす。原始惑星系円盤内に埋もれた成長途中の惑星は、自身の重力によって周囲のガスの流れを乱すため、ペブル集積に基づく惑星形成を議論する際は、惑星-原始惑星系円盤ガス-ペブルの相互作用を考慮する必要があることが最近の研究で明らかとなってきた。本稿では、惑星周りのガスの流れ場がペブル集積に及ぼす影響について、筆者がこれまで行ってきた研究を紹介する。そして、惑星系の成り立ちについての考察を行い、惑星形成における様々な素過程への影響も議論する。

1. はじめに

本稿(以降、論文Ⅱ)は、『原始惑星が駆動するガス流:その形態と性質について』と第する論文(以降、論文Ⅰ[1])の続編として執筆されたものである。論文Ⅰ、Ⅱでは、共通の変数、無次元量を使用しており、本稿では必要に応じて論文Ⅰの図や式を引用することができる。

2. 新たな惑星形成モデル： ペブル集積モデル

惑星は、ガスとダストから成る原始惑星系円盤(以下、円盤)内で形成される。近年、kmサイズの微惑星集積による惑星形成モデルに代わり、 \sim mm-cmサイズ¹の固体物質(ペブル)集積による新たな惑星形成モデルが盛んに議論されている[e.g., 2, 3]。

ペブル集積モデルを簡単に表すならば、円盤ガスが豊富に存在する環境において、それ自身の重力を

無視できるような小さな粒子(ペブル)が、大きな重力を持つ天体(惑星)に降り積もる現象である。微惑星集積とペブル集積、両者の大きな違いは、ペブルが惑星との重力相互作用の他に、円盤ガスからの抵抗を受けながら運動するという点にある。ここで、円盤内に存在する質量 m_p の粒子が受けるガス抵抗は

$$\mathbf{F}_{\text{drag}} = -m_p \frac{\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_g}{t_{\text{stop}}}, \quad (1)$$

と書ける。 \mathbf{v}_p は粒子の速度、 \mathbf{v}_g は周囲のガスの速度、 t_{stop} は粒子の運動がガスの流れに馴染むまでの時間(後述; 制動時間((10), (11)式))である。ペブル集積による惑星形成を考える際は、円盤ガスの影響を考慮することが極めて重要になる。ガス抵抗というブレーキが掛かることによって、惑星重力圏付近を通過するペブルを多数集積できることから、ペブル集積モデルは効率的な惑星成長につながる可能性がある[2, 3]。

¹ここでは、典型的な円盤モデルを仮定した際の大まかな換算サイズを記載した。惑星科学分野における「ペブル」は、粒径ではなく空気力学的に小さい粒子(粒子の運動がガスの運動に馴染むまでの時間が、円盤のケプラー時間よりも短い)として定義される。一方、堆積学の分野における「ペブル」とは、径が4-64 mmのものとして定義されている。

1. 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系

2. 東京工業大学 地球生命研究所(ELSI)
kuwahara.a.aa@m.titech.ac.jp

本稿では論文Iと同様に、惑星重力圏の大きさをボンディ半径 R_{Bondi} またはヒル半径 R_{Hill} で定義する。ボンディ半径とは、惑星表面からの脱出速度がガスの熱運動速度(音速)になる半径である。ヒル半径とは、中心星-惑星-粒子の3体運動を考えた際、中心星重力よりも惑星-粒子間に働く重力のほうが支配的になる領域の半径を表す(論文Iの(3), (4)式を参照[1])。以降、惑星重力圏の半径を $R_{\text{grav}} = \min(R_{\text{Bondi}}, R_{\text{Hill}})$ で表すこととする。ボンディ半径、ヒル半径の大小関係については論文Iの図2を参照されたい[1]。

これまで、ペブル集積モデルの大半は、円盤ガスは惑星の重力による影響が反映されていない流れ、すなわち単なるシア一流であるという仮定のもとで議論されてきた。しかし近年、円盤内に埋もれた成長途中の惑星の重力圏スケール ($\lesssim R_{\text{grav}}$) を細かく解像できるような高解像度の3次元流体シミュレーションによって、原始惑星の近傍には複雑な3次元ガス流れ場が存在していることが明らかになった[e.g., 4, 5]。ペブルはガス抵抗を強く受けるため、このガス流れ場はペブル集積に影響を及ぼす可能性がある[1, 6]。

本稿では、筆者らの近年の研究成果[7, 8]を踏まえ、惑星の重力によって摂動を受け、その構造が複雑に変化したガス流中におけるペブル集積過程についてまとめる。3節では、まず原始惑星系円盤ガスへの惑星重力の影響を無視した場合を考え、円盤内におけるガス・粒子の運動の基礎に立ち返る。具体的には円盤内に存在する粒子がガス抵抗を受けながら中心星方向に移動することを述べる(粒子の動径ドリフト; 3.1小節)。粒子がやがて惑星軌道に達すると、その一部が惑星に集積する。その際、粒子の集積過程は3つに大別することができ、そのうち沈殿レジームと呼ばれる過程がペブル集積に対応することを述べる(3.3小節)。ペブル集積と呼ばれる過程がどのような大きさの粒子、どのような質量の惑星を想定しているのかについて理解した上で(3.4小節)、ペブル集積を考える際は原始惑星周囲のガスの流れ場の存在を考慮する必要があることを論じ、惑星が駆動するガス流れ場中におけるペブルの軌道(4.1.2小々節)、及びペブル集積率を調べる(4.2.3小々節)。そして、原始惑星が駆動するガス流が惑星形成に及

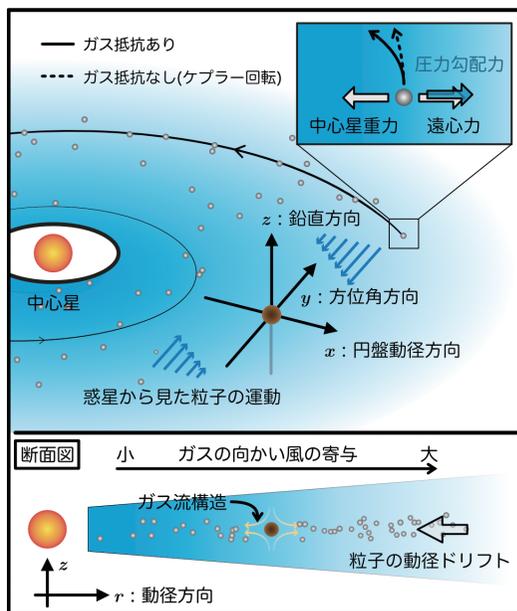


図1: 概念図. 原始惑星系円盤内に存在する粒子と、円軌道に固定された惑星を考える。円盤ガスには圧力勾配力が働くため、ガスはサブケプラー回転する((2)式)。粒子は円盤ガスからの向かい風を受けて角運動量を失い、中心星方向へ移動し(動径ドリフト)、やがて惑星軌道に達する。惑星の近傍では複雑なガス流れ場が形成される(4節)。本稿では、円盤モデルとして最小質量円盤[9]を仮定する。このとき、惑星・粒子が受ける向かい風の寄与は軌道長半径とともに増加する(論文Iの(11)式を参照[1])。

ぼす影響や、惑星形成における様々な素過程への影響も議論する(4.3小節)。

なお、原始惑星が駆動する3次元ガス流れ場の詳細については、筆者らによる研究[6]、または論文Iを参照されたい[1]。

3. 非摂動状態におけるガス・粒子の運動

原始惑星系円盤内に存在する粒子が惑星にどのように集積するか(粒子の集積レジーム)は、ガスの流れに対する粒子の追従度合いや惑星質量に応じて様々異なる。本節では、まず従来の仮定のもとでの粒子の集積レジームについてまとめ、「ペブル集積」と呼ばれる現象を具体化することを目指す。すなわち、ペブル集積と呼ばれる過程がどのような大きさの粒子、またどのような惑星質量を想定するのかについて考える。

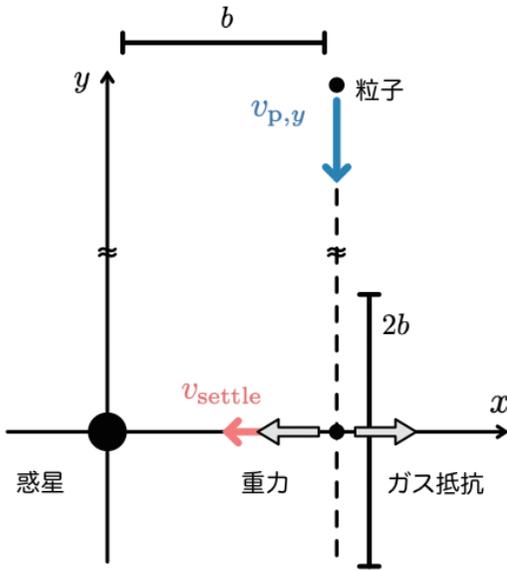


図2: 惑星とともに回る共回転座標系(図1)における粒子-惑星間相互作用の模式図. 簡単のため, 円盤中心面でのみ考える. 図の作成にあたり, [11] を参考にした.

はじめに, 本稿における状況設定を概観する(図1). 円軌道に固定された1つの惑星と, それ自身の重力が無視できるような粒子が円盤内に豊富に存在しているとす. ただし, 現時点においては円盤ガスへの惑星重力の影響は一切無視する(非摂動状態と呼ぶことにする). ペブル集積過程に馴染みのある読者は, 4節以降から読み進めても構わない.

3.1 粒子の動径移動

原始惑星系円盤内に存在する物質に働く中心星重力と遠心力が釣り合っているとき, 物質はケプラー角速度 Ω_K でケプラー回転していると言う. 本小節では, まず円盤内におけるガス・粒子の運動を振り返ろう. 簡単のために円盤中心面のみを考え, 粒子の運動に影響を及ぼすような円盤乱流の影響も無視する. また, 惑星重力も無視する. このとき, ガス・粒子それぞれの運動方程式は

$$\frac{d\mathbf{v}_g}{dt} = -\frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_g}{t_{\text{stop}}} - \frac{GM_*}{r^3} \mathbf{r} - \frac{\nabla P}{\rho_g}, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = -\frac{\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_g}{t_{\text{stop}}} - \frac{GM_*}{r^3} \mathbf{r}, \quad (3)$$

と表せる. G は万有引力定数, M_* は中心星質量, ρ_p, ρ_g は粒子, 及び円盤ガスの質量密度, P は円盤ガ

スの圧力, r は中心星からの距離を表す(図1). 以降は $\rho_p/\rho_g \ll 1$ とし, 粒子からガスへの反作用は無視することにしよう.

(2) 式から, 円盤ガスには圧力勾配力が働くため, 実際にはケプラー回転とは異なる速度で回転することが分かる. ケプラー回転からのずれを考慮した回転角速度は $\Omega = \Omega_K(1 - \tilde{\eta})$ と書ける. ここで, $\tilde{\eta}$ は $\tilde{\eta} = -1/2(c_s/v_K)^2 d \ln P / d \ln r$ で表される無次元量であり, c_s は等温音速, $v_K = r\Omega_K$ はケプラー速度である. 圧力分布が滑らかであるような典型的な円盤モデルでは, 通常 $dP/dr < 0$ となり, ガスはケプラー回転よりも少し遅い速度で回転する(サブケプラー回転). このとき, 円盤内でケプラー回転する物体は, ガスからの向かい風を受ける. その速度は

$$v_{\text{hw}} = \tilde{\eta} v_K e_\phi, \quad (4)$$

と書ける. ϕ は円盤の方位角方向を表す. なお, 本稿では無次元量にはチルダ記号をつけることとする. ここで, 円盤モデルとして最小質量円盤[9]を仮定すると, $\tilde{\eta} = 1.8 \times 10^{-3} (r/1 \text{ au})^{-1/2}$ となる. したがって, ケプラー回転からのずれはほんの僅かであると言える. しかし, この僅かなずれが粒子の運動に影響を及ぼす.

さて, 粒子には圧力勾配力が働かないので², ガス抵抗がないとき, (3) 式から粒子はケプラー回転することがわかる. 一方, ガス抵抗がある場合はどうだろうか. ここでは簡単のため, 粒子は十分小さく, したがってガスの運動に直ちに馴染むとすると, 粒子は中心星重力とガス抵抗とが釣り合った運動(終端運動)をする. (2), (3) 式で定常を仮定し, 更に $|v_{p,r}|, |v_{p,\phi} - v_K| \ll v_K$ とすることにより ($v_{p,r}, v_{p,\phi}$ は粒子の速度の r, ϕ 成分), 以下の定常解を得る事ができる[10]:

$$v_{p,r} = -\frac{2t_{\text{stop}}\Omega_K}{1 + (t_{\text{stop}}\Omega_K)^2} \tilde{\eta} v_K, \quad (5)$$

$$v_{p,\phi} = v_K - \frac{\tilde{\eta} v_K}{1 + (t_{\text{stop}}\Omega_K)^2}. \quad (6)$$

(6) 式から, 粒子がガスからの向かい風を受けることによって ϕ 方向(円盤回転方向)の回転速度がケ

²ここでは粒子の内部密度はガスの質量密度よりも十分大きく, したがって粒子が受けるガスからの圧力勾配力(浮力)は無視できるとみなす.

ラー回転から減速されている事がわかる。ガス抵抗によって角運動量が失われることにより、 r 方向(動径方向)には向かい風に比例した速度で移動することになる((5)式)。これを粒子の動径ドリフトと呼ぶ(図1)。

なお、制動時間にケプラー角速度をかけた(ケプラー時間で割った)無次元量はストークス数と呼ばれ、本稿では、以降

$$\tilde{St} = t_{\text{stop}}\Omega_K, \quad (7)$$

と表す。

3.2 3つの時間スケール

粒子がガス抵抗によって中心星方向にドリフトし、やがて惑星軌道にまで達すると、粒子の一部は惑星に集積する(図1)。ここからは、粒子のガスの流れに対する追従度合いや、惑星質量に応じて集積レジームを分類し、「ペブル集積」と呼ばれる過程を具体化することを目指そう。本小節では、まず時間スケールに着目する。

図1に基づき状況設定を振り返る。本小節では、円軌道に固定された惑星を中心とする局所共回転座標系を考える。ただし、現時点においては円盤ガスへの惑星重力の影響は無視する(非摂動状態)。引き続き簡単のため円盤中心面でのみ考える。図1の x 、 y 軸はそれぞれ円盤動径方向、円盤回転方向に対応する。ケプラー角速度は中心星からの距離の $-3/2$ 乗に比例するので、円盤の曲率が無視できるような惑星の近傍領域では、ケプラー回転は線形速度シア(中心星周りの公転半径が異なることによって生じる速度差)で近似でき、 $-3/2\Omega_K x$ と書ける。したがって、(5)、(6)式より、惑星を中心とする共回転座標から見ると、 x 、 y 方向の粒子の速度は

$$v_{p,x} = -\frac{2\tilde{St}}{1+\tilde{St}}\tilde{\eta}v_K, \quad (8)$$

$$v_{p,y} = -\frac{3}{2}\Omega_K x - \frac{\tilde{\eta}v_K}{1+\tilde{St}}, \quad (9)$$

と表せる。

次に、粒子の集積レジームを分類するに当たり重要となる3つの時間スケールを導入する。

(a) 制動時間

粒子の運動がガスの流れに馴染むまでの時間を

表す。(1)式から、 $t_{\text{stop}} \rightarrow 0$ の極限では粒子の軌道はガスの流線に一致し、 $t_{\text{stop}} \rightarrow \infty$ の極限では粒子はガスと完全に独立して運動する。制動時間は粒子半径 s と円盤ガスの平均自由行程 λ との間の関係によって、

$$t_{\text{stop}} = \begin{cases} \frac{\rho \cdot s}{\rho_g c_s} & (s \leq \frac{9}{4}\lambda: \text{エプスタイン則}), \\ \frac{4\rho \cdot s^2}{9\rho_g c_s \lambda} & (s > \frac{9}{4}\lambda: \text{ストークス則}), \end{cases} \quad (10)$$

と表される。なお、平均自由行程は $\lambda \sim 1/n\sigma \propto \rho_g^{-1}$ と書けるので、ストークス則では制動時間はガス密度に依存しないという特徴がある。ここで、 n はガスの数密度、 σ はガス分子同士の衝突断面積である。

(b) 遭遇時間

簡単のため、円盤中心面での粒子の運動を考える。このとき、惑星の軌道半径と粒子の軌道半径の差は b であるとする(図2)。 y 方向に惑星との相対速度 $v_{p,y}$ で接近してくる粒子が、惑星付近を通過する際に惑星重力を感じながら運動する距離を $2b$ とすると、遭遇時間は

$$t_{\text{enc}} = \frac{2b}{v_{p,y}}, \quad (12)$$

と書ける。

(9)、(12)式から、粒子の接近速度に応じて遭遇時間の依存性を定性的に調べることができる。ここでは、本稿で主に取り扱う、ガス抵抗が重要となるような小さい粒子($\tilde{St} \ll 1$)を考え、 $v_{p,y} \sim -(3/2\Omega_K x + v_{\text{hw}})$ としよう。惑星質量が大きいほど重力圏の大きさも大きくなるので、粒子が惑星重力を感じる長さ b も大きくなる(b の典型的な長さは惑星重力圏の大きさでスケールされる。後述の(16)、(17)式を参照)。このとき、(9)式の第一項が卓越するので、 $x \sim b$ より $t_{\text{enc}} \sim \Omega_K^{-1}$ が得られる。すなわち、粒子と惑星との遭遇はケプラー時間程度で生じる。一方、惑星質量が小さいときは第二項が卓越し、 $t_{\text{enc}} \sim 2b/v_{\text{hw}}$ となる。すなわち、遭遇時間は b が小さいほど、向かい風が強いほど短くなる。

(c) 沈殿時間

ガス抵抗によって速度 v_{settle} で終端運動する粒子

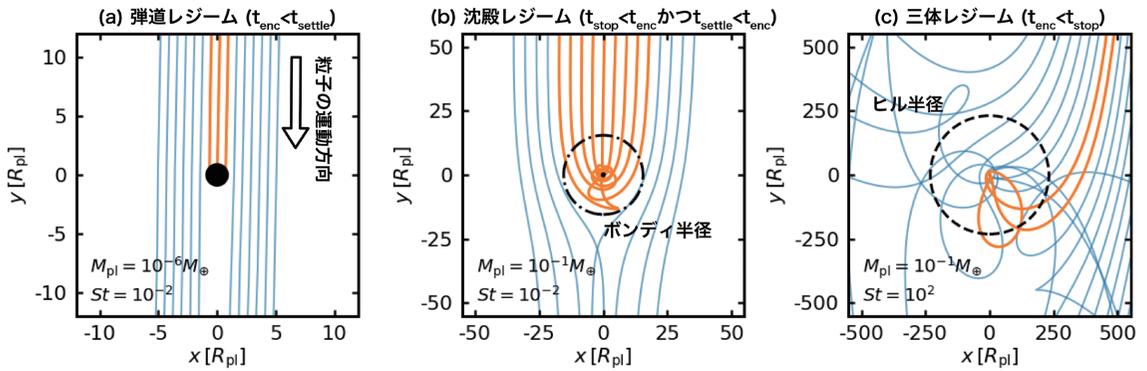


図3: 惑星を中心とする共回転座標系(図1)における粒子の軌道(オレンジ: 惑星に集積, 青: 未集積). x, y 軸はそれぞれ惑星半径 R_{pl} で規格化されている. 各レジームの違いを判別しやすくするため, 惑星の軌道運動方向の前方から粒子が近づいてくる場合の軌道を示した. 「ペブル集積」と呼ばれる過程は, (b) の沈殿レジームにおける粒子集積のことを指す.

が, 惑星に「沈殿」³するのにかかる時間を表す.

惑星から距離 b だけ離れた位置にある粒子を考える(図2). このとき, 粒子に働くガス抵抗と惑星重力は釣り合っている, すなわち終端運動しているとする,

$$\frac{GM_{pl}}{b^2} = \frac{v_{settle}}{t_{stop}}, \quad (13)$$

より終端速度 v_{settle} が得られる. ここで, M_{pl} は惑星質量である. v_{settle} で運動する粒子が b だけ移動するのにかかる時間として, 沈殿時間

$$t_{settle} = \frac{b}{v_{settle}} = \frac{b^3}{GM_{pl}t_{stop}}, \quad (14)$$

が得られる. ここで, 粒子の「沈殿」を考える際は, ガス抵抗の効果が本質的に重要であることに注意が必要である. ガス抵抗が働かない極限 ($t_{stop} \rightarrow \infty$) を考えると, (14)式から $t_{settle} \rightarrow 0$ となり, 粒子が一瞬で惑星に沈殿するように思える. しかし, この場合の集積は, 後述する三体レジームで生じ, むしろ集積は抑制される. ゆえに, 直感的な意味での「沈殿」が生じるかどうかは詳しく調べる必要がある(3.3 小節).

3.3 粒子の集積レジーム

前小節で導入した3つの時間スケールを用いることで, 粒子の集積過程を分類することができる[2]. 図3にそれぞれのレジームに対応する粒子の軌道を示した.

(a) 弾道レジーム

遭遇時間が沈殿時間より短いとき ($t_{enc} < t_{settle}$), 集積は弾道的に生じる(図3a). 条件式から,

$$\frac{GM_{pl}}{b^2} < \frac{v_{p,y}}{2t_{stop}}, \quad (15)$$

が得られる. すなわち, 惑星重力によって粒子を引っ張り切る前に, 粒子が惑星を通り過ぎてしまう状況を表している.

惑星重力が小さいとき, 粒子の運動に及ぼされる惑星重力の影響も小さい. このとき, 惑星に対する粒子の相対運動はほとんど乱されず, 粒子の運動に対するガスの影響も無視できるため, 集積断面積は惑星の幾何断面積でスケールされる. 惑星成長の初期段階における粒子の集積は, このレジームで生じる. 粒子の大半は惑星を通り過ぎていくので, 弾道レジームにおける惑星成長は極めて非効率である.

(b) 沈殿レジーム

「ペブル集積」と呼ばれる過程は, このレジーム

³集積過程において, 粒子がガス抵抗を受けながら惑星の重力場中に「沈殿」していく様子から, settling(沈殿) という名前が用いられた[2]. ここでは円盤中心面への粒子の沈殿(z 方向の運動; 図1) を考えているわけではないことに注意.

で生じる粒子集積のことを指す[11]. 以下の2つの条件(沈殿条件): (1) 制動時間が遭遇時間より短い($t_{\text{stop}} < t_{\text{enc}}$), (2) 沈殿時間が遭遇時間より短い($t_{\text{settle}} < t_{\text{enc}}$)を満たすとき, 粒子の集積は沈殿レジームで生じる(図3b). この過程ではガス抵抗が重要な役割を果たす. 惑星が成長し質量が大きくなると, 沈殿時間は減少する((14)式). 惑星付近を通過する粒子が惑星重力による引っ張りやガス抵抗の両方を経験しながら減速し, やがて惑星に集積する.

3.2小節(b)で述べた遭遇時間の定性的な振る舞いを元に, このときの集積断面積を見積もってみよう. 沈殿条件の2つ目から, $t_{\text{settle}} = t_{\text{enc}}$ よりそれぞれ

$$b \sim \begin{cases} R_{\text{Hill}} \tilde{St}^{1/3} \equiv b_{\text{sh}}, & (t_{\text{enc}} \sim \Omega_K^{-1}) \\ \sqrt{\frac{2GM_{\text{pl}} t_{\text{stop}}}{v_{\text{hw}}}} \equiv b_{\text{hw}}, & (t_{\text{enc}} \sim 2b/v_{\text{hw}}) \end{cases} \quad (16)$$

が得られる. すなわち, 沈殿レジームにおける集積断面積は, 惑星重力圏の大きさとスケールされる(図3b). 弾道レジームに比べ, 集積断面積が著しく増加していることがわかる.

(c) 三体レジーム

制動時間が遭遇時間より長いとき($t_{\text{enc}} < t_{\text{stop}}$), 集積は三体レジームで生じる(図3c). 粒子の運動は, 粒子-惑星-中心星の三体相互作用によって決まり, 惑星重力圏付近における粒子の軌道は複雑な様相を呈する. 多くの粒子が惑星重力圏に侵入するものの, 沈殿レジームとは異なりガス抵抗による減速が効きにくく, 大半は重力散乱を経験するため, 最終的に惑星に集積するものは少ない. なお, 微惑星集積と呼ばれる過程はこのレジームに対応する.

3.4 ペブル集積とは

前小節までの内容を踏まえると, 「ペブル集積」はガス抵抗を受けた粒子の惑星への「沈殿」で特徴づけられることがわかった. もう少し定量的にペブル集積を特徴づけるために, ペブル集積が開始する惑星質量, 及び重要となるストークス数を見積もってみよう.

惑星の成長に伴い, 集積は弾道レジームから沈殿レジームに移行するのだった. 惑星成長の初期段階

⁴小惑星ケレスの質量はおおよそ $1.5 \times 10^{-4} M_{\oplus}$ なので, ペブル集積が開始する質量の目安としてしばしば引き合いに出される.

における遭遇時間は $t_{\text{enc}} \sim 2b/v_{\text{hw}}$ と見積もれるので(3.2小節(b)), 先に求めた b_{hw} ((17式))と沈殿条件の2つ目から, $t_{\text{enc}} = b_{\text{hw}}/v_{\text{hw}} = t_{\text{stop}}$ より, 弾道レジームから沈殿レジームへの遷移質量として,

$$M_{\text{pl}} = \frac{v_{\text{hw}}^3 t_{\text{stop}}}{8G}, \\ \simeq 2.4 \times 10^{-4} M_{\oplus} \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^{3/2} \left(\frac{M_*}{M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{\tilde{St}}{1} \right), \quad (18)$$

が得られる⁴. ここで, 最小質量円盤[9]を仮定し, $\tilde{\eta} = 1.8 \times 10^{-3} (a/1 \text{ au})^{-1/2}$ を用いた. a は惑星の軌道長半径, M_{\oplus} は地球質量, M_{\odot} は太陽質量を表す.

なお, 惑星の成長に伴い(9式)においてシアアの寄与が増すと, 遭遇時間は $t_{\text{enc}} \sim \Omega_K^{-1}$ となるので(3.2小節(b)), 沈殿条件の1つ目よりストークス数の上限として

$$\tilde{St} \lesssim 1, \quad (19)$$

が得られる.

以上より, ペブル集積とは, ガスの影響を受けやすい粒子⁵ ($\tilde{St} \lesssim 1$)がある程度成長した惑星 ($\gtrsim 10^{-4} M_{\oplus}$)の重力とガス抵抗を受けながら減速し, 惑星に集積する現象のことを指す, と具体化できる. このことは, 惑星重力によって摂動を受けた円盤ガスの流れの影響を考慮する必要があることを示唆している(後述; 4節).

ストークス数が1程度するとき, ペブルは円盤内を動径方向に大きく移動する. ペブル集積モデルでは, 円盤外側からの粒子のドリフトに伴う連続的な物質の供給によって惑星が成長する(図1). したがってペブル集積モデルは大局的なモデルと捉えることができる.

一方, 微惑星集積モデルでは, 惑星は自身の軌道付近に存在する微惑星のみを集積して成長する. 微惑星 ($\tilde{St} \gg 1$)はガスの流れとは独立して運動し, かつ微惑星同士は稀にしか近接相互作用しないので, 微惑星の運動は基本的に中心星周りのケプラー運

⁵なお, ペブルが惑星に集積するためには, 粒子がある程度成長し, 中心星方向へのドリフトを経て惑星軌道付近にまで達する必要がある. ストークス数が小さいとき, ドリフト速度もまた遅くなる((5式). そのため, ストークス数に下限値を設けて, 惑星科学分野では $10^{-3} \dots 10^{-2} \lesssim \tilde{St} \lesssim 1$ という基準を満たす粒子のことを「ペブル」と呼んでいる[11].

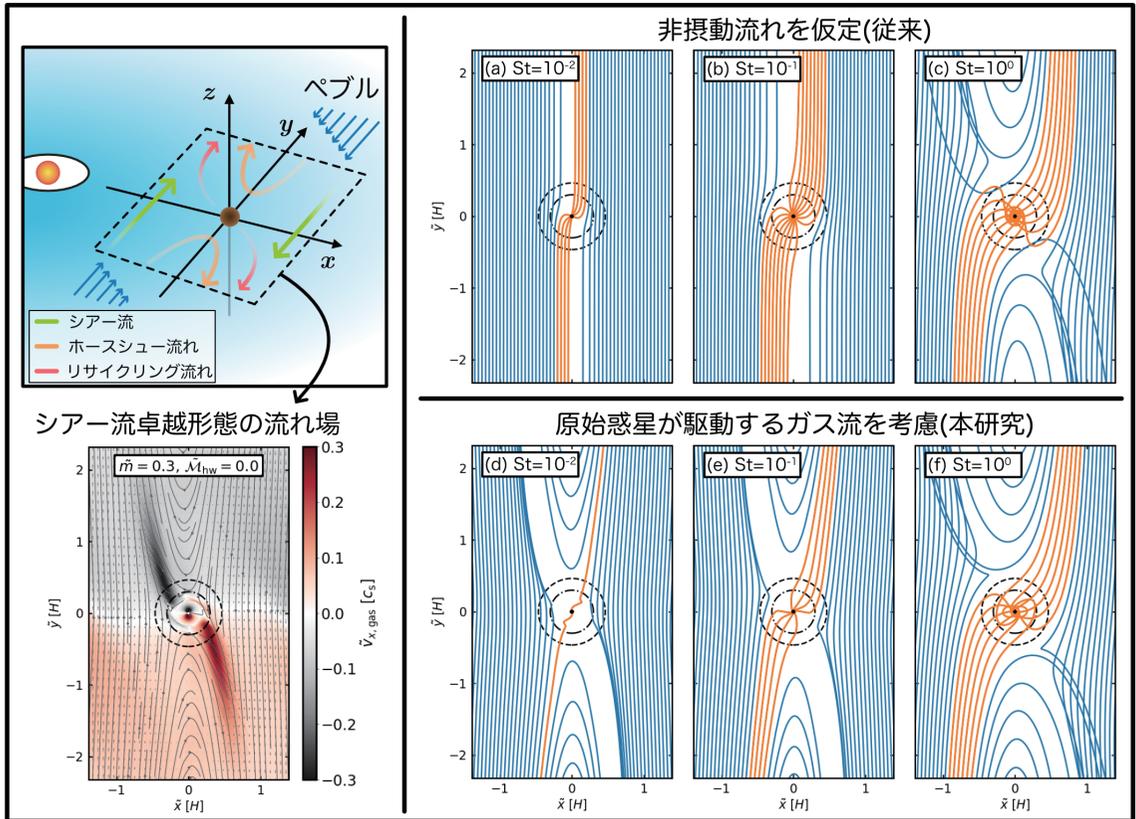


図4: 円盤中心面におけるペブルの軌道。右上: 従来同様, 非摂動流れ(円盤ガスへの惑星重力の影響を無視)を仮定した場合。右下: 惑星によって駆動されるガス流(シア一流卓越形態)の影響を考慮した場合。左上: 概念図(図1と同様)。左下: 流体計算結果。横軸: 円盤動径方向。縦軸: 円盤回転方向。それぞれ円盤ガススケール単位で規格化。青線: 惑星を通過。橙線: 惑星に衝突。惑星質量, 及び向かい風のマッハ数は $\dot{m} = 0.3, \dot{M}_{hw} = 0$ 。データはKuwahara & Kurokawa [7] で得られたものを使用。

動になるためである[12]。従って微惑星集積モデルは局所的なモデルと見なすことができる。

3.5 ペブル集積率

ペブル集積による惑星成長を考える上で鍵となる要素は、惑星へのペブル集積率である。前小節までは円盤中心面にのみ着目してきた。しかし、円盤ガスの乱流によってペブルが円盤中心面から巻き上げられる可能性がある。乱流による巻き上げによって得られるペブル層の厚さは、

$$H_p = \left(1 + \frac{\tilde{St} 1 + 2\tilde{St}}{\tilde{\alpha} 1 + \tilde{St}} \right) H, \quad (20)$$

と表される[13]。ここで、 H は円盤の典型的な厚みであるガススケール単位、 $\tilde{\alpha}$ は円盤乱流の強さを表す

無次元のパラメータで[14]、理論・観測から示唆される典型的な値は $\tilde{\alpha} \sim 10^{-4} - 10^{-2}$ 程度である。 $\tilde{\alpha}$ が大きいほど、 \tilde{St} が小さいほどペブルはより円盤の上層まで巻き上げられることを意味する。

ペブル層の厚みに応じて、ペブル集積率を大まかに見積もることができる。ペブル層の厚みが十分小さいとき、したがってペブルが円盤中心面に集中している場合は、ペブル集積は2次元的に生じるとみなせる。その集積率は、惑星質量が小さく、主に向かい風によって遭遇時間が決まっているとき ($t_{enc} \sim 2b/v_{hw}$), b は(17)式によって見積もれるので、

$$\dot{M}_{2D} \sim 2v_{p,y} b \Sigma_p \sim \sqrt{8GM_p v_{hw} t_{stop}} \Sigma_p, \quad (21)$$

と表せる。 Σ_p はペブルの面密度である。一方、惑星

質量が大きく、 $t_{\text{enc}} \sim \Omega_K^{-1}$ のとき、 b は(16)式によって見積もれるので、集積率は

$$\dot{M}_{2D} \sim 2v_{p,y} b \Sigma_p \sim \tilde{S}t^{2/3} R_{\text{Hill}}^2 \Omega_K \Sigma_p, \quad (22)$$

と表すことが出来る。

一方、ペブル層の厚みが集積断面積よりも大きくなると、ペブル層の内一部のペブルが惑星に集積するようになる。すなわち、ペブル集積は3次的に生じるとみなせて、

$$\dot{M}_{3D} \sim \pi b^2 v_{p,y} \rho_p \sim 2\pi GM_{\text{pl}} t_{\text{stop}} \rho_p, \quad (23)$$

と書ける。

ペブルの巻き上げが大きいほど、惑星にとっては取りこぼすペブルが増えることを意味するので、 $\dot{M}_{3D} \leq \dot{M}_{2D}$ となる。非摂動流れを仮定した場合のペブル集積率は詳細に調べられている[15]。しかし、先行研究では惑星が駆動するガス流の影響が考慮されていないため、ペブル集積率を見直す必要がある(後述;4節)。

4. 原始惑星が駆動するガス流がペブル集積に及ぼす影響

これまで、ペブル集積モデルの大半は、原始惑星系円盤ガスは惑星からの重力による影響が反映されていない非摂動流れ、すなわち単なるケプラーシア流れ(+円盤ガスの圧力勾配に由来する向かい風)であるという仮定のもとで議論されてきた。

ところが、円盤ガス中に埋もれた成長途中の惑星は、自身の重力によって周囲のガスの流れを乱す[1]。近年、原始惑星の重力圏スケール($\lesssim R_{\text{grav}}$)を細かく解像できるような高解像度3次元流体シミュレーションが行われてきている。それにより、円盤内に埋没した原始惑星の近傍には複雑な3次元ガス流れ場が存在していることが明らかになった[e.g., 4, 5]。

ペブル集積が開始する段階に入るということは、ペブルを集める惑星自身がある程度成長していることを意味する($\gtrsim 10^{-4} M_{\oplus}$; (18)式)。このとき、惑星重力圏の大きさは惑星の物理半径よりも大きくなり得る(論文Iの図1を参照[1])。ペブルの集積断面積は惑星重力圏でスケールされるので((16), (17)式)、惑星重力圏が重要な空間スケールの一つであると言

える。そしてなにより「ペブル」とはガス抵抗を受けやすい粒子のことを指す($\tilde{S}t \lesssim 1$)。したがって、ペブル集積による惑星形成過程を考える際は、惑星重力圏スケールで生じる3次元ガス流れ場の影響を考慮することが極めて重要になる。

4.1 研究手法

ここからは、筆者らの研究に基づき[7, 8]、原始惑星が駆動するガス流中におけるペブル集積過程についてまとめる。改めて状況設定を概観する。円軌道に固定された惑星を中心とする局所共回転座標系を考える(図1)。以降の議論のため、論文Iと同様に長さ・時間・速度をそれぞれ円盤の典型的な厚みであるガススケールハイト H 、惑星位置におけるケプラー角速度の逆数 Ω_K^{-1} (ケプラー時間)、等温音速 c_s で規格化した無次元単位系を導入する(論文Iの4.1小節を参照[1])。この単位系において、無次元化惑星質量を $\tilde{m} = R_{\text{Bondi}}/H$ 、向かい風のマッハ数を $\tilde{M}_{\text{hw}} = v_{\text{hw}}/c_s$ で定義する(論文Iの(6), (7)式を参照[1])。無次元量を次元付きの量に変換する場合は論文Iと同様に最小質量円盤モデルを仮定する[9]。無次元量と実次元量の対応や、 \tilde{m} 、 \tilde{M}_{hw} の軌道長半径依存性は論文Iの図3を参照されたい[1]。

惑星を中心とする共回転座標系から見ると、非摂動状態におけるガスの速度は $\tilde{\mathbf{v}}_{g,\infty} = (-3/2\tilde{x} - \tilde{M}_{\text{hw}})\mathbf{e}_y$ と書ける⁶。惑星とガスの軌道速度が一致する点をガスの共回転半径と呼ぶ。ガスの共回転半径の x 座標は $\tilde{\mathbf{v}}_{g,\infty} = 0$ とすることによって得られ、

$$\tilde{x}_{g,\text{cor}} = -\frac{2}{3}\tilde{M}_{\text{hw}}, \quad (24)$$

である。

4.1.1 3次元流体計算

図1に示した局所共回転座標において、原始惑星の近傍($\lesssim R_{\text{grav}}$)を細かく解像し、輻射冷却を考慮した3次元非等温流体計算を実施する。惑星質量 \tilde{m} 、及び向かい風のマッハ数 \tilde{M}_{hw} を様々変えたシミュレーションを行い、原始惑星周囲のガスの速度場、密度構造を得る[16]。ガス流れ場の構造は図4, 5に

⁶(9)式において $\tilde{S}t \rightarrow 0$ とした式であると言える。

示すが、詳細については筆者らの研究[6]、または論文Iを参照されたい[1]。以下で簡潔に流れ場の特徴をまとめる。ここで重要となる点は、惑星が受ける円盤ガスからの向かい風の寄与の程度に応じて、原始惑星が駆動するガス流れ場は「シア一流卓越形態」と「向かい風卓越形態」の異なる2つの形態に分類されることである。流れ場は、主に3種類の流線から成る。

(a) ケプラーシア一流線

惑星軌道の内外に存在する、惑星を通り過ぎていく流れ。惑星とともに回る局所座標系から見たとき、原始惑星系円盤ガスのケプラー回転を線形速度シアード近似できることは3.2小節で述べた通りである。

(b) ホースシュー流線

惑星の軌道運動方向に存在する。惑星の近傍でUターンカーブを描くような軌跡を辿る(本稿では、これをホースシューターンと呼ぶことにする)。ホースシュー流線は、ほぼ一定の幅を保ったまま鉛直方向に連なった柱状の構造をしている[5]。

(c) リサイクリング流線

惑星重力圏に流入・流出するガスの流線。惑星が受ける円盤ガスからの向かい風の寄与の大きさによって、「シア一流卓越形態(向かい風が弱いとき)」及び「向かい風卓越形態(向かい風が強いとき)」に分類される。シア一流卓越形態では惑星重力圏高緯度からのガス流入、円盤中心面からのガス流出が生じる。向かい風卓越形態では円盤中心面からのガス流入、惑星重力圏中～高緯度からのガス流出が生じる[4]。

4.1.2 ペブルの3次元軌道計算

得られた流体計算結果を用いて、ペブルの軌道を計算する。以下に手法の概略を示す。引き続き円軌道に固定された惑星を中心とする局所共回転座標系を考える(図1)。 x, y, z 軸は、それぞれ円盤動径方向、方位角(円盤回転)方向、鉛直方向を表す。先に導入した単位系において、無次元化したペブルの運動方程式は、

$$\frac{d\tilde{\mathbf{v}}}{dt} = \begin{pmatrix} 2\tilde{v}_y + 3\tilde{x} \\ -2\tilde{v}_x \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{\tilde{m}}{\tilde{R}^3} \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} + \tilde{\mathbf{F}}_{\text{drag}}, \quad (25)$$

と書ける。 \tilde{R} は惑星からの距離を表し、

$\tilde{R} = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}$ である。右辺第一項はコリオリ力と潮汐力⁷、第二項は惑星重力、第三項はガス抵抗を表し、

$$\tilde{\mathbf{F}}_{\text{drag}} = \begin{cases} -\frac{\tilde{\mathbf{v}}_p - \tilde{\mathbf{v}}_g}{\tilde{S}t/\tilde{\rho}_g}, & (\text{エプスタイン則}) \\ -\frac{\tilde{\mathbf{v}}_p - \tilde{\mathbf{v}}_g}{\tilde{S}t}, & (\text{ストークス則}) \end{cases} \quad (26)$$

と書ける。 $\tilde{S}t$ はパラメータで、軌道計算中は常に固定の値を用いる。(25)式を数値積分することにより、ある初期位置、あるストークス数に対するペブルの軌道を計算することができる。初期位置の \tilde{y} 座標は $\tilde{y}_s = |40\tilde{R}_{\text{Hill}}|$ とし[17]、初期位置の \tilde{x}, \tilde{z} 座標を様々変えて計算を行う。ペブルの初速度は(8)、(9)式で与える。

初期位置は惑星から十分離れた場所にあるため、ペブルをはじめ、流体シミュレーションによって流れを計算した領域($\lesssim 1-10\tilde{R}_{\text{Hill}}$)の外側を運動する。このときのガスの背景場としては、 $\tilde{\mathbf{v}}_g = \tilde{\mathbf{v}}_{g,\infty}$ を与える(円盤ガスへの惑星重力の影響を無視した非摂動流れ)。ペブルが流体シミュレーションによって流れを計算した領域内に入った時点から、流体計算によって得られたガスの速度・密度を用いて、(25)式のガス抵抗を計算する。なお、使用するガスの流れ場は流体計算から得られたデータで固定し、時間変化、及びペブルからガスへの反作用は考慮しない。また、計算はすべて局所座標で行い、ペブルが惑星に集積、または $|\tilde{y}| = 40\tilde{R}_{\text{Hill}}$ に達した時点で計算を終了し、その後の軌道は追跡しない。

以上の手法により、惑星が駆動するガス流がペブル集積に及ぼす影響を調べる。ただし、4.2.1、4.2.2小々節ではストークス数がガス密度に依存しない(ストークス則; (11)式)と仮定した場合の軌道のみを紹介する。エプスタイン則を適用した場合も軌道の特徴は変わらない。

⁷ここでは、乱流によるペブルの巻き上げと潮汐力の鉛直成分が釣り合っているとして、潮汐力の鉛直成分は無視した[7, 8]。

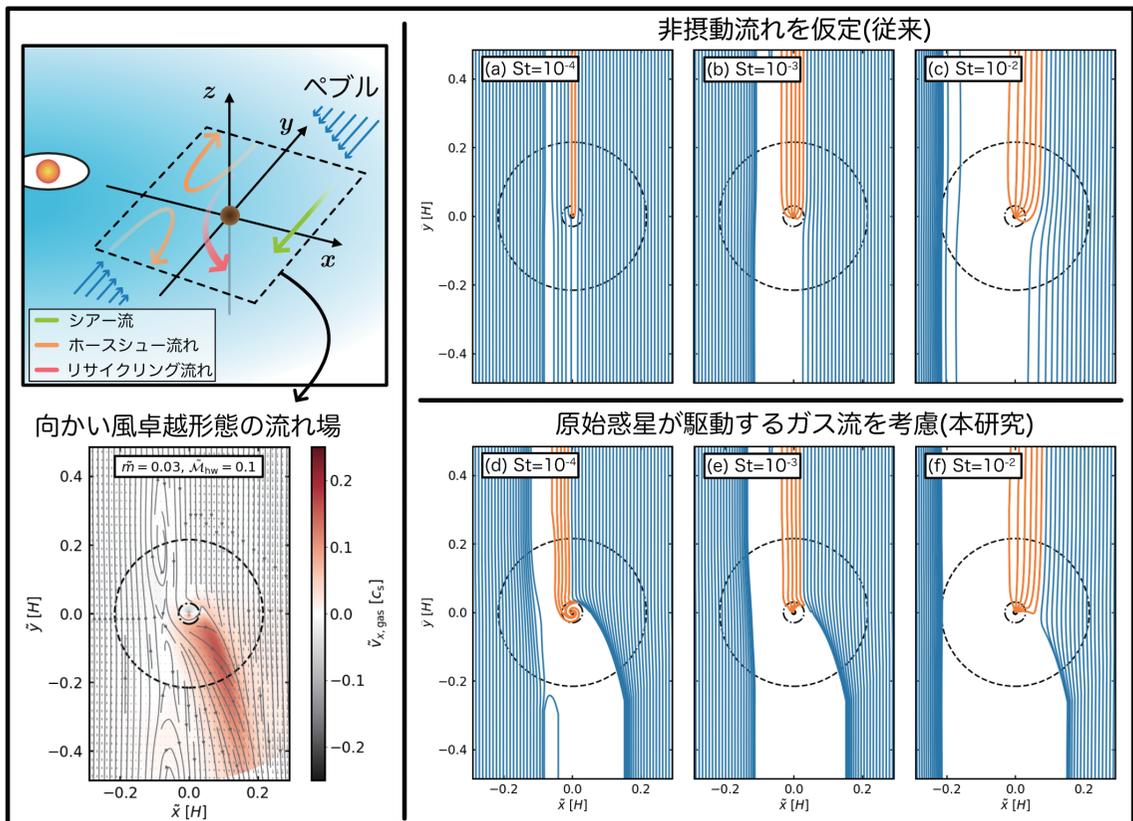


図5: 図4と同様。ただし、惑星質量、及び向かい風マッハ数は $\dot{m} = 0.03$, $\dot{M}_w = 0.1$ であり、惑星が駆動するガス流れ場は向かい風卓越形態にある。データはKuwahara & Kurokawa [8] で得られたものを使用。

4.2 結果

4.2.1 シアー流卓越形態の流れ場におけるペブル集積

惑星が受ける円盤ガスからの向かい風の寄与が小さいとき、すなわち、惑星が駆動するガス流れ場がシアー流卓越形態にあるときのペブルの軌道を見ていこう。図4に非摂動流れ、及び惑星が駆動するガス流中におけるペブルの軌道をそれぞれ示した。 $\dot{St} \gtrsim 10^0$ のとき、ペブルはガスの影響を受けにくいので、惑星が駆動するガス流中におけるペブルの軌道は、非摂動流れを仮定した場合とほぼ一致する(図4c, f)。

ストークス数が小さくなると、惑星が駆動するガス流の影響が顕著になる。ここでは、 $\dot{St} = 10^{-2}$ の場合を例に、シアー流卓越形態における軌道の特徴を見

ていこう(図4d)。

惑星軌道($\dot{x} = 0$)から十分離れた軌道半径($|\dot{x}| \gtrsim 1$; 図4d)にあるペブルは、ほぼシアー運動する((9)式)。この傾向は非摂動流れを仮定した場合と共通しているが、原始惑星が駆動するガス流中では惑星重力によってシアー流が惑星付近で曲げられるため、ペブルの軌道にもその特徴が現れている。

惑星軌道付近($|\dot{x}| \lesssim 1$; 図4d)から惑星に近づいてくるペブルはホースシュー流れの影響を受け、惑星重力圏に侵入することなく惑星から遠ざかっていく(ホースシューターンする)。この描像は非摂動流れを仮定した場合には見られない(図4a)⁸。

ケプラーシアー流れとホースシュー流れの間の狭い領域から惑星に近づいてきたペブルのみが惑星

⁸ストークス数が大きい場合の軌道にもホースシューターンが現れているが、これは中心星-惑星-ペブルの三体相互作用によって生じるものである(三体レジーム; 3.3小節)

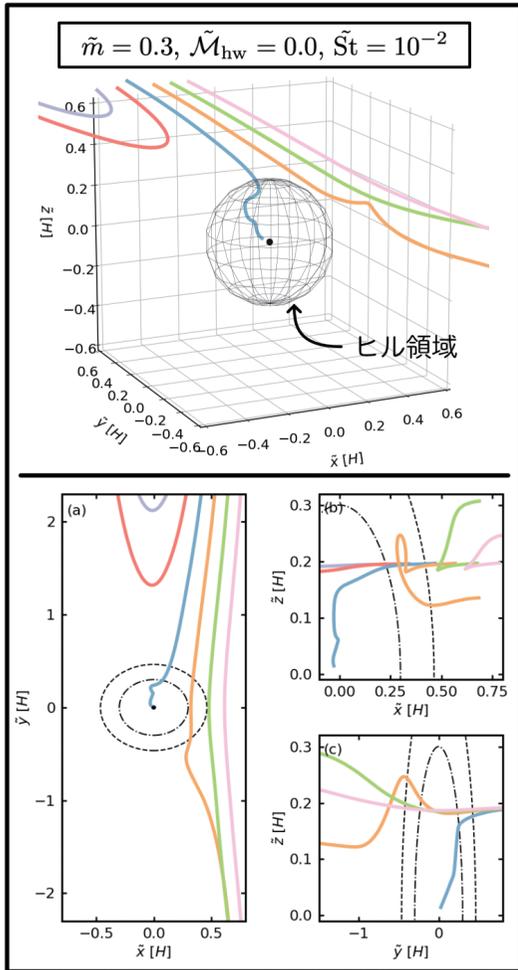


図6: シアー流卓越形態の流れ場中における3次元的なペブル ($\tilde{S}t = 10^{-2}$)の軌道。惑星質量, 及び向かい風マッハ数は $\tilde{m} = 0.3$, $\tilde{M}_{hw} = 0.0$ 。上: 3次元プロット。下: 軌道を各平面に投影した図。 \tilde{x} 軸: 円盤動径方向。 \tilde{y} 軸: 円盤回転方向。 z 軸: 円盤鉛直方向。それぞれ円盤のガススケールハイトで規格化。破線はヒル半径, 点破線はボンディ半径を表す。ペブルの初期位置の高度は $\tilde{z} = 0.2$ [H]とした。データは Kuwahara & Kurokawa [7] で得られたものを使用。

重力圏内に侵入し, 惑星に集積する。図4a, dを比較すると, 惑星が駆動するガス流を考慮した場合はペブルの集積断面積が大きく減少している事がわかる。なお, 図4d-fより, 集積断面積はストークス数が小さいほど小さくなるという明らかな傾向が見られる。惑星重力圏付近を運動するペブルに対しては, 重力圏付近からのガス流出が重要な役割を果たす(4.1.1小々節(c))。たとえ惑星重力圏内に侵入できた

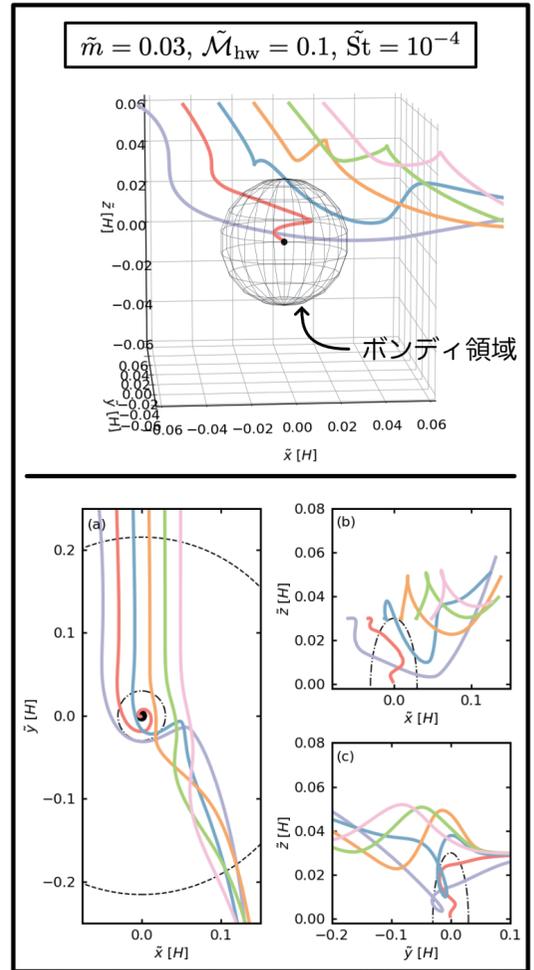


図7: 図6と同様。ただし, 向かい風卓越形態の流れ場中における3次元的なペブル ($\tilde{S}t = 10^{-4}$)の軌道を表す。惑星質量, 及び向かい風マッハ数は $\tilde{m} = 0.03$, $\tilde{M}_{hw} = 0.1$ の場合。データは Kuwahara & Kurokawa [8] で得られたものを使用。

としても, ガス流出によって軌道が大きくそらされ, 集積が妨げられる場合もある。これによって, 図4dの第2, 4象限に隙間が生じている。これは3次元流体計算によって得られた惑星近傍の複雑なガス流の影響を考慮することで初めて明らかになった特徴である⁹。

⁹シアー流卓越形態の流れ場では, 惑星重力圏高緯度からのガス流入によって, 円盤中心面からのガス流出が生じる。したがって, リサイクリング流れは純粋に3次元的な効果によって生じる。2次元ではリサイクリング流れが再現できず, よって惑星重力圏からのガス流出も存在しないので, 軌道に隙間は生じない[18]。

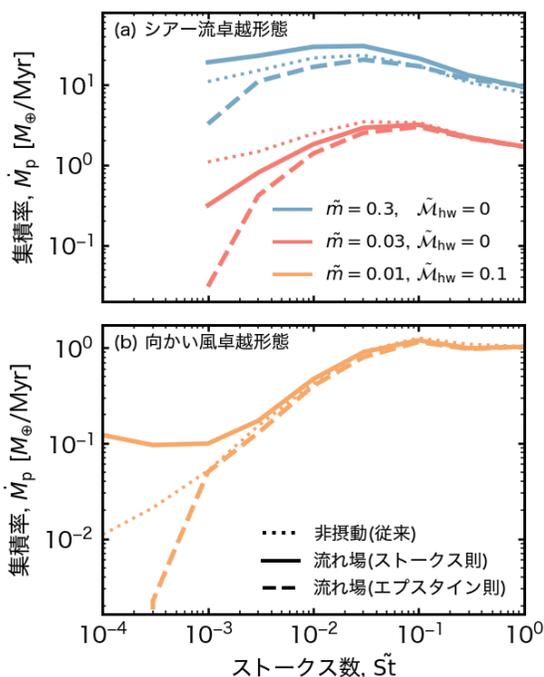


図8:ペブル集積率。(28)式を元に計算。その際、ペブル巻き上げに関する乱流強度は $\tilde{\alpha} = 10^{-3}$ とした。パネル(a)では $\text{St} < 10^{-3}$ の計算を行っていないため、データ点が存在しない。データはKuwahara & Kurokawa[7, 8]で得られたものを使用。

次に、惑星によって駆動されるガス流におけるペブルの3次元的な軌道に着目する($\text{St} = 10^{-2}$; 図6)。ペブルの軌道は、円盤中心面における軌道と共通した特徴を持つ。これは、惑星が駆動するガス流の鉛直構造に起因する。ホースシュー流線はほぼ一定の幅を保ったまま鉛直方向に連なった構造をしている[5]。そのため、ペブルが円盤中心面から離れた高度を運動している場合もまた、ホースシューターンの特徴が軌道に現れている(図6の赤、紫線)。

図6の黄色線はガス流出による軌道偏向を経験したペブルの軌道を表す。惑星重力圏からのガス流出は円盤中心面で最も卓越するが、鉛直方向にも広がりをもって流出する。典型的な幅は $\sim 0.5R_{\text{grav}}$ 程度である。そのため、円盤中心面における軌道ほど顕著ではないものの、高高度を運動するペブルの軌道にもガス流出の影響が軌道に現れる[7]。

円盤中心面では見られなかった特徴として、ケプラーシアー流れとホースシュー流れに挟まれた狭い

領域を通して惑星に近づいてきたペブルが、惑星重力圏近傍で惑星に向かって急激に降下している様子が確認できる(図6の青線)。これは、惑星重力圏の極付近で生じる惑星重力圏へのガス流入が影響している(4.1.1小々節(c))。

リサイクリング流に巻き込まれたペブルは惑星重力圏に突入する。このとき、惑星重力圏内のガスは惑星周りをゆっくりと回転している。遅く回転する理由は、惑星重力圏内では静水圧平衡を保つためにガス密度が急激に増加するためである。この遅い流れ場にペブルが突入すると、ペブルとガスの相対速度が増加、すなわち強いガス抵抗を受けてペブルは急激に減速する。これにより遭遇時間((12)式)が増加し、沈殿条件が満たされやすくなるため、ペブルは惑星に集積する。

円盤中心面付近ではガス流出によってペブル集積が妨げられることは先に述べた。しかし、ガス流出の鉛直スケールは $\sim 0.5R_{\text{grav}}$ なので、それよりも上空から惑星に近づくペブルの集積はガス流出の影響を受けにくい。惑星によって駆動されるガス流がシアー流卓越形態にあるとき、ガス流出の鉛直スケールよりも高高度の領域が、いわば惑星に向かって近づいてくるペブルにとっての「窓」となり、高高度における集積幅は円盤中心面におけるそれと比べてやや広がるのが筆者らの研究から明らかになった[7]。

ただし、リサイクリング流に巻き込まれたペブルが最終的に惑星に集積するかどうかは実効的なストークス数に依存する。ガス抵抗則としてエプスタイン則((10)式)を適用すると、惑星重力圏内のガス密度は惑星に近づくほど指数関数的に増加するため、実効的なストークス数が指数関数的に減少する。このとき、ガスと強く結合したペブルがガスとともに惑星重力圏外へと流出し得る。実際、エプスタイン則を適用した場合は集積率が大幅に減少する(後述; 4.2.3小々節)。

4.2.2 向かい風卓越形態の流れ場におけるペブル集積

惑星が受ける円盤ガスからの向かい風の寄与が大きいつき、すなわち惑星が駆動するガス流れ場が向かい風卓越形態にあるときのペブルの軌道を見ていこう。まずは円盤中心面における軌道に着目する。

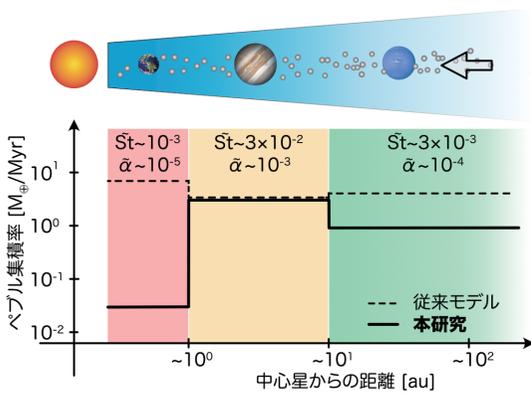


図9: 円盤の各領域におけるペブル集積率. 集積率の計算にあたり, $\tilde{m} = 0.03$ の惑星を仮定した. Kuwahara & Kurokawa [7] を元に改変して掲載.

図5 に非摂動流れ及び惑星が駆動するガス流中におけるペブルの軌道をそれぞれ示した.

$\tilde{St} = 10^{-4}$ の場合を例に, 向かい風卓越形態における軌道の特徴を見ていこう(図5d). まず, 惑星軌道($\tilde{x} = 0$)から離れた軌道半径にあるペブルは($|\tilde{x}| \gtrsim 0.2$; 図5d), ほぼシアー運動する. この傾向は非摂動流れを仮定した場合と共通している.

惑星軌道の少し内側($\tilde{x} \sim -0.1$; 図5d)では, 非摂動流れを仮定した場合には見られなかったペブルのホースシューターンが現れている. ホースシュー軌道が惑星軌道内側で見られるのは, 向かい風の寄与が強まるにつれ, ガスの共回転半径((24)式)とともにホースシュー流れも中心星側(惑星軌道内側)によるためである. 惑星軌道のやや外側($\tilde{x} \sim 0.1$; 図5d)では, ガス流出によってペブルの軌道がそらされている.

惑星軌道と重なるような軌道半径を運動するペブルが惑星に集積する¹⁰. 図5a, dより, 惑星が駆動する流れ場を考慮した場合の方が集積断面積が増加することがわかった. これは, リサイクリング流に巻き込まれたペブルが惑星に集積するためである(4.2.1小々節).

次に, 惑星によって駆動されるガス流中におけるペブルの3次元的な軌道に着目する(図7). リサイク

¹⁰ ストークス数が小さいときの傾向. ストークス数が大きくなると, 三体相互作用が効き始めるので, 惑星軌道付近ではホースシューターンが現れる. したがって, 集積断面積は惑星軌道から離れた場所に位置する.

リング流れが生じるような, 鉛直方向に $\sim R_{\text{grav}}$ の範囲に着目したとき, 惑星軌道付近におけるペブルの軌道は円盤中心面のもとの似た特徴を持つことがわかった. 流れ場が向かい風卓越形態にあるとき, ガスは惑星重力圏の中～高緯度から流出する. このため, ガス流出によってペブルがより高高度へと巻き上げられている様子も見られる(図7の赤線以外).

ペブルが円盤中心面から離れた高度を運動する場合も, リサイクリング流に巻き込まれたペブルの一部が惑星に集積する(図7の赤線). ペブルは惑星重力圏内に突入後, 惑星を周回しながら惑星に近づき, 最終的には強い重力を受けて惑星に集積する. 図7では $\tilde{St} = 10^{-4}$ という小さなストークス数を仮定したが, 惑星重力圏内ではガスとは異なる速度で運動することがわかった[8]. これにより, 非摂動流れを仮定した場合に比べ, 集積断面積が増加することがわかった[8].

4.2.3 原始惑星が駆動するガス流中におけるペブル集積率

ここまで, 惑星が駆動するガス流れ場がペブル集積に及ぼす影響を, 主に軌道に着目して議論してきた. 本小々節では, 軌道計算結果を元にペブル集積率を見積もる.

4.2.1, 4.2.2小々節の内容を振り返ると, 大まかな傾向として, 非摂動流れを仮定した場合に比べてシアー流卓越形態の流れ場中では集積断面積が狭まり(図4), 向かい風卓越形態の流れ場中では広がる傾向が見られた(図5). しかし, この結果を集積率に焼き直す場合は注意が必要である. ペブル集積率は惑星への集積が可能な範囲を通過するペブルの質量フラックスとして定義され, すなわち

$$\dot{M}_p = \int_{\text{集積断面積}} \rho_p v_{p,y} dx dz, \quad (28)$$

と書ける. したがって, \dot{M}_p は $v_{p,y}$ に依存することに注意する必要がある.

図8に, 筆者らの研究[7, 8]に基づいて得られたペブル集積率を示した. まず, ストークス数がガス密度に依存しない場合を見る(ストークス則; 図8の実線).

図8aは, 流れ場がシアー流卓越形態にあるときの集積率の惑星質量及びストークス数依存性を

示す。 $\tilde{m} = 0.03$ (図8の赤線) のとき、 $\tilde{St} \lesssim 10^{-2}$ において、 \dot{M}_p は非摂動流れを仮定した場合に比べて小さくなることがわかった。これは、惑星が駆動するガス流によって集積断面積が減少したためであると直感的に理解することができる。このパラメータセットの場合はその理解で問題はない。

一方、 $\tilde{m} = 0.3$ のときは、惑星が駆動するガス流を考慮した場合のほうが \dot{M}_p は大きくなっている。これは次の理由による。惑星が駆動するガス流を考慮したとき、ペブルはケプラーシアー流れとホースシュー流れに挟まれた狭い領域を通して惑星に集積する(4.2.1小節; 図4)。すなわち、非摂動流れを仮定した場合と比べて、惑星の軌道半径よりも遠い軌道半径を運動するペブル ($|v_{p,y}|$ が大きい) が集積する。このため、集積断面積の減少が相対速度の増加によって打ち消される。結果、 $\tilde{m} = 0.3$ の場合は正味で \dot{M}_p が増加する。ホースシュー領域の幅は惑星質量とともに増加する[30]。 $\tilde{m} = 0.03$ のときは、ホースシュー領域の幅が狭いため、集積断面積の減少分を打ち消しきれず、結果正味で \dot{M}_p は減少していたのである。

図8bは、流れ場が向かい風卓越形態にあるときの結果を表す。 $\tilde{St} \lesssim 10^{-3}$ のとき、 \dot{M}_p は非摂動流れを仮定した場合と比べて大きくなる(図8bの実線)。集積断面積の位置は変わらない一方(図5)、その大きさは増加するので、集積断面積の変化が \dot{M}_p の変化に直接反映されている。

ストークス数がガス密度に依存するとき(エプスタイン則; 図8の破線)、ストークス数が小さい場合 ($\tilde{St} \lesssim 10^{-3}$) は、流れ場の形態によらず \dot{M}_p は従来の見積りよりも小さくなった。惑星重力圏内での急激なガス密度の増加に伴い実効的なストークス数が桁で減少するため((26)式)、ペブルはほとんどガスと一体となって運動するようになり、惑星周囲を流れるガスによって運ばれ、集積断面積が大幅に減少するからである(4.2.1小々節)。

4.3 惑星系形成への示唆

惑星が駆動するガス流は、ペブル集積に影響を及ぼす。この事実がペブル集積モデルに基づく惑星系形成理論にどのような影響を及ぼすかについての議論を以て、本稿を締めくくりたいと思う。重要となる要素は、以下の2点である: (1) 惑星が駆動する流れ場

は2形態存在する。(2) 惑星が駆動する流れ場はストークス数が小さいペブルに対して強く影響する。

前者について、流れ場の形態変化は向かい風の寄与によって決まる。円盤モデルの例として最小質量円盤を仮定すると[9]、向かい風のマッハ数は軌道長半径の増加に伴って強まるので¹¹、円盤内側領域ではシアー流卓越形態の流れ場(小さなペブルの集積を抑制する)、円盤外側領域では向かい風卓越形態の流れ場(小さなペブルの集積を促進する)と大雑把に言い換えることもできる¹²。

後者について、円盤内に存在する粒子のサイズについては理論的・観測的な制約がなされる。たとえば水スノーラインより内側に存在する固体物質は主に衝突によってくっつきにくく成長しにくいシリケート粒子からなると考えられるため、粒子のストークス数は小さくなる[e.g., 19]。一方、水スノーラインよりも外側では、氷をまとった粒子はくっつきやすいという性質からストークス数は大きくなる。従って、惑星が駆動する流れ場の影響は、円盤内側領域においてペブル集積の抑制という形で顕著に現れる可能性がある。

また、ペブル集積率は円盤乱流の強さにも依存する(3.5小節)。惑星が円盤中心面に位置している場合、乱流によるペブルの中心面からの巻き上げが大きければ、ペブル集積率は低下する。筆者らは、理論・観測から予測される円盤内の粒子サイズ分布[19]及び乱流強度分布[20, 21]を用いて、各領域におけるペブル集積率を見積もった(図9)。その結果、従来の見積もりに比べ、円盤内側領域における惑星の成長が強く抑制され得ることを示した。

この結果を元に、系外惑星分布について議論する。観測から、太陽型星の約半数が短周期スーパーアースを持つことがわかっている[22, 23]。短周期スーパーアースは、軌道周期が $\lesssim 85$ 日、半径が $\sim 1-4 R_{\oplus}$ (R_{\oplus} は地球半径)、質量が $\sim 2-20 M_{\oplus}$ であるような惑星のことを指す。また、太陽型星の約1%がホットジュピター ($\lesssim 0.1$ au に存在) を、約10%がコールドジュピター ($\sim 1-10$ au に存在) を有する[24,

¹¹より一般的には、円盤の温度分布が $T \propto r^{-q}$ と表せるとき、 $q < 1$ となる円盤モデルであれば同様のことが言える。

¹²惑星質量を固定した場合、惑星質量が大きいと、向かい風卓越形態に移行するために必要な向かい風の強さもまた大きくなるため、円盤外側領域でもシアー流卓越形態の流れ場は容易に駆動され得る[8]。

25]. これらの惑星は半径が $\sim 10\text{--}20 R_{\oplus}$ 、質量が $\geq 100 M_{\oplus}$ の巨大惑星である。惑星がペブル集積によって成長すると仮定すると、惑星が駆動するガスの流れ場を無視した場合は円盤の幅広い領域で高い集積率が達成される(図9の破線)。結果、惑星は暴走的なガス降着が生じるとされる臨界コア質量に達し($\sim 10 M_{\oplus}$; [26]), 至るところで巨大惑星が作られる可能性がある。

一方、惑星が駆動する流れ場を考慮すると、粒子のストークス数が小さいと考えられる円盤内側領域でペブル集積が抑制される(図9の実線)。筆者らの研究[1, 6] から、惑星が駆動するガス流によるペブル集積抑制は $\dot{m} \geq \sqrt{\dot{\Sigma} t}$ のときに有効に機能することが示されている(ガス流出障壁; 論文Iの(29)式を参照[1])。円盤内側領域におけるストークス数を $\dot{\Sigma} t \sim 10^{-3}$ とすると、原始惑星の質量が $\dot{m} \sim 0.03$ ($\sim 0.3 M_{\oplus} (a/1 \text{ au})^{3/4}$)に達した段階でガス流出障壁によるペブル集積抑制が機能し始め、原始惑星の成長は抑制される。これらの小質量惑星は暴走ガス降着を免れることができるので、円盤ガス散逸後、系の内側領域には小質量の岩石惑星が残ることになるだろう。またこれらの小質量惑星が軌道不安定を引き起こし巨大衝突を経験すれば、最終的にスーパーアース質量天体が形成される可能性がある。従って惑星が駆動する流れ場は、系外惑星分布にみられる偏り——中心星近傍には短周期スーパーアースなどの小質量惑星が豊富に存在し、遠方にはコールドジュピターなどの大質量惑星が多く存在するといった惑星系の姿を決定づける要因の一つとなっているかもしれない。

5. まとめと今後の展望

本稿では、惑星が駆動する3次元ガス流がペブル集積に及ぼす影響について、筆者らが中心となって進めてきた一連の研究成果をまとめた[6-8]。近年、惑星形成理論において、kmサイズの微惑星集積による惑星形成モデルに代わり、 $\sim \text{mm}\text{--}\text{cm}$ サイズの粒子(ペブル)集積による新たな惑星形成モデルが盛んに議論されている。ペブル集積モデルは、従来の微惑星集積モデルでは説明が困難な点を克服できる可能性がある。ペブル集積モデルと微惑星集積

モデルの大きな違いは、ペブルが惑星との重力相互作用の他に、原始惑星系円盤ガスの抵抗を受けながら運動するという点にある。従って、ペブル集積による惑星形成を考える際は、円盤ガスの影響を考慮することが極めて重要になる。従来のペブル集積モデルの大半は、惑星重力による摂動を受けていないガスの流れを仮定した上で議論されてきた。しかし、最新の3次元流体計算から、形成途中の惑星の周囲には惑星重力によって駆動される3次元的なガス流れ場が存在することが明らかになった[e.g., 4]。この流れ場はペブル集積に影響を及ぼす可能性がある[1]。

筆者らは、まず惑星周りの円盤ガス流についての3次元流体計算を実施した。そして、流体計算結果を元に、惑星重力によって駆動されるガス流の影響を考慮してペブル軌道計算を行った。軌道計算結果から、惑星重力によって駆動されるガス流中におけるペブルの軌道は、従来仮定されていた非摂動流れにおけるそれとは大きく異なることがわかった。より小さなペブルはガスの影響をより強く受けるため、惑星重力によって乱された流れの影響が重要になる。惑星によって駆動されるガス流れ場中におけるペブル集積率は、従来の見積もりに比べ $\sim 1\text{--}2$ 桁増減することがわかった。惑星が駆動するガス流中におけるペブル集積率を解析的に見積もる研究も行われ始めている[27]。今後、ペブル集積モデルに基づく惑星形成を議論する際は、惑星重力によって摂動を受けた流れ場の影響の考慮が不可欠になる。

本稿では円軌道に固定された惑星を考えたが、惑星が離心率を持っている場合にも特徴的な流れ場を形成することがわかってきている。先行研究の2次元流体シミュレーションから、惑星の軌道運動方向の後方に卵型の流線の特徴づけられるガスの流れが存在することが明らかになった[28]。離心率を持った天体へのペブル集積過程について調べた先行研究は僅かであり[29]、流れ場を考慮した場合の影響についても未解明である。また、惑星によって駆動された流れ場の影響は、単に集積率に影響を及ぼすだけにとどまらない。流れ場があることによって惑星とペブルのぶつかり方そのものが変化するため、ペブルが惑星に与える自転角運動量にも影響が出る可能性がある。惑星が駆動するガス流れ場は惑

星重力圏付近の局所スケールで生じる現象だが、この流れ場が円盤内に存在するダストのグローバルな空間分布に影響を及ぼす可能性も浮かび上がっている。円盤ガス及びダストの観測を行うことによって、円盤内に埋没した小質量惑星の存在を間接的に示すことが出来るかもしれない。

6. 謝辞

本稿を執筆するにあたり、お声がけくださった編集委員の荒川創太氏、及び野津翔太氏に感謝いたします。本稿は、筆者が第一著者である参考文献[6], [7], 及び[8]の内容から主に構成されています。これらの研究の共同研究者である井田茂氏、黒川宏之氏の両氏に深く御礼申し上げます。そして、本稿の査読者である武藤恭之氏には、極めて丁寧な査読をして頂きました。この場を借りて感謝致します。流体計算については国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの共同利用計算機Cray XC50 を用いて行われました。本研究はJSPS科研費15H02065, 16H04073, 17H01175, 17H06457, 18K13602, 19H01960, 19H05072, 20J20681の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 桑原歩, 2022, 遊星人 31, 188.
- [2] Ormel, C. W. and Klahr, H. H., 2010, *Astron. Astrophys.* 520, A43.
- [3] Lambrechts, M. and Johansen, A., 2012, *Astron. Astrophys.* 544, A32.
- [4] Ormel, C. W. et al., 2015, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 446, 1026.
- [5] Fung, J. et al., 2015, *Astrophys. J.* 811, 101.
- [6] Kuwahara, A. et al., 2019, *Astron. Astrophys.* 623, A179.
- [7] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., 2020a, *Astron. Astrophys.* 633, A81.
- [8] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., 2020b, *Astron. Astrophys.* 643, A21.
- [9] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, 1100.
- [10] Nakagawa, Y. et al., 1986, *Icarus* 67, 375.
- [11] Ormel, C. W., 2017, *Astrophys. Space Sci. Lib.* 445, 197.
- [12] 井田茂, 2007, 系外惑星 (東京大学出版会).
- [13] Youdin, A. N. and Lithwick, Y., 2007, *Icarus* 192, 588.
- [14] Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A., 1973, *Astron. Astrophys.* 24, 337.
- [15] Ormel, C. W. and Liu, B., 2018, *Astron. Astrophys.* 615, A178.
- [16] Kurokawa, H. and Tanigawa, T., 2018, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 479, 635.
- [17] Ida, S. and Nakazawa, K., 1989, *Astron. Astrophys.* 224, 303.
- [18] Ormel, C. W., 2013, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 428, 3526.
- [19] Okuzumi, S. and Tazaki, R., 2019, *Astrophys. J.* 878, 132.
- [20] Malygin, M. G. et al., 2017, *Astron. Astrophys.* 605, A30.
- [21] Lyra, W. and Umurhan, O. M., 2019, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 131, 072001.
- [22] Fressin, F. et al., 2013, *Astrophys. J.* 766, 81.
- [23] Weiss, L. M. and Marcy, G. W., 2014, *Astrophys. J.* 783, L6.
- [24] Johnson, J. A. et al., 2010, *Publ. Astron. Soc. Pac.* 122, 905.
- [25] Fernandes, R. B. et al., 2019, *Astrophys. J.* 874, 81.
- [26] Mizuno, H., 1980, *Prog. Theor. Phys.* 64, 544.
- [27] Okamura, T. and Kobayashi, H., 2021, *Astrophys. J.* 916, 109.
- [28] Mai, C. et al., 2020, *Astrophys. J.* 899, 54.
- [29] Liu, B. and Ormel, C. W., 2018, *Astron. Astrophys.* 615, A138.
- [30] Masset, F. S. and Benítez-Llambay, P., 2016, *Astrophys. J.* 817, 19.

著者紹介

桑原 歩



東京工業大学 理学院 地球惑星
科学系 及び 東京工業大学 地
球生命研究所 博士後期課程3
年. 日本学術振興会特別研究員
(DC1). 専門は惑星形成論. 日本
天文学会, 日本惑星科学会, 日本

地球惑星科学連合に所属.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その27 ～はやぶさ2ミッションを振り返って～

佐伯 孝尚¹

(要旨) はやぶさ2は、2019年2月22日と7月11日の2回リュウグウの試料を採取し、それを2020年12月6日に地球へ届けることに成功した。その後、リュウグウの試料の分析が着々と進み、科学成果が次々と発表されていく中、はやぶさ2プロジェクトチームは2022年6月末にて解散となった。2011年のプロジェクト化からでも、10年以上という長期間の活動となったはやぶさ2について、プロジェクトチームの一員として名を連ねていた筆者の視点で振り返り、過去を懐かしむとともに、長い活動の中で得られた教訓等についてまとめる。

1. はじめに

2020年12月5日、私は宇宙科学研究所のセキュリティエリアの中にある管制室内にいた。リュウグウの試料の入った大事なサンプルリターンカプセルを分離するための運用の最中である。やり直しができない運用であることもあり、管制室内も緊張感が漂っていた。困難なプロジェクト立ち上げ、厳しいスケジュールの中での開発を経て打ち上げられたはやぶさ2の集大成の運用である。打ち上げ後も、往路巡行/小惑星到着フェーズ、小惑星近傍フェーズ、復路巡行/精密誘導フェーズと、数多くの苦しい場面をチームメンバ皆で繋いできた「櫛」をカプセルチームとその後の回収チームに渡す時がついにやってきたのだ。

私は2018-2019年の小惑星近傍運用フェーズの大変な時期を思い出しながら、「ここまで来て分離しないってことないですよねぇ。分離してからもちゃんと飛びますよねぇ(ニヤニヤ)」とカプセルチームに話しかける。櫛とともに蓄積された積年のプレッシャーも忘れずに渡すためだ。担当の一人は、「(必ず最後の最後で最大のプレッシャーを受ける)カプセル二度と

やらねえ」と言いつつも、この日のために(開発も含め)準備はしっかりとやってきているぞ、という自信に溢れた顔をしていた。私もそんなカプセルチームを信頼し、運用の成功を確信していた。

「3, 2, 1, 0分離」日本時間14:30カプセル分離コマンドが実行された。分離はすぐに確認された。皆がホッとする中、私は続く探査機の地球再離脱に向けた指示を出した。はやぶさ初号機では、エンジンの故障のため出来なかった運用である。はやぶさ2は15:30から3回に分け、合計12m/sの速度変更を行い、地球をスイングバイして再離脱する軌道に入った。はやぶさ2の拡張ミッションに櫛を繋ぐことができたのだ。ここで私は一息ついて10年前を思い出していた。

2010年6月13日、はやぶさ初号機は、満身創痕ながら地球まで約7万kmの距離でカプセルの切り離しを行い、最後の地球撮像を終え、地球の大気圏に突入した。当時私はIKAROSという探査機の運用の最中であったが、はやぶさの運用の様子が気になって見ていたのだ。学生時代の恩師でもある、はやぶさプロジェクトマネージャ川口氏とチームの皆のやり遂げた表情は、なんとも清々しく格好良かったことか。こういう仕事をいつかしてみたいと思っていたが、まさか10年後に自分が管制室ではやぶさ2の帰

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

還に立ち会えるとは当時は想像もしていなかった。このように思い返すと、糧は、はやぶさ2のずっと前から繋がられてきたのだと実感した。

カプセルの地球帰還から1年半の2022年6月末で、はやぶさ2プロジェクトチームは解散になった。予想を超える5.4gものリュウグウのサンプルの分析は、今後も世界中で行われ、我々に次々と新しい発見をもたらしてくれるだろう。私は、10年以上の期間にわたって、はやぶさ2に微力ながら尽力させていただいたこともあり、成功裡にプロジェクトが終わったことにホッとしつつ、ある種の喪失感を感じている。今回ご縁があってこのような執筆の機会をいただいたこともあり、はやぶさ2プロジェクトについて振り返りをさせていただこうと思う。自分語りの拙い文章であるが、ご容赦いただきたい。

2. はやぶさ2プロジェクト化と開発フェーズ

2.1 はやぶさ2のプロジェクト化

私は、宇宙科学研究所で修士・博士課程を過ごし、ポストドクとメーカ勤務を経て、2009年7月に、宇宙科学研究所に赴任した。新天地での活動に夢を膨らませているところに、当時の上司でもあり恩師でもあった川口氏に「佐伯くん、いま暇だね。はやぶさ2やらない?」と言われた。疑問形であってもこれは強制である。こうして、私のはやぶさ2への参加が光の速さで決まったのである。当時、吉川氏を中心に、はやぶさ2は立ち上げに向けての準備を行なっているところであったが、状況はあまり良いものではなかった[1]。はやぶさ初号機と違いを出すために検討されていた、探査機を小惑星にぶつけるという独立インパクトという構想は、コストが問題視されており、低コストで小惑星の地下にアクセスする手法について検討をしているところであった。私はその担当になった。私は当時32歳で、本格的な探査ミッションに携わるのは初めてであった。右も左も分からない中、メーカ含めたミーティングを何度も行なって、爆薬を使用して衝突体を高速射出する小型インパクトという方法に辿り着いた。2009年10月には、後のパートナーとなる日本工機の白河製造所において超

小型供試体を用いた衝突体の飛翔実験を行ない、実現に向けて手応えを得た。その後も細々と検討を進めている中、2010年6月13日のはやぶさの地球帰還が大きな注目を集めることになり、はやぶさ2のプロジェクト化の動きが急加速し、2011年5月に正式なプロジェクトとなった。

2.2 衝突装置の開発

私は正式に、新規機器となる衝突装置(Small Carry-on Impactor: SCI)の開発責任者となり、開発体制を整えていった。JAXA側は私を開発責任者とし、メーカ側の体制としては、IHIエアロスペース、NEC、日本工機の3社の体制となった。ありがたいことに、私が未熟なことを考慮してか、メーカのメンバは所謂プロであり、経験豊かな方々で構成されていた。経験の浅い私は、おかしなことも多々言ったと思うが、粘り強く丁寧に議論していただいた。逆に私は、自身の専門外の設計について、その「こころ」を学ぶように心がけ、少しでもついていこうとした。今思えば、開発責任者にいただいたことで、自身の判断が物事を左右するという実践の場を与えてもらい、その中で百戦錬磨のメーカの方々に鍛えてもらったのだと思う。困ったことがあって色々な専門家に相談した時も、丁寧に教えてもらった。このように、実際の現場におけるOn the Job Trainingによって私自身が成長し、技術についても多少なりとも引き継ぐことができたと思う。

衝突装置の開発自体は、楽しくもあり非常に苦しくもあった。とにかくスピード重視で、システムを簡易なものにするように設計したのだが、新機開発器であることもあり、スケジュールが厳しかった。自分達のせいで打ち上げを遅らせるわけにはいかないと必死であった。おそらく探査機開発に携わった全ての方々が同様の気持ちであっただろう。誰が最初にグブアップを言い出すのかという、さながらチキンレースのような開発であったと思う。

困難な開発であったが、チームの雰囲気は非常に良かったと思う。私とコンビを組んでくれた今村氏を筆頭に、明るい人が多く、また妥協を許さないメンバばかりであったので、トラブルが起こっても悲観的にならず解決策を考え、一步一步着実に開発を進めていった。非常に苦労した分離試験を含む種々の開発



図1: 2013年秋の衝突体飛翔試験完了時の集合写真(画像のクレジット: JAXA).



図2: 衝突体飛翔試験で生成された直径2m程の浅いクレータ(画像のクレジット: JAXA).

試験をクリアしていき、2013年秋にはフライト品と同等な供試体を用いた衝突体の飛翔試験を岐阜県で実施し、設計通りの性能が出ていることを確認した(図1)。ちなみに、この試験の時に作られたクレータは心配になるくらい小さく、これが2019年の本番まで私の頭から離れず、私のメンタルを削り続けるのであった(図2)。ともあれ、チームメンバの必死の努力により、何とか衝突装置を種子島に送るところまでこぎつけた。

3. はやぶさ2の打ち上げ

3.1 フライトオペレーション

2014年の9月から種子島で打ち上げに向けた最終工程(フライトオペレーション)が始まった。衝突装置は、探査機本体より先に種子島に到着し、9月半ばから最終の整備を開始した。ここまでくれば順調にいくだろうと思っていたが、9月某日の私の38歳の誕生日は祝われることなく、種子島宇宙センターでの作

業と打ち合わせで消えていった。それでも、何とか9月27日に最終整備を完了した(図3)。探査機の方の作業も着実に行われ、衝突装置は探査機に組み付けられ、10月末には大量の爆薬を持つ爆薬部が探査機に取り付けられた。気の弱い私は、以降、はやぶさ2が打ち上がるまでハラハラしていたことは言うまでもない。11月11日に打上前最終確認会が実施され、その後ロケットに引き渡された。

本稿は筆者の視点から、衝突装置の開発にフォーカスしているが、はやぶさ2の困難な開発をやり遂げた開発チームの全ての方々に改めて敬意を表したい。

3.2 はやぶさ2宇宙へ

はやぶさ2の打ち上げは元々2014年11月30日に予定されていたが、天候の関係で12月3日に延期された。探査機を立ち上げ、種々の設定を行ない、最終確認の後にプロジェクトマネージャの國中氏からチームメンバへ言葉が伝えられる。

「ここまで地上におけるシステム開発、大変どうもありがとう」

「これから小惑星探査機はやぶさ2を発進させる。そして、再び地球に戻ろう」

自分は、大変だった開発フェーズを乗り切ったことに感慨に耽りながら、はやぶさ2のこれからの長い道のりを想像し、何故だか身震いがした。

日本時間13:22:04にH-II Aロケット26号機によって、はやぶさ2は宇宙に旅立った。打ち上げ方法は特殊で、リフトオフからはやぶさ2の分離までが非常に長かった。探査機は分離後、自動で太陽捕捉を行った後、太陽電池パネルを展開する。これが探査



図3: 衝突装置最終整備完了時の集合写真(画像のクレジット: JAXA).



図4:打ち上げ直後の管制室の様子(画像のクレジット: JAXA).

機にとっての第一関門なのだが、分離後の最初のテレメトリで予定通りシーケンスが完了していることを確認してホッとした(図4)。その後、日本局の最初の運用で探査機の姿勢確立等を行なった。私はその後の海外局運用の担当(スーパーバイザ)であったが、日本局の運用が終わると、ほぼ全ての人がいなくなるとても心細い思いをした記憶がある。ともあれ、はやぶさ2は無事打ち上げられ、長い旅が始まった。

4. 往路巡行フェーズ

4.1 体制変更

探査機の機能を軌道上で確認する初期運用を終えたころ、プロジェクトマネージャの國中氏が突然部屋にやってきて「佐伯、プロジェクトエンジニアをやってもらうから」と告げた。プロジェクトマネージャが國中氏から津田氏に交代になるのに伴い、津田氏が担当してきたプロジェクトエンジニア(システム取りまとめ)をやれと言うのだ。全くの寝耳に水であり、自信もなかったので「無理です。手に余ります」と返答したものの、「もう決まっているから」と押し切られた。衝突装置の担当になったときと同様に半ば強引に決まってしまった。

2015年4月、津田氏をプロジェクトマネージャとした新しい体制でははやぶさ2運用チームが正式に動き出した。運用チームの業務は、主に、探査機の日々の運用を確実にこなしていくことと、小惑星1999 JU3到着後の運用の計画をたてることの2本立てであった。前者は、有志で組織されるスーパー

バイザを中心に、システムや姿勢系の担当がサポートを行いながら実施する。小惑星到着までに、探査機の癖を掴み、使い倒せるように慣れておく必要がある。また、後者のために、小惑星近傍フェーズ運用検討チーム(Proximity Phase Planning Team: P3T)を組織した。ちなみにP3Tは復路・帰還フェーズではP4T、拡張ミッションではP5Tとなぜか数字がインクリメントされ、運用検討を行うチームとして存続している。

4.2 往路巡航運用

往路運用の主役は、軌道計画・軌道決定およびイオンエンジンチームである。はやぶさ2は低推力のイオンエンジンを使用した軌道制御を行うため、事前に綿密な軌道計画が立案され、それに従いイオンエンジンを正確に噴射する。決められた方向に、決められた力積を出すように厳密な管理が必要である。また、軌道決定によって探査機の位置速度は定期的に推定され、それに基づいて軌道計画を立案し直すというループが常に行われていた。

往路運用の最初の山場は、2015年12月3日の地球スイングバイであった。イオンエンジンによる軌道制御と、その後の化学推進系を用いた精密な誘導によりはやぶさ2は高度約3000kmの地点を通過し、リュウグウという名前がつけられた天体に向かう軌道に入った。その後のイオンエンジンによる軌道制御も非常に順調であった。これにより、チームは日々の運用に忙殺されることなく、小惑星近傍運用の計画検討にエフォートを割くことができた。そういう意味で、軌道計画・軌道決定およびイオンエンジンチームは間違いなく後の小惑星近傍運用の成功の立役者であった。

4.3 小惑星近傍フェーズ計画

新体制になってすぐに、我々は小惑星近傍フェーズの計画の詳細化にとりかかった。それにあたり、私は自分の中で大方針を決めていた。それは、安易に「はやぶさの時はどうしていたか」ということに頼るのではなく、自分たちなりのやり方でやってみるということであった。探査機製造は脈々と受け継がれた職人の技を最大限に活用し成し遂げたが、探査機運用は自分たちこそが探査機に魂を入れるというつも

りであった。そうでなければ我々の成長もないし、面白くない。幸いチームもそういう意気込みをもったメンバーばかりであった。

はやぶさ2では、リュウグウに到着してから、実に様々な降下運用を行う必要があった。リュウグウの形状や重力を計測するための中高度観測運用と重力計測運用、MINERVA-IIローバやMASCOTランダを着陸させる運用、リュウグウ試料を採取するタッチダウン運用、衝突装置を使用して人工クレータを生成する運用と実に多彩であった。そこで、それぞれの運用に主担当を設定し、主担当が責任をもって運用検討を進めるとともに、それを他のメンバーがサポートする体制をとった。若いメンバーも臆することなく主担当として手腕を振るった。

小惑星近傍フェーズを成立させるための大きな課題が、スケジュールの成立性であった。はやぶさ2のリュウグウへの滞在はおよそ1年半であったが、途中、小惑星が太陽の後ろに入ってしまい探査機との通信に制約のある合の期間があり、太陽距離が小さいと小惑星表面に降りられない等もあり、実際にタッチダウンを行える期間は思ったよりずっと短い。その中で複数(最大3回)のタッチダウンを目指す計画であった。そのため、早々にデイリースケジュールを作成した。合の始まる前に1回目のタッチダウンを行い、合明けのスケジュールは、大まかに決めておき、到着後リュウグウの自転軸を確認した後に再検討する方針とした。スケジュール作成といっても、単にイベント(降下運用)を並べるだけでなく、イベントのための準備期間や人員の割り当てが十分か等も含めて検討する必要がある。降下運用のためには、手順の作成とその検証を毎回行うこととしており、手

順の作成を担うNECのエンジニアとともに検討を行った。表1は合前の前半戦運用の計画と実際の運用日を示す。一部他の運用に置き換わっているものの、綿密な事前の計画に従って実際の運用ができていくことがわかる。

4.4 運用訓練

緻密な計画を立てたとしても、それを実現できるかどうかは別問題である。そのため、早くから運用訓練の必要性は認識されていた。課題は2つあった。2018年6月末のリュウグウに到着したら、8月の中旬にはタッチダウンや小型着陸機の着陸地点を決める必要があり、時間的に厳しいことである。もう1つは、降下運用で探査機を本当に自由自在に操れるのかということであった。これらを訓練するためには、どうしても小惑星のCG(模擬小惑星)が必要であった。

模擬小惑星をどうしようか頭を悩ませていた2015年の7月末、宇宙科学研究所内のシンポジウムで、イトカワの形状モデルを使用したはやぶさの軌道推定に関する発表を行っていた三浦氏の発表を見て、これだと感じた。すぐに三浦氏に「はやぶさ2で模擬小惑星が必要なのだが手伝ってくれないか?」と声をかけたのだが、10日後には最初の小惑星のCGが送られてきた。その後、理学チームも模擬小惑星の作成にノリノリで参加し、最終的に図5のような模擬リュウグウ(Ryugoid)が作成された。

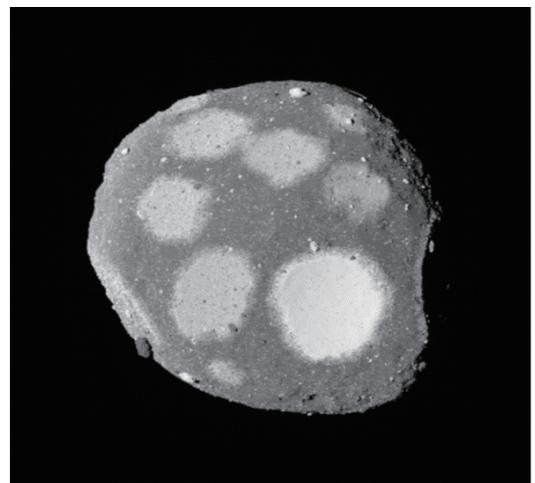


図5: 訓練のために作成された模擬リュウグウ(Ryugoid) (画像のクレジット: JAXA).

表1: 合前の降下運用の計画と実績。

運用	計画	実際の運用日
中高度観測運用	2018/8/1	2018/7/31-8/2
重力計測運用	2018/8/6	2018/8/5-7
タッチダウン1リハ1	2018/9/9	2018/9/11-12
MINERVA分離運用	2018/9/19	2018/9/20-21
MASCOT分離運用	2018/10/1	2018/10/2-5
タッチダウン1リハ2*	2018/10/15	2018/10/14-15
タッチダウン1**	2018/10/22	2018/10/24-25

* 実際はタッチダウン1リハ1のやり直し運用

** 実際はタッチダウン1リハ3(ターゲットマーカ分離運用)

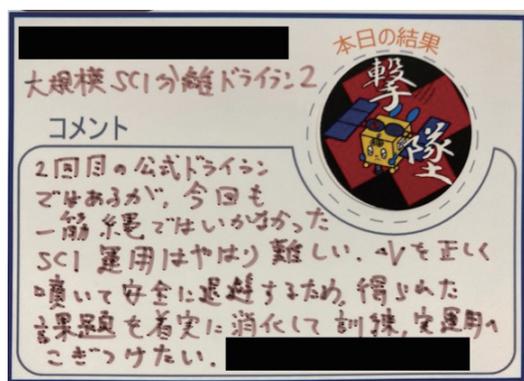


図6:「撃墜」シールが貼られた訓練結果(画像のクレジット: JAXA).

このRyugoidを使用して、まずは着陸点を選ぶ訓練(Landing Site Selection: LSS訓練)が行われた[2]。Ryugoidの模擬画像から自転軸や形状を再現し、そこから得られる地形情報やサイエンスの議論をもとに、どこにタッチダウンし、どこに小型着陸機を降ろすかを定める過程を国内外の関係者で確認し、最終決定の模擬ミーティングも実施した。これがなかったら、リュウグウに到着後すぐに墮いたかもしれない。

その後、Ryugoidへの降下運用の訓練(Realtime Integrated Operation: RIO訓練)を行なった。これは本当に一筋縄ではいかなかった。最初は表面に近づくこともできなかったが、徐々に探査機を自由自在に動かせるようになってきた。それでも、簡単にはいかず、失敗と改善を繰り返しながら手順等の改良を行なっていた(図6)。訓練には別の大事な効果もあった。RIO訓練は、最初は工学メンバのみでの実施を考えていたが、理学メンバも積極的に参加し、活動を共にすることでチームの結束を高めることができた。

5. 小惑星近傍フェーズ

5.1 リュウグウへの到着と着陸地点の選定

2018年2月末に、はやぶさ2はそのカメラでリュウグウを初めて観測し、それをもとに軌道修正を行い、6月にはリュウグウへの最終接近を行なった。はやぶさ2が撮像した画像上で日々大きくなるリュウグウの



図7:リュウグウ到着時の管制室での集合写真(画像のクレジット: JAXA).

姿を見て、ワクワクしつつ、1年半の近傍フェーズを想像して気の引き締まる思いであった。はやぶさ2は2018年6月27日、リュウグウから20kmのホームポジション(Home Position: HP)に到達した(図7)。

リュウグウは非常に暗く、赤道付近が膨らんだ形状をしていた。ありがたかったのは、自転軸が公転面に対してほぼ垂直であったということだった。これにより、降下によりアクセス可能な緯度帯が時期によって大きく変化することはなく、合明けの運用スケジュール立案の難易度が減ったからである。その一方で、リュウグウの表面は岩で覆われゴツゴツしており、すぐにタッチダウンは難しそうだと感じた。

到着してすぐに、HP付近に探査機を維持するための制御を確立し、事前に準備した計画に従って、中高度観測運用と重力計測運用を行なった。リュウグウの重力は計画段階で設定した値と大きく変わらず、降下回数を大きく変更する必要はなかった。着陸地点選定については、LSS訓練の甲斐もあって形状モデル作成等のプロセスは順調で、事前に決めておいた評価項目に従って着陸地点候補を選出した。2018年8月27日には、国内外の関係者を集めて着陸地点選定会議が行われ、第1回のタッチダウンの着陸候補(L08という地域)と、MASCOTとMINERVA-II1の着陸候補地点が選定された[3]。ただし、ここならタッチダウンできるという確信があったわけではない。というのも、リュウグウ全体が岩で覆われていたためである。



図8: MINERVA-II1Bが撮像したリュウグウ表面画像(画像のクレジット: JAXA).

5.2 着陸機の分離運用と方針転換

2018年9月11日には、着陸地点選定会議の結果を受け、L08エリアへのタッチダウンリハーサル降下が実施された。しかしながら、高度600m付近で、探査機はレーザ高度計(LIDAR)の出力異常を検知し、自身の判断で緊急上昇を行なった。原因はすぐに突き止められたが、タッチダウンリハーサルで低高度域までの探査機誘導の妥当性を確認した後にMINERVA-II1を着陸させる予定が、ぶっつけ本番での実施を余儀なくされた。

私の心配はよそに、MINERVA-II1の分離運用は順調に進み、2018年9月21日13:05(日本時間)に、はやぶさ2は高度55m付近でMINERVA-II1Aと1Bの2つの着陸機を無事分離した。2機の着陸機は、リュウグウの表面をホップしつつ、多くの画像を我々に届けてくれた。2018年10月4日10:57(日本時間)には、DLRとCNESが開発したMASCOTを同様に分離した。「何かあれば国際問題だ」と、非常に緊張した運用であったが、分離も予定通り実施でき、MASCOTからも観測データが送られてきた。

MINERVA-II1やMASCOTが送ってきた地表面の画像(図8)は、リュウグウの表面が非常にゴツゴツしていることを我々に改めて認識させた。また、9月頭のタッチダウンリハーサルの中断により、スケジュール的にも厳しくなったため、チームは最初のタッチダウンを合明けの2019年に延期することに決定した。そのため10月中旬のタッチダウンリハーサル2は、タッチダウンリハーサル1のやり直しを行い、

10月下旬に予定していたタッチダウン運用は、リュウグウ表面にターゲットマーカを投下する運用に振り替えることになった。従来、はやぶさ2のタッチダウンは、ターゲットマーカの分離とタッチダウンを1度の降下運用で実施する方式を考えていた(ノーマルタッチダウン)。一方で、人工クレータの直近に高精度でアクセスするための方法として、ピンポイントタッチダウンという方法も検討を行なってきた。これは事前投下したターゲットマーカ相対で探査機を精密に地表面に誘導する方式であり、これを最初のタッチダウンから実施しようという方針であった。

5.3 タッチダウンの準備

新しい方針に従って、10月中旬にタッチダウンリハーサル1のやり直し(TD1-R1A)が実施された。既にMINERVA-II1やMASCOTの分離運用で経験しているため、低高度へのアクセスも順調で、10月25日22:44(日本時間)には高度約22mに到達し、低高度域で使用するレーザ高度計(LRF)の計測に初めて成功した。

2018年内最後の降下運用は、前述の通りターゲットマーカ投下運用(TD1-R3)であった。探査機はL08領域の中でも、平坦な地形が期待されるL08-B地点に向けて降下を行い、10月25日11:37(日本時間)に高度12mでターゲットマーカを分離し、その後、分離したターゲットマーカをカメラ視野中心に維持するような追尾運動にも成功した。これで年明けのタッチダウン運用に布石を打った状況を作り出せた。ちなみに、私は10月28日には、病院のベッドの上にいた。蓄積したプレッシャーのせいなのか、ターゲットマーカ投下成功の後に飲みに行っただけが原因なのかはわからないが、1週間ほど入院することとなった。年内の降下運用をやり切るまで持ってくれた空気の読める自身の体に感謝した。

ターゲットマーカは狙った地点からおよそ15m離れたところに着地していた。ノーコンと揶揄された結果であったが、元々想定していた着陸精度50mからは十分よい精度であった。しかし、ターゲットマーカの側には大きな岩があり、ノーマルタッチダウンを行っていたら、探査機喪失の可能性が大きかった。我々は方針転換が正しかったことを改めて認識した。

探査機は、2018年11月23日から合期間に入った。

探査機が太陽の向こう側に隠れてしまい、通信状態が悪くなる期間である。この期間、安全のため、探査機をリュウグウから離れて飛行させた。この間にやるのは、落ちたターゲットマーカ周辺の地形の調査である。ここでは理学チームの方々が大活躍してくれた。理学チームは、リュウグウの観測により多くの学術成果を出しつつあったが、一方で、リュウグウの自転や形状モデルの解析により、探査機運用に直接的で重要な貢献をしてくれていた。今回も、ターゲットマーカ周辺の岩の高さを一つ一つ推定することで、探査機がタッチダウン可能な領域の割り出しに注力してくれた。

70cm以上の高さの岩は、タッチダウンの際に探査機にとって危険であるという中、抽出されたタッチダウン候補領域は2つ。1つは、元々のL08-B領域内にある少し広いがターゲットマーカから遠いL08-B1領域。もう1つは、ターゲットマーカに近いが、半径3m程の広さしかないL08-E1領域。このどちらかしかなかった。議論の結果、ターゲットマーカに近い方が、着陸精度が良くなる見込みが高いため、L08-E1領域(というよりは点)を1回目のタッチダウンの目標に選定した。

着陸目標地点を選定したものの、その狭い領域に本当に安全に降りられるかは、相変わらず解を見出せないでいた。というのも、着陸直前にはLRFによってリュウグウの地形を計測し、探査機姿勢を地面に正対するように制御する計画であったが、地形の凹凸が激しいため、姿勢の不確実性が大きくなり、着陸精度を確保できない状況であった。2018年も終わろうかという時点でもそういう状況であったが、LRFの計測値に無理やり外部から値を捻じ込むことで姿勢を安定させる方法に辿り着き、その後の膨大な解析により、タッチダウンの目処を得るに至った。

5.4 最初のタッチダウン

2019年の最初の降下運用は、第1回タッチダウン運用となった。降下運用が始まる前日の深夜まで、最終確認の作業が行われた。準備は万端のつもりであったが、それでも手を動かさないとソワソワしてしまう浮き足立った感じだった。

その準備万端のタッチダウン運用はいきなりトラ

ブルに見舞われた。降下開始の1時間半前に、探査機が低高度で行われるべきシーケンスを開始してしまったのだ。緊急対処がすぐに行われ、原因も究明されたが、これによりタッチダウン運用の延期はやむなしと誰もが思っていた。しかし、運用の延期は、今後のスケジュールに多大な影響があるため、運用チームは必死に復旧を行い、5時間遅れでの降下開始にこぎつけた。

その後の降下は非常に順調に行われた。誘導の精度が悪いと、落ちているターゲットマーカを見つけられずに、何もせず上昇することになってしまうが、訓練と実機で何度も繰り返してきた降下運用によって改良された制御則と熟練したオペレータにより探査機はターゲットマーカの直上に正確に誘導された。2019年2月22日7:07(日本時間)に探査機は高度45mでホバリングを開始し、すぐにターゲットマーカを捕捉した。以降自律制御により高度8.5mまでさらに降下し、最終降下位置に誘導され、降下のためのエンジン噴射が行われ7:29:10にタッチダウンを行った。探査機はすぐに上昇し、はやぶさで発射できなかったサンブラの弾丸も正しく発射されたことが確認された。

管制室は歓喜の輪ができ、フライトディレクタとして運用に参加していた私もその中で喜びを噛み締めたが(図9)、一方で次の大イベントである人工クレータ生成運用のことが気になり始めた。

5.5 人工クレータ生成運用

人工クレータの生成は、はやぶさ2のミッション目



図9:タッチダウン成功時に抱き合う筆者と津田氏(画像のクレジット: JAXA).

標の1つであり、クレータを作ってそれを確認することは、はやぶさ2の成功基準において最低ライン(ミニマムサクセス)に設定されていた。もし人工クレータの生成が確認できないと、はやぶさ2全体が失敗だと評価されることになる。それもあって、衝突装置の開発責任者であった私は、とんでもないプレッシャーを感じていた。

人工クレータの生成運用は、危険を伴う困難なものであった。衝突装置は爆薬を使用しているため、動作時に高速破片を撒き散らすことがわかっており、それを避けるため、探査機は衝突装置を分離してから40分間で小惑星の裏側に退避する必要がある。これに失敗すると探査機を喪失することになる。また退避の途中で観測のための分離カメラ(DCAM3)を分離するのだが、これを正確な位置で実施しないと、撮りたい写真が撮れないことになる。探査機を極めて精度良く移動させていかなければならないという難しい運用であった。

人工クレータ生成運用の準備は、タッチダウン運用の準備と並行して進められていたため、どうしても二の次感があったのだが、それでも誘導制御担当の三桝氏やDCAM3の担当たちとともに、綿密なシーケンスを検討し、緊急事対処等も決めて行った。また、タッチダウン運用の準備で忙殺されていた2019年1月16日に、実機を使ったエンジンの長時間噴射の試験(退避リハーサル)を行って、エンジン噴射時の姿勢制御と太陽電池パネルの振動のカップリングについての確認を行った。

2019年3月22日、クレータを作る予定のS01と呼ばれる領域の周辺の地形情報を観測した。このS01という領域は、工学チームが1度目のタッチダウンの準備をしている間に、理学チームが見つけたリュウグウの中でも比較的平坦な領域であり、人工クレータの生成目標とされていた。また、その後の2回目のタッチダウンの有力な候補地点でもあった。

2019年4月4日、ついに人工クレータを作るための運用が始まった。私はフライトディレクタと衝突装置担当を兼務していた。開発時に苦労をともにした衝突装置開発チームの面々も集まってくれ、心強いと思う反面、絶対に成功させなければという思いで胃に穴があきそうな状態であった。探査機の降下は極めて精度良く行われた。4月5日10:04(日本時間)に、最

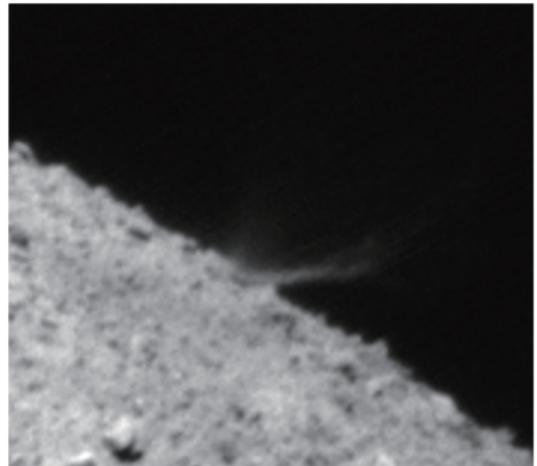


図10: リュウグウ表面から噴出されるイジェクタ(デジタルカメラの画像、最初にイジェクタを確認したのはアナログカメラの画像であった)。 (画像のクレジット: JAXA、神戸大、千葉工大、高知大、産業医科大)

終のGOコマンドが送信された。これ以降、探査機は完全自律モードに移行し、引き返すことはできない。衝突装置は10:56に分離され、その後の退避も順調で、11:14にDCAM3の分離を迎えた。DCAM3は打ち上がってから初めて電源が入り、そのテレメトリを確認したDCAM3のチームが湧き上がり、私もほっとした。衝突装置の作動は11:36:10であった。このとき探査機と地球は非常に離れていたため17分半ほどたって、テレメトリが地球に降りてくる状況であった。作動の瞬間のテレメトリには何の変化もなく、探査機が健全であることを示していた。「退避成功ですね。おめでとう」とプロジェクトマネージャから声が上がり、管制室では拍手が起こった。

フライトディレクタとしての自分は退避の成功に安心したが、衝突装置担当としては、やはり本当にクレータができたのかが心配で心からは喜べなかった。モヤモヤした気持ちで運用を続けていると、管制室にプロジェクトサイエンティストの渡邊氏が現れ、「一応DCAMのアナログにイジェクタが映っています」と告げた。「えー!」と驚き、画像を見るために運用室に向かった。そこには小さいながらもリュウグウから噴き出るイジェクタがあった(図10)。泣くなんて思ってもいなかったが、これまでのことを思い返すと自然と涙が出た。

2019年4月25日、探査機は高度1.7kmの位置か

ら、3月22日と同様に地形情報を観測した。クレータ生成の事前事後の画像を比較することによりクレータを探す予定であったが、DCAM3の画像でおおよその位置が分かっていたこともあり、狙った地点からおよそ20m北西に直径15mほどのクレータがすぐに見つかった。地上試験でのクレータの大きさとはかけ離れた大きなクレータであった。小さなクレータしかできないという夢を何度も見たのはなんだったのか。

5.6 2度目のタッチダウン

1回目のタッチダウンが大成功だったこともあり、3回目のタッチダウンはやらないことに決定したが、チームは2回目のタッチダウンに向けてすぐに着陸地点選定のための作業を開始した。クレータの南側には詳細観測済みであるS01という平坦な地形が広がっており、探査機を安全にタッチダウンさせるためには都合が良かったが、DCAM3の画像や、探査機搭載カメラの画像は、クレータの南側には地下物質はあまり積もっていないことを示唆していた。一方で、クレータの北側は、地下物質は多いかもしれないが、凹凸が激しく、詳細な地形データは未取得であった。2019年4月29日の最終の着陸地点選定会議においても、北側か南側かの議論がなされたが、最終的には地形情報が既知であり、より安全そうである南側のS01領域が選ばれた。

2019年5月16日、S01領域にターゲットマーカを投下する運用の最中に探査機が、高度50mで緊急上昇した。原因はLIDARの計測異常であった。ターゲットマーカの投下という目標を達成できなかったため、チームは落胆したが、一方で嬉しい誤算があった。こんなこともあろうかと仕込んでいた緊急上昇時のカメラ撮像が、クレータの北側の領域を捉えていたのである。画像の中には狭いけれども平坦に見える領域があった。この領域の地形を理学チームが突貫で解析し、工学チームによって着陸安全性解析が行われた結果、着陸実行可能であると判断され、タッチダウン目標が、C01-Cbと名付けられたクレータ北側に変更された。

チームが2回目のタッチダウンに向けて進む中、主にプロジェクト外からタッチダウン実施そのものの是非を問う声が起こっていた。はやぶさ2は1回目の



図11: 2回目のタッチダウン直後の搭載カメラの画像(画像のクレジット: JAXA).

タッチダウンで採取した試料を持っている状態であり、2回目のタッチダウンで何かあると、それすらも失われる可能性を心配してである。工学チームは探査機の安全をしっかりと担保できることを示すことで、2回目のタッチダウンをなんとか実施できるように準備を進めた。理学チームの「工学チームを信頼します」という後押しもあり、最終的にGOの判断が下された。

2019年7月11日10:06(日本時間)に、はやぶさ2は再びリュウグウに舞い降りた。1回目のタッチダウンで舞い上がった砂塵で光学系の性能が落ちていたため、難易度が上がっていたが、着陸の精度は約60cmを達成した(図11)。プロジェクトマネージャによって100点満点中1000点と評された、完璧な2回目のタッチダウンによって、日本は世界に明確に差をつけることができた。

6. 地球帰還フェーズ

6.1 リュウグウ出発と復路巡航運用

2回目のタッチダウンの後も、ターゲットマーカやMINERVA-II2ローバをリュウグウの周りに周回させる等、さらに成果を積み上げていったはやぶさ2も、リュウグウを離れる時がきた。2019年11月13日、はやぶさ2はスラスタ噴射によってリュウグウを離脱した。もう二度と来ることはないであろうリュウグウとの別れを惜しむかのように、離脱中に最後の撮像を行なった。ちなみに、拡張ミッションで行けそうな

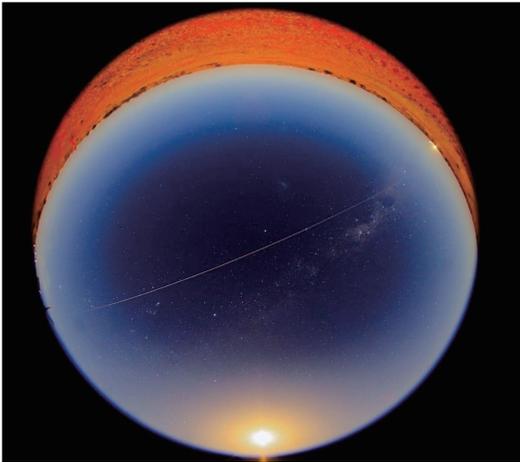


図12: 地球に再突入したカプセルの航跡(画像のクレジット: JAXA).

天体を探すと、いつもリュウグウが出てきて、しみじみとしたお別れが台無しになるような気がした。

リュウグウ離脱後、ずっと使用していなかったイオンエンジンの健全性を確認した後、2019年12月3日から地球帰還のためのイオンエンジン運転が開始された。復路は、カプセルを豪州の砂漠にドンピシャで着陸させなければならないため、地球スイングバイ時と異なり、位置速度とともに時刻も厳密に制御されなければならない。イオンエンジンチームとともに、軌道決定チームおよび軌道計画チームの確実な軌道操作によって、はやぶさ2は着実に地球に近づいていった。

2020年8月28日にイオンエンジンを一度停止し、軌道決定を行った後、再点火による軌道修正を9月17日に終え、はやぶさ2ノミナルミッションでのイオンエンジン運転は全て完了した。イオンエンジンは最初から最後まで確実に動作したため、イオンエンジンチームは拡張ミッションというさらに11年のおかわりをもらえることになった。

6.2 精密誘導とカプセルの分離

10月からは精密軌道決定と化学推進系による地球への精密誘導フェーズへと移行した。それと同時に、カプセル分離のための機上試験も行われた。2020年11月4日には、実機を使ったカプセル分離運用リハーサルを実施した。本番を模擬して、探査機の姿勢を大きく変更し、運用計画の妥当性や地上で

の確認体制に問題がないことを確認した。

軌道制御で最も重要なイベントは、3回目の軌道修正(3rd Trajectory Correction Maneuver: TCM-3)と呼ばれるものであった。それまでは、はやぶさ2は地球のそばを通過する軌道にいたが、TCM-3で探査機を初めて地球に突入する軌道に入れる計画であった。しかも、予想着陸点がウーメラ管理区域(WPA)内からはみ出たはならないので、非常に厳密な軌道修正が要求される難しい運用であった。前日に豪州帰還安全担当官からははやぶさ2をWPAに突入する軌道に入れる許可が出され、11月26日にTCM-3が実施された。化学推進系を噴射している間の姿勢誤差も考慮した複数回のエンジン噴射で、1.2m/s程の大きな速度変更にもかかわらず、3.5mm/s程度の速度変更誤差にとどめることができた。

12月1日には、地球帰還前の最後の軌道修正となるTCM-4を実施し、12月5日、ついにカプセル分離の日を迎えた。そこで、本稿の冒頭のような会話になるわけであるが、着実な準備とチームの力で、カプセル分離と探査機の地球離脱をやり遂げ、拡張ミッションに繋げることができた。この後、カプセルは綺麗に大気圏に突入し、オーストラリアでは回収班が5.4gもの試料のはいったカプセルを素早く回収した。回収班の奮闘については[4]を、拡張ミッションについては[5]を参照されたい。

7. はやぶさ2からの教訓と将来計画について

7.1 はやぶさ2からの教訓

はやぶさ2からの教訓は、チームメンバによって山のように抽出されたが、筆者個人が感じたことをいくつかピックアップしたい。

はやぶさ2のような大規模ミッションでは、個人の力ではどうしようもなく、チームの力が不可欠である。しかし「本気」でない人が集まったとしてもそれはチームにはならない。本気でミッションをやる人が集まるには、ミッションが魅力的である必要がある。幸い、はやぶさ2は多くのチームメンバがミッションに魅力を感じ、本気で「楽しむ」状況にあったと感じる。

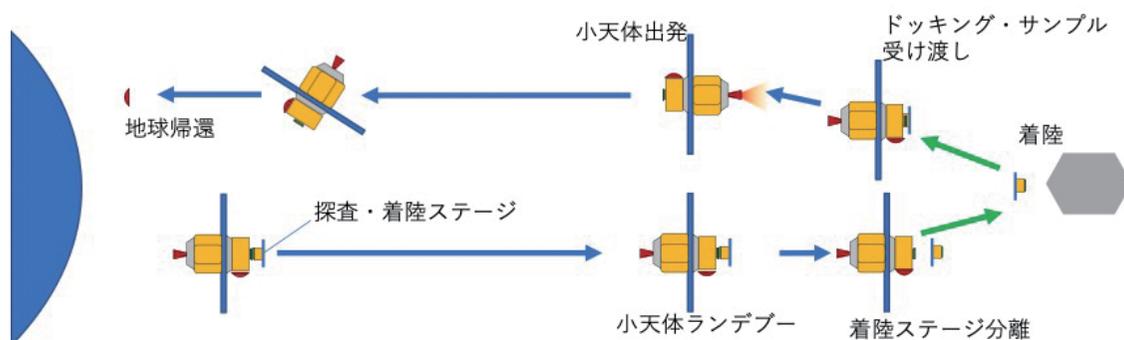


図13: 複数機で構成される探査システム。

世界初、世界一のような要素を取り込み、チームメンバーが本気でやりたいと思うミッションとすることが重要である。

上記に加え、チームが連携して機能的に活動するためには、メンバー相互の信頼感が不可欠である。信頼感は個人の本気にも繋がる。はやぶさ2では、訓練など「同じ釜の飯を食う」場面が多くあり、理工学、JAXAと大学、関連企業の結束が高まる結果となった。探査機のカメラが航法と科学観測を兼ねていたことも、理工の連携を促した。これは設計的には改善の余地があるのであろうが、チームの成熟という意味では非常に大きな効果があった。また、「信頼するけど信用しない」という相互チェックがチームとしてうまく機能したと感じている。昨今は業務および責任分担の明確化ということが重要視されているが、チームメンバーが互いのやることを尊重しつつ、別の人のやっていることに興味や注意を払い、任せきりにならないという空気が非常に大切であると思う。

探査システムという観点からは、はやぶさ2では小型着陸機や衝突装置、DCAM3等の小型子機の有用性が示された。単体の探査機でできることは限りがあるが、小型子機を使うことでミッションの質を高めることが可能であることが強く認識された。小型機は親機に目標天体まで連れていってもらえるため、単機能でも野心的なミッションが可能になり、昨今注目されている超小型衛星の技術はこのような場面で活かせるのではと感じている。

2回目のタッチダウンの実施の是非が問われたことも、大きな教訓である。決して高頻度とは言えない日

本の太陽系探査では、一つ一つのミッションを確実に実施するとともに、無謀ではないチャレンジはしっかりと行える状況を整える必要があると考える。そのためには柔軟性の高い探査システムを検討する必要がある。

7.2 次世代小天体サンプルリターン計画

現在、はやぶさ2に続く次世代の小天体サンプルリターンミッションについて検討が開始されている。本来ははやぶさ2のミッション期間中にも将来ミッションの検討を進めるべきであったと反省しているところだが、ともあれ、ようやくスタートを切ることができている。

探査天体については、理学メンバーを中心に検討中であるが、未到の遠方天体を中心に議論が行われている。探査システムとしては、地球-目標天体間の輸送を担当する往還機と、現地での着陸探査を行う小型の着陸機で構成されるシステムを検討している(図13)。前述のはやぶさ2の教訓を活かしつつ、将来の重力天体探査にも繋がる自在性の高い探査システムを目指している。サンプルリターンを行うためには、着陸機から往還機へ天体試料の受け渡しを行う必要があるのだが、それには、はやぶさ2のターゲットマーカを使用したピンポイントタッチダウンの技術を応用することを考えている。

探査ミッションの数が多くない日本では、一般の科学とともに、将来に向けた技術革新を両立させる必要がある。それは簡単なことではないが、多くの方々が本気で参加できるミッションとして何とか実現

したいと頑張っているところであるので、本稿をご覧になって興味を持って活動に参加いただける方が少しでも増えれば幸いです。

8. おわりに

今回、はやぶさ2ミッションの振り返りをまとめる執筆機会を頂けたことに感謝しております。はやぶさ2の地球帰還から早1年半以上が経過し、チームの解散で、寂しい思いをしていたところ、苦しくも楽しかった日々と、その時の熱い気持ちを思い出すことができました。はやぶさ2で得られた経験や人脈といった宝物を有効に活用し、将来につなげていくこ

とが、筆者を含むはやぶさ2のチームメンバのこれからの使命だと思っております。

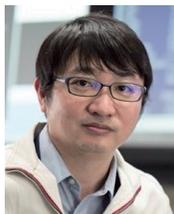
最後に、この素晴らしいミッションを大成功させたプロジェクトチームを誇りに思うと共に、全ての関係者の皆様に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 吉川真, 2018, 遊星人 28, 320.
- [2] 石原吉明, 2017, 遊星人 26, 139.
- [3] 菊地翔太ほか, 2019, 遊星人 28, 143.
- [4] 中澤暁ほか, 2021, 遊星人 30, 18.
- [5] 寫生有理ほか, 2021, 遊星人 30, 169.

著者紹介

佐伯 孝尚



宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授. 東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 博士課程終了. 博士(工学). 宇宙航空研究開発機構 宇宙航空プロジェクト研究員, 三菱重工業株式会社, 宇宙科学研究所 助教を経て, 2022年5月より現職. 専門は軌道工学, 制御工学, 宇宙機システム等. はやぶさ2プロジェクトにおいて開発時フェーズではインパクタの開発責任者, 打ち上げ後はプロジェクトエンジニアとして探査機システムの取りまとめを行った.

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その51 ~多波長撮像で探る金星のメソスケール気象~

今村 剛¹, 成田 穂², あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 金星探査機「あかつき」に搭載されたカメラ群によって、多波長で多くの雲画像が得られてきた。このデータを用いて雲の模様の波長間の相関解析を行うことにより、雲の模様の形成に関わるメソスケール気象の手がかりが得られつつある。

「赤外線から紫外線までの多波長で同時に金星大気を撮影して、異なる物理量や異なる観測高度の関係性から大気力学や雲形成のメカニズムに迫る。」これが20年前に金星気象衛星プロジェクトを立ち上げたときからの狙いでした。そのために探査機「あかつき」には異なる波長で観測する5つのカメラが搭載され、一体運用されています(中間赤外カメラLIR, 近赤外カメラIR1・IR2, 紫外カメラUVI, 雷大気光カメラLAC。そのうちIR1とIR2は現在は停止)。このような狙いはすでにいくつかの科学成果に結実しています。たとえば、惑星スケールの波動の伝播にともなう紫外波長と近赤外波長での雲アルベド変動を波動の構造をもとに解釈[1], 山岳波が作る波状構造を赤外波長と紫外波長の間で比較して波動による物質輸送を推定[2], といった例があります。

そして今年、「あかつき」の多波長撮像を象徴するような論文が出版されました[3]。金星を紫外線で見ると惑星スケールの明暗に加えて水平スケール1000 km以下(メソスケール)の細かな模様が多く見られることが、1970年代からわかっていました(図1)。低緯度には塊状あるいは細胞状の模様が、中高緯度には筋状の模様が目立ちます。このようなメソスケールの雲の形態は対流細胞を思わせませんが、背景大気の成層が不安定化している証拠はなく、メカニズ

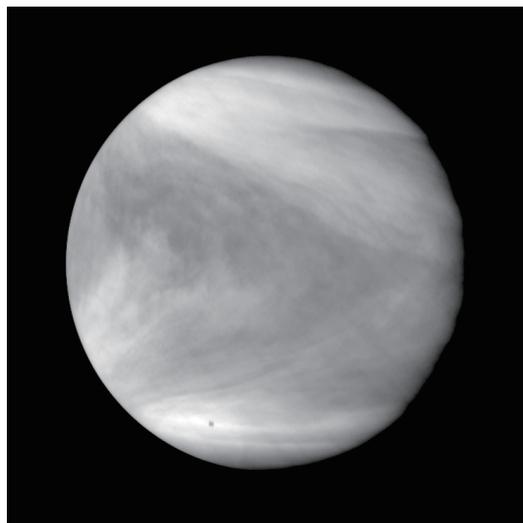


図1: 2021年4月14日にUVIを用いて波長283 nmで撮影した金星。この波長ではSO₂による吸収の寄与が大きい。

ムはわかっていません。ともあれ、硫酸雲の材料となる化学物質を下層大気から運び上げる、熱エネルギーや運動量を鉛直輸送するなど、大気全体の構造形成に関わっていることは大いにありそうです。このようなメソスケール気象の手がかりを得るためにこそ多波長撮像が有効であるはず、というのが20年前にミッション提案書に記したことです。そのシナリオに沿って、LACを除く4つのカメラによる雲画像からメソスケールの構造を抽出し、そこに見られる模様に波長間でどのような相関関係があるかを調べました。

1. 東京大学 新領域創成科学研究科

2. トロント大学 機械産業工学科

t_imamura@edu.k.u-tokyo.ac.jp

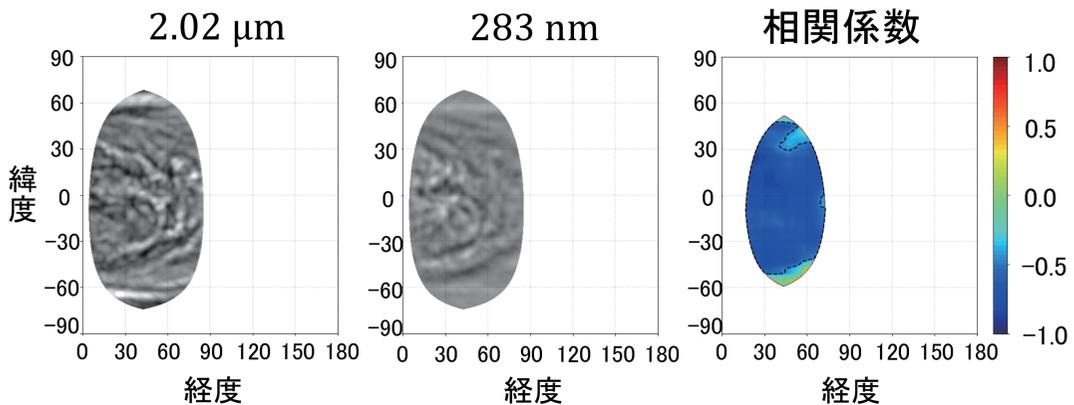


図2: IR2による波長 $2.02\ \mu\text{m}$ の画像とUVIによる波長 $283\ \text{nm}$ の画像を用いた相関係数マッピングの例。2016年7月7日に取得したデータを用いた。

この研究では、異なる波長で同時に取得された2枚の画像を用いて、同一の小領域間で相関係数を計算し、その相関係数の空間分布を調べました(図2)。すると例えば、雲頂高度を反映する CO_2 吸収帯の波長 $2.02\ \mu\text{m}$ と雲頂温度を反映する波長 $10\ \mu\text{m}$ の相関係数から、雲頂が高いところで雲頂温度が低いことが判明し、鉛直流にともなう断熱膨張・圧縮の効果がうかがわれました。雲頂高度を反映する波長 $2.02\ \mu\text{m}$ と、紫外吸収物質の量を反映する波長 $283\ \text{nm}$ (主に SO_2 による吸収)あるいは波長 $365\ \text{nm}$ (吸収物質は未同定)の相関係数からは、雲頂が高いところで紫外吸収が強いことが判明し、上昇流によって低高度から紫外吸収物質が運び上げられている可能性が示されました。雲頂高度を反映する波長 $2.02\ \mu\text{m}$ と雲層下部の雲量変化の影響が大きいと考えられている波長 $0.90\ \mu\text{m}$ にはほとんど相関が見られず、雲層内の上下結合がメソスケールでは弱いことが示唆されました。

こうしてメソスケールの大気運動とその物質輸送への影響を観測データから論じることが可能になりつつありますが、そのメカニズムや大気構造への影響を解明するには、時間変化、風速分布との対応関係、惑星規模波動との関係などを調べる必要もあるでしょう。それは「あかつき」の網羅的な気象観測

データを使えば可能なはずであり、すでに挑戦が始まっています。「あかつき」の成果としては惑星規模の高速大気循環「スーパーローテーション」の成因に関わるものが多く公表されていますが、メソスケール気象の研究も本格化しています。

参考文献

- [1] Lee, Y. et al., 2020, Nature Comm. 11, 5720.
- [2] Kitahara, T. et al., 2019, J. Geophys. Res. 124, 1266.
- [3] Narita, M. et al., 2022, J. Geophys. Res. 127, e2022JE007228.

著者紹介

今村 剛

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程修了, 博士(理学). JAXA宇宙科学研究所勤務を経て, 2016年より現職.

成田 穂

トロント大学Mechanical & Industrial Engineering専攻博士課程1年. マサチューセッツ大学アマースト校Computer Science専攻修士課程修了. 東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻修士課程(科学)修了.

遊星人の海外研究記 その8 ～世界の中心で研究する～

癸生川 陽子¹

1. 経緯

なんとなく海外で研究したいという思いはあった。D3の時にあれこれ就職先を探していたなかで、米国ワシントンDC、カーネギー研究所のGeorge Cody博士を紹介していただき、運よく彼が学会で日本に来た時に会うことができた。渋谷の沖縄料理屋に行ったところまわりがうるさく、店のセレクトミスだったかとハラハラしたが、当時の指導教員の助けもあり、それなりに好印象で終わることができたと思う。そんなわけで、カーネギーのポスドクプログラムであるカーネギーフェローに応募してみることになった。あまり英語には自信がなかったので、個別指導の英会話に通ったり、海外ドラマを見たりして対策した。面接のためのプレゼンを個別指導の先生に見てもらったが、内容が専門的なので辛そうであった。そしていざ面接の日を迎えた。いやはや現地で1日がかりのヘビーなものであった。午前中にセミナーでの発表、昼食をはさんで、午後は数人の研究者と個別面談だ。もちろん全部英語で、最後の研究者との面談の時は脳が完全に活動を停止しており、ほとんど何も話せなかった。よく通ったものだが、あとから推薦書が良かったとちらっと聞いた(そっちか!)。この時たしか2、3泊して、前半はカーネギーのスタッフサイエンティストの方の家に泊めてもらった。朝ごはんにいただいたブルーベリー入りパンケーキがおいしかった。後半は事務の方が気を利かせて少しダウンタウ

ンのほう(“Hip”な場所だと言っていた)のヒルトンホテルをとってくれたのだが、土地勘も余裕もなくあまり堪能できなかった。かろうじてメジャーな観光地のスミソニアン博物館などを見て帰った。

2. カーネギー研究所での研究生活

ともかく、2009年6月(10年以上前の話である!)から、カーネギー研究所でGeorge Cody博士のもとポスドクとして研究生活を行うことになった。カーネギーフェローは2年間なので3年目からは海外学振で、2013年3月までカーネギー研究所にいた。カーネギー研究所は、米国の首都ワシントンDCの北西の方に位置するこじんまりした研究所だが、名だたる研究者がそろっている。天文系ではVera Rubin博士が現役であったり(残念ながら2016年に亡くなった)、固体地球系では超高压実験に強い。日本では地方から東京に人が集まるように、ワシントンDC(現地の人は単にDCと呼ぶ)には、世界中から人が集まってくる。まさに多様性だ。カーネギー研究所の人々も、ポスドクだけでなくスタッフサイエンティストも多国籍だった。

日常としては、週1回、昼前にセミナーがあり、所外から研究者を呼んでの講演、そのまま(有志で)ランチを囲むといった会がある。金曜の夕方にはBeer hourだ。年に1回Carnegie nightというイベントがある。講演会とパーティからなるドレスコードありのイベントだ。普段はTシャツ、短パン、サンダルな研究者もこの日はスーツやドレスで決めてくる。非日常的な新鮮さがよかった。講演会は、研究所内の

1. 横浜国立大学 大学院工学研究院
kebukawa@ynu.ac.jp

シニアスタッフサイエンティストが演者を務める。ここで講演するのは大変名誉のようで、Cody博士がその役目であったときはとても緊張していた。また、大統領やノーベル賞受賞者が会員になっているというCosmos clubという歴史のある社交クラブがあり(少し前までは女性は入れなかったとか)、なにかの折に何度か行く機会があった。こちらもちろんTシャツでは入れない。メリハリをつけるのが米国流だ。首都DCはホワイトハウスやペンタゴン(国防総省、正確にはDCではなく隣のバージニア州になる)があり、政治の中心であるのはもちろん、学術面でもいろいろ集まっている。研究所ではNational Institutes of Health (NIH)が有名で、日本学術振興会(JSPS)のワシントンオフィスもある。カーネギー研究所にもポスドクやサバティカルなどで訪れる日本人研究者がいる他、NIHやJSPSの日本人の方々と交流する機会もあった。

カーネギー研究所の研究環境は非常に良かったと思う。サポートスタッフが豊富だ。装置など、専属テクニシャンがいる場合が多い。事務的なサポートもしっかりしており、今は自分でやっているめんどうな会計処理などはほとんど必要なかった。スタッフサイエンティストの他に、ポスドクが多く(カーネギーフェロー以外にも各研究者の研究費で雇っている場合などがある)、Ph.D student (博士課程の学生)もいた。Ph.D studentも給料をもらっているのが日本と違う点だ(日本でも最近は給料が出る事例が増えてきたようだが)。Conel Alexander博士など恐ろしい論文数の研究者がざらにいるのだが、あくせくしている感じでもなく、秘訣は何だろうと思って見ていた。例えばAlexander博士は研究所に犬を連れてきており、時々庭で犬と遊んでいた。ロッククライミングが趣味のCody博士は時々研究所の建物の壁を登っていた。仕事の合間に適度に体を動かすのがよさそうだという安直な解が導かれるのだが、現在日本の大学に所属し日々あくせくしており、まったくまねできたものではない(今、原稿を書いている合間にも外で体を動かしてみようか?しかし外は30℃越えの炎天下だし締め切りも迫っている!)

普段の研究はだいたいカーネギー研究所内で行っていたのだが、時々放射光を使った分析を行うためにカリフォルニア州バークレーのAdvanced Light

Source (ALS)に行くことがあった。カリフォルニア大学バークレー校のキャンパスを超えて山を登った感じのところにあるピンク色の建物だ。野生の七面鳥がいることでも有名(?)である。放射光施設では一般的なことだが、ビームは1日24時間出続けるので、3日間といった時間が割り振られている場合は、ビームタイムを無駄にしないために72時間ぶっ続けで実験することになる。さすがに1人では無理なので2人以上で交代で行うのが普通だ。初回は私が戦力外なので、私が操作を覚えるまではボスのCody博士と現地のビームラインサイエンティストの2人で担当する予定でいた。だが急にCody博士が行けなくなり、私一人で行くことになった。昼夜を問わずなれない私の面倒を見ないといけなかったのでビームラインサイエンティストは怒っていたし、私はそもそも日本でも放射光施設に行ったことがなく、すべてにおいて不安であったが、まあやってみれば何とかなるものだ。怒っていたと書いたがもちろん深刻なものではなく、ビームラインサイエンティストは非常に面倒見の良い人で、その後ずっとお世話になった。時々所外に行って実験などをするのは気分が変わってよいものだ。西海岸のカリフォルニアはDCとは気候や雰囲気もまったく異なるので面白い。

ワシントンDCといえばスミソニアン博物館が有名だ。自然史博物館や国立航空宇宙博物館など複数あり、いずれも無料ということもあって観光客でいっぱいだ。自然史博物館には隕石もたくさん展示しており、大きなCIコンドライト(図1)など生唾ものなのだが、この辺は観光客には人気がない。自然史博物館の一番人気は、マリー・アントワネットの手に渡ったこともあるというホープ・ダイヤモンドと呼ばれる45.52カラットのブルーダイヤモンド(図2上)。「持ち主を次々と破滅させながら人手を転々としていく」といういわくつき(ウィキペディア情報)もあってか、観光客が絶えない。しかし、個人的にもっとすごいと思ったのが、Allende隕石から取り出した肉眼で見えるナノダイヤモンドだ(図2下)。1.2 mgある。これだけ取り出すのにいったい何gの隕石を溶かしたのだろう。スミソニアン自然史博物館には研究所も付属していて、たくさんの隕石が保管されている。こちらも見せていただく機会があり、博物館の裏口から入るといふレアな体験ができた。



図1: 自然史博物館に展示してあるOrgueil隕石とIvuna隕石.

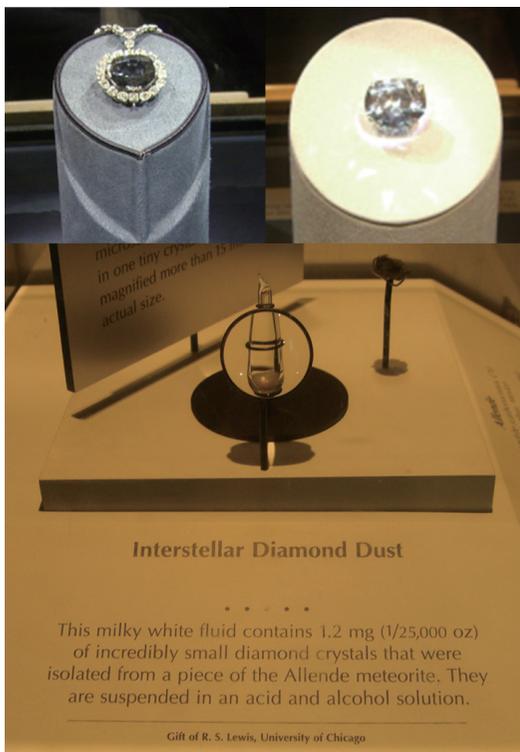


図2: (上)自然史博物館の一番人気ホープ・ダイヤモンド。右はペンダントから外された状態で展示(別日に撮影)。(下)自然史博物館の裏人気、Allende隕石のナノダイヤモンド。

アリゾナ州フラッグスタッフにあるバリンジャー・クレーターを見に行く機会があった。見渡す限り何もない赤茶色の台地にバリンジャー・クレーターに行くためだけに作られたような道路があり、クレーターが忽然と姿を現す(図3)。到着してみると観光地化されていて快適に見学ができ、資料館ではこのクレーターを作ったキャニオンディアプロ隕石を見ることができる。クレーターは比較的こじんまりしていることもあり、たどり着くまでの壮大な景色のほうが感動し



図3: バリンジャー・クレーター(上)とそれに続く道路(下).

たというのが正直なところ。ともかく隕石研究者としては一度は見ておきたかった。

3. ワシントンDCでの日常

自炊ができないとつらからう。小さい研究所なので学食のようなものは無いし、日本の牛丼屋のように安く手軽に健康的な(?)ものが食べられる店はなく、自炊できないとジャンクフードばかり食べることになる。私は近くのスーパーで食材を買ってきとうな自炊をしていた(実験屋は料理くらいできないと務まらない)。カーネギー研究所にはランチクラブというシステムがある。持ち回りでメンバーの分のランチを作る、というものだ。最初は入ってみたのだが、ベジタリアン対応も含めて大人数の料理を作るのは思いのほか大変で、すぐにやめた。あとは夕飯の残り等をランチに持って行ってた。あるとき居室でお昼ご飯のおかずにご飯の缶詰を食べていたら(手抜きすぎだろというつつこみは無しで)異臭騒ぎを引き起こした。この匂いは○○○(なんだか忘れたが薬品名)

じゃないか?などと言われてしまった(鯖だよ)。

時々、韓国人の留学生にコリアンマーケットに連れて行ってもらったり、中国人のポスドクにチャイニーズマーケットに連れて行ってもらったりした。ついでに食べる本格韓国焼肉や本格中華がおしかった。中華では外来植物として規制されているという空心菜(大好物!)を裏メニューだといって出してもらった。アジア系スーパーでは米やなじみの食材が手に入るし、日本からの輸入品も売っている。たまに珍しい果物やウチワサボテンの瓶詰といった変わったものを試してみるのも楽しい。ダウントウンのほうに行くと日本からの輸入食材を専門に売っている小さな店もあった(高いしあまり行かなかったが)。

多国籍なDCらしくいろいろな国の料理のレストランがある。日本料理も本格的なものからカリフォルニアロールが出てくるようなところまで様々だ。珍しいところではギリシャ、ロシア、アフガニスタン、アフリカ料理などがあつた。どこの料理だか忘れたが(東欧のほうだったか?)、「タベルナ」という名前のレストランがあつた。食堂のような意味らしい。

レストランなどでアルコールを頼むと必ずIDを問われる。そのたびにパスポートを出すのはなかなかしんどい(あまり持ち歩きたくない)のと、好奇心から運転免許を取つた。日本の免許があれば、その翻訳(日本大使館で作ってもらえる)と簡単な試験だけでアメリカの運転免許が取れる(簡単な試験と書いたが1度は落ちた)。ペーパードライバーだったこともあり車の運転はしなかつた。DCは地下鉄やバスが発達しているので車がなくても生活はできる。車が必要な時は誰かに便乗、というパターンが多かつた。

車がないかわりに自転車によく乗つた。ワシントンDCは10マイル四方なので、ある日周囲を一回りしてやろうと思つて勇んで出かけたが、自転車が通れない道もあつたりして、半分くらいで挫折を余儀なくされた。挫折してもバスや地下鉄に自転車を乗せられるので便利だ。当時スマホは持っていなかつたので紙の地図を見ながら走つた。道に全部名前がついているのでわかりやすい。ちなみにDCは南北に走る道路には中心から外側にむかつて1st street, 2nd streetといった名前がついていて、東西に走る道路には南から、A street, B streetとなっている。都会の割に自然が多く、ジョギングやサイクリング用に

コースが整備されている。そのような所はのんびり散歩している人やジョギングしている人、自転車の人がいる。自転車が歩行者を抜くときは“On your left”と後ろから声をかけて、左側を通るから気を付けてと注意を促す習慣がある。

行かないほうがよい(治安が悪い)と言われていた南東のほうにも昼間なら大丈夫だろうと思ひ行つてみた。実際のところ、暑い中自転車で走っていると、庭のピニールプールで涼んでいた人が、水かけたらか(暑いから涼めるようにというよい意味で)、のように声を掛けてきたりと気さくな感じであつた。治安の悪さを感じたのは、飲み物かなにかを買いにスーパーに寄つたときに、店員から自転車に鍵をかけたかと念をおされたことと、店に入るときにバックバックを預けなければいけなかつたこと(万引き防止と思われる)であつた。このような対応は初めてだつた。この地域で見かけたのはほぼ100%アフリカ系(もしかしたらラテン系もいたかもしれない)だつた(私はさぞ浮いていたであろう)。いまだにこのような人種格差があるのがアメリカの現実なのだと思つた。

とはいえ、先にも述べたが基本的にDCは多様性の街である。今でこそ日本でもLGBTQ+といった言葉をよく聞くが、DCはだいぶ先を行つており、毎年Pride Paradeという彼らが主役のお祭りがあるし、カーネギー研究所でもイベントの際などに普通に同性のパートナーを連れてきているポスドクもいた。これは日本に帰つてから聞いた話だが、カーネギー研究所の事務系スタッフの一人が同性のパートナーと結婚したそうだ。

アメリカ人はお祭りが好きだ。何かにつけてお祭りがある。私が一番好きなのはハロウィンだつた。いまでこそハロウィンは日本にも浸透してきているが、当時(少なくとも私が渡米する前)はさほど一般的ではなかつたと思う。ハロウィンシーズンになると、家々の前に工夫を凝らしたハロウィンの飾りつけがなされて、それを見るだけでも楽しかつた。渡米した最初の年には、Trick or treatをやつてみたくて、半ば強引にお菓子をもらいに家々を回つたことがある(本来は子供がやるものだ)。私ともう一人の日本人ポスドクにつきそつてくれたアメリカ人は苦々しく、こいつらハロウィンの習慣がない日本から来たので…、などと言ひ訳をしてくれていた。申し訳なかつたがとても良



図4: かぼちゃの伊達政宗.

い経験をさせていただいた。カーネギー研究所ではかぼちゃ彫りコンテストがある。初年度は日本人チームで、かぼちゃの伊達政宗を作って優勝した(図4)。一方で、クリスマスの後には家々の前にクリスマスツリーの残骸としてそこそこ立派な本物の木が打ち捨てられており、毎年使い捨てたのかと悲しい気持ちになったものだ。

桜の季節にはNational Cherry Blossom Festivalがある。DCは桜が名物で、ダウントウンのナショナルモールには日本から寄贈された桜が植わっており、桜の季節には観光客や地元民がこぞってお花見に来る(図5)。日本のようにがっつりブルーシートを敷いて酒を飲むという習慣はないが(そもそもアメリカは公共の場所でお酒を飲むではいけない)、レジャーシートをひろげてランチを食べたりくつろいでいる人々はちらほらいた。お花見文化はDCに根付いているようで、例によって自転車でうろうろしていた時に、なんでもない住宅地の合間の公園に桜がたくさん咲いており、地元民(おそらく)がレジャーシートでお花見をしていたのを見かけたことがあった。ちょうど満開な折りでもいい感じだった。カーネギー研究所の庭にも小さな桜の木があった。

2011年のCherry Blossom Festivalは、東日本大震災のすぐ後だったため、追悼やチャリティー活動も行われていた。3月11日当日はLPSC(月惑星科学会)でテキサス州ヒューストン郊外にいた。ホテルで朝ご飯を食べているときについていたテレビになんとなく目をやったらすさまじい津波の映像が映っていたのだが、テレビの音声はほぼ聞こえなかった



図5: ジェファーンソン記念館付近の桜.

し、その時はまさかこれが本物とは思わなかった。LPSCの会場についたらなんとも不穏な雰囲気、朝の映像が本物だったと気づいた。学会から戻ってしばらくたって少し落ち着いたところに日本に一時帰国した。食料が不足しているらしいとのことでカップ麺やらを買い込んでスーツケースに詰め込み、すかさずかの飛行機で帰国した。成田エクスプレスからの景色の時点で、屋根に青いビニールシートが被せられているような家を多く見て、被害を実感した。宇都宮の実家は幸いさほど被害はなかったが、計画停電で信号機がとまっていて怖かった。

DCは基本的に地震のない土地柄だ。あるとき研究所で揺れがあって、ラボで爆発でもあったのかととりあえず外に避難、どうやら地震だったようだ。体感的には震度3くらいだったのだが、地震対策をしていない分、住んでいたアパートの壁にひびが入ったり、街の有名な大聖堂の一部が崩れたりと意外と被害が大きかった。研究所でよく使っていた顕微赤外分光装置の管理者が、装置は大丈夫かと心配していた。日本分光(JASCO)製の装置だったので、日本ではこの程度の地震はしょっちゅうだから問題ないと言ったら納得していた。

最後に、海外にいと、海外(ここではアメリカ)の良さと逆に日本の良さ、両方に気づくことができ、研究面だけでなく人生経験として貴重な体験であったと思う。若い方(に限らず)、機会があれば海外研究生活をしてみることをお勧めしたい。質問などお気軽にお声がけください。10年ほど前の話なので、記憶があいまいな点があることはご了承ください。

著者紹介

癸生川 陽子



横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授. 大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻博士課程修了. 博士(理学). カーネギーポストドクトラルフェロー, 日本学術振興会海外特別研究員, 日本学術振興会特別研究員PDを経て2014年4月より現職. 専門は宇宙化学・分析化学. 地球外の有機物の分析や実験的研究を行っている. 日本惑星科学会, 地球化学会, 生命の起原および進化学会, 日本宇宙生物学会, 日本分析化学会に所属.

「第7回iSALE講習会」参加報告書

黒崎 健二¹

2022年6月17日から7月15日にかけて第7回iSALE講習会がオンライン形式で開講した。iSALEはImpact-SALE(Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)の略称で、数値衝突計算コードの1つであり、欧米の科学者を中心に現在でも開発が進められている[1-4]。本年度は国立天文台シミュレーションプロジェクト(以下、CfCA)の支援のもと、週1回・全5回のオンライン形式で開催された。講習会Cisco WebExを用いた講師による講義スライドを用いた

解説、CfCAの共同利用計算機でのiSALE実行およびpySALEPlotを用いた解析の実習を行った。講習会の内容は、講師が執筆した講習会テキストの内容を基にしている。本年度の参加者は10名であった。本講習会はCfCAの協力のもとで開催されており、計算サーバを一部講習会専用貸し切りに使用した。専用の計算サーバはジョブ投入後の待ち時間がないため快適に使える。講習会の時間割は以下のとおりである。

■2022年 6月 17日(金)

- 13:30 - 13:45 講習会の流れについての説明
- 13:45 - 15:30 iSALEの概要と衝突物理学と数値流体計算の基礎1(講義編テキスト3章途中まで)
- 15:30 - 15:35 国立天文台共同利用計算機についての解説 (by 国立天文台 CfCA 伊藤孝士氏)
- 15:35 - 15:40 国立天文台共同利用計算機へのログイン方法についての解説
- 15:40 - 16:10 講習会専用サーバ上でのiSALE実行と配布ファイルの解説(実践編テキスト 1, 2章)
- 16:10 - 16:30 iSALE開発チームによる例題の紹介(実践編テキスト 3.3節)

■2022年 6月 24日(金)

- 13:30 - 14:45 衝突物理学と数値流体計算の基礎2(講義編テキスト3章続き)
- 14:50 - 15:20 iSALE入力ファイル(asteroid.inp)の読み方解説(実践編テキスト 3.1節)
- 15:20 - 16:00 iSALE入力ファイル(material.inp)の読み方解説(実践編テキスト 3.2節)
- 16:00 - 16:30 iSALEの計算出力についての解説(実践編テキスト 4.2節)

■2022年 7月 1日(金)

- 13:30 - 14:30 衝突物理学と数値流体計算の基礎3(講義編テキスト4, 5章)
- 14:30 - 15:30 iPythonを用いたpySALEPlotの解説(実践編テキスト 4.3節)
- 15:30 - 16:30 初級課題(実践編テキスト 4.4節)

1. 神戸大学大学院理学研究科
kenji.kurosaki@people.kobe-u.ac.jp

■2022年 7月 8日(金)

13:30 - 16:30 中級課題(実践編テキスト 5章)

■2022年 7月 15日(金) :中間発表会

13:30 - 15:30 各自の計算

15:30 - 16:15 各自の計算結果発表

16:15 - 16:30 計算サーバへの申請方法の解説

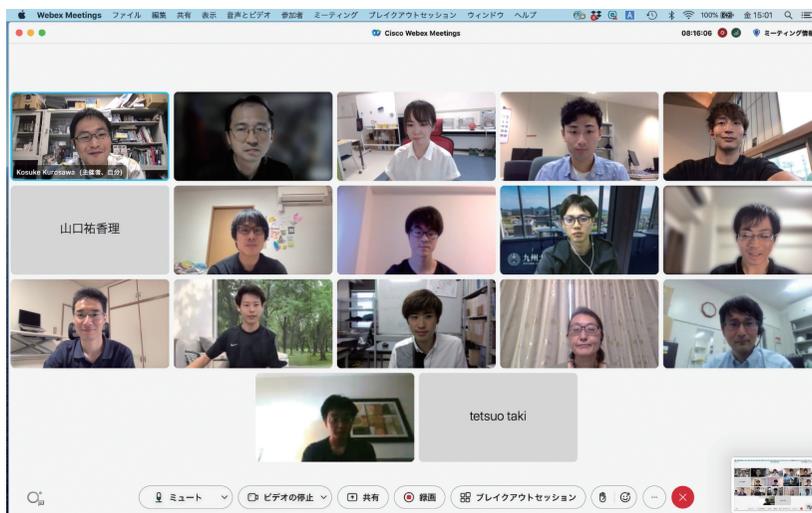


図1: 講習会の集合写真.

講習会一日目はiSALEの概要と衝突物理学の基礎的な内容の講義から始まった。iSALEは科学利用目的では無償で利用できるコードであり、アイデア次第で様々な理論研究のテーマに取り組める。iSALE講習会 の講師をしていただいている黒澤耕介氏と寫木有理氏はともに実験系出身の方々であり、もともと理論系出身ではない人や、周囲に理論系や数値計算の経験が豊富な研究室出身でなくても活用できるように配慮された講習会となっている。さらにiSALEコードでは弾性体や塑性体をモデル化して取り入れてあるため、実在の物質の実験結果との比較にも適している。

講習会二日目は実際にiSALE のデモンストレーションコードを動かしてみて、pythonスクリプトと併用して計算結果の可視化を実施した。iSALEコードは衝突体と標的の形状や大きさ、衝突速度、物質モデルの設定を容易に変更できる。それらの計算設定

の扱いを手動的に取り扱い、各々が計算したい系をどのように作るかの解説がなされた。

講習会三日目は、座学でiSALEが取り扱える計算モデルのほかに、iSALEでは取り扱えない物理現象など、iSALEを使った研究を実施する上でのコツや注意点についての解説がなされた。計算設定ファイルの操作方法を前回の授業で理解した次に、実際に計算を動かしてみてその計算結果の可視化と解析をおこなった。

講習会四日目はiSALEの解析でトレーサー粒子を用いた計算結果の解析をした。トレーサー粒子を活用することにより、流れ場に沿った動きの物理量を追跡することで衝突に伴う物理現象を追跡し、衝突を経験した物質が経験した圧力や温度を知ることができる。衝突現象が標的や衝突体にどのような変化をもたらすかを数値計算から探るために重要な手法であるといえる。図1にiSALEを用いた数値

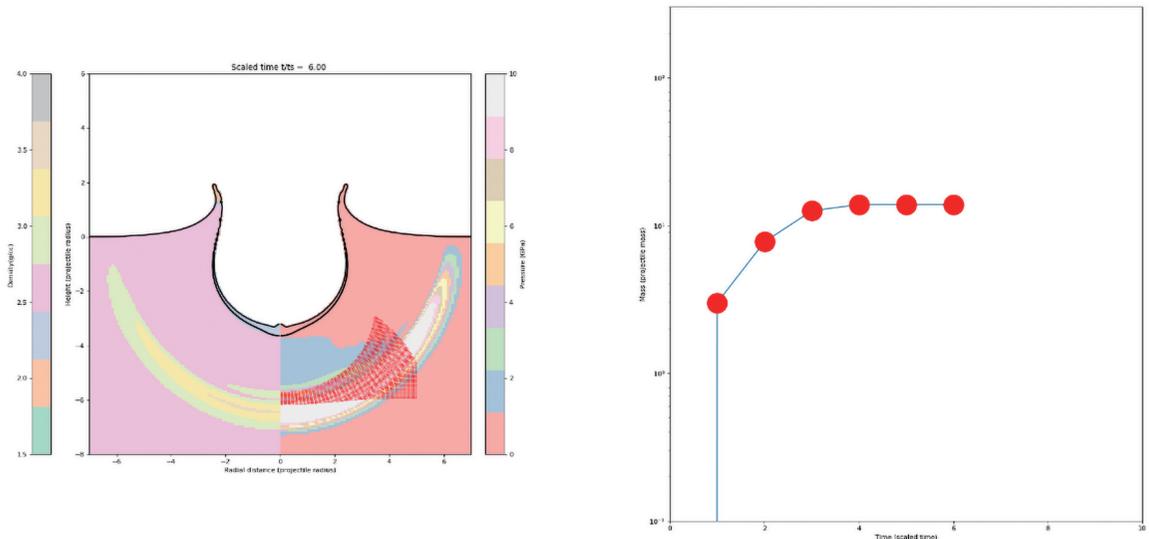


図2: 衝撃波面とpySALEPlotを用いた解析の一例。左図は衝突に伴う密度および圧力の変化を表す。右図はトレーサー粒子の解析を活用し、速度が上向きとなったトレーサー粒子の総質量の時間発展を書いたもの(講習会四日目の課題より抜粋)。

計算結果の解析の一例を掲載する。

講習会五日目、最終日は中間発表としてそれぞれが設定した課題に取り組み、その中間成果を報告した。参加者の発表内容はどれもサイエンステーマが明確で、計算したい内容や研究目標に沿った計算設定を構築しており、今後iSALEから優れた研究が多くなることが期待できる内容であった。最後に、iSALEを用いた研究を継続するためにCfCA共同利用申請方法が紹介された。講習会がすべて終了した後に、参加者同士の親睦を深めるため懇親会を行った。懇親会ではiSALEに関する議論を行う場と、学生同士で今やっている研究や興味がある分野について語り合う場に分かれて親睦を深めていた。図2に参加者の就航写真を掲載させていただいた。

以上、簡単ではあるが第7回iSALE講習会参加報告を行った。講習会期間中はSlackワークスペースを作成し、講義資料配布・質疑応答・情報交換などができ、iSALEに関する質問は黒澤耕介氏が、CfCA計算サーバの取り扱いに関する質問は伊藤孝士氏が即時対応し、無理なく講習会についていける。第三回以降は講義開始前の12:30-13:30に演習問題の解説・質問を受け付ける補講を希望者向けに設けて

いた¹。さらに、講義の様子録画も用意されていて、講習会期間中は自由に閲覧できるようになっており、講義内容の復習がしやすい環境を整えていただいた。そのため参加できなかった場合や、忘れてしまった内容を確認したい場合などで録画を活用し、効率的に学べるような配慮がされていた²。筆者は2019年に国立天文台三鷹キャンパスで開催された第4回iSALE講習会にも参加している。対面で開催された講習会と比較してみた場合、参加者が少人数であるならばオンライン形式の講習会のほうが良い面もあると考える。筆者が考えるオンラインの利点を以下に挙げる。

1. オンライン講習会は毎週金曜開催であり、自分でコードを扱ったり調べたりする時間を比較的とりやすい。数値計算は自分で手を動かして学習することが重要であるため、短期集中の対面式講習会

¹時間に都合がつく参加者はほぼ全員参加していたようだ。演習問題を独力で解いていても、講師の解説や質問を通して内容の把握に努める参加者が多くみられた。

²講習会後の懇親会で録画についてアンケートを取ったところ、演習課題や各自の計算課題の取り組み中に内容の復習で録画を見直す人は参加者の半分以上を占めていた。講習会中に限定して録画を残すことは非常に有益であるようだ。

よりもオンラインで週一度開催される講習会のほうが試行錯誤する時間を多くとれる³。

2. 今年度から録画を再度確認することができるため、自分で復習する際に資料として活用しやすい。
3. Slackを用いた質問でも即時に対応がされるなら対面で行う場合と大きな差がない⁴。
4. 計算を行う上で誰かがつまづきやすいポイントは他の人もつまづくポイントであるため、質問がログとして残るSlackは講習会用FAQとして共有される。FAQを読むだけでも自分が通らなかった試行錯誤を知る機会になるため理解が深まりやすい。

以上のことから、比較的小規模で密度の高いiSALE講習会では、オンラインでも十分な学習成果をあげられると考えている。

最後に、本講習会の開催にあたりご尽力いただいた講師の黒澤耕介氏、 寫木有理氏に感謝いたします。また、国立天文台CfCAの伊藤孝士氏、加納香織氏、波々伯部広隆氏には講習会中の計算サーバ・解析サーバの利用などの環境の提供や講習会中のフォローをしていただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [2] Ivanov, B. A. et al., 1998, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [3] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.

³課題に真面目に取り組む場合は、まとまった自習時間を確保する必要がある。

⁴その反面、講師はSlackの対応に追われやすい。特に中間発表会前日は多数の質問が入り乱れるため講師の負担が大きかった。

著者紹介

黒崎 健二

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻特命助教、
東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、博士(理学)、東京大学特任研究員、名古屋大学博士研究員、日本学術振興会特別研究員PDを経て、2022年9月より現職。専門は天体衝突、惑星内部・大気構造。日本天文学会、日本惑星科学会、日本地球惑星科学連合に所属。

第14回月惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英¹, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 第14回月惑星探査データ解析実習会の報告記事です。今回のテーマは『理学と工学がハイブリッドした、月面ローバー探査のためのデータ解析とSLAM体験』でした。新型コロナウイルス感染症対策として、ZoomとSlackを併用した多地点オンライン実習会の形式を取りました。申し込みのあった受講生の内訳は11機関(前橋工科大学, 東京大学, 青山学院大学, 奈良女子大学, 名古屋大学, 東海大学, 東京理科大学, 早稲田大学, 大阪大学, JAXA/ISAS, 会津大学)24名, 講師および世話人が6機関(東大, 阪大, JAXA, 慶応大, 神戸大, 会津大)13名, 理学パート工学パートで部分的に参加した人もいましたが, 多くは通して参加して理学と工学の交流が図れました。本実習会は, 日本惑星科学会, 神戸大CPS, 会津大学ARC-Spaceの共催で行われました。

第14回目を迎えた月惑星探査データ解析実習会は, おそらく過去最高の参加人数で大盛況でした。前回同様, 新型コロナウイルス感染症対策として, ZoomとSlackを併用し講師も参加者も分散した多地点オンライン実習会として実施しました。今回のテーマは『理学と工学がハイブリッドした, 月面ローバー探査のためのデータ解析とSLAM体験』というものです。SLAMとは, Simultaneous Localization and Mappingの略語で, 自己位置推定とマッピングを同時実行する技術を指します。初日は, 理学の観点からどのように着陸地点を選定するのかを学び, 二日目は工学の観点から着陸広報誘導技術とローバー実験, そして実際にSLAMを体験する実習が行われました。最終日は受講生から学んだこと体験したことを成果発表してもらい, 続いて今回初めての企画として学会長や講師と受講生との意

見交換会をしました。後述のアンケート結果の通り, この企画は受講生に好評でした。

申し込みのあった受講生の内訳は11機関(前橋工科大学, 東京大学, 青山学院大学, 奈良女子大学, 名古屋大学, 東海大学, 東京理科大学, 早稲田大学, 大阪大学, JAXA/ISAS, 会津大学)24名, 講師および世話人等が6機関(東大, 阪大, JAXA, 慶応大, 神戸大, 会津大)13名, 一部パートのみ参加した人もいましたが, 多くは通して参加して理学と工学の交流が図れました(写真1)。成果発表直後の意見交換会では, 探査にどう関わっていいのか, が話題になり, 実際に参加したいという受講生がたくさんいました(写真2)。なお, 本実習会は, 日本惑星科学会月惑星探査育英会, 神戸大CPS, 会津大ARC-Spaceの共催で行われました。

1. 会津大学宇宙情報科学研究センター
demura@u-aizu.ac.jp

開催日程: 2022年3月1日9:00~3月3日13:00

開催場所: Zoom多地点接続

主催: 月惑星探査育英会

共催: 会津大学宇宙情報科学研究センター

後援: 日本惑星科学会, 神戸大学大学院惑星科学研究センター(CPS)

実習会詳細および資料:

https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school_mission-14

講師および主な内容:

1日目(理学の座学と実習): オムニバス形式の座学+着陸地点評価選定練習課題

はやぶさ2着陸地点選定紹介: 諸田智克(東大)

SLIMの理学目標と着陸点検討: 佐伯和人(阪大)

SLIM着陸点周辺のボルダー計測: 本田親寿(会津大)

LUPEXの目標とミッション概要: 大竹真紀子(会津大)

LUPEXの着陸点検討に向けた解析: 井上博夏(JAXA)

実習: 既存のリモセンデータを使った課題領域の地形・地質評価と選定実習

2日目(工学の座学と実習): オムニバス形式の座学+SLAM作成実習

ローバ技術一般+大島での走行実験について: 石上玄也(慶應大)

SLIM着陸技術について: 坂井真一郎(JAXA)

SLAM紹介(座学)+実習: 山田竜平(会津大)

3日目(実習課題発表会+意見交換会):

理学・工学実習時に紹介する課題の成果発表

(理学: 着陸点選定, 工学: 探査におけるSLAMデータ活用アイデア)

受講者は理学・工学好きな方の課題を選んで発表

実習会のラップアップと今後の探査技術に関する意見交換会

講評(講師, 中村惑星科学会長), 意見交換

世話人: 大竹真紀子, 本田親寿, 平田成, 西谷隆介, 小川佳子, 出村裕英

参加者アンケート結果

●新規企画: 講師と学会長を囲む意見交換会についての意見や感想

他の受講生や講師, 世話人の方が抱えている案などを知ることができ, 自らの知見も広げることができました。非常に楽しい時間でした。

若い人達がちゃんと未来のことを考えていて, 日本もまだ捨てたものじゃないと思いました。

このような機会があることに驚きました。ぜひ継続的にこのような議論の場を持っていただけると嬉しいです。

非常に良かったです。世話人の方々ができるようなことを考えておられるのか, 若者がどういう思いや悩みを抱えているのか, 聞いてとても充実しておりました。

他の参加者の皆さんや講師の先生方がどのようなことを考えているのか聞けたので良かったです。

話を聞いて面白かった。できれば, 対面で交換会後の交流(一人ひとりに話に行く, 連絡先を交換する)があればよいと思った。(学生同士や先生, 講師の方を含めたものなど)

学部生にとっては縁遠い話もあったが, 修士以上の学生にとって直接要望を言う機会というのは限られていると思うので, すごくいい場だと思った。有意義な意見交換がされているように見えた。

申し込み時から楽しみにしていた項目のひとつで, 参加できて良かったです。講師がたや学会長, また参加者同士の交流ができる時間がもっとあると, より楽しく人脈も広げられるのではないかと思います。発表会を午前, 交流会を午後(前半に講師・学

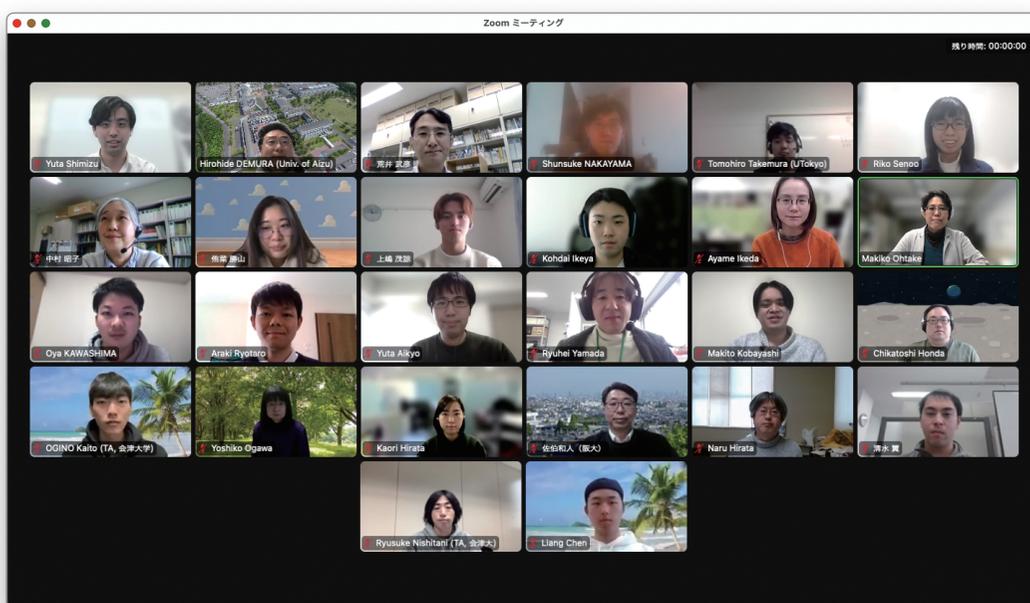


写真1:リモートを含む当日参加者集合写真.

会長を含むもの、後半にブレイクアウトルームを用いた、あるいはメインルーム全体で、(お時間があれば講師の方々も含んだ)参加者同士での交流の時間を設ける)という形だと交流がはかどりそうだと思います。

私も一人の学生として、大人に意見が言えるようになりたいと思った。

なかなか、学会長や講師の教員が若い学生さん達の意見を聞く機会はないので、良い試みだと思います。

参加者から有意義なコメントが多かったので今後もしも続ければ良いと思いました。

さまざまな方とざっくばらんに議論ができる点で魅力的でした。

受講生が多かったおかげで様々な角度からの意見が得られた。少ないと萎縮して今回のような意見はでなかったかもしれない。

学生として探査に関わることについて、日頃からどうすれば良いか疑問に思っていたことへの回答が得られた貴重な機会でした。また、他の院生の方も自分と同じようなことを感じていたと知れたのも良かったです。

学生の率直な意見や要望が表面させていたのが

とても良かったと思います。

第一線で活躍されている研究者の方々と意見を交わしあえる環境に初めて出会った。しかしシャイなので発言できず、交流する勇気を持てなかったことがとてもはずかしい。

講師や学会長だけの意見交換だけでなく、学部生の疑問に修士や博士の方が質問に答えていたのがいいと思ったし、とても参考になりました。

●完全オンラインでの実施に対するご意見・要望・感想

ペアとさえもなかなか交流は取りにくかったです。楽しかったです。

メモリ不足によって進行不可の場面があったので、必要なスペックの詳細を事前にご指導いただければと思います。

オンラインで詰まると進めなくなるので、事前準備に時間をかけられたら良いです。

オンラインはもちろん楽が良いですが、対面し、雑談的なことをしつつ実習できるのも魅力だと思っておりますので、情勢が落ち着きましたらぜひ対面の開催をお願いいたします。

自分是对面でいろんな人と仲良くなりたいので、

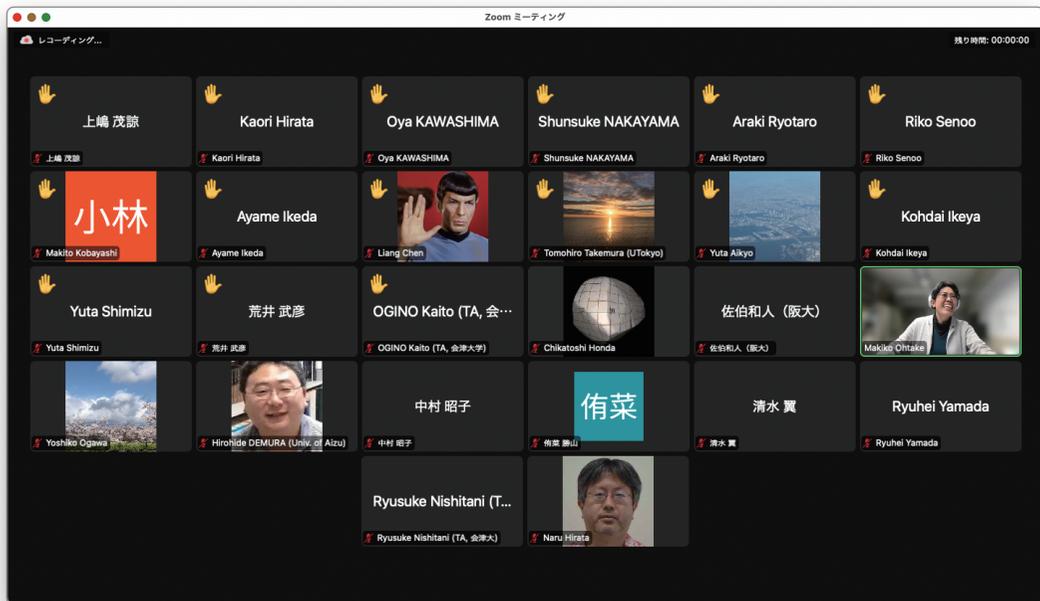


写真2:意見交換会で、探査に参加したいと手を挙げた皆さま。

対面が復活すればと願っております。ただ、コロナがなくなってもどうしても現地に参加できない人もいると思うので、オンラインも残していただけますと幸いです。

対面よりもチャットベースの議論が多くなり、込み入った議論がしにくいのでやや長めの時間をとっていただければよい。

完全オンラインだったため都合がつけられた面があったので、オンラインで良かったです。

比較的気軽に参加できるので良いと思う。今回はオンラインながら、ブレイクアウトルームなど質疑対応がしっかりしていたので、質問しやすかった。ただ対面での機会があると嬉しい。

ブレイクアウトでの対応が手厚く、気兼ねなく聞きやすい環境になっていたのがありがたかった。

Slack・zoomで手厚くサポートしていただけてとてもありがたかったです。

気軽に受講できたのはよかった反面、実習中の行き詰まったときに孤独をととても感じて辛かった。

やはりslack上よりも対面の方が直接指導できるので、教えやすい面はある。ただ、遠隔の人が気軽に参加できるのは良い面でもあるので、オンラインの

機会はあっても良い。

出張よりもハードルが低いため参加しやすく大変ありがたかったです。

PCの不具合などは対面であればもう少し早く解決できたかもという場面が多々ありました。一方、これだけの人数が参加してくださったのは完全オンラインだったからだとも思います。願わくばハイブリッド開催ですが実習会のハンドリングを考えると難しいところです。(実習フル参加の方は対面で、聴講+意見交換会のみ参加の方はオンラインにするなどにするとうりやすい?)

研究室から参加できるため便利である一方、いろいろな学生間での交流がもう少し充実すると良いと感じました。

コロナ禍仕方なくオンラインで行ったが、そのおかげで受講生が増えたと思う。一方で工学パートは対面がふさわしく、データ取得からできると全体の流れがつかめて良かったかも(亀動かしてシミュレートしたのですが分かりづらかったかも)。

実習パートでは質問対応でメインルームが滞るタイミングが何回もあり、オンライン開催の難しさを感じました。一方で、Slackやブレイクアウトルームでの

TAや世話人の皆様の対応がとても丁寧で大変助かりました。ありがとうございました。

オンラインでも、ブレイクアウトルームやslack等で質問をしやすい環境を作ってくださいとても進めやすかったです。

参加者方々の質問対応が難しく感じます。相手の状況の把握も、操作の指導も難しく感じます。可能であれば事前準備の段階で(未経験者の理解間違いを下げるために)参加者たちの環境を共有画面で確認する時間を作った方が、自習が全体的にスムーズに行けるかもしれません。質疑対応につきましては、セキュリティ面の心配もありますが、TAが操作で手本を見せた方が参加者たちにとっては理解しやすいと思います。参加者の画面だけ見える状態では、言葉の指示でPCの操作をさせるのは多少難しいと思います。

パソコンを2台使っていたので分からないことを聞くとき、画面共有ができなかったので不便でした。なので、できることなら対面の方がいいと思いました。

●次回以降の希望テーマとしては

下記が挙げられました。

他天体のリモセンデータ解析、月面の画像処理と機械学習技術、ポイントクラウドからのDEM作成、火星・氷天体・小惑星のデータ解析、探査機の軌道、SP(昨年参加してないので)、レーダデータ、着陸地点選定、ローバーのアームやタイヤのCAD作成、ローバーシミュレーション、惑星大気、「はやぶさ2」、RTFの見学会も含めた不整地(箱庭)のフィールド実習等、形を計測する解析方法の解説をオムニバスで、ISIS講習、GDAL講習、分光観測の生データ(カウント)からスペクトルデータへの変換、小型衛星の軌道設計

●実習会への意見・要望・感想(記名)

川島桜也(D2)非常に有意義でした。私は以前のかぐやSPデータ解析会にも参加させていただいており、今回のTC/MI解析は話として繋がりがあがる部分も多く、テーマにも入り込みやすかったです。ROSに関してはubuntuを使ってオペレートするという不慣れな部分からのスタートでしたが、なんとかLIDAR-SLAMの原理を理解して、最後マッピング

する技術まで無事にフォローできて良かったと思います。あとは、測器で取ったデータをROSに取り入れる部分までのプロセスを体験することや、(より高度には)遠隔でロボット(または測器)を操作してデータを通信して無人でマップを作ってみることなど、もう少しアドバンスな部分もご教授いただければと思います(将来の惑星探査への応用という部分でよりイメージが湧きやすいと思うので、今回の実習のフォローとしてぜひそんな機会も設けて頂ければと存じます)。

荻野魁人(B3)自身の研究分野外のことを知る事ができる、非常に有意義な実習会でした。

荒井武彦(スタッフ)教員の立場からの意見ですが、優秀な学生が集まってくださっていて、びっくりしました。この人達が将来の惑星探査を引っ張る人になれるよう、交通整備できると良いです。

小林真輝人(D2)毎年、準備から運営までお忙しい中ありがとうございます。今年も興味深い内容で、来年以降も楽しみです。

清水雄太(D1)世話人の皆様、この度はお忙しいところ素晴らしい実習会をありがとうございました。第一線の方々のお話を聞けるだけでなく議論もでき、さらにデータ解析の手法を学ぶので、とても価値の高い3日間だったと感じております。今後さらにこの実習会が発展し、惑星探査を担うような若者がここから生まれ、実際に論文になるような成果が出るようになると、さらに意義深いものとなると考えます。個人的には火星や氷天体のデータを扱うような機会があると非常に嬉しく思います。ありがとうございました。

愛敬雄太(B4)実習では初めてQGISやSLAM用ソフトウェアを扱いましたが、途中で分からないことやトラブルがあった場合も丁寧に対処していただけたので、データ解析の初心者でも安心して実習することができました。また、着陸技術やローバーのような工学的なお話は普段聞く機会がないため、今回の実習会で聞くことができて良かったです。

池谷広大(B4)今回は参加させていただき本当にありがとうございます。講演では普段聞けない探査の詳細を理学・工学の2つの面から学ぶことができ、大変貴重な経験となりました。さらに実習においても理学・工学の2つを実際に行うことができ、今後の

研究にも役立たせることができそうです。特にMIの解析は、いままで自分の研究で使用したものより詳細かつ自由な解析ができるため、研究室内でも使用法を共有し、実際にしようしていこうと思います。SLAM実習では普段触れていない工学の解析体験ができました。ubuntuの操作は不慣れでしたが、なんとか表示させることができました。惑星探査に学生でも関わることができる、探査データ解析を実際に行えるということは、今後の研究における大きなモチベーションとして、今回の実習会の経験を活かしていけたらよいとおもいます。ありがとうございました。

上嶋茂諒(B2) 長期休みに開講される実習会、スプリングスクールの中でも理学と工学のどちらもテーマにしたものは少なく、惑星探査の一端にダイレクトに触れることができるイベントとして3日間を通して楽しむことができた。理学の講義では、こうした場でなければなかなか聞くことのできないJAXAの行うプロジェクトの裏話のようなものも聞くことができて面白かった。工学の講義では、初めて聞くSLAMの概念とその活用法について理解できた。講義には概ね満足だったが、実習でやる操作のバックグラウンドになる知識に関してはもう少し専門的な説明があってもいいかなと感じた。(勝山さんがおっしゃっていた「何をやっているか分からない」状態になることを防ぐ程度に)。実習について、1日目のQGISでRGB図を出力できたときが最も達成感を感じた。自分の手で画像から月面の地形およびその物質組成などを調べられたからだと思う。2日目は自分は準備段階で躓いてしまい、TAや世話人の方にも長時間に渡ってお力添えを頂いたが、あまり満足に操作ができなかった。1日目の実習に比べこうしたソフトに触れる経験の多寡が大きく影響しやすかったのだと思う。(オンライン開催だったことでフォローがより難しくなっていたとも思った。)全体を通して本当にハードなスケジュールだったので、できればもう少し時間に余裕があるとよりよかったと感じた。講義が休憩時間なく続いたのもかなりハードだったので、2時間に1度程度は休憩時間が欲しいと感じた。最後に、私は最年少の参加者の一人だったので、特に実習の面で他の参加者に比べ経験不足を感じることはありましたが、全体を通して非常に楽しめました。今までブラックボックスのように感じていた惑星探査

の科学的手法の見方が少し変わり、ひとつ道が見えたように思います。サポートを頂いたTA、世話人、講師の方々、受け入れて頂きありがとうございました。

妹尾梨子(B3) 小さい頃から小惑星探査機はやぶさや惑星が好きで惑星探査に興味があったので、実習会に参加させていただきました。これまで、興味があっても地球以外の天体のリモセンデータ解析などを行う機会がほとんどなかったのですが、今回の実習会で初めて体験できてとても嬉しく、有意義な時間でした。先日大学で地球についてのリモセン・GIS実習でQGISを扱っていて、地理関連で用いられているものだと思っていたのですが、今回の実習で地球以外の天体でもQGISを使って色々と解析できることを知って、とても楽しかったです。座学では理学・工学の両方の先生方から探査について色々なお話を伺うことができ、漠然と興味のある惑星探査にどのような研究が関わっているかを知ることができたので、惑星探査に関する研究の世界が自分の中で少しでも明確になりました。宇宙の研究に携わりたいというのは漠然と決まっているのですが、その中でもどのような手法で何を対象にして研究したいのかということについてまだ迷っています。今回の実習で実用的な手法を学べたことで、探査データ解析をメインに研究することになったときにはアドバンテージになりますし、もしサンプル分析などのデータ解析ではない手法をメインで惑星関係の研究に関わることになっても、今回学んだ探査データ解析の手法と、他の手法の両方を使って手法にとらわれない研究ができるようになるのではないかと期待しています。この実習会は主に院生向けのものだと思っていたのでついていけるか少々不安でしたが、先生方やTAさんたちが手厚くサポートしてくださったので、学部生の私でも安心して実習会に参加することができました。3日間でたくさんのことを学ぶことができました。本当にありがとうございました。

勝山侑菜(B2) 一人前になってから出直します。

山田竜平(スタッフ) 今回、初めて実習会の講師役を務めましたが、私自身も良い刺激を受け、勉強になりました。また、理工問わず、探査に関わる人材が広く関わられるような会になっていければ良いと思います。

井上博夏(スタッフ) 今回はタイミングがプロジェクト繁忙期と重なり、自分の発表時間以外にあまり参

加させていただくことができず残念でしたが、実際に手を動かす実習会の中で、実際のプロジェクトの例を実際のプロジェクトの中の先生方からご説明いただける機会は学生さんにとっても貴重な時間であると思いました。講師としても興味深い体験ができました。今回は、お声掛けいただきありがとうございました。

竹村知洋(M2) 様々なバックグラウンドを持つ方が集まっており、大変魅力的な講習会でした。ありがとうございました。

平田佳織(M2) 3日間にわたって丁寧にご指導いただきありがとうございました。理工学の融合という普段から興味を持っていたテーマで、探査に直結するようなデータ解析手法の基礎を習得でき、とても有意義でした。講師、世話人、TAの皆様、本当にありがとうございました。学会や論文だけではなかなか知ることができない、開発中の悩みや運用中の様子などのお話を聞くことができ大変興味深かったです。講師の皆様、世話人・TAの皆様、ありがとうございました。

鶴見美和(B4) 学会や論文だけではなかなか知ることができない、開発中の悩みや運用中の様子などのお話を聞くことができ大変興味深かったです。講師の皆様、世話人・TAの皆様、ありがとうございました。

金丸仁明(PD) 資料の共有など、部分参加にも対応いただきありがとうございました。

中村昭子(スタッフ) 理学畑の人が工学的考え方に触れることができる貴重な機会を提供となっており、また、参加学生・講師による活発で率直な質疑応答・意見交換が印象的でした。企画・運営のご尽力に感謝するとともに継続を期待します。

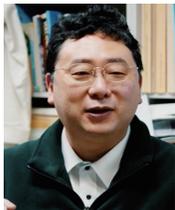
中山舜介(M1) この春休みの中でもっとも学びが得られた三日間です。データ解析からSLAMの実行に至るまで、手取り足取り教えていただきました。自身が手探りでこのようなテクニックを独学するならば、膨大な時間をかけていたと思います。貴重な講義・実習を開催していただき、誠にありがとうございました。

清水翼(B3) 自分は学部生で知識が浅く、実習会に参加するのが不安でしたが講師の方の説明やスライドがとてもわかりやすかったので理解しやすかったです。2日目で学んだSLAMに関しては興味をもつ

たので今後も調べていき卒業研究などに活かしていきたいです。

著者紹介

出村 裕英



会津大学宇宙情報科学研究センター教授・センター長、惑星科学会を母体学協会とする共同利用・共同研究拠点「月惑星探査アーカイブサイエンス拠点」の長、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士(理学)、旧NASDA宇宙開発特別研究員を経て、2002年11月より現職。専門は惑星科学や探査理工学と情報科学が融合した月惑星探査アーカイブサイエンス。惑星科学会のほか、IAU, The Meteoritical Society, 地球惑星科学連合, リモートセンシング学会, 測地学会, 情報地質学会, 東京地学協会, 情報処理学会に所属。

New face

荒川 創太¹ (海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター)

皆様、こんにちは。荒川創太(あらかわ そうた)と申します。今年の4月から海洋研究開発機構(JAMSTEC)の横浜研究所で研究をしております。2020年3月に中本泰史先生のご指導の下、東京工業大学で博士号を取得し、2020年4月から今年の3月まで国立天文台科学研究部に日本学術振興会特別研究員として所属していました(受入研究者は小久保英一郎先生)。学位取得から時間が経過し、学生時代の記憶が曖昧になってきておりますが、このようなありがたい機会をいただきましたので簡単に自己紹介をさせていただきます。

私は東京都府中市で生まれ育ちました。府中市の郷土の森博物館には素敵なプラネタリウムがあり(天文月報の裏表紙で一部の皆様にはお馴染みの五藤光学研究所も博物館の周辺にあります)、また、NEC航空宇宙システムや航空自衛隊の宇宙作戦群なども市内にあり、「宇宙」との距離は近かったのかもしれない。ですが、大学進学以前に惑星科学・天文学に特別な興味・関心を持つことはなかったのではないかと思います。

東京工業大学(東工大)の理学部(当時の名称は第1類)に入学した際、一緒に特別入試(当時の東工大には数学1科目のみで受験できる学部入試がありました)で入学した同級生の大多数が数学科や情報科学科への進学を希望していましたが、私には彼女らほどの数学への情熱はないと感じました。理学部の学生としていくつかの講義を履修していくなかで、地球惑星科学科の先生方の講義が面白いと思ったため進学を決めました。特に、綱川秀夫先生の講義で感じた「現実世界を簡単な(?)数理モデルでざっくりと理解する」雰囲気惹かれた記憶があり



ます。

その後、地球惑星科学科で学部4年生になり、惑星科学の理論の研究室である中本研究室に所属させていただきました。卒業研究のテーマは「木星型連惑星の形成確率と惑星形成環境への制約」で、長澤真樹子先生にご指導いただきました。初期に木星型惑星が3つ以上存在する惑星系において、惑星の軌道が不安定になって系外に飛ばされたり(浮遊惑星)ホットジュピターが形成されたりすることが知られています[1]が、この軌道不安定の初期に2つの惑星が接近し(動的な)潮汐散逸によって連惑星(連星の惑星版のこと、二重惑星とも)が形成される場合があります[2]。私の卒業研究ではこの連惑星の形成を、(1)まず潮汐の効果を無視した軌道計算を行い、(2)その後、惑星同士の接近時の情報を用いて連惑星が形成されるかどうか判定する、という方法を採用して議論しました。この方法の長所は、軌道計算が規格化できるため、惑星系の軌道長半径や惑星半径を変えた場合についても(追加の軌道計算を行わずに)判定できるという点です。卒業研究では長澤先生から数値計算に関する基本的なことから、研究に対する姿勢など大切なことを教わり

1. arakawas@jamstec.go.jp

ました。

修士・博士課程も東工大の中本研究室で研究を続けました。修士進学時に中本先生に「複合コンドルールの研究がしたいです」とお願いしたところ、すぐに論文 [3] を紹介していただき、「(いきなり高度な数値シミュレーションに取り掛かるよりも) まずはどのような理論モデルが存在し、それらの問題点は何か整理しましょう」ということになりました。その後、複合コンドルール形成における最大の困難は衝突後に2つのコンドルール同士が融合してしまう [4] ことだとわかり、「浮遊したコンドルールは過冷却状態を経て結晶化する」という長嶋剣氏らの実験結果 [5] に基づく新しい形成シナリオを短い論文として発表することができました [6]。その後もコンドルール形成に関する研究を(細々とではありますが) 楽しく続けております [7, 8]。

卒業研究後に一旦わたしの手を離れた連惑星の研究について、天体のかすり衝突でも連惑星が形成可能なのではないかというアイデアが修士2年の後半に浮かんできました。この話を長澤氏に相談したところ、天体衝突の問題であれば東工大ELSIの玄田英典氏と議論するのがよいのではないかとアドバイスをいただきました。その後、木星型惑星の連惑星を衝突で作るのは簡単ではないということがわかったのですが、一方で、冥王星・カロン系のような1000 kmサイズの天体においては様々な衝突条件で多様な連星系・衛星系が形成され得ることも明らかになりました。その過程で、「大型の太陽系外縁天体のまわりには高確率で衛星が存在する」という観測的な事実があることを偶然知り、我々の結果と整合的だと気がつきました。そして玄田氏、兵頭龍樹氏のご指導の下、衝突数値計算と潮汐軌道進化計算を行い、なんとか論文にまとめることができました [9]。さらに潮汐軌道進化については庄司大悟氏に共同研究をお願いし、簡単な熱進化とレオロジーモデルを考慮した、熱進化・軌道進化のカップリング計算もできるようになりました [10, 11]。今後は天体の内部構造とその進化を考慮した計算にも取り組み、外縁天体の熱史・形成史の研究を発展させていきたいと考えております。

博士課程において取り組んだテーマのうち、ダスト集合体(アグリゲイト)の熱伝導率に関する研究

は個人的に特に気に入っているもののひとつです。よく知られているように、惑星形成の第一歩は原始惑星系円盤中のダスト粒子の付着成長、そして微惑星の形成です。つまり生まれたての微惑星は巨大なダスト集合体であり、その物性を知ることは微惑星の進化を理解する上で非常に重要です。当然、ダスト集合体の機械・熱物性は室内実験で精力的に調べられており、また、圧縮強度 [12] や引張強度 [13] などの機械物性については数値計算による研究も行われています。一方で、ダスト集合体の熱物性、特に熱伝導率については(城野信一氏による先駆的な研究 [14] がありますが) 惑星科学の分野においてはあまり理論研究が進んでいませんでした。そこで私は、片岡章雅氏および辰馬末沙子氏に準静的に圧縮されたダスト集合体の構成粒子の位置情報を提供していただき、そのデータを用いて熱伝導率を数値的に求めることにしました [15, 16]。そして、充填率が低いふわふわのダスト集合体において、熱伝導率が充填率の約2乗に比例するという美しい関係式を導きました。その後、どうにかしてこの結果を理論的に解釈したいという気持ちになり、中本研究室の竹本正輝氏にも協力していただきダスト集合体の内部構造の解析に取り組みました。最終的に、ダスト集合体内部の小さな構造のフラクタル次元および粒子鎖の迂回の程度を表す指数(この指数に名前が付いているのかどうかは不明です)から熱伝導率の充填率依存性を導出可能であるということが明らかになりました [17]。この結果が得られたときには非常に興奮しました。

こうして得られた熱伝導率の理論モデルを現実の太陽系小天体の問題に応用したいと思い、まずは彗星の熱慣性の再解釈に取り組むことにしました。彗星はその集積メカニズムや内部構造が盛んに議論されており、天体表層の熱物性から起源に迫ることができるのではないかと考えたからです。ここで、彗星には大量の有機物が存在することが知られているのですが、有機物の物性(光学特性、機械・熱物性など)に関する知識が私にはありませんでした。そこで、東工大の同期であった大野和正氏に相談したところ、惑星大気へのヘイズ等の文脈で調べられている有機物について様々な情報を教えていただきました。また、大野氏との議論によって研究の問題意識

が明確になり、具体的にどのような設定で計算するのかという方針が立てられました。その後、大野氏にダスト集合体の光学特性の計算も行っていただき、共著で論文を書くことができました [18]。我々の論文の結論は、彗星の熱慣性を説明するためには、従来の研究で仮定されているよりも大きいダスト集合体(ペブル)が表層に存在することが望ましい、というものです。この論文は査読者から大変好意的なコメントを頂き、修正なしで受理されたことが大変嬉しかったという記憶があります。

熱伝導率の研究で片岡氏にデータの提供を依頼した際、「一度まじめに数値シミュレーションをやってみると良いのではないでしょうか」といった趣旨のアドバイスをいただきました。そこで、最近(ようやく)ダスト集合体の数値シミュレーションに取り組み始めました。具体的には、ダスト粒子(いわゆるモノマー粒子)の衝突において重要であるとされている粘性的なエネルギー散逸 [19] をダスト集合体の衝突数値計算の粒子間相互作用モデルに取り入れ、その影響を調べるというものです(田中秀和氏、小久保英一郎氏との共同研究です [20])。今後もダスト集合体の物理を探究するべく、JAMSTECではまじめな(?)数値シミュレーションにも向き合っていきたいと思います。

惑星科学会の皆様にはこれまでも大変お世話になりました。共同研究者の皆様のサポートによって私がこの記事で紹介した研究(および紹介できなかった研究、例えば [21])を論文というかたちでまとめることができました。また、東工大、国立天文台で議論に付き合ってくださいました皆様、秋季講演会やその他の研究会などで質問してくださいました皆様、質問に快く回答してくださいました皆様のおかげで視野が広がり、新たな問題に挑戦することができるのだと感じております。今後も惑星科学の発展に微力ながら貢献できるよう精進してまいります。また、遊星人の編集委員としても、皆様に素敵な記事を届けられるよう努力いたします。何卒よろしく願いいたします。

参考文献

- [1] Nagasawa, M. et al., 2008, ApJ 678, 498.
- [2] Ochiai, H. et al., 2014, ApJ 790, 92.
- [3] Hubbard, A., 2015, Icarus 254, 56.
- [4] Yasuda, S. et al., 2009, Icarus 204, 303.
- [5] Nagashima, K. et al., 2006, J. Crystal Growth 293, 193.
- [6] Arakawa, S. and Nakamoto, T., 2016, Icarus 276, 102.
- [7] Arakawa, S. and Nakamoto, T., 2019, ApJ 877, 84.
- [8] Arakawa, S. et al., 2022, ApJ 927, 188.
- [9] Arakawa, S. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 802.
- [10] 荒川創太ほか, 2020, 遊星人 29, 104.
- [11] Arakawa, S. et al., 2021, AJ 162, 226.
- [12] Kataoka, A. et al., 2013, A&A 554, A4.
- [13] Tatsuuma, M. et al., 2019, ApJ 874, 159.
- [14] Sirono, S., 2014, Meteorit. Planet. Sci. 49, 109.
- [15] Arakawa, S. et al., 2017, A&A 608, L7.
- [16] Arakawa, S. et al., 2019, Icarus 324, 8.
- [17] Arakawa, S. et al., 2019, PTEP 2019, 093E02.
- [18] Arakawa, S. and Ohno, K., 2020, MNRAS 497, 1166.
- [19] Arakawa, S. and Krijt, S., 2021, ApJ 910, 130.
- [20] Arakawa, S. et al., 2022, ApJ 933, 144.
- [21] 荒川創太ほか, 2022, 遊星人 31, 50.

2022年度宇宙科学奨励賞公募のご案内

公益財団法人 宇宙科学振興会¹

公益財団法人宇宙科学振興会では、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、将来の宇宙科学の発展に大きな役割を果たすことが期待される若い研究者を顕彰し、宇宙科学奨励賞を授与いたします。ここに2022年度の第15回宇宙科学奨励賞候補者のご推薦を募集いたします。推薦要綱の詳細は当財団のホームページ(<http://www.spss.or.jp>)に揭示しておりますが、当奨励賞の概要は以下の通りです。皆様の周りで優れた業績を挙げ将来の活躍が期待される若手研究者をご存知の際には、是非ともご推薦いただきますようお願い申し上げます。

●表彰の趣旨

宇宙理学(飛翔体を用いた観測、探査、実験に関連する理学研究)分野及び宇宙工学分野で独創的な研究を行い、宇宙科学の進展に寄与する優れた研究業績をあげた若手研究者個人を顕彰する。

●授与機関

公益財団法人 宇宙科学振興会

●候補者

上記分野で優れた業績をあげた当該年度の4月1日現在37歳以下の若手研究者個人。候補者の推薦は他薦に限る。

●業績の審査

業績の審査は、推薦理由となる研究業績に関連して

発表された論文に基づいて、当財団が設置する選考委員会において行う。

●賞の内容

授賞は原則として毎年宇宙理学関係1名、宇宙工学関係1名とする(ただし適格者のいない場合は受賞者なしとする場合がある)。受賞者には本賞(賞状と表彰楯)および副賞(賞金30万円)が贈られる。

●推薦締切日

2022年10月31日(月)必着。

●表彰式

選考結果は2023年1月に推薦者と受賞者に通知するとともに、当財団ホームページにおいて発表する。その後2023年3月初旬に表彰式を行い、受賞者には受賞対象となった研究に関する講演をして頂く。

なお、推薦の手続きの詳細については財団のホームページ(<http://www.spss.or.jp>)をご覧ください。推薦書式をダウンロードして必要事項を記載の上、(1) 候補者の略歴、(2) 論文リスト、および(3) 推薦の対象となる論文の別刷等必要書類を添付の上、電子メールにてご提出下さい。

●お問い合わせ先および推薦書送付先

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1
公益財団法人宇宙科学振興会 事務局
E-mail: admin@spss.or.jp

1.公益財団法人 宇宙科学振興会 事務局
admin@spss.or.jp

遊星人2019年28巻3号における 英文タイトルの訂正とお詫び

前編集専門委員会委員長 和田浩二

遊星人2019年28巻3号の論文記事『富永 遼佑, 高橋 実道, 犬塚 修一郎著: 原始惑星系円盤内の巨視的なダスト動力学と多重リング形成』の英文タイトル(目次)が間違っ
て掲載されておりました。

当時の編集長の確認がおろそかになったことが原因です。著者の富永氏, 高橋氏, 犬塚氏をはじめ, 読者の皆さまにはご迷惑をおかけいたしましたこと, 訂正してお詫び申し上げます。

誤) Toward the understanding of active asteroids

正) Macroscopic dynamics of dust grains and
formation of multiple rings in protoplanetary disks

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第57回総会議事録
- ◇日本惑星科学会第151回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第152回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第153回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第57回総会議事録

日時:2022年5月24日(火) 12:30-13:30

場所:オンライン開催

正会員数:597名

定足数:60名

参加人数:85名(投票時参加人数は101名)

委任状:66通(議長:63通, 中村 昭子会員:1通, はしもと じょーじ会員:1通, 保井 みなみ会員:1通)

1. 開会宣言

保井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野口 里奈会員, 書記に田畑 陽久会員が選出された.

3. 議事

3.1. 審議事項

- ・ 第16期上期(2021年度)活動報告(中村会長)

日本地球惑星科学連合2021年大会, 日本惑星科学会2021年秋季講演会の参加者数および発表数, 学会誌の発行状況, 最優秀研究者賞および最優秀発表賞の受賞者, 各種セミナーやシンポジウムの開催状況, 学会運営などの説明がなされた.

- ・ 第16期下期(2022年度)活動計画(中村会長)

現在開催中の日本地球惑星科学連合2022年大会, 開催予定の秋季講演会, 学会誌の発行予定, 各種セミナー

や実習会の開催予定等の説明がなされた。

- ・ 第16期上期(2021年度)会計決算報告(佐伯財務専門委員長)
第16期上期の一般会計・特別会計の決算報告についての説明がなされた。新型コロナウイルス感染症対策のためオンライン開催とした2021年秋季講演会について、暫定的に黒字収支となったことが報告された。黒字分は暫定的にプール金とし、今後オンライン開催の場合でも秋季講演会の収支0を目指すことが報告された。
- ・ 会計監査報告(小河会計監事)
収支決算に誤りのないことが報告された。
- ・ 事務局移行作業に伴う学会会則の改定について(保井総務専門委員長)
事務局移行作業の一環として学会のゆうちょ口座を新規開設し、それに伴って会則の変更が必要であることの説明がなされた。会則の変更は第150回運営委員会で承認済みであり、詳細は該当議事録に記載されていることが報告された。
- ・ その他
特になし。
- ・ 質疑応答及び討論
第16期上期会計決算報告の秋季講演会の収入および支出の金額はイベントペイの手数料を差し引いた金額であるかとの質問があった。
佐伯財務専門委員長より、手数料を差し引いた金額であることが説明された。
- ・ 採択
審議事項の採決が行われ、賛成: 162(うち出席者96名)、反対: 0、保留: 1(うち出席者1名)により採択された。

3.2. 報告事項

- ・ 第16期下期(2022年度)予算執行状況(佐伯財務専門委員長)
第16期下期予算は予算通り執行されていることが報告された。
- ・ 2021年最優秀研究者賞受賞者発表(中島学会賞選考委員長)
兵頭 龍樹会員(JAXA/宇宙科学研究所)と巽 瑛理会員(カナリア天体物理学研究所/Instituto de Astrofísica de Canarias)の両名に授与されることが発表された。
- ・ 2022年秋季講演会開催案内(百瀬2022年秋季講演会組織委員)
2022年秋季講演会の実施案についての報告がなされた。
開催期間は9/20-22とし、現状、対面(会場:茨城大学)+オンラインのハイブリッド開催を予定している。
口頭発表は会場またはZoomを選択したうえ、会場の発表をZoomで配信する。ポスター発表はSlackへのアップロードに加えて、会場にて掲示スペースを用意し、ポスターコアタイムも設ける。
発表受付および参加費支払期間は6/24-8/26、発表申込期間は6/24-7/15の予定。支払にはイベントペイを使用する。

口頭発表希望多数の場合は抄録を参考に口頭／ポスターの振り分けを行う。

- ・各種専門委員会・作業部会等報告(各種委員会委員長・部会長)
- ・学生発表賞の新設について(田中学会賞検討作業部会長)
従来の最優秀発表賞に加えて、新たに優秀発表賞を若干名に授与することが報告された。
選考は従来通り特別選考セッションにて行い、副賞は賞状のみとする。優秀賞の受賞は一度のみとし、再受賞は行わない。2022年秋季講演会から実施予定。
- ・質疑応答及び討論
新設する優秀発表賞の授与人数は具体的に何名程度を想定しているのかとの質問があった。
田中学会賞検討作業部会長より、具体的な人数は現時点では未定であり今後実施する中で調整してゆく方針であることが説明された。
- ・月惑星探査アーカイブサイエンス拠点今年度事業の説明(出村会員)
月惑星探査アーカイブサイエンス拠点の下半期(2022-2025年度)の予算公募の説明がなされた。
上半期同様の萌芽研究(40万円/件)および実用研究(400万円/件)に加えて、新たに海外招聘共同研究1-2件と海外旅費助成数件の公募を行う。
公募は6月初旬から1ヶ月程度の予定。
- ・その他
- ・事務局の現在の暫定的な体制について(中本事務局体制検討作業部会長)
2022年3月にイーサイド社への委託終了以降の暫定的な事務局の体制について説明がなされた。
2022年4月からは個人に委託しており、2024年3月まで同様に委託予定。2024年4月以降の体制は今後議論して決定する。

4. 議長団解任

5. 閉会宣言

保井総務専門委員長が閉会を宣言。

以上

◇日本惑星科学会第151回運営委員会議事録

期間:2022年 4月26日(火)~4月29日(金)

運営委員会委員:

出席(23名)

中村 昭子, 竝木 則行, 中本 泰史, 玄田 英典, 関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩, 関 華奈子, 千秋 博紀, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 藪田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 白井 寛裕, 倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席(なし)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす。

議決方法:上記期間内に steering-ml@wakusei.jp 宛に投票。

議題:

2022年秋季講演会にて、以下のような一般講演会の実施を行いたく、その実施案について承認を求める。

提案内容:

日時:9月23日午後 ザ・ヒロサワシティ会館小ホール

テーマ:「水惑星の誕生:その起源と条件を探る」

講演者(依頼承諾済み):

生駒 大洋氏(自然科学研究機構国立天文台科学研究部・教授)

中村 智樹氏(東北大学大学院理学研究科・教授)

審議結果:

議題は原案のとおり承認された(可 23・否 0)。

以上

◇日本惑星科学会第152回運営委員会議事録

日時:2022年5月23日(月)18:30-20:30

場所:オンライン開催

運営委員:

出席者20名

中村 昭子, 竝木 則行, 中本 泰史, 玄田 英典, 関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 藪田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席者3名

千秋 博紀, 関 華奈子, 白井 寛裕

(委任状:会長2通)

オブザーバー:

黒崎 健二(2022年連合大会プログラム委員), 北里 宏平(総務専門委員)

議題・報告事項:

1. 日本地球惑星科学連合:プログラム委員会(黒崎 連合大会プログラム委員)

・2022年大会では「惑星科学」,「惑星火山学」,「宇宙・惑星探査の将来計画及び関連する機器開発の展望」の3セッションが学協会セッションに登録された。

- ・次期プログラム委員に門屋 辰太郎会員(正)と伊藤 祐一会員(副)が推薦され、承認された。

2. 2021年度最優秀研究者賞について(中島 2021年学会賞選考委員長)

- ・7名応募のうち1名が資格を満たさなかったため、6名に対して選考を行なった。
- ・選考委員会からの推薦に基づき、兵頭 龍樹会員と巽 瑛理会員の兩名を受賞者として決定した。

3. 最優秀研究者賞受賞資格の緩和について(奥住 運営委員)

- ・若手の多様なライフプラン・キャリアプランに配慮し、最優秀研究者賞の受賞資格条件を緩和する旨の提案がなされた。
- ・出産、育児、介護による研究の中断期間については配慮することが認められた。
- ・民間就職や浪人期間などの扱い方については次回の運営委員会で継続審議することとした。

4. 最優秀発表賞の改訂案について(田中 学会賞検討作業部会長)

- ・現行の最優秀発表賞は受賞者数が1, 2名と他学会の同様な学生賞に比べて少ない。
- ・質の高い発表を幅広くエンカレッジするため、最優秀発表賞に加え、若干名の優秀発表賞を新設する旨の提案がなされた。
- ・採決の結果、賛成多数により提案は可決された。2022年秋季講演会から適用する。
- ・内規の改訂については作業部会で再度検討した上で、改めて審議することとした。

5. 2022年秋季講演会について(百瀬 2022年秋季講演会組織委員長)

- ・会期は2022年9月20日(火)から22日(木)までの3日間。23日(金・祝)に一般講演会。
- ・会場は茨城県水戸市のザ・ヒロサワ・シティ会館。
- ・実施形態は対面とオンラインのハイブリッド。
- ・6月24日(金)から参加・発表申込み受け付けを開始する。
- ・口頭発表希望多数の場合、抄録をもとに発表形態を実行委員会で判断。
- ・参加者はオンライン・実体を問わず、事前登録が必要。当日の現地対応は原則行わない。
- ・玄田委員より2023年秋季講演会の検討状況について報告がなされた。
- ・藪田委員を組織委員長として広島市内にて開催。

6. 第16期上期決算(佐伯 財務専門委員長)

- ・ほぼ予算案通りに執行し、監査も終えている。
- ・各種イベントがオンラインとなり、支出が少なかった。
- ・サーバ移行費用の追加により、事務局関連の管理費が例年と比べて30万増。

7. 第16期下期予算執行状況(佐伯 財務専門委員長)

- ・収入、支出ともに、ほぼ予算案通り。
- ・事務局体制移行のため、レンタルオフィス代や税務処理などの支出項目が追加。
- ・今年も匿名の方から10万円の寄付金を頂いた。

8. 日本惑星科学会サーバへの事務局メール用smtpサーバ機能の追加について(荒川 情報化専門委員)

- ・事務局体制移行に伴い、レンタルサーバおよびドメイン保守の契約を2021年末に切り替えた。
- ・事務局スタッフが学会サーバの個人メールアドレスを使えるようにするため、サーバ機能の追加を調整依頼してい

る。

- ・作業費の支出を伴うことを承認した。

9. 学術会議の大型研究計画策定について(竝木 副会長)

- ・マスタープランから未来の学術振興構想(仮称)に変更となったことについて説明がなされた。
- ・学術研究構想と学術振興の「ビジョン」をセットで提案することが求められている。
- ・提案者が学会である点は従来と変わらない。
- ・荒川将来構想検討作業部会長よりマスタープランのフォローアップ会議の開催報告がなされた。
- ・「国際宇宙探査計画と連動した火星宇宙天気・気候・水環境探査(MIM)」、「惑星科学コンソーシアム」、「惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画」の3提案について意見交換を行なった。
- ・学術会議から正式に公募が出た時点で、新たに学会内に再公募をかけるかどうかを検討する。
- ・新しい公募の内容を検討して、3提案の扱いを決定する。

10. 惑星探査専門委員会からの報告(関根 惑星探査専門委員長)

- ・来る10年について各パネルのロードマップの議論がひと段落した。
- ・夏頃に第一段階を終える予定で作業を進めている。

11. 事務運営体制について(中本 事務局体制検討部会長)

- ・2022年4月から事務運営を新体制に移行した。
- ・2023年までは現体制を維持。2024年以降については年内を目処に案を出す。

12. 遊星人の発行状況報告(三浦 編集専門委員長)

- ・つつがなく発行できている。特集「新・惑星形成論」を2号にわたって掲載。
- ・J-STAGE Dataに参加する旨の提案がなされ、承認された。
- ・遊星人の投稿規定にプレプリントサーバに関する説明事項を追記する旨の提案がなされ、承認された。
- ・遊星人の記事に著者の簡単なプロフィール(希望者は顔写真も)を掲載する旨の提案がなされ、承認された。

13. 第16期上期活動報告、第16期下期活動計画(保井 総務専門委員長)

- ・総会で提示する活動報告と活動計画の内容について説明がなされた。

14. 入退会状況報告(保井 総務専門委員長)

- ・会員数に大きな変動はないことが報告された。

15. 第57回総会の議長・書記の推薦について(保井 総務専門委員長)

- ・議長に野口 里奈会員、書記に田畑 陽久会員が推薦され、承認された。

16. 学会賞選考委員の入れ替え(保井 総務専門委員長)

- ・次期選考委員に寺田 直樹会員(委員長)、成田 憲保会員、三浦 均会員、白井 寛裕会員、黒川 宏之会員、古川 善博会員、鈴木 絢子会員、樫村 博基会員の8名が推薦され、承認された。

17. 事務局移行作業に伴う会則改定について(保井 総務専門委員長)

- ・第150回運営委員会にて承認された会則改定について説明がなされた。

18. その他

・大竹委員より月惑星探査アーカイブサイエンス拠点の公募事業について報告がなされた。

以上

◇日本惑星科学会第153回運営委員会議事録

期間:2022年6月9日(木)~6月15日(水)

議題:最優秀発表賞内規の改訂案について

運営委員会委員:

出席(23名)

中村 昭子, 竝木 則行, 中本 泰史, 玄田 英典, 関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩,
関 華奈子, 千秋 博紀, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 藪田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 白井 寛裕,
倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席(なし)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす。

議決方法:上記期間内に steering-ml@wakusei.jp 宛に投票。

議題:

最優秀発表賞の改訂(優秀発表賞の新設)に伴う内規改訂について、以下のように改訂案を提案し、その承認を求める。

議案:

背景:

第151回運営委員会にて学会賞検討部会より、最優秀発表賞に加えてそれに準ずる優秀発表賞の新たな設置について、説明があった。

議論の後、採決が行われ、その結果、賛成14名、中立5名、反対0名により、設置が決定した。

その決定に伴い、最優秀発表賞内規の改訂が必要となったため、改訂案を部会で検討した。その改訂案について、承認を求める。

日本惑星科学会最優秀発表賞内規改訂案

当該内規の第1, 2, 3条を以下のように改訂する。

・第1条(目的)末尾に、以下の1文を追加:

また、最優秀発表賞に準ずる賞として日本惑星科学会優秀発表賞を設ける。

・第2条(受賞資格)に、以下の項目4を追加:

4. 優秀発表賞については、最優秀発表賞または優秀発表賞を受賞していない者・第3条(賞)の項目 1,2,4 を、以下のように変更:
1. 最優秀発表賞受賞者は毎年2名以内とし、優秀発表賞受賞者は毎年若干名とする
 2. 最優秀発表賞は賞状と副賞を授与し、優秀発表賞は賞状を授与する
 4. 最優秀発表賞受賞者は、受賞対象の研究解説を会誌「遊・星・人」に掲載する

(内規改訂案全文は日本惑星科学会ホームページの会員ページに掲載された添付ファイルを参照のこと)

審議結果:

議題は原案のとおり承認された(可 23・否 0).

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2022年7月29日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

- ・Harris Geospatial 株式会社
- ・株式会社ナックイメージテクノロジー
- ・株式会社ノビテック

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a) 場所, (b) 主催者, (c) ウェブページ/連絡先など.

転記ミス, 原稿作成後に変更等があるかもしれません. 各自でご確認ください.

2022/9

2022年9月27日(火)-9月29日(木)日本流体力学会 年会2022

- (a) 京都大学 吉田キャンパス 本部構内
- (b) (一社)日本流体力学会
- (c) 日本流体力学会年会2022実行委員会(E-mail:jsfm2022@nagare.or.jp)

編集後記

遊星人の連載記事の一つに「遊星人の海外研究記」がある。一人ひとりの研究者の横顔が見られるようで、わたしは毎回楽しみにしている。ここ数年で、海外に飛び出して研究することは以前ほど簡単でなくなってしまった。そのため、過去に海外で研究していた経験を記事にさせていただくことも増えている。しかし、どの「遊星人の海外研究記」からも、どこかポジティブな印象を受ける。記事の内容が現在か過去かには関わらないようだ。異国での生活で格闘した経験や、それぞれの国での生活や文化から、なにかおもしろいことを、自分の発見を伝えたいと思ってくださる執筆者のみなさまに感謝したい。

本号には、横浜国立大学の癸生川さんから「遊星人の海外研究記」が寄せられている。私は、癸生川さんと重なる時期にカーネギー研究所の別研究室でポストドクをしていたので、懐かしく特別な思いで読んだ。同時に、自分が経験していない“知らない話”も見たような気になった。わたしは、このあとの人生で何回

くらい、自分の知らない文化圏で暮らせるのだろうか。一回もないなんてゴメンだ。そう思った。

大学院生のころ、一度は海外で研究をすることが、研究者になるための「必修」であると思こんでいた。学生のときに、英語ができて、Zoomがあつて、世界の人とコミュニケーションが取れていても、やっぱり懐に入らねばならないと思ひ込んだような気がする。誰かに今もし聞かれたら、随分しんどかったけど外国で暮らせてよかったと言うと思う。

ちょうど10年前、Van Ness駅前のDays Innを一週間予約した。そして、トランクに入るだけの荷物と共にアメリカに到着した。右も左もわからないなか、アパート探しを手伝ってくれた癸生川さんの頼もしさは一生忘れないだろう。カーネギーを去る癸生川さんから、記事に出てくる自転車を譲ってもらった。しかし、乗ってみたら足がつかず、そのまま他のポストドクにもらわれていった。(瀧川)

編集委員

三浦 均 [編集長]

瀧川 晶 [編集幹事]

荒川 創太, 上栢 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 杉山 耕一朗, 関口 朋彦, 瀧 哲朗, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, 野津 翔太, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 和田 浩二

2022年9月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第31巻 第3号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)
 編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)
 印刷所 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービー
 発行所 日本惑星科学会事務局
 〒140-0014 東京都品川区大井1-6-3 アゴラ大井町3階
 Tel: 03-6410-7041
 e-mail: staff@wakusei.jp
 (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。

1. 原稿の様式

○投稿原稿：

受領可能なファイルの形式は、MS WORD, PDF, またはテキストファイルである。原稿投稿時チェックリストを参照して作成すること。また、所定の投稿原稿送り状も提出すること。

○最終稿：

原稿の掲載が決定したら、最終原稿準備チェックリストを参照して必要なファイルを提出する。原稿のファイル形式は WORD, PDF, または、テキストファイル。図は別ファイルにて提出。そのファイル形式は tiff, eps, pdf, pict が望ましい。jpeg, png も可。

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストはウェブサイトで

(<https://www.wakusei.jp/book/pp/guide.html>) から取得できる。

2. タイトル

記事のタイトルは20字程度以内。また、タイトル、筆者名、及び所属を和文・英文両方で付す。

(注：著者人数に対する制限はなく、紙面本文タイトルにおいて著者全員の氏名が原則掲載されるが、著者が多数である場合、各号の目次においては紙面の都合上一部著者名を省略することがある。)

3. 要旨

研究報告の記事や解説記事については、(原稿タイトルと著者名の後に) 300字程度の要旨をつける。

4. セクション

セクションは1,2,....., サブセクションは1.1,1.2,..... 細区分は(1),(2)..... の記号を頭にして、左寄せ、行末改行とする。

- ・文中での区分けは(a), (b), (c)を用いる。
- ・これら記号はすべて半角文字を用いる。
- ・セクションタイトルは簡潔にすること。

5. 述語

専門用語はなるべく避けるか、十分な説明をつける。特に、対応する日本語がある場合、英語・英略語は使わない。

6. 字体

- －数字、英字は半角とする。また () [] ; : など区切り記号も半角を用いる。
- －変数は斜体、ベクトルと行列は太字、を使う。

7. 句読点

句読点は全角の“,”と“.”を用いる。

8. 図、表

文中での図表の引用は“図1”、“図2”の形をとる。最終稿に図表の刷り上がり時の位置や大きさを指定のこと。他の文献から図表を転載する場合は、著者及び発行者より転載許可を得ること。また、出典を明記すること。

図作成のガイドライン：

原則として、電子ファイルとして作成すること。解像度は印刷時実寸で300dpi相当以上。ファイル形式は TIFF, EPS, PDF, JPEG, PNG が望ましい。

やむをえない場合に限り、写真も可とする。その際はL版サイズ以上の大きさと鮮明な写真を送付すること。送付された写真は原則として返却しない。カラーページは、著者の費用負担により可能。ただし、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、電子版のみにカラー画像が掲載され、冊子体には白黒で印刷される。

9. 脚注

脚注は“1”などの記号をつける。

10. 文献の引用

引用文献は重要なものに限る。目安として20項目程度とする。ただし編集部が必要と認めた場合についてはこの限りではない。

本文中での引用は[1],[2]の形で通し番号をつけ、論文の末尾に一括してリストを載せる。[1,2,3]のように3つ以上の連番を引用する場合は、[1-3]のように、最初と最後の番号をハイフンで繋げる。

文献リストは以下の形式に従う。題名は省略する。3人以上の著者は、英文なら「et al.」, 和文なら「ほか」と表記する。「et al.」「ほか」のあとには半角カンマを入れる。雑誌名などは一般に使われる略称を用いる。雑誌名の後のカンマは不要。ページについては開始ページのみを記す。書籍の場合は出版社をカッコ書きで明記。各文献の最後にピリオドをつける。

参考文献

- [1] Wakusei, T. et al., 1989, ApJ 220, 293.
- [2] 惑星太郎ほか, 1993, 天文月報 86, 186.
- [3] Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (New York: Wiley).
- [4] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II (Tucson: University of Arizona Press), 1100.

11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 三浦 均

e-mail : chiefeditor@wakusei.jp

電子メールで送付できない場合は下記へ郵送

日本惑星科学会事務局

〒140-0014

東京都品川区大井1-6-3 アゴラ大井町3階

Tel: 03-6410-7041

e-mail: staff@wakusei.jp



The Japanese Society for Planetary Sciences

