日本惑星科学会誌 遊・星・人

第28巻 第3号

目 次

卷頭言	近藤 忠	171
「2018 原始惑 星 富	年度最優秀発表賞受賞論文」 星 系円盤内の巨視的なダスト動力学と多重リング形成 永 遼佑,高橋 実道,犬塚 修一郎	
特集「AL ALMA	MAで迫る惑星科学」 特集号の編纂にあたって 秋山 永治	
アルマ 誓 ア	塁遠鏡の現状と機能拡張計画「アルマ2」 ルバロ・ゴンサレス, 深川 美里, 伊王野 大介, 平松 正顕, 他1チーム	
ALMA	による原始惑星系円盤の高解像度観測 武藤 恭之	190
惑星形成	戈領域からの様々なガス輝線のALMA観測 野村 英子 ⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯	200
アルマ望	遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に見出した惑星形成の種 塚越 祟	207
 原始惑 星	星系円盤の電波観測入門 (1):惑星系の母胎を探る 百瀬 宗武	213

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その39

~ 「第74回藤原セミナー / International Venus Conference 2019」開催報告~ 高木 聖子	226
火の鳥「はやぶさ」未来編 その19 ~Hayabusa2 DCAM3 デジタル系の開発~ 小川 和律,白井 慶,澤田 弘崇,荒川 政彦,本田 理恵,石橋 高,和田 浩二,他4名	231
遊星百景 その17 ~スプートニク平原~ 鎌田 俊一 ······	239
第11回月惑星探査データ解析実習会を終えて 出村 裕英,晴山 慎,園家 俊,平田 成,本田 親寿,小川 佳子,天野 香菜,他6名1チーム…	241
2019年日本惑星科学会秋季講演会プログラム 河北 秀世	245
2019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	255
JSPS Information	256

Preface T. Kondo	171
Toward the understanding of active asteroids R. T. Tominaga, S. Z. Takahashi, and Si. Inutsuka	172
Publishing the ALMA special issueE. Akiyama	182
Current status of ALMA and upgrade plan towards a second phase of the project: ALMA 2	104
A. Gonzalez, M. Fukagawa, D. Iono, M. Hiramatsu, and the NAOJ ALMA Project Team	184
High spatial resolution observations of protoplanetary disks with ALMA T. Muto	190
ALMA observations of various line emission from planet forming regions H. Nomura	200
ALMA pinpoints the formation site of an extrasolar planetaround a young star TW hydraeT. Tsukagoshi	207
Introduction to radio observations of protoplanetary disks (1) :exploring birth place of planetary systemsM. Momose	213
Road to the first star : Venus orbiter from Japan (39) — The report of "The 74th Fujihara seminar/international Venus conference 2019" — S. Takagi	226
 Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (19) — Development of Hayabusa2 DCAM3-D science camera — K. Ogawa, K. Shirai, H. Sawada, M. Arakawa, R. Honda, K. Ishibashi, and 5 authors 	231
My favorite view in planetary sciences (17)— Sputnik planitia —S. Kamata	239
Report of 11th exercise for data analysis in lunar and planetary data exploration H. Demura, M. Hareyama, T. Sonoke, N. Hirata, C. Honda, and 8 authors, 1 committee	15 241
Program for 2019 annual meeting H. Kawakita	245
Announcement of public offering for Space Science Incentive Award	255
ISPS Information	255 256

卷頭言

惑星科学会創立期に大学院生だった私は、ある先生から「今、入会予約すれば、一桁の会員 番号かも知れないよ」と勧誘されたが、既に三つほどの学会に入会していたために躊躇してし まった.ところが自分の所属していた「地球科学科」も「地球惑星科学科」と改名することになり、 多少の絵心が有ると勘違いされた私に宣伝のためのポスターを何か描けという指令がきた.ど うにも良い案が出ず、「天文学と惑星科学と地球科学の違いは何でしょうか?」と周りの先生 や先輩に聞くと、そこにある物質を取ってこられないなら「天文学」、そこにある物質を扱え るなら「地球科学」、その間で太陽系ぐらいなら「惑星科学」とのコメント、高圧地球科学分野 での研究を始めた自分は「隕石は勝手に落ちてくるし、マントルや核の物質は自由に取れない けどなあ…」と悩みながら、空想の惑星に降り立った子供が他の天体を眺めているポスターを 構想し、こんな風景を人類が見るのはいつだろうと思いながら仕上げ、学会入会は大家先生の 退官となる東北大での開催でまで引きずってしまった、

時は流れて学会は四半世紀を超えた.現在,私が所属する専攻は,地球科学と天文学が半々 同居という全国的にも奇異な構成で,生命系から物性物理の教員まで含まれる「オール理科」 みたいな印象.赴任時は天文系と地球系の接点を見出すのが難しかったが、「惑星科学」とい う中間的な観点からは,天文系は系外惑星探査が普通になり,惑星を扱うシミュレーションに も物性的要素が入り「地球科学」の範囲にかなり近づいてきた.一方,日本の探査機は小天体 からのサンプルリターンを実現し,太陽系外縁部でさえ遠くて近寄れない「天文学」というイ メージが崩れてきた.物質科学や宇宙生命などの接点も含め、「惑星科学」は「中間の科学」で は無く「中心の科学」になってきたと感じる.と言っている間に令和の新時代に突入した.次 は自分も何らかの接点になれればと思う.

近藤 忠(大阪大学)

2018年度最優秀発表賞受賞論文 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

冨永 遼佑^{1,}, 高橋 実道^{2,3}, 犬塚修一郎¹

2019年3月22日受領, 査読を経て2019年5月10日受理.

(要旨) 原始惑星系円盤における微惑星形成機構や,近年発見されたダストの多重リング構造の起源として 様々なダスト集積過程が考えられてきた.永年重力不安定性はその1つである.ダストの集積はダストの乱 流拡散によって阻害されてしまうため,現実的なダスト集積過程を議論するためにはその拡散を考慮した解 析が重要である.しかし,これまで広く用いられてきた拡散を記述する方程式系には円盤の全角運動量が保 存しないという問題があった.そこで本研究では平均場近似に基づき,角運動量を保存しつつダスト拡散を 適切に記述する巨視的な方程式を新たに定式化した.本稿では定式化の概要を示すとともに,定式化した方 程式に基づいた解析によって発見した新しい不安定性と,それによる多重リング形成について紹介する.

1. はじめに

原始惑星系円盤とは星形成過程に伴って原始星/前 主系列星の周りに形成される円盤であり,主に水素分 子からなるガスと固体微粒子(ダスト¹)から構成され る.原始惑星系円盤は質量や角運動量,磁場の輸送を 通して中心星の進化過程に影響を与える.また,円盤 中のダストは付着合体を通して数km-数百kmの微惑 星へと成長し,さらに,微惑星が衝突合体を繰り返し て惑星へと成長すると考えられている.つまり,原始 惑星系円盤は惑星の母体となる天体である.このよう に原始惑星系円盤は星の進化過程と惑星形成過程の両 方に密接に関連するため,円盤構造やその進化過程を 理解することは非常に重要である.

原始惑星系円盤の構造は主に可視光/近赤外線と電 波で観測されている.可視光と近赤外線によって観測 される円盤構造は、円盤表層のミクロンサイズのダス トの分布に相当している.なぜなら、円盤からの可視 /近赤外の光は中心星からの光が円盤表層の小さいダ ストによって散乱されたものだからである.一方、電 波観測では円盤中のダストからの熱放射を直接観測し ている。電波の熱放射に対しては、比較的密度の高い 赤道面付近のミリメートルサイズのダストの寄与が大 きい. このように異なる波長帯の円盤構造の観測は. 異なる円盤高度の.異なるサイズのダストの空間分布 を見ることに対応している.近年の観測技術の発展は 著しく. 原始惑星系円盤を高空間分解能で観測できる ようになってきた. 例えばSubaru望遠鏡やVery Large Telescope(VLT)による可視光/近赤外線観測 によって、様々な円盤に渦状腕構造やリング構造が発 見されてきた[e.g.1, 2]. 電波帯ではAtacama Large Millimeter/submillimeter Array(ALMA)による観測 が活発に行われており、特に連続波観測によってリン グ/ギャップ構造²などの軸対称構造や三日月構造。 渦状腕構造などの非軸対称構造が発見されてきた[e.g., 3.4.5]. このように近年の高解像度観測は、滑らかな 密度分布というよりもむしろ特徴的な密度構造が多く 存在しているということを示してきた。これらの円盤 構造の詳細な空間スケールや存在頻度等を議論するた

^{1.} 名古屋大学

² 工学院大学

^{3.} 国立天文台

tominaga.ryosuke@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

本稿では微惑星よりもサイズが小さい固体成分をダストと呼ぶことにする。

ここでリングとは、ある幅を持ち、ある半径で輻射強度が極 大となっている軸対称構造を指す、一方、ギャップは輻射強 度が極小となっている構造を指す。

め,高解像度観測による統計的研究も徐々に進められ ている。例えばDSHARP³というALMAを用いた円 盤探査プロジェクトでは,非常に高い空間分解能(~5 au)で20個の円盤の観測が行われた[6].この観測では 20個の円盤のうち18個に多重のリング/ギャップ構 造を発見しており,軸対称構造の観測頻度が高いこと を示唆している.DSHARPで観測されたリングの半 径は10 au程度から100 au以上まで広く分布している が,リングの幅はどれも10 au程度かそれよりも細い ということが分かっている.また,このようなリング の特徴量は中心星の質量や年齢,円盤からの質量降着 率とは顕著な相関を持っていないことも確認されてい る[7].

観測によって様々なリング/ギャップ構造が発見さ れている一方. そのような軸対称構造の形成過程を探 る理論的研究も活発に行われている。これまでに提案 された多重リング/ギャップ形成機構には。(1)惑星 と円盤の重力相互作用[e.g., 8], (2)円盤中の多様な分 子の各スノーライン付近で起こるダストの合体成長/ 破壊過程[9,10], そして本稿で注目する(3)ダスト-ガ ス系で起こる不安定性である永年重力不安定性[11]な どがある.実際の天体でどの形成機構が働いているか は未だ明らかになっていないが、どの場合においても 惑星形成過程との関連が示唆される。もし観測された リング/ギャップ構造が惑星によって形成されたとす ると,惑星の形成過程に直接制限をかけることができ る. 例えば, HL Tau [3]のような年齢が100万年程度 以下の若い天体に観測された多重リング/ギャップ構 造が惑星によって形成されたとすると、その100万年 の間に惑星自身がまず形成されなければならない. つ まり、これまでの標準的なシナリオでは1億年と考え られていた惑星の形成時間に、非常に強い制限をつけ ることができる.一方,(2)(3)のような惑星を必要 としない形成機構が実際の円盤で作用しているとする と、観測されたリング内にはダストが濃集していると いうことになる. ダストが濃集した領域ではガスへの 摩擦反作用が効きダスト-ガス間の相対速度が小さく なるため、微惑星形成の困難のひとつとして知られて いる"ダスト落下問題"4が緩和される.つまり、上記 の観測は多重リング内でこれから微惑星形成が起こる ことを示唆している可能性がある.このように、いず れにせよ惑星形成過程の理解に繋がることが期待でき

るため、多重リング形成機構の解明は惑星形成理論の 解明のために重要である。

本稿では、私たちが行ってきたダスト-ガス系で起 こる不安定性の理論的な研究[14]に基づき、乱流ガス 中でのダストの拡散現象とダスト-ガス系で起こる不 安定性について論じる.2章では永年重力不安定性の 特徴と不安定成長のメカニズムについて紹介する.3 章ではまず永年重力不安定性を最も効率的に安定化し てしまうダストの拡散過程と従来の拡散のモデル化に ついて概説する.次にこれまで用いられてきたモデル には角運動量が保存しないという問題点があることを 示し、それを解決するために私たちが行った基礎方程 式の再定式化について紹介する.新たに定式化した方 程式を用いて局所線形解析を行った結果、私たちは新 しい不安定性があることを発見した.4章では新しい 不安定性のメカニズムとそれによる多重リング形成の 可能性について紹介する.

2. 永年重力不安定性とは

永年重力不安定性は前述の通りダストとガスが混ざ った円盤で起こる不安定性である。まず永年重力不安 定性の成長過程を物理的に示そう。先行研究と同様に 本稿では軸対称構造を考える. 図1は永年重力不安定 性の成長過程を局所回転座標系で模式的に示した図で ある。不安定成長過程はガス円盤内の"地衡風"に基づ くと簡潔に説明することができる. ただしここで言う "地衡風"は地球大気等で現れるそれとは異なり圧力勾 配力、コリオリカ、(ガスとダスト両方を重力源とす る)自己重力の3つの力が釣り合うことで形成される 帯状流を指すことに注意して頂きたい。自己重力が働 くため、圧力勾配力とコリオリ力が同じ方向を向くよ うな定常な流れ場(図1の(1))を考えることができ、 これは地球大気等で議論されるいわゆる地衡風とは速 度構造が異なる、このガス流の中でダストがどのよう に運動するかを考える. ガスに対して相対的に運動し ているダストには空気抵抗(以下では"摩擦"と呼ぶ)が

^{3.} Disk Substructures at High Angular Resolution Project

^{4.} 円盤内側領域ほど圧力が高いガスとダストが摩擦相互作用す ると、ダストが角運動量を失い内側に移動("落下")してし まう. その速度はメートルサイズ程度のダストで最大になり、 ~0.01 au/年と非常に速い[e.g., 12, 13]. この速い動径移動の 結果、微惑星まで成長する前にダストが中心星に落ちてしま うことをダスト落下問題と呼ぶ.



永年重力不安定性の物理的解釈

図1:永年重力不安定性の成長過程を模式的に示した図.永年重力不安定性は、圧力勾配力、コリオリカ、自己重力の釣り合いによって形成されるガスの帯状流で起こるダスト集積過程と捉えることができる.ダスト-ガス間の 摩擦によってダストの回転速度がガスの回転速度に馴染むと、ダストは動径方向の力の釣り合いを保てず自己 重力によって高密度領域に集積する.

働く、サイズが十分小さく、摩擦による制動時間がケ プラー周期よりも十分短い場合にはダストの速度は終 端速度と仮定することができる。例えば回転角方向に はダストはガスとほぼ同じ速度で動いている(図1の (2)). これは軸対称の仮定のもとで回転角方向にはガ スの圧力勾配がなく、相対運動を促す力が働かないた めである.次に動径方向の相対運動を考えよう.前述 のように自己重力は圧力勾配力とコリオリカの合力と ちょうど釣り合っている(図1の(1)). 一方, ダスト には圧力勾配力が働かないためガスのように力の釣り 合いを満たせず、ダストはある速度で高密度領域に向 かって運動する(図1の(3)). すると高密度領域がよ り高密度になるため自己重力が強くなりダストはさら に集積する.この正のフィードバック過程により円盤 が不安定化する現象が永年重力不安定性である。以上 の思考実験ではガスを定常としていたが、本来はダス トからの摩擦反作用を受けて運動する. この反作用を 考慮した場合にも永年重力不安定性が成長することが わかっている[15]、永年重力不安定性の成長には摩擦 によってダストとガスの回転速度が馴染む効果が重要 である.また、自己重力が働くことも重要であるが、 いわゆる古典的な重力不安定性とは対照的に永年重力 不安定性は自己重力的に安定な軽い円盤でも成長し、 ダストを集積することができる.このことから永年重

力不安定性はもともと微惑星形成機構の候補として提 案された[e.g., 16].

永年重力不安定性が最も速く成長する摂動の動径方 向の波長(最大成長波長)はガス円盤の厚み(スケール ハイト)程度である.また、その成長時間はかなり不 安定な場合を想定してもケプラー周期の数10倍から 100倍程度である.つまり永年重力不安定性は、円盤 の回転周期と比べて非常に長い時間をかけて円盤内に 軸対称模様を作る機構である.永年重力不安定性の成 長過程で形成された高密度領域がリング構造、低密度 領域がギャップ構造となる.このリング/ギャップ構 造はダストだけでなくガスにも形成されるが、ダスト の面密度ゆらぎの方がガスのそれより大きいというこ とが局所線形解析から分かっているため、ダスト円盤 により顕著な縞模様を作ると考えられる.

ガス乱流中で起こるダストの拡散 過程

原始惑星系円盤中のガスは乱流状態にあると考えられている. 乱流の起源は例えば磁気回転不安定性[e.g., 17]などが考えられている⁵. このガス乱流の"強さ"は

^{5.} 他にも様々な流体不安定性[e.g., 18] が考えられているが、本 稿では乱流起源には立ち入らない.

乱流渦の散逸の結果生じる実効的な粘性応力の強さ (乱流粘性係数 v の大きさ)で測られる. 乱流粘性係数 はしばしばガスの音速 c_s と円盤の回転角速度⁶ Ω で規 格化された無次元量 $\alpha \equiv vc_s^2 \Omega$ で表される[19]. いく つかの円盤では α に対する観測的な制限がかけられて いる. 例えば多重リング構造をもつHD163296 [e.g., 20]では、ALMAによるガス輝線観測によって $\alpha \leq$ 3×10^{-3} が示唆されている[21, 22]. 同じく多重リング 構造をもつHL Tau [3]に対しては、観測されたダス ト円盤が非常に薄く、後述の乱流によるダスト拡散が 非効率的であるという観測的事実から $\alpha \leq 10^{-4}$ が示 唆されている[23].

このようなガス乱流中では、ダストは乱流場との摩 擦相互作用を介して拡散することがわかっている.拡 散の強さ(拡散係数)はαに比例しており[e.g., 24],ガ ス乱流が大きいほど拡散が効率的に起こる.このダス ト拡散は文字通りダストの集積を妨げる過程であり、 永年重力不安定性の安定化に最も効く物理素過程でも ある.永年重力不安定性に限らず、一般にダスト集積 を促す機構が実際の円盤で起こるかを議論する際には ダストの拡散も取り入れた解析が必要である.また、 拡散はダストの密度分布を均すため、形成されるリン グの幅を議論する上で重要である.本節ではまずダス トの拡散を記述する従来のモデルとその問題点をまと める.次に私たちが行った拡散を適切に記述する基礎 方程式の再定式化を紹介する.より詳細な記述は我々 の論文[14]を参照して頂きたい.

3.1 従来のモデル化と問題点

ガス乱流中でダスト1粒子ごとの運動を記述するの は、方程式の数がダスト粒子の数だけ必要になるため 困難である.この理由から拡散現象はしばしば移流拡 散方程式でモデル化される.次章でダスト/ガス円盤 の面密度を用いて無限に薄い円盤の安定性を議論する ため、ここでも面密度に対する移流拡散方程式をもと に議論する⁷.ダストの面密度Σ_dに対する移流拡散方 程式は以下である⁸:

$$\frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial t} + \nabla \cdot (\Sigma_{\rm d} \boldsymbol{v}) = \nabla \cdot (D \nabla \Sigma_{\rm d}) \tag{1}$$

ここで**v**はダストの速度, Dは拡散係数である.右辺 の拡散項がない場合,この式はダストの連続の式と等 価である.一方,左辺第2項の移流項を無視した場合 は面密度Σ_dに対する拡散方程式となっていることが 分かる.速度**o**はダストの運動方程式で時間発展させ る場合や,単に終端速度を代入する場合などがある.

移流拡散方程式によるモデル化は広く用いられてい るが、このモデル化には円盤の全角運動量が保存しな いという問題がある.これを具体的に見るために、以 下のようなダストとガスの連続の式と回転角方向の運 動方程式を考えよう[see also, 14]:

$$\frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Sigma_{\rm d} v_r \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial r} \right), \tag{2}$$

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Sigma u_r \right) = 0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial v_{\phi}}{\partial t} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial \left(r v_{\phi} \right)}{\partial r} = -\frac{v_{\phi} - u_{\phi}}{t_{\text{stop}}},\tag{4}$$

$$\frac{\partial u_{\phi}}{\partial t} + \frac{u_r}{r} \frac{\partial \left(ru_{\phi}\right)}{\partial r} \\ = \frac{\Sigma_d}{\Sigma} \frac{v_{\phi} - u_{\phi}}{t_{\text{stop}}} + \frac{1}{\Sigma r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \Sigma \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_{\phi}}{r}\right)\right].$$
(5)

ただし円柱座標 (r, ϕ) を用いて方程式を書き下し,軸 対称性を仮定した. Σ はガスの面密度,u,u, u, u, dダス トとガスの動径速度, v_{ϕ}, u_{ϕ} は回転角方向の速度, t_{stop} は摩擦によりガスとダストの相対速度が減少する 時間スケール(制動時間)であり摩擦の強さを表す.ま た式(5)の右辺3項は乱流粘性による運動量輸送の効 果を表している.これらの式を使うと単位面積あたり の角運動量の時間発展が以下のように書ける:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\Sigma_{\mathrm{d}} j_{\mathrm{d}} + \Sigma j \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r v_r \Sigma_{\mathrm{d}} j_{\mathrm{d}} + r u_r \Sigma j \right)$$
$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \Sigma \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_{\phi}}{r} \right) \right] + j_{\mathrm{d}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial \Sigma_{\mathrm{d}}}{\partial r} \right). \tag{6}$$

ここで $j_{d} \equiv rv_{\phi}$, $j \equiv ru_{\phi}$ はそれぞれダストとガスの比 角運動量である.また右辺第2項は式(2)の拡散項に 由来するトルクが存在し、そこでの角運動量(=(面密 度)×(比角運動量))が変わるということを表している. 両辺を円盤全域で空間積分すると左辺第1項が全角運 動量の時間変化となる.左辺第2項と右辺第1項は空 間積分を行うと表面項となるため、円盤の外から角運 動量が流入しない状況を考えてここでは無視する.右 辺第2項は空間積分を行うと一般に0でない有限の値

7. 質量密度を用いた場合でも本章と同様の議論が可能である.

^{6.} 本稿では円盤はケプラー回転則に従うとする.

^{8.} 拡散項の質量流束をダスト-ガス質量密度比もしくは面密度比の勾配に比例する形で与える場合もある.

を持つ. つまり,式(6)は拡散によって円盤の全角運 動量が保存しなくなるということを表している. とこ ろがダストの拡散はダスト粒子とガスとの摩擦相互作 用によって起こるため、ダスト-ガス間で角運動量の 輸送が起こっても、正味の角運動量は保存する. すな わち、ダストとガスの全角運動量は拡散過程において 本来保存する物理量である. したがって式(6)から導 かれる全角運動量の非保存は、ダストの拡散過程を単 に式(2)の拡散項でモデル化してしまったために起こ った"非物理的な振る舞い"である.

質量拡散項はダストの方程式にのみ現れているため、 その拡散項はダストの角運動量を非物理的に変化させ てしまう.ダストとガスは摩擦を介して角運動量をや り取りしているため、ダスト側で起こった角運動量変 化は一部ガスにも輸送されるが、その量はダストと比 べるとダスト-ガス面密度比の分だけ小さい.つまり、 拡散によって起こる角運動量の非保存は主にダストの 運動に影響する.したがって、ダストの集積過程やリ ング形成過程を正しく議論するためには、この角運動 量非保存問題を解決しなければいけない.次節では私 たちが行った巨視的方程式の定式化の概要と、角運動 量を保存しつつ拡散を適切に記述できる方程式につい て紹介する.

3.2 巨視的な支配方程式の再定式化

本稿ではダストが十分小さい場合(t_{stop}Ω <1)を考え, 動径方向のダスト拡散を考える⁹. また簡単のためガ スの乱流速度場は等方的であるとする. ダストが小さ く,制動時間がケプラー周期よりも十分短い場合には, ダストはガス乱流から受ける揺動力(キック)と同じ方 向に拡散する[24]. つまり,動径方向の拡散は動径方 向のキックによって起こる. 一般に動径方向の力は比 角運動量を変化させないため,この場合ダストの比角 運動量は拡散流に沿って保存することがわかる. 回転 角方向のキックは角運動量を変化させるが,乱流場の 等方性から正味の角運動量変化は起こらない.

ところで,式(2)は以下のように書き換えることが できる:

$$\frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \Sigma_{\rm d} \left(v_r - \frac{D}{\Sigma_{\rm d}} \frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial r} \right) \right] = 0.$$
(7)

この式は拡散流に沿った移流速度が – $\sum_{d}^{-1} D \partial \Sigma_{d} / \partial r$ で

あることを表している. そこでダストの比角運動量が 次の式で時間発展する場合を考えよう:

$$\frac{\partial j_{\rm d}}{\partial t} + \left(v_r - \frac{D}{\Sigma_{\rm d}}\frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial r}\right)\frac{\partial j_{\rm d}}{\partial r} = -r\frac{v_{\phi} - u_{\phi}}{t_{\rm stop}}.$$
(8)

この式は式(4)の移流速度 $v_r \in v_r - \sum_{d=1}^{-1} D \partial \sum_{d} / \partial r$ に置 き換えたものである.上述のように動径方向のキック ではダストとガスの間で角運動量の輸送は起こらない ため、ガスの式(5)に対する修正は不要である.式(2), (3),(5),(8)から単位面積あたりの角運動量の時間 発展方程式として

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Sigma_{\rm d} j_{\rm d} + \Sigma j) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(v_r - \frac{D}{\Sigma_{\rm d}} \frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial r} \right) \Sigma_{\rm d} j_{\rm d} + r u_r \Sigma j \right] \qquad (9) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \Sigma \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_{\phi}}{r} \right) \right]$$

を得る. 拡散項に由来する項が左辺第2項の中にのみ 現れており,この項は空間積分を行うと表面項になっ て消えるため,円盤の全角運動量が保存することが分 かる.つまり,移流項に拡散流の寄与も加えることで 全角運動量が保存するようになるということがわかっ た.私たちは平均場近似という操作に基づいて式(2) と(8)が自己無撞着に定式化できることを示した[14]. 平均場近似とは乱流場の解析に用いられる解析手法の 1つであり,乱流に起因する密度や速度の擾乱成分を 粗視化し,巨視的な密度場と速度場("平均場")の時間 発展方程式を定式化する操作である.式の煩雑さから ここでは詳細を省略するが,動径方向の運動方程式に 対しても同様に移流項に拡散流の寄与を加える必要が あることがわかった.

以上のように私たちは全角運動量を保存しつつ拡散 を適切に記述する方程式の定式化に成功した.次節で は定式化した巨視的方程式を用いて無限に薄い軸対称 円盤の局所線形解析を行った結果を紹介する.

線形解析と不安定性による多重 リング形成

本章ではガスの方程式と再定式化したダストの方程 式を用いて原始惑星系円盤の安定性解析を行った結果 [14]に基づき,そこで得られた2つの不安定性の物理 的解釈と不安定性によるリング形成の可能性について 紹介する.線形解析には式(2),(3),(5),(8)に加え,

^{9.} 回転角方向の拡散は軸対称性から無視する.



図2: 永年重力不安定性の分散関係を先行研究と本研究の場合とで比較した図. 破線が先行研究の結果,実線が本研究の解析結果である. 左図はある波長の摂動の成長率(振動数の虚部)を表す. 成長率が正のとき摂動の振幅が指数関数的に増加する. 右図は摂動の振動数の実部を表す. ここでは非摂動状態のダスト-ガス面密度比 Σ_{do}/Σ_0 を0.1とし,その他のパラメータは次の値を用いた: $D=10^{-4}c_s^2\Omega^{-1}$, $Q=c_s\Omega(\pi G\Sigma_0)^{-1}=3$, $t_{stop}\Omega=0.01$, $c_d=0$. ただしGは万有引力定数, Qはガス円盤のToomreのQ値である.

TVGIの物理的解釈 (@局所回転座標系)

o ガス乱流粘性なし (定常流)

oガス乱流粘性あり (TVGI)



図3:TVGIの成長過程を模式的に示した図.ガスの乱流粘性を無視した場合にはダストとガスが同じ回転速度をもつ定常解 (定常流)が存在する(左図).この定常流がガスの乱流粘性によって不安定化したものがTVGIである(右図).TVGIの 成長にはガスのコリオリカが乱流粘性によって減少することと(右図(1)),摩擦によってダストに働くコリオリカが 減少すること(右図(2))の2つの過程が重要である.

以下のガスとダストの動径方向の運動方程式を用い る:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} &= \frac{u_{\phi}^2}{r} - \frac{c_s^2}{\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\Phi - \frac{GM_*}{r} \right) \\ &+ \frac{\Sigma_d}{\Sigma} \frac{v_r - u_r}{t_{stop}} + 2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Sigma \nu \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{\Sigma \nu u_r}{r^2} \right] \\ &- \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\Sigma \nu}{r} \frac{\partial (r u_r)}{\partial r} \right] \end{aligned}$$
(10)

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + \left(v_r - \frac{D}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r}\right) \frac{\partial v_r}{\partial r} \\
= \frac{v_\phi^2}{r} - \frac{c_d^2}{\Sigma_d} \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\Phi - \frac{GM_*}{r}\right) \\
- \frac{v_r - u_r}{t_{\text{stop}}} + \frac{1}{r\Sigma_d} \frac{\partial}{\partial r} \left(rv_r D \frac{\partial \Sigma_d}{\partial r}\right).$$
(11)

ここで式(10)の右辺第2項は圧力勾配力を表し,式 (10),(11)の右辺第3項はポテンシャルΦの自己重力 と質量*M**の中心星から受ける重力を表す.自己重力



図4:縦軸に乱流強度 α[19],横軸にケプラー角速度で規格化したダストの制動時間をとった時に最も速く成長する不安定 性の成長時間を図示したもの。色はケプラー周期で規格化した不安定性の成長時間,点線はTVGIもしくは永年重力不 安定性が最も速く成長する領域の境界である。また、白い領域はTVGIも永年重力不安定性も安定な領域である。ここ ではダスト-ガス面密度比を0.05,ガス円盤のToomreのQ値を10とした。

ポテンシャルΦは以下のPoisson方程式を用いて計算 する:

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \left(\Sigma + \Sigma_{\rm d} \right) \delta(z). \tag{12}$$

ただし δ (z)は円盤の鉛直方向(z方向)に対するデルタ 関数である.式(10)の右辺第5,6項は乱流粘性によ る運動量輸送を表す.式(11)の左辺の移流項には式 (8)と同様に拡散流の寄与が含まれている.式(11)の 右辺第2項は乱流場との相互作用でダストに速度分散 $c_d \propto \sqrt{a} c_s$ [24]が発生する効果を表す.式(11)の右辺第 5項は我々の定式化[14]で得た項であり,左辺の拡散 による移流項と同じオーダーの項である.

4.1 永年重力不安定性の再解析

まず私たちはダスト-ガス間の摩擦を考慮した局所 線形解析に基づき永年重力不安定性の再解析を行った [14]. その結果,不安定条件はほとんど変わらないも のの,永年重力不安定性のモードの性質に顕著な差が あることがわかった.図2は今回の再解析で得た永年 重力不安定性の分散関係を先行研究と比較したもので ある.先行研究で得られた永年重力不安定性は振動し ながら振幅が指数関数的に増加していく過安定モード であった.一方,本研究の解析では永年重力不安定性 が指数関数的に単調成長する不安定モードであること がわかった.この性質の違いはやはり角運動量が保存 しているかどうかに起因しており,先行研究で得られ た振動は非物理的なものであることがわかった.これ を示すためにダストの比角運動量の時間発展を考えよ う.先行研究のダストの比角運動量の時間発展は,式 (2),(4)から

$$\frac{\partial j_{\rm d}}{\partial t} + \left(v_r - \frac{D}{\Sigma_{\rm d}}\frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial r}\right)\frac{\partial j_{\rm d}}{\partial r} \\
= -r\frac{v_{\phi} - u_{\phi}}{t_{\rm stop}} - \frac{D}{\Sigma_{\rm d}}\frac{\partial \Sigma_{\rm d}}{\partial r}\frac{\partial j_{\rm d}}{\partial r}$$
(13)

となる. ここでは移流項に拡散流の寄与が現れるよう に式変形をした. ダスト拡散の取り扱いを修正して得 られたダストの比角運動量変化の式(8)との違いは右 辺第2項である. ケプラー回転円盤を考えると比角運 動量は円盤外側ほど大きいため,右辺第2項の符号は ダスト面密度の勾配で決まる. 面密度勾配が正(負)の 領域では右辺第2項は負(正)のトルクとなりダストの 比角運動量を減少(増加)させる. つまり,ダストの集 積を妨げる向きに角運動量を変化させる. このトルク が先行研究で現れた振動の原因である. 式(8)を用い た今回の解析では,式(13)の右辺第2項のような拡散 に起因するトルクは働かず,永年重力不安定性は単調 成長する.



図5: HL Tauの円盤モデルに基づき線形解析を行った結果. 左図は最大成長波長の動径分布, 右図はその成長時間の分布を 表す. 黒線と灰色線は線形解析の際にガスの乱流粘性を考慮した結果と考慮しなかった場合の結果を表す. 左図の灰 色の線分で示された領域は永年重力不安定性の方が速く成長する空間領域に相当している.

4.2 摩擦とガスの乱流粘性が駆動する新しい 不安定性

ダスト拡散の式を再定式化することで、私たちは永 年重力不安定性とは別の新しい不安定性(Twocomponent Viscous Gravitational Instability, TVGI) を発見した[14]. TVGIはダスト-ガス間の摩擦とガ スの乱流粘性(式(5)の右辺第2項)が働く場合に起こ る。TVGIのメカニズムを以下に簡単に示す。ガスの 乱流粘性を無視した場合には、摩擦が働く場合にもダ ストとガスが同じ回転速度を持って定常分布を実現す る解が存在する¹⁰. 例えばダストの速度分散c_dが0の 場合には、この定常解ではガス面密度が一定で圧力勾 配力がなく、ダストの面密度揺らぎに起因する自己重 力がダストとガスのコリオリ力と釣り合っている(図 3の左図)¹¹. この定常流がガスの乱流粘性によってど のように変化(不安定化)するのかを考えよう.粘性は 運動量と角運動量の拡散を引き起こす。図3に示した ガスの速度構造には動径方向に回転速度勾配があるが、 この勾配が粘性による(角)運動量拡散によって均され

る. つまり,ガスの回転速度揺らぎの振幅が減少する (図3の右図(1)). その結果,もともとガスと同じ回 転速度揺らぎを持っていたダストとの間に相対速度が 発生する. この相対速度に起因する摩擦がダストに働 き、ダストの回転速度揺らぎの振幅も小さくなる(図 3の右図(2)).回転速度揺らぎが小さくなると、もと もとダストの自己重力と釣り合っていたコリオリ力が 減少してしまう. つまりダストもガスも動径方向の力 の釣り合いが保てなくなるのである(図3の右図(3))¹². このようにガスの乱流粘性と摩擦が同時に働くことで コリオリ力が弱まり、ダストとガスが自己重力によっ て動径方向に集積するというのがTVGIである. 永年 重力不安定性の場合と同様にTVGIの成長過程ではガ スに対してダストがより集積するため、円盤内のリン グ形成や微惑星形成機構になりえる.

TVGIの最大成長波長は永年重力不安定性と同様に ガスのスケールハイト程度かそれ以下である.また, 成長時間も同様にケプラー周期と比べて非常に長い. 図4はガス乱流の強さα[19]とダストの制動時間に対 して最も速く成長する不安定性の成長時間を表してい る.図中の点線は永年重力不安定性が成長できる最大 のαに相当しており,それを境にして最も速く成長す る不安定性がTVGIか永年重力不安定性かどうかで領 域が分かれている.図4から,乱流が強く永年重力不

^{10.}これはガスの乱流粘性を無視した場合の線形摂動方程式の定常解である.このような時間発展しない摂動解はstaticモードもしくはneutralモードと呼ばれている.先行研究では拡散に起因する非物理的なトルクによってこの定常解が存在しなかった.2章の地衡風もまたstaticモードのひとつであり、摩擦と乱流粘性のどちらも無視した線形摂動方程式の定常解である.

^{11.}c_aが有限の値を持つ場合にはガスの面密度揺らぎが有限の振幅を持ち,圧力勾配力も含めて動径方向の力の釣り合いが成り立つような定常分布が存在する.以下の議論は、c_a≠0の場合にも同様に成立する.

^{12.}図3ではダストの密度勾配が図に対して右向きの場合を示したが、勾配が左向きの場合も同様の議論が成立する.ただしその場合には、回転速度揺らぎの向きや動径方向の力の向きが全て逆になることに注意が必要である.

安定性が安定な場合でもTVGIは成長できることが分かる.

また、TVGIはダストがより小さく摩擦が強い場合 でも不安定成長することができる.つまり、合体成長 に伴いダストのサイズが大きくなっていく中で、 TVGIは永年重力不安定性よりも早い時期に成長する ことが図4から分かる.したがって、不安定性による ダスト集積や微惑星形成を考える上でTVGIも考慮す ることが重要であると言える.

TVGIの成長が期待されるのは、ダストがどの程度 のサイズまで成長した段階だろうか.ここではダスト -ガス間の摩擦がEpstein則¹³に従うと仮定して、要 求されるダストサイズを定量的に評価してみよう. Epstein則ではダストの制動時間 t_{stop}は以下のように 与えられる:

$$t_{\rm stop} = \frac{\rho_{\rm int} a}{\rho_{\rm g} c_{\rm s}}.$$
 (14)

ただし ρ_{int} はダスト1粒子の質量密度, aはダストの 半径, ρ_{g} はガスの質量密度である.ここでガス円盤 は鉛直方向(z方向)に静水圧平衡状態になっていて, 次の正規型の密度分布をもつと仮定する:

$$\rho_{\rm g} = \frac{\Sigma_0}{\sqrt{2\pi}c_{\rm s}\Omega^{-1}} \exp\left[-\frac{z^2}{2\left(c_{\rm s}\Omega^{-1}\right)^2}\right].$$
(15)

ただし Σ_0 が非摂動状態でのガスの面密度である.以下では赤道面(z = 0)での物理量を評価することにし、ガス密度を $\rho_g = \Sigma_0 (\sqrt{2\pi} c_s \Omega^{-1})^{-1}$ で与えると、式(14)から

$$a \simeq 1.7 \mathrm{mm} \left(\frac{t_{\mathrm{stop}}\Omega}{0.1}\right) \left(\frac{T}{20\mathrm{K}}\right)^{1/2} \left(\frac{M_*}{1M_{\odot}}\right)^{1/2} \\ \times \left(\frac{r}{70\mathrm{au}}\right)^{-3/2} \left(\frac{\rho_{\mathrm{int}}}{\mathrm{1g \ cm^{-3}}}\right)^{-1} \left(\frac{Q}{10}\right)^{-1}$$
(16)

を得る. ただし*T*はガスの温度, *M*_{*}は中心星質量, $Q \equiv c_{s} \Omega (\pi G \Sigma_{0})^{-1}$ はガス円盤のToomreの*Q*値であ る. また音速*c*_sを計算する上で平均分子量を2.34と仮 定した. 式(16)と図4から, 例えば $\alpha = 10^{-4}$ では(サブ) ミリサイズまでダストが成長するとTVGIが成長する ことがわかる.

4.3 多重リング形成への示唆

上述のようにTVGIはダストを集積する過程である

ため、円盤内の多重リング形成機構になり得る. 私た ちは局所線形解析に基づいてHL Tauのリング構造が TVGIによって形成可能かどうかについて調べた[14]. HL Tau に観測されたリングは10 au から100 au 程度 まで広く分布しており、隣接するリングどうしの間隔 は最も内側(r < 40 au)の1組が20 au程度, それより 外側で10 au程度とわかっている[3]. もし観測された リングが不安定性によって形成されたとすると、リン グ間隔が不安定性の最大成長波長程度になっているで あろう、図5は観測[23,25]から得られた物理量に基づ き線形解析を行った結果得られた不安定性の最大成長 波長と成長時間の動径分布を表している[cf., 11]. 永 年重力不安定性が成長する領域とTVGIが成長する領 域を表すために、ガスの乱流粘性を無視した場合の線 形解析の結果も図中に示した. 永年重力不安定性の方 が速く成長する領域はおよそ80 auから100 auの間で あり、それ以外の領域ではTVGIが最も速く成長する. HL Tauの年齢は100万年以下であるため、不安定性 によって観測されたリングが形成される条件は、最大 成長波長が観測されたリング間隔(~10 au)でかつ成 長時間が100万年以下であることである。図5からお よそ50 auより外側では2つの不安定性によってHL Tauの多重リングが形成可能であるということが分か る.

5. まとめと今後の展望

本稿では、私たちが行ってきたダスト-ガス系で起 こる不安定性の理論的な研究[14]に基づき、ダスト拡 散過程を記述する方程式の定式化とダスト-ガス系の 不安定性について物理的理解を論じた.

ガス円盤の乱流によって引き起こされるダスト拡散 は、リング/微惑星形成にとって重要なダスト集積過 程を阻害してしまう.この集積/拡散過程を詳細に議 論するためには拡散の適切なモデル化が必要不可欠で あるが、これまで用いられてきたモデルには円盤の全 角運動量が保存しないという問題があった.そこで本 研究ではまず角運動量が保存しつつダストの拡散を適 切に記述する方程式を定式化した.本稿では詳細に立 ち入らなかったが、この定式化は乱流による擾乱成分 を粗視化し巨視的な密度場/速度場の時間発展方程式 を導出する平均場近似という手法に基づいている.次

^{13.}ダストのサイズがガスの平均自由行程より小さい場合の摩擦 則.

に私たちは定式化した方程式に基づいて円盤の線形解 析を行った.その結果,先行研究とは異なり永年重力 不安定性は指数関数的に単調成長するモードであるこ とがわかった.角運動量が保存しない拡散モデルを用 いてしまうとモードの定性的な性質を変えてしまうと いう点においても拡散の適切なモデル化は重要である と言える.

さらに、本研究では永年重力不安定性とは別の新し い不安定性(TVGI)を発見した、TVGIはダスト-ガス 摩擦とガスの乱流粘性の両方が働くことによって成長 する不安定性である、TVGIは永年重力不安定性より も不安定条件が緩く、例えば乱流がより強くダストサ イズがより小さい場合でも成長することがわかった (図4).円盤内でダストが合体成長を通して大きくな っていくことを鑑みると、TVGIは円盤進化段階のよ り早い時期に成長することが示唆される、TVGIの成 長過程ではガスに対してダストが集積されるため円盤 内の多重リング形成や微惑星形成機構になり得る現象 である.

DSHARPを含む近年のALMA望遠鏡の観測によっ てHL Tau以外の天体にも様々な天体で多重リング構 造が発見されてきている.今後それらのリング構造が TVGIと永年重力不安定性によって形成可能かどうか について詳細な解析を行う予定である.また,数値計 算を行って不安定性に伴う密度分布の時間発展を直接 調べる事も重要である.これらの不安定性が微惑星形 成機構になり得るかどうかを調べるためには,非線形 成長の解明が非常に重要になる.私たちは拡散を考慮 しなかった場合の永年重力不安定性の非線形数値計算 をすでに行っており,ダスト面密度がガスの面密度よ りも大きいリングができる事を確認している[26].今 後は今回定式化した方程式に基づきダスト拡散の効果 を加え非線形数値計算を進めていく.

謝 辞

本研究は日本学術振興会の特別研究員奨励費 18J20360の助成を受けて行ったものです。ダストの 拡散過程と定式化に関して京都女子大学の道越秀吾氏 から様々なご助言を頂きました。名古屋大学の小林浩 氏,井上剛志氏,国立天文台の高棹真介氏にはセミナ ー発表等を通して大変有益なコメントを頂きました。 さらに本稿の査読者である田中秀和氏には非常に丁寧 な査読をして頂きました.この場を借りて感謝致しま す.

参考文献

- [1] Muto, T. et al., 2012, ApJL 748, L22.
- [2] Avenhaus, H. et al., 2018, ApJ 863, 44.
- [3] ALMA Partnership et al., 2015, ApJL 808, L3.
- [4] Fukagawa, M. et al., 2013, PASJ 64, L14.
- [5] Perez, L. M. et al., 2016, Science 353, 1519.
- [6] Andrews, S. M. et al., 2018, ApJL 869, L41.
- [7] Huang, J. et al., 2018, ApJL 869, L42.
- [8] Kanagawa, K. D. et al., 2015, ApJL 806, L15.
- [9] Zhang, K. et al., 2015, ApJL 806, L7.
- [10] Okuzumi, S. et al., 2016, ApJ 821, 82.
- [11] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S.-i., 2016, AJ 152, 184.
- [12] Adachi, I. et al., 1976, Prog. Theor. Phys. 56, 1756.
- [13] Weidenschilling, S. J., 1977, MNRAS 180, 57.
- [14] Tominaga, R. T. et al., 2019, ApJ 881, 53.
- [15] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S.-i., 2014, ApJ 794, 55.
- [16] Youdin, A. N., 2011, ApJ 731, 99.
- [17] Balbus, S. A. and Hawley, J. F., 1998, Reviews of Modern Physics 70, 1.
- [18] Nelson, R. P. et al., 2013, MNRAS 435, 2610,
- [19] Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A., 1973, A&A 24, 337.
- [20] Isella, A. et al., 2016, PhRvL 117, 251101
- [21] Flaherty, K. M. et al., 2015, ApJ 813, 99.
- [22] Flaherty, K. M. et al., 2017, ApJ 843, 150.
- [23] Pinte, C. et al., 2016, ApJ 816, 25.
- [24] Youdin, A. N. and Lithwick, Y., 2007, Icarus 192, 588.
- [25] Kwon, W. et al., 2015, ApJ 808, 102.
- [26] Tominaga, R. T. et al., 2018, PASJ 70, 3.

特集「ALMAで迫る惑星科学」 ALMA特集号の編纂にあたって

秋山 永治1

南米チリに建設されたアルマ望遠鏡(アタカマ大型 ミリ波サブミリ波干渉計. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA) は、これ までのミリ波・サブミリ波望遠鏡を遥かに凌駕する解 像度と感度を備えた大型電波望遠鏡である。2011年 にアルマの科学観測が開始されて以来、観測性能は長 足の進歩を遂げ、まだ最終性能に到達していないもの の. 星・惑星形成の現場である原始惑星系円盤の精緻 な描像を明らかにし、現代の惑星科学が目指す我々の 太陽系や地球の起源に迫る革新的な情報を提供してい る。さらに、生命に関連した大型有機分子が星形成領 域や原始惑星系円盤で検出され、今や物質起源や宇宙 生命に関して観測結果を基にした本格的な議論が精力 的に行われている。また、観測的研究の飛躍によって 流体シミュレーションや化学反応計算などの高度化し た理論モデルとの整合化が図られるようになり、惑星 の形成進化過程や惑星形成領域の詳細な物理・化学構 造が観測的検証を重ねて明らかになりつつある.一方. 太陽系内の天体においては、金星、天王星、海王星を はじめとする惑星や、イオ、エウロパ、タイタンなど の衛星に対して高空間分解能・高感度観測が行われ、 大気構造や化学組成などの理解が急速に進んでいる. また小惑星については詳細な表面温度分布が観測で明 らかにされている. 今後もアルマの観測性能は向上し, 原始惑星系円盤や太陽系内天体の観測が加速的に進む ことは間違いない.近年の研究で明らかにされた新事 実により惑星形成の理解が混沌とする中、アルマは 我々に惑星形成現場や惑星本体の観測的知見を与え、

惑星科学が目指す汎惑星形成理論や大気形成理論の構 築に向け新たなエポックを築いていくと期待される.

このような惑星科学の急速な発展に伴い、本特集で は、9月号と12月号の2回に渡ってアルマがもたらし た惑星科学に関連する研究成果をまとめ、これまでに 明らかになった観測事実や理論モデルを分かりやすく 解説し、専門外の方でも理解できるように努めた、そ のため、第1編ではアルマプロジェクトマネージャー を務める国立天文台のアルバロ・ゴンザレズ氏から導 入としてアルマ国際プロジェクトの概要およびアルマ 望遠鏡の基本性能について説明していただいている。 そして今後予定されている新たな観測機能や現機能の 拡張化などアルマの将来計画についても紹介していた だいている。第2編と第3編では、工学院大学の武藤 恭之氏と国立天文台の野村英子氏から原始惑星系円盤 のダストとガスの高解像度・高感度観測を中心に星・ 惑星形成領域の詳細な構造、化学組成、有機分子の検 出とその分布といったアルマ望遠鏡の性能と特性を活 かして得られた観測成果について解説していだだいた. 第4編では、国立天文台の塚越崇氏から、太陽近傍に 存在しAUスケールの詳細観測が可能な原惑星系円盤 において,惑星形成初期もしくは惑星形成が始まる直 前の描像を捉えた観測結果について解説記事として分 かりやすく説明していただいた.

続いて12月号の第5編では、東アジア・アルマ地域 センターのマネージャーである国立天文台の深川美里 氏から、観測提案、データの取得、解析、配布といっ た当該センターにおけるユーザー支援体制とそれに関 わるソフトウェア開発について紹介していただく予定 である.第6編では、京都産業大学の佐川英夫氏から

^{1.} 北海道大学 高等教育推進機構 eakiyama@high, hokudai, ac. jp

太陽系内天体の観測として火星の全球ダストストーム とそれによって生じる太陽光吸収や日傘効果による温 度減少を観測結果から見積もり,惑星のダイナミック な大気現象について報告していただく.さらに,本観 測では日本が主導的に設計・建設したACA(The Atacama Compact Array,モリタアレイ)が持つ解像 度と視野の特性を活かして成果が挙げられている.次 いで第7編と第8編では,東京工業大学の奥住聡氏か らスノーラインを考慮したダスト成長に関する理論研 究と茨城大学のスン・カンロウ氏から円盤のモデル計 算を介した原始惑星系円盤のガス・ダスト質量比の見 積もりおよびダスト凝集のメカニズムについての報告 を予定している.最後に第9編では,北海道大学の秋 山永治からアルマの広視野観測によって示唆される惑 星形成の頑健性に関する論文が予定されている.

本特集号は常任編集委員の関口朋彦氏の呼びかけに よって企画がはじまり,関口氏と秋山が特集号の編集 を担当する運びとなった.さらに,茨城大学の百瀬宗 武氏と「遊・星・人」編集長の和田浩二氏のお二人か ら計らいをいただき,本特集号とのコラボレーション で初学者向けの原始惑星系円盤の電波天文観測に関す るテキストを用意していただいた.本テキストでは電 波観測の基本的事項の説明に加え,観測量を基に円盤 モデルから物理量を導く手法なども詳説されており, 本特集号で取り上げられている論文や記事を深く理解 する上で大変重宝するものとなっている.また,原始 惑星系円盤の電波観測に重点をおき基礎を与える数少 ない和文テキストでもある.次号以降も掲載予定であ るので,本特集号と併せて是非目を通していただきた い.

最後に,多くの関係者の方々からご協力をいただき, 惑星科学に関する最新の研究成果と重要なテーマを議 論した特集号を完成することができた.アルマ関係者 ならびに惑星科学のコミュニティの皆様からご支援い ただけたことに心から感謝申し上げる.

特集「ALMAで迫る惑星科学」 アルマ望遠鏡の現状と機能拡張計画「アルマ2」

アルバロ・ゴンサレス¹, 深川 美里¹, 伊王野 大介¹, 平松 正顕¹, 国立天文台アルマプロジェクトチーム¹

2019年6月29日受領, 査読を経て2019年7月22日受理.

(要旨) アルマ望遠鏡は、2011年の観測開始以来、目覚ましい成果をあげている. 原始惑星系円盤を高解像 度で観測し、同心円状の隙間を持つ円盤を多数発見するとともに、地球にもっとも近い原始惑星系円盤では 1天文単位スケールの構造を描き出した. 一方、観測装置は2000年代の設計思想や技術に基づいている. そ こで、アルマ望遠鏡が引き続き天文学を牽引していくために、今後10年の機能強化の指針となる『ALMA Development Roadmap』が国際的議論に基づき策定された. この機能強化は2020年代に共同利用観測と並 行して行われる予定である(日本では「アルマ2」計画と呼ぶ). 機能強化により、現在の100倍以上に及ぶ数 の原始惑星系円盤で1天文単位スケールの構造をとらえることが可能になる. また、複雑な有機分子の原始 惑星系円盤内での分布を明らかにすることができると期待される.

1. アルマ望遠鏡の概要

アルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉 計, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA)は,南米チリ共和国・アタカマ砂漠 の標高5000 m地点に建設された巨大電波望遠鏡であ る.日本が主導する東アジア,欧州,北米がチリと協 力して運用する国際共同プロジェクトであり,2011 年から科学観測を開始した.

アルマ望遠鏡が観測するのは,波長0.35 mm ~3.6 mm(周波数84 GHz ~950 GHz)の「ミリ波・サブミリ 波」と呼ばれる電波である.星間空間に漂う極低温(お よそ10 K)のガスやダストは可視光を発することはで きないが、ミリ波・サブミリ波を放射することができ る.ガスやダストは星や惑星の材料であるから、ミリ 波・サブミリ波を観測することで星や惑星、その集合 体である銀河の誕生と成長を調べることができる.

アルマ望遠鏡は、66台のパラボラアンテナ(口径12 mアンテナ54台と7mアンテナ12台)を同期させて 観測し、データを結合することで全体をひとつの巨大

```
1. 自然科学研究機構国立天文台
alvaro.gonzalez@nao.ac.jp
```



図1:アルマ望遠鏡のアンテナ群. Credit: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com) /ESO

望遠鏡として機能させる「電波干渉計」という仕組み を用いている.一般に望遠鏡は口径を大きくするほど 空間解像度が向上する.アルマ望遠鏡ではアンテナを 最大で16 kmの範囲に展開することで,直径16 kmの 電波望遠鏡と同じ解像度(最大0.01秒角)を達成できる. アルマ望遠鏡の各アンテナには,周波数帯(バンド)ご とに最適化された設計を持つ超伝導受信機が搭載され ている.現在はバンド3からバンド10までの受信機 が搭載されており,バンド1受信機は開発中,バンド



図2: (左) アルマ望遠鏡が撮影したおうし座HL星の原始惑星系円盤. 同心円状の複数のリングが写し出されている. Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)(右) アルマ望遠鏡が撮影したうみへび座TW星の原始惑星系円盤. 拡大図では、地球軌道ス ケールの隙間が見えている. Credit: S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2受信機は開発検討中である.アルマ望遠鏡は,高精 度アンテナと高感度受信機に好適な気象条件も相まっ て,感度も極めて高い.アルマ望遠鏡は,ミリ波サブ ミリ波を観測する望遠鏡としては史上最も高性能であ り,これにより多くの科学成果を上げている.

2. アルマ望遠鏡のこれまでの観測成果

アルマ望遠鏡は太陽や系内の惑星・衛星・小惑星・ 彗星から130億光年を超える距離にある原始銀河まで さまざまな天体を観測対象としている.なかでもアル マ望遠鏡では,(a)太陽系以外の惑星系とその形成, (b)銀河形成と諸天体の歴史,(c)膨張宇宙における物 質進化の探究を科学目標の3本柱としている.

アルマ望遠鏡はその高い感度と空間解像度で,原始 惑星系円盤の詳細な構造を描き出すことに成功してい る.2014年に公開されたのが,年齢10万年程度の若 い星おうし座HL星に付随する原始惑星系円盤におい て発見された,多重の細いリング状構造である[1]. そのリング状構造の起源には諸説あり,惑星を起源と する説,円盤内の動径温度分布に伴う塵の変化を起源 とする説,円盤におけるガスと塵の摩擦に起因する流 体力学的不安定性を起源とする説などが提案されてい るが,まだ解明されていない.また,地球から最も近 い原始惑星系円盤であるうみへび座 TW 星周囲の円 盤においては,中心に半径1天文単位程度の穴が空い ており,さらに,数本の細いリング状構造が2016年 に見いだされた[2,3].2018年にはDSHARP(Disk Substructures at High Angular Resolution Project: 高解像度による原始惑星系円盤構造観測プロジェク ト)と名付けられた大規模観測計画が実施され,およ そ5天文単位の解像度で20個の原始惑星系円盤の姿を とらえることに成功している[4].

銀河形成分野においては、赤方偏移9.11(距離にして132.8億光年)の銀河の2階電離酸素輝線[OIII]を検出し、人類史上最も遠い酸素の検出に成功している [5]. ビッグバン直後の宇宙には水素とヘリウム、ごく 微量のリチウムしか存在せず、これより重い酸素は恒 星の中での核融合反応によって合成されたものである. ビッグバン後およそ5億年の天体に酸素が検出された ということは、それよりも前の時代(ビッグバン後お よそ2.5億年、赤方偏移~15)に多くの星が生まれ、核 融合反応を起こし、合成された元素が星の死によって 周囲にばらまかれたということを示唆している.この 研究成果により、2階電離酸素輝線[OIII]が初期銀河 を探る有力なプローブであるということが確立された. さらに、原始銀河団、サブミリ波銀河、重力レンズ、 スニヤエフ・ゼルドビッチ効果、分子ガス構造などの 観測から宇宙初期の様子が明らかになりつつある.

宇宙における物質進化に関連して,生命起源に関連 する物質の探査が精力的に進められている.これまで に、単純な糖類分子グリコールアルデヒド[6],イソ シアン酸メチル[7,8]などの複雑な有機分子や、枝分 かれした炭素骨格を持つ有機分子[9]を発見した.さ らに、原始惑星系円盤にメタノールを初めて検出した [10].これらの分子は、アミノ酸をはじめとする地球 生命の構成要素の形成にとって基礎的な分子と考えら れており、その検出には高感度・高波長分解能を誇る アルマ望遠鏡の機能が最大限に発揮されている.また、 太陽系内の彗星や惑星・衛星、銀河系内の星形成領域、 近傍宇宙の銀河などにおいて多様な有機分子の探索と それらの形成メカニズムに迫る研究が進んでいる.

3. アルマ望遠鏡の運用とその現状

2011年,アルマ望遠鏡は16台のアンテナと限られ た周波数帯(バンド)の受信機を使った初期科学観測を 開始し,徐々にアンテナ数と観測可能バンドを拡張し ながら現在に至っている.

アルマ望遠鏡は、世界の研究者からの提案をもとに 観測を行う共同利用装置である.1年間をひとつの「サ イクル」として、サイクルごとに観測提案の募集と審 査を行っている。科学観測に供される時間は初期科学 運用のころから継続的に増加しており、2019年10月 に開始される「サイクル7」では12mアンテナを用い る観測に4300時間が供される。研究者からの要望は 非常に多く、最近の各サイクルでの提案件数はおよそ 1800件である。共同利用時間に対して観測提案時間 数の合計はほぼ常に5倍弱となっており、高い競争倍 率を維持している。さらに、アルマ望遠鏡観測データ に基づく査読論文は2019年6月時点で1500編に迫っ ており、当該分野の研究を大きく前進させる画期的な 成果も多く含まれている.論文数の伸びは、世界のほ かの第一線の観測装置とほぼ一致しており、アルマ望 遠鏡が確かに天文学を牽引していることがわかる.

2019年10月開始の「サイクル7」以降では、通常の 観測提案募集に加えて、アルマ望遠鏡アンテナのうち 7mアンテナ12台と12mアンテナ4台からなるアタ カマ・コンパクト・アレイ (Atacama Compact Array: ACA、愛称「モリタアレイ」)だけで観測を行うモード (ACAスタンド・アローン)の追加観測提案募集が行 われる予定である、これは、ACAの利用効率を最大 化することを目指したものである. ACAスタンド・ アローンではアンテナ数とアンテナ展開範囲が限られ るため、アルマ望遠鏡全体を使う場合に比べて感度・ 解像度は劣る、一方で、天球上で広がりを持つ天体の 観測には威力を発揮し、またACA 7 mアンテナはほ かのアンテナに比べて鏡面精度が高いことから短い波 長(特に,バンド9・10:波長0.35 mm~0.5 mm, 周 波数602 GHz~950 GHz)での観測に適している.ア ルマ望遠鏡以外でバンド9・10の波長帯が本格的に観 測できるのは、ハーシェル宇宙望遠鏡(すでに運用終 了)のような宇宙望遠鏡やアクセスと運用が困難な南 極の望遠鏡しかなく、アルマ望遠鏡でこの波長帯を観 測する意義は極めて高い.

アルマ望遠鏡は教科書を書き換えるような成果を多 く上げている一方,そこで採用されている技術や設計 思想は2000年代初期のものであり,今後もアルマ望 遠鏡が競争力のある観測装置であるためには機能向上 が欠かせない.受信機(フロントエンド)や信号処理シ ステム(バックエンド)の技術開発では近年目覚ましい 進展があったことから,一部装置をアップグレードす ることによってアルマ望遠鏡の性能はさらに大きく向 上すると期待される.

今後およそ5年のうちに、アルマ望遠鏡は定常運用 を行うフェイズから、定常運用と次の10年の科学研 究を切り拓くための機能強化を並行して行うフェイズ へと移行する.機能強化の具体的な内容は、新たに設 定した科学目標に基づいてALMA Development Roadmap [11]として優先順位をつけてまとめられて おり、アルマ望遠鏡の最高意思決定機関であるアルマ 評議会の承認を受けている.世界中の研究者から寄せ られる観測提案に基づいて科学運用を継続しながら装置システムの主要コンポーネントのアップグレードを 行うことが重要であり、改修中の一部装置が稼働して いない状態でも科学成果を最大化するために、高いレ ベルのシステムエンジニアリングが必要とされる.

4. アルマ望遠鏡のための技術開発

アルマ望遠鏡プロジェクト,特に東アジア陣営は, ALMA Development Roadmapを先に見据えながら ALMA Development Programを 推進している. ALMA Development Roadmapでは,(a)広帯域受信 機の開発,(b)基線の拡大,(c)データアーカイブの向 上が優先順位の高い項目として掲げられている. ALMA Development Roadmapには,さらに長期に わたる性能向上を目指して,視野を拡大するためのマ ルチビーム(多視野)受信機開発や感度を向上させるた めの12 mアンテナの増設について述べられている. また,アルマ望遠鏡建設地に大口径の単一鏡を設置し てアルマ望遠鏡とのシナジーを生み出す案にも触れら れている.現在のALMA Development Roadmapの さらに先,2030年代以降を見越した研究開発を立ち 上げることも重要である.

ALMA Development Programは、アルマ望遠鏡の 3つの執行機関(自然科学研究機構国立天文台、欧州 南天天文台、米国北東部大学連合/米国国立電波天文 台)によって実行される、その内容は、以下のふたつ に分けられる。

- Development Projects:実際のハードウェアやソフトウェアをアルマ望遠鏡に新たに組み込むことで、アルマ望遠鏡の性能を向上させることを目指すもの.アルマ評議会あるいはアルマ所長による承認が必要である.
- ▶ Development Studies: 将来的にアルマ望遠鏡の性 能を向上させることを目指して,基盤技術の開発や 技術的な実現可能性を検討する.基礎開発・検討が 完了したのち,多くの場合はDevelopment Project に移行する.各執行機関の責任で開始・実行される. 東アジア地区では、国立天文台が毎年ALMA Development Workshopを主催している.実際にアル マ望遠鏡を使って観測成果を生み出す天文学者と,装 置やソフトウェアを開発する技術者が一堂に会し,開

発項目に関するアイデアや優先順位についての意見を 交換する場である.この議論は、合同アルマ観測所や 各地域の執行機関、また各地域の科学諮問委員会とも 連携して行われる.ここ数年のワークショップのテー マは、「広帯域観測が可能な受信機と信号処理系」「テ ラヘルツ受信機」「多視野受信機」「さらなる長基線観 測を実現するための装置開発」であった.

現在,東アジア陣営に関連のあるものとしては以下 の3つがDevelopment Projectsとしてアルマ評議会に 承認され,進行中である.

- ▶バンド1受信機:35~50 GHzの周波数帯を観測す る受信機であり、台湾中央研究院天文及天文物理研 究所が国立天文台との緊密な協力のもとにリードし ており、米国国立電波天文台、チリ大学、ヘルツバ ーグ天体物理学研究所(カナダ)が協力している.バ ンド1受信機の主要な科学目標は以下の2点である.
 - (a) 原始惑星系円盤の内側領域における,比較的大 きなダスト粒子の分布を明らかにする.この領域 はハビタブル惑星が形成される領域であるが,円 盤の密度が高いと短い波長の電波では光学的に厚 くなるため観測が困難である.
 - (b)赤方偏移6~12の宇宙で、低温ガスからの一酸 化炭素分子輝線(J=3-2/4-3)を検出し、その分布 を明らかにする、一酸化炭素は、宇宙再電離期に 存在した初期銀河での星の材料をトレースするこ とができる、バンド1受信機は間もなくManufacturing Readiness Reviewを受け、2022年末ま でのアルマ望遠鏡への搭載を目指して量産が進め られる予定である。
- ▶バンド2受信機:67~116 GHzの周波数帯を観測す る受信機であり、欧州南天天文台が開発をリードし 国立天文台が光学系の開発で貢献する.設計を完了 させ最初の6台の受信機を製造する段階までのプロ ジェクトが、アルマ評議会によって近頃承認された. その科学目標は、以下の3点である.
 - (a)宇宙の歴史の中で最も星形成が活発であった赤 方偏移2~4の時代の銀河を観測し、低温ガスか らの一酸化炭素輝線(J=2-1/3-2/4-3)を検出し分 布を明らかにすること、およびより遠方宇宙(赤 方偏移11まで)において、一酸化炭素輝線(J=7-6)と中性炭素輝線を検出しその分布を描き出すこ と、



図3:紫外線から電波の波長域における望遠鏡の空間分解能(解像度).実線は2018年現在で稼働中の望遠鏡,破線は建設中の 望遠鏡を示す.アルマ2計画(ALMA2,破線)は、ミリ波・サブミリ波の波長帯において圧倒的に高い解像度を有する. Credit: 国立天文台

- (b)硫化炭素や一酸化炭素などの2原子分子とその 同位体,重水素化合物,グリコールアルデヒドな どの複雑な有機分子からの電波輝線を検出すること
- (c)原始惑星系円盤において, 2.5~4.5 mmのサイ ズのダスト分布を明らかにすること
- ▶ ACA分光計:韓国天文宇宙科学研究院が国立天文 台との密接な連携のもとに進めるプロジェクトであ り、ACA 12 mアンテナ向けに特化した分光計を開 発することを目指している.現在稼働中のACA相 関器に比べて、信号の線形性、フラックス精度、ダ イナミックレンジ、スペクトル応答の点で優れてお り、ACA 12 mアンテナでの撮像観測能力を強化す ることができる.さらにACA分光計では一般に使 われているGPU技術を応用することで、将来的な 拡張性や拡張のための自由度を確保している.

5. 「アルマ2」計画

2020年代, ALMA Development Roadmap に基づ いてアルマ望遠鏡の機能を圧倒的に向上させながら科 学運用を実行する計画を, 日本では「アルマ2」計画と 呼称する、「アルマ2」では(a) 基線長を現在の16 km から30 km程度まで拡張し、解像度を2倍向上、(b) アンテナに搭載される受信機を改良し、感度を2倍、 同時観測可能な周波数帯域を2倍以上に拡張する。第 2章で紹介した通り、現在のアルマ望遠鏡では地球に 近い惑星誕生現場であるうみへび座TW星の原始惑 星系円盤において、1天文単位スケールの構造を見出 すことに成功した.太陽系近傍における原始惑星系円 盤の分布を考えると、同スケールの構造が見分けられ る天体は5天体程度に限られるが、「アルマ2」で解像 度が2倍に向上することでこれが100倍以上に増加す る.また、受信機の感度を2倍、同時観測可能な周波 数帯域を2倍以上に向上させることで、分子・原子輝 線の検出効率が大きく向上する.これにより、例えば 原始惑星系円盤において多数の複雑な有機分子の輝線 を効率よく検出し、生命の起源につながる可能性のあ る有機分子の分布と起源を明らかにすることができる と期待される. また遠方銀河においても. 酸素をはじ めとする重元素(星内部の核融合によって合成された 元素)の輝線を効率よくとらえることができる。輝線 は赤方偏移、すなわち距離を測定するために重要な手 がかりである. 可視光赤外線の撮像観測によって大ま

かにしか赤方偏移が決定されていない場合は、広い周 波数帯域にわたって観測し輝線を探す必要があるが、 同時観測可能な周波数帯域を拡大することで、効率よ く遠方銀河の観測を実行することが可能になる. 同時 に、ビッグバン後5億年未満しかたっていない初期の 銀河から重元素の輝線をとらえることで、宇宙で最初 に重元素が作られたのはいつかという問いに迫ること ができる.

6.結論

アルマ望遠鏡は、科学観測の開始から数年で革新的 な観測成果を上げ続け、プロジェクト開始時に定めら れた所期の目標を達成しつつある。例えば、原始惑星 系円盤では同心円状の隙間だけでなく三日月型構造や 渦巻き型構造など、多様な構造があることを明らかに しつつある. また. 原始惑星系円盤にメタノールをは じめとするいくつかの有機分子を発見している. アル マ望遠鏡が所期の目標を達成しつつあることを受けて、 新しい科学目標を設定し、その達成を目指してアルマ 望遠鏡の機能を強化させる ALMA Development Roadmapが策定された. 日本では自然科学研究機構 国立天文台が、「アルマ2|計画としてこれを推進する 準備が進められている. 「アルマ2」計画によって、ア ルマ望遠鏡は地球上で最も先進的なミリ波サブミリ波 望遠鏡として、今後も画期的な成果を上げ続けること ができる。特に惑星系形成分野の研究では、1天文単 位の空間解像度で数百の原始惑星系円盤を観測するこ とができることの意義はたいへん大きく、円盤の内側 から外側までの全域で進行する惑星系形成過程を理解 することを目指す. また. 有機分子輝線を単に検出す るだけでなく、円盤内におけるその分布を明らかにす ることで、生命の材料になりうるような複雑な有機分 子が原始惑星系円盤にどのように分布しているのかを 明らかにできると期待される。さらに、円盤内の重水 素存在比の分布を明らかにすることで、水の起源に迫 ることも重要である。太陽系内始原天体での水や有機 分子の探査, 可視光赤外線観測による太陽系外惑星大 気での生命兆候探査と組み合わせることで、「アルマ2」 は地球外生命探査に向けた基本的な知見を与えること を目指す.

参考文献

- [1] ALMA Partnership et al., 2015, ApJL 808, L3.
- [2] Andrews, S. et al., 2016, ApJL 820, L40.
- [3] Tsukagoshi, T. et al., 2016, ApJ 829, L35.
- [4] Andrews, S. et al., 2018, ApJL 869, L41.
- [5] Hashimoto, T. et al., 2018, Nature 557, 392.
- [6] Jørgensen, J. et al., 2012, ApJL 757, L4.
- [7] Martín-Doménech, R. et al., 2017, MNRAS 469, 2230.
- [8] Ligterink, N. F. W. et al., 2017, MNRAS 469, 2219.
- [9] Belloche, A. et al., 2014, Science 345, 1584.
- [10] Walsh, C. et al., 2016, ApJL 823, L10.
- [11] https://www.almaobservatory.org/en/publications/thealma-development-roadmap/

特集「ALMAで迫る惑星科学」 ALMA による原始惑星系円盤の高解像度観測

武藤 恭之'

2019年6月14日受領, 査読を経て2019年7月11日受理.

(要旨) ALMA 望遠鏡は、ミリ波・サブミリ波の波長帯で、これまでにない空間分解能と感度を兼ね備えた 電波干渉計であり、近傍の星形成領域の中の原始惑星系円盤を、最小で数天文単位の空間分解能で観測する ことが可能である. 従来の惑星形成の枠組みの中で、原始惑星系円盤は滑らかで軸対称な構造を持つことが 仮定されてきたが、ALMA 望遠鏡の登場により、円盤には様々な構造が存在することが明らかになってきた. 本稿では、原始惑星系円盤からのダスト連続波放射の観測を中心に、高空間分解能観測でわかってきた原始 惑星系円盤の構造について概観し、今後の課題として、円盤構造の統計・円盤形成初期における構造・デー タ解析手法の三点を提示する.

1. 惑星形成の初期条件としての原始 惑星系円盤

原始惑星系円盤は、生まれたての星の周囲に存在す る、ガスとダスト(シリケイトなどの固体成分)から成 る回転円盤である.この中で、ダストが成長すること により惑星が生まれると考えている.惑星形成は、太 陽系の形成の文脈で、系外惑星の発見以前から研究さ れており、数十年にわたる歴史がある.20世紀終わ りころまでは、我々の太陽系のみが観測可能な惑星系 のサンプルであったので、惑星形成モデルについても、 まずは太陽系と同じような惑星系を作る、ということ を一つの大きな目標としていた.しかし、系外惑星が 発見され、多様な系外惑星系の姿が分かってくると、 惑星形成についても、より一般的にどのような惑星系 ができるのか、という形に問題が変わってくる.

惑星形成の大きな問題の一つとして,その初期条件 がどのような形で与えられるのかが理解されていない, ということがある.すなわち,原始惑星系円盤はどの 程度の質量を持っており,どのような構造を持ってい るのか,という問題である.歴史的には,太陽系の惑

```
1. 工学院大学 教育推進機構
muto@cc. kogakuin. ac. jp
```

星の分布を基にした最小質量円盤モデル(例えば[1]) がよく用いられてきたが、このモデルの下での惑星形 成には、様々な問題点があるということが知られてい る. さらに、多様な系外惑星系が発見されてくると、 我々の太陽系が一般的な惑星系の姿であるかどうかと いうことにも疑問が生じ、さらにその問題は混沌とし てくる.

原始惑星系円盤の姿を理論的に求めるということが 大変に難しい問題であるということを納得するには、 原始惑星系円盤の形成が起こる星形成の過程を考える と良いだろう、星は、星間空間の中でも密度の濃い分 子雲コアと呼ばれる場所で、ガスが自己重力によって 収縮することによって形成される、その際、大部分の 質量は中心の星になり、いわば、重力崩壊の「残りかす| が原始惑星系円盤になる。簡単なオーダー計算として、 星形成が起こる前には、現在の太陽の質量と同程度の 量のガスが、宇宙空間に一様にばらまかれたと考えて みよう、現在、太陽の周囲には1パーセク(~3× 10¹⁸cm) に一つの程度の割合で星が分布している. そ こで、もともと、太陽質量(=2×10³³g)程度のガスが 1立方パーセク程度の空間にばらまかれていたと考え ると、その密度は7×10⁻²³ g/cm³程度になる、これは、 水素原子の数にして、およそ40個/cm³程度に相当す

る¹. 現在の星間空間の水素原子の密度はおよそ1個/ cm³であるから,この見積もりだけでも,星形成以前 に存在していたガスのほとんどが星になっていなけれ ばならないということが分かるだろう.つまり,原始 惑星系円盤の姿を,星形成の過程から完全に理解する ということは,星形成を95%以上の精度で理解しな ければならない,ということになる.もちろん,星形 成過程は長年にわたって研究されてきており,理解が 進んできているという部分はあるが,この精度にまで は至っていないであろう.

原始惑星系円盤撮像装置としての ALMA望遠鏡

原始惑星系円盤の姿を理論的に推定することが難し いということであれば、実際の観測に基づき、生まれ たての星の周囲の構造を理解していく必要がある.そ のための道具として、ALMA望遠鏡は画期的な観測 装置であり、これによって原始惑星系円盤の姿を「写 真」として空間分解してはっきりと捉えることが可能 になった.ALMA望遠鏡は、最大で0.1秒角よりも良 い空間分解能を出せる、ミリ波・サブミリ波(波長で 1 mm 程度かそれ以下)の電波望遠鏡である.まず、 この望遠鏡がなぜ原始惑星系円盤観測に必要かという ことを簡単に述べておこう.

原始惑星系円盤は、中心星に力学的にも熱的にも強 く支配されている系である.力学的には、原始惑星系 円盤の物質(ガスとダスト)にかかる最も大きな力は中 心の星による重力である. 原始惑星系円盤中の物質は. 星の周囲を回転することによる遠心力と星からの重力 とが(ほぼ)釣り合うことで、中心星にすぐに落下せず に存在することができる. すなわち. 原始惑星系円盤 は、中心の星の周囲をほぼケプラー回転している差動 回転円盤系である.また,熱的には、中心星からの輻 射による加熱²と、円盤中のダストの熱放射による冷 却が釣り合った系であり、中心星から遠ざかるほど温 度が下がっていく、円盤の温度は、オーダーとしては、 太陽系の惑星の表面温度と同じ程度であると考えれば よく、中心星から1天文単位³程度離れた場所でおよ そ数100 Kだが、中心星から100天文単位程度離れた 場所では数10 Kとなる.したがって、ウィーンの変 位則により、原始惑星系円盤に存在するダストからの

熱放射は、中間赤外線から電波の領域で主に発せられ るということになるから、観測波長として電波を選ぶ

ことが自然である

次に、原始惑星系円盤の距離と大きさから、円盤の 撮像をするために必要な空間分解能を見積もってみよ う、原始惑星系円盤は、星形成の初期に、およそ100 万年から1000万年程度の時間だけ存在する、そこで、 一般的な星の寿命を100億年とすれば、原始惑星系円 盤を持つような星の割合は、星全体の1/10.000程度だ と見積もれる.したがって、星同士の間の距離をおよ そ1パーセクとすれば、最も近い原始惑星系円盤は数 10パーセクの距離にあるということになる、実際に、 最も地球に近い原始惑星系円盤を持つ星であるうみへ び座TW星(TW Hva)までの距離は、およそ60パー セクであり、原始惑星系円盤を持つ星が多く存在する 星形成領域は、最も近いものでもおよそ140パーセク の距離にある、原始惑星系円盤の大きさについては、 惑星系の典型的な大きさとして、半径100天文単位程 度としてみると、原始惑星系円盤を空間分解するとは、 140パーセクの距離にある、大きさ100天文単位程度 の構造を空間分解するということだと言える. そこで、 望遠鏡に求められる空間分解能を14天文単位として みよう、これは、典型的な星形成領域までの距離(140 パーセク)にある天体を観測することを考えると、お よそ0.1秒角かそれ以下の空間分解能が望遠鏡に要求 されているということになる.

望遠鏡の空間分解能は、波長をλ,望遠鏡の口径を Dとしたとき、およそλ/Dによって与えられるので、 0.1秒角の空間分解能を、波長1 mmの電波で実現す るためには、望遠鏡の口径としておよそ2 kmが要求 されることになる.現実的には、口径数kmの望遠鏡 を作製することはできないので、ALMA望遠鏡では、 最大で10 km程度の距離を離して多数のアンテナを 配置し、それぞれのアンテナからの信号を干渉させる ことによって、実質的に大口径の望遠鏡で観測したの と同じような画像を取得する.

^{*1.} 実際は、分子雲コアの密度はこの見積もりよりも1から2桁程 度大きい.しかし、星どうしの間の距離を2倍変化させれば、 ガス密度の見積もりが1桁程度簡単に変わるくらいの精度の 議論である.

^{*2.} 円盤ガスの中心星への降着によるエネルギー解放も*加熱に 寄与するが、それが支配的となるのは中心星近傍で、かつ円 盤中心面の領域のみである。

^{*3.1}天文単位は太陽・地球間の距離で,1.5×10¹³cmである.

以上より,ALMA望遠鏡は,まさに原始惑星系円 盤の様々な構造をとらえるのに最適な望遠鏡であるこ とが理解できるだろう.実は,惑星が形成される現場 の観測は,ALMA望遠鏡の重要な科学目標の一つと して位置付けられ,「原始惑星系円盤の構造をとらえ ることができるように」設計がされてきたという経緯 がある.

3. ALMA望遠鏡による原始惑星系 円盤の構造の観測

3.1 初期科学運用における非軸対称構造の観測

ALMA 望遠鏡は、2011年から科学運用観測が開始 された、はじめは、アンテナ台数が少なく、アンテナ 群もそこまで広い範囲に拡がって置かれた状態ではな かった、そのため、ALMA 望遠鏡の運用開始当初は、 空間分解能は既存の電波干渉計と同程度であった. そ れでも,既存の電波干渉計に比較して感度が桁で優れ ており、初期観測運用段階においても様々な発見をも たらした。その代表的な例として、いくつかの原始感 星系円盤において、非常に強い非軸対称な放射が見い だされた.図1は、HD 142527という星の周囲の原始 惑星系円盤からのダスト熱放射の空間分布である[2]. 観測の結果、この円盤からのダスト熱放射には強い非 軸対称性があり、ダストが円盤内において非常に偏っ た分布をしていることが示唆された、実際に、この観 測を再現するダスト分布のモデルを検討したところ、 ダスト熱放射が最も明るい場所は、暗い場所に比較し て、ダストの量が70倍程度濃集しているであろう、 という示唆を得られた[3].

3.2 原始惑星系円盤の超高解像度観測の 科学試験観測

ALMA 望遠鏡が,空間分解能という点でその実力 を証明したのは,2014年に行われた長基線観測の科 学試験観測においてである.これは,アンテナを10 km程度まで離した観測で,科学的な議論に耐えうる データを取得可能であることを実証するための観測で ある.原始惑星系円盤観測のターゲットとして,HL Tauという,おうし座の方向にある星形成領域にある 円盤の中でも特に明るく若いものが選ばれた.



図1:HD 142527周囲の原始惑星系円盤からのダスト連続波放射. 「遊・星・人」25巻36ページ掲載の執筆者による記事の図4左パネルの再掲.

観測の結果、図2に示すように、HL Tauの周囲には、 たくさんのリング状の構造が存在することが見出され た[4]. 初期科学運用でも、構造を持った円盤がすで に観測されていたが、HL Tauの観測結果は、年齢が 10万年程度の非常に初期の段階から、原始惑星系円 盤は構造を持っている可能性があるということを示唆 している。例えば、原始惑星系円盤にすでに惑星が存 在していれば、その影響で円盤にリング状の構造が励 起されるという可能性がある. HL Tauの観測結果に ついても、観測された構造が惑星が作るものであると して解釈することが可能であることを、金川らが指摘 した[5]. しかし、このような円盤進化の初期段階で すでに惑星が存在しているのだろうか、という点には 疑問が残る、別の可能性として、原始惑星系円盤の温 度構造を考えると、このようなリング状構造が、様々 な分子が固体で存在する場所と気体で存在する場所の 境界(雪線と呼ばれる)付近に生じる可能性があること が、Zhangら[6]や奥住ら[7]によって議論されている. その場合は、あらゆる原始惑星系円盤で特定の温度領 域にリングが観測されるはずだが、果たしてそのよう になっているのかということは、この観測の段階では 不明であった.

初期科学運用から超高解像度観測の科学試験観測ま での間に,原始惑星系円盤は,従来仮定されてきたよ うな,軸対称で滑らかな,構造の無い円盤ではなく, 多様な姿をしている可能性があるということが見えて



図2:HL Tau周囲の原始惑星系円盤からのダスト連続波放射(左)と、太陽系のスケール(右)の比 較図. ALMA望遠鏡プレスリリース^はより引用. Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO).



図3: ALMA望遠鏡大規模観測プログラムによる様々な原始惑星系円盤からの熱放射画像. ALMA望遠鏡プレスリリース⁵ より引用. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO),S. Andrews et al.; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello.

*4. https://alma-telescope.jp/news/press/mt-2000

*5. https://alma-telescope.jp/news/dsharp-201812

きた.現実的な原始惑星系円盤とはどのような姿をし ているのかという問題が,惑星形成における重大な問 題として認識され,かつ,その疑問に(部分的にでも) 答えることができる装置が使える状態にあるというこ とが実証された.

3.3 様々な原始惑星系円盤の高解像度観測

ALMA 望遠鏡の初期段階の観測では、いくつかの 原始惑星系円盤が複雑な構造を持つことが分かった. 次は、より多数の原始惑星系円盤を観測し、このよう な構造が様々な円盤に普遍的に存在しているのかどう かということが問題になる.この疑問に対する直接的 なアプローチとして、まとまった数の天体の超高解像 度観測がAndrewsらによって、ALMA 望遠鏡の大規 模観測プログラムの一環として行われた[8].これは、 それまであまり構造が無いと考えられてきた、20の 近傍の原始惑星系円盤について、35ミリ秒角(およそ 5天文単位)程度の空間分解能で電波強度分布をとら えたというものである.観測の結果、図3に示すように、 多くの原始惑星系円盤にリング状の構造が存在してい ることが見いだされた.

リング構造の起源については定かではないが,一つ の可能性として、全てのリング構造が原始惑星系円盤 に形成されている惑星の影響による、つまり、リング 構造一つにつき,惑星が一つあると考えると,何が言 えるだろうか. Zhangら[9]は,円盤中に存在する惑 星がどのようなリング構造を作るかを数値計算によっ て調べ,惑星質量や円盤の温度・粘性などの物理量を パラメータとして,リング構造の幅や深さを表す経験 的な関係式を求め,大規模観測の結果に適用した.こ れは,HL Tauにおける金川らの研究[5]の発展版とい うべきものである.

観測によって多数のリング構造が見つかっているの で、モデルと観測を比較することによって、原始惑星 系円盤中に存在する「惑星」の分布がどのようになっ ているか、という議論を展開することができる.その 結果、中心星から5-10天文単位程度以上離れた場所 に存在する5木星質量以上の惑星は全体の6%程度し か存在しないであろうということが示唆された.この ことは、遠方の巨大惑星が直接撮像観測であまり多く 見つかっていないこと[10]と整合的である.さらに、 10天文単位以上離れた場所に存在する海王星質量か ら木星質量程度の惑星が全体の半分程度を占めており、 このような質量範囲の惑星が多く存在していることが 示唆された.この質量・軌道長半径のパラメータ領域 は、現在の系外惑星探査の手法で見つけにくい領域で あり、今後の観測が期待される.

また、この大規模観測プログラム以外にも、様々な



図4: MWC 758周囲の原始惑星系円盤のダスト連続波放射. ALMA望遠鏡プレスリリース⁶より引用のうえ,一部改変. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO),Dong et al..



図5:DM Tau周囲の原始惑星系円盤のダスト連続波放射画像.

*6. https://alma-telescope.jp/news/mwc758-201806

原始惑星系円盤の高解像度観測が行われている. その 中で,筆者の関わったものの中から,興味深い構造を 示す二天体を紹介する.

第一は、Dongらによる、MWC 758という、3.5太 陽質量程度の比較的重い星の周囲の原始惑星系円盤の 観測である[11]. 図4には、この円盤からのダスト連 続波の放射を示す. 観測の結果、楕円状のリング構造 をした原始惑星系円盤が見いだされた. その構造を詳 しく調べると、リングは完全な円ではなく、楕円状を していることがわかり、中心星の位置はその楕円の焦 点の位置に対応していることが分かった. さらに、塵 が集まって放射が明るく見えていると考えられる場所 が二か所、円盤中に存在している. この天体は、近赤 外線による撮像観測でも渦巻き状の構造があることが 知られており、これまでのどの観測よりも複雑な構造 をしており、非常に力学的に活発であることが示唆さ れる.

第二は、工藤らによる、DM Tauという太陽質量の

半分程度の星の観測である. DM Tauからの放射の. 可視光から電波に渡るスペクトルエネルギー分布 (SED)の解析から、この天体の円盤は、中心星から半 径数天文単位程度の範囲にはダストが存在せず、中心 星付近が穴のように見えることが予想されていた. し かし、ALMA以前の電波望遠鏡による観測では、穴 構造は見つかっていたものの、その半径は20天文単 位であり、予想された構造との食い違いが問題となっ ていた. ALMA望遠鏡による観測で、図5に示すよ うに、実はこの円盤は、半径3天文単位程度の穴構造と、 半径20天文単位のリング状構造が両方とも存在する。 二重リング構造になっているということが見いだされ た. ALMA以前の望遠鏡では、内側の半径3天文単 位の円盤を空間分解することはできず、その存在がそ もそも画像としてとらえられていなかったのである. 半径3天文単位と半径20天文単位に、それぞれリング 状の構造があるというのは、太陽からおよそ3天文単 位の位置に小惑星帯があり、およそ20天文単位の位 置に天王星があるという. 我々の太陽系の姿を想起さ せるものでもある.太陽系と系外惑星をつなぐという 観点からも、「太陽系に似た構造を持つ原始惑星系円 盤|としてのDM Tau周囲の原始惑星系円盤の存在は 重要である.

4. 円盤の詳細構造観測の展望

4.1 原始惑星系円盤構造の統計的性質

原始惑星系円盤の高解像度観測は現在も進行中であ るが、現在までに、数十程度の原始惑星系円盤につい て、空間分解能が0.1秒角を切るような高解像度観測 がなされていると見られる.これらの観測は、全体と しては明るい・大きいなどの条件を満たす、観測しや すい天体から順番になされている傾向がある.より一 般的な円盤がどのような構造を持っているかというこ とに答えるためには、もう少し高解像度観測のサンプ ルを増やしていく必要があるだろう.

低解像度の観測であれば、かなりの数の原始惑星系 円盤がすでに観測されている.ALMA望遠鏡は、そ れまでの電波望遠鏡に比較して感度が非常に高く、空 間分解能が0.3から0.4秒角程度であれば、1分程度の 観測時間で、ダストからの熱放射を容易に受けること ができる.この空間分解能は、典型的な星形成領域の 距離(140パーセク)で、40天文単位から50天文単位の 大きさに対応する.したがって、少し大きめの原始惑 星系円盤であれば、数個のビームで空間的に分解する 観測が可能である.このALMA望遠鏡の特徴を生かし、 多少空間分解能を犠牲にして、星形成領域にある数十 から数百の原始惑星系円盤を一気に観測するというこ とが行われている.このような研究は、Ansdellらに よるおおかみ座分子雲の観測[12]を皮切りに、様々な 星形成領域で行われた.

特に、Ciezaらによるへびつかい座分子雲のサーベ イ[13]は、総天体数にして297を数える観測で、様々 な進化段階の円盤を含んでいる。そのうち、比較的若 い天体を多く含む147天体に関する結果によると、10 地球質量程度以上のダスト成分を持つ原始惑星系円盤 は全体の1/3程度しかなく、また、半径30天文単位よ りも大きな円盤は全体の15%程度しかなかった。そ の後、観測天体全ての統計がWilliamsらによって報 告された[14]が、やはりダストの量が総じて少ないと いう結論は変わっていない。すなわち、大多数の原始 惑星系円盤は小さくて軽く、また、ガス惑星のコアを 作るのに十分な質量の物質が残っていない可能性があ る.現在観測されている、様々な構造を持った「立派な」 原始惑星系円盤は、実は全体として見れば少数派であ るのかもしれない.また、出来上がる惑星系としては、 コンパクトな岩石惑星の系が多いかもしれない、とい うことも想像される.ただし、この結果はダスト連続 波観測をもとにしたものであることには注意しなけれ ばならない.実際に観測しているのはダストからの熱 放射であり、その明るさの情報には、ダストの温度・ 放射率・(面)密度が縮退している.この縮退を解くた めには、複数の波長の観測を行うことで円盤の「色」 を調べるなどの追加観測を行っていく必要がある.

高解像度の観測についても、今後、このようなサー ベイ的な観測を通じ、構造による円盤の分類を行って いく必要があるだろう. リング構造の幅と深さ、非軸 対称構造の大きさや強さなど、原始惑星系円盤の構造 を観測的に特徴づけるパラメータには様々なものがあ る、多数の円盤でそれらの構造を特徴づけるパラメー タを求めることができれば、それらが円盤の温度・密 度などの物理パラメータとどのように関係しているか を明らかにしていくことができるだろう. さらに、そ の関係を円盤における物理的・化学的過程に関する理 論から導かれる予測と比較していけば、円盤で何が起 こっているかの理解を深めていくことができるだろう. 仮に、ギャップ構造が観測された多数の原始惑星系円 盤のデータをもとに、冷たい円盤でギャップが深いと いう傾向が見いだされたとする.一方で,原始惑星系 円盤の中の惑星が作るギャップ構造のモデルからは、 円盤の温度が低いほど、同じ質量の惑星でも作るギャ ップが深いということが導かれる.この理論的な関係 と、観測された円盤温度・ギャップ深さの関係が同じ ような傾向を持っているのかどうかということを検討 することが、「何割くらいの円盤で惑星形成が起こる のか」という問題に対するアプローチの一つの方向性 になりうるだろう.

ここで、原始惑星系円盤の高解像度観測を行う動機 の一つとして、この観測が原始惑星系円盤における力 学的な過程に直接迫る手段となりうる、ということを 強調しておきたい、原始惑星系円盤における力学過程 の時間スケールとしてケプラー回転の時間を取り、ま た、力学的な過程の結果として生じるケプラー回転か ら外れた運動速度の典型的な値として音速程度の速度 を仮定すると、構造の典型的な空間スケールは、円盤 半径の1/10程度以下の大きさであると見積もられる⁷. この構造を空間分解して観測したいと思うと、例えば、 中心星から100天文単位離れた場所での力学過程に迫 るためには、10天文単位程度の構造を空間分解する 必要が生じる.これは、距離140パーセクにある原始 惑星系円盤の観測では、0.1秒角を切る構造になるので、 ALMA 望遠鏡の高解像度観測が必須である.

また、観測がいくら進んだとしても、それを解釈す るような理論の整備がされていないと、観測の解釈が できなくなってしまう. すなわち. 原始惑星系円盤に 構造を生み出す物理的。 あるいは化学的な過程を理論 的に調べていくことも必要である。現状では、原始惑 星系円盤と惑星の間の重力相互作用に関する研究は盛 んに行われており、先述した Zhang らの研究以前から、 惑星質量と円盤構造(特にギャップ構造)のパラメータ を定量的に結び付けようという試みがなされてきた. また、非軸対称構造についても、円盤に局所的に存在 する渦構造を記述する解析解が知られており[15]. そ れを流体不安定性の結果として生じる渦構造と比較す るような試みも、小野らによって行われている[16]. 理論の立場としては、円盤で生じうる様々な物理過程 を調べ、観測可能量に関する予測を立てていくことが 今後ますます重要になってくるだろう.

4.2 円盤形成初期段階における円盤構造と 早い惑星形成

先述の通り,原始惑星系円盤のサーベイ観測により,小さくて軽い円盤が多いということが分かってきた. この理由は定かではないが,一つの可能性は,もとも と実は原始惑星系円盤はそれほどの質量を持って生ま れたものではなく,惑星の材料とするダストもあまり 多くないということである.しかし,これとは全く逆 の可能性もある.すなわち,原始惑星系円盤進化の比 較的早い段階ですでにダストの成長,あるいは惑星の 形成が起こってしまっており,ミリ波放射をよく出す ような,大きさ1 mm程度のダストの量がすでに減っ てしまっている,という可能性である.

後者の可能性は、初期に惑星の存在しない原始惑星 系円盤の存在を仮定する伝統的な惑星形成の枠組みで は考えられてこなかったことであるが、この可能性を 示唆する別の観測もある、図6は、Sheehanらによる、

^{*7.} これは、円盤の厚みと同程度の長さスケールである.



図6:WL 17周囲の原始惑星系円盤のダスト連続波放射. Sheehanらによる発見論文[17]の図1を転載.放射強度のコ ントアは、1σ = 36 μJyとして、4σから2σおきに描かれ ている.観測ビームの大きさ(左下の楕円)は、0.06秒角× 0.05秒角である.(C) AAS. Reproduced with permission.

WL 17という,年齢50万年以下と考えられる若い星の周囲の円盤からのダスト連続波放射の観測である [17].この円盤には、半径13天文単位程度の小さなリング構造が見出された.先述したHL Tauも、同程度かそれ以上に若い星であると考えられてある.つまり、すでに構造を持った若い原始惑星系円盤が、複数見つかってきているのである.

このような観測を理解していくためには、原始惑星 系円盤の形成過程を、星形成の段階から理解していく 必要がある.分子雲の収縮から原始惑星系円盤の形成・ 進化までの全てのプロセスを、一つの数値シミュレー ションで全て追うことは困難であり、何らかのモデル を介した理解が必要になってくる.その一例として、 高橋らは、分子雲コアの収縮による星と原始惑星系円 盤の形成、およびその後の原始惑星系円盤の進化につ いて、ダストの運動まで含めて全ての段階を計算する 一次元モデルを作った[18].そして、分子雲の初期条 件やダストの大きさなどで形成される原始惑星系円盤 の姿がどのように影響を受けるかを解析したところ、 ダストがある程度成長していれば、進化の初期段階で あっても原始惑星系円盤はリング状の構造を持ちうる ことを指摘した.

これまでの原始惑星系円盤の観測では,原始惑星系 円盤の形成初期の段階にある星はあまり観測されてこ なかった.しかし,数天体ではあるが,構造を持った 若い原始惑星系円盤が観測されてきたことで,「惑星 形成の初期条件」は何かという問題の重要度が増して きているように感じられる.今後,ALMAでより多 くの観測がなされてくることを期待したい.

4.3 高解像度画像を得るためのデータ解析手法

本稿の最後に、高解像度観測を目指すためのデータ 解析に関して、少しだけコメントをしておこう. ALMA望遠鏡などの電波干渉計は、空間的に距離を 離して置かれた多数のアンテナから得られた信号を干 渉させることにより、高空間分解能を達成している。 これは、非常に大雑把に言えば、大口径の望遠鏡のほ とんどの部分を隠して小さな覗き穴を多数あけ、それ ぞれの覗き穴から得られる情報を組み合わせて全体の 画像を復元する、ということである. つまり、電波干 渉計で得られたデータは、大口径の望遠鏡で得られた データに比較して情報が本質的に不足している. その 部分を何らかの方法で補って初めて画像を得ることが できる.より具体的には、電波干渉計で最初に得られ るデータは、天球面上における電波強度の空間分布の フーリエ成分の(ごく)一部である. したがって. 観測 データから電波強度の空間分布画像を復元するために は、まず、不足しているフーリエ成分を何らかの方法 で推定したうえで、フーリエ空間(干渉計を用いた観 測ではuv空間と呼ばれる)から実空間にフーリエ逆変 換をすることが必要になる.

不足したデータの推定には、ほとんどの場合 「CLEAN」と呼ばれる手法が用いられる.これは、天 球面上の電波強度分布を点源の集合と考え、観測され た空間的なフーリエ成分が合うようにその点源分布を 決めていく方法である.この方法は、電波天文学にお いては十分に確立された手法であるが、点源の存在す る場所を解析者が指定するなどの恣意性もあり、画像 復元の手法として最適であるかどうかは分からない. 実際、最大エントロピー法などの統計的手法も有力で あり、CLEAN法よりも高い解像度の画像を低いノイ ズレベルで実現できるという報告もある[19].

また,原始惑星系円盤の構造は比較的単純であるの で,観測で得られているフーリエ空間のデータを直接 解析するという手法も用いられる.一般に,特徴的な 長さスケールを持つ画像をフーリエ変換すると,その 長さスケールに対応するフーリエ成分に特徴的な構造 が現れる、そこで、観測データとして得られるフーリ エ成分を直接解析し,特徴的な構造を見つけることが できれば、フーリエ逆変換に伴う不定性を伴わない形 で空間構造を議論することができる. こうすることで. 取得されたデータをより有効に使うことができ、実空 間での画像から得られるよりもより多くの情報を引き 出すことができることがある、実際に、こうした解析 により、動径方向に10から30天文単位程度のスケー ルの構造を持った円盤が多数あることは、原始惑星系 円盤の高解像度サーベイ観測が行われるよりも前に予 想はされていた[20]. しかし、フーリエ成分は直観的 にわかりにくく、ある程度事前に構造を予想しておか ないと、このような解析を行うことができない、理論 的に予測される様々な構造が、フーリエ空間でどのよ うな情報として現れるのかという基礎的な研究が進展 していけば、今後、より多くの情報を観測から引き出 すことができるようになると期待している.

5. まとめ

本稿では、ALMAによる原始惑星系円盤の高解像 度観測を概観し、今後の展望を議論した。ALMA望 遠鏡は、原始惑星系円盤に様々な構造が存在すること をこれまでに明らかにしており、「軸対称で滑らかな 円盤」という従来の惑星形成における円盤の描像は崩 れてきているというべきであろう。現在、高解像度観 測の科学試験観測からはおよそ5年が経過しており、 最初の成果が揃ってきている段階である。今後は、こ れまでの様々な発見に立脚し、原始惑星系円盤の構造 に関する統計を深めていく段階になるだろう。その上 で、観測に基づいた原始惑星系円盤の描像を確立して いくことが求められている。特に、原始惑星系円盤形 成の初期段階での円盤の構造については、惑星形成の 初期条件や時間スケールを制限するという観点から、 今後、一層の観測が求められてくるだろう。

また、構造からどのような情報を引き出すかについ て、理論的な研究や解析手法の研究を深めていくこと も重要である. ALMA 望遠鏡により、原始惑星系円 盤の力学過程を直接観測できる段階に達している. そ こで、理論的な研究としては、様々な物理過程がどの ように観測量として反映されるかということを、デー タ解析に使いやすい形でモデルを作っていくことが求 められている.また、データ解析技術そのものについ てもまだ進展の余地がある.ALMA望遠鏡の運用は、 高解像度観測まで含めて、安定期に入ってきている. アンテナ間隔が現在の10倍になったり、アンテナ台 数が二倍以上に増えるといったような、望遠鏡のハー ドウェアそのものの劇的な変化はしばらくは生じない であろう.そこで、より多くの情報を観測から引き出 すためのデータ解析技術の開発も今後重要になってく る課題であると言える.

本稿では、紙面の都合から、原始惑星系円盤からの ダスト連続波放射の観測を主として取り上げた.しか し、ALMA望遠鏡は、これ以外の観測も行うことが できる.例えば、円盤に存在する分子ガスの輝線観測 から、原始惑星系円盤におけるガスの量や運動状態を 推定することができる他、感度を生かして様々な希少 な分子種の発見をしていくことができる.また、電波 の偏光観測も行うことができ,そこからダストの大き さの情報や円盤における磁場の情報を得ることもでき る.特に、原始惑星系円盤の電波領域での偏光観測に ついては、片岡らがダスト散乱による偏光という新し いメカニズムを提案[21]して以来発展してきたとい う経緯がある.今後も、ALMA望遠鏡によって原始 惑星系円盤の様々な姿が明らかにされることを期待し たい.

謝 辞

本稿の執筆の声掛けをしていただいた,『遊・星・人』 ゲストエディターの秋山永治氏に感謝をいたします. 本稿で取り上げた成果のうち,執筆者の関係するもの については,多数の共同研究者の方の寄与が大きいも のです.以下に,主な共同研究者の氏名を記し,謝意 を表します.HD 142527の初期観測とモデル:深川美 里氏(国立天文台)・百瀬宗武氏(茨城大学)・花輪知幸 氏(千葉大学)・塚越崇氏(国立天文台)・スンカンロウ 氏(茨城大学).原始惑星系円盤と惑星の重力相互作用 のHL Tauへの適用:金川和弘氏(東京大学),田中秀 和氏(東北大学).MWC 758の高解像度観測: Ruobing Dong氏(ビクトリア大学).DM Tauの高解 像度観測:工藤智幸氏(国立天文台)・橋本淳氏(アス トロバイオロジーセンター)・小西美穂子氏(大分大学). ロスビー波不安定性により励起される渦構造の解析: 小野智弘氏(プリンストン大学).円盤形成期における 構造のモデル:高橋実道氏(国立天文台).原始惑星系 円盤の散乱偏光:片岡章雅氏(国立天文台)・百瀬宗武 氏(茨城大学).執筆者は,科学研究費補助金 (19K03932・18H05441・17H01103・15H02074)および, 国立天文台ALMA共同科学研究事業(2016-02A)によ る補助を受けています.

参考文献

- Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, 1100.
- [2] Fukagawa, M. et al., 2013, Pub. Astron. Soc. Japan 65, 6.
- [3] Muto, T. et al., 2015, Pub. Astron. Soc. Japan 67, 122.
- [4] ALMA Partnership, 2015, Astrophys. J. Let. 808, L3.
- [5] Kanagawa, K. D. et al., 2015, Astrophys. J. Let. 806, L15.
- [6] Zhang, K. et al., 2015, Astrophys. J. Let. 806, L7.
- [7] Okuzumi, S. et al., 2016, Astrophys. J. Let. 821, 82.
- [8] Andrews, S. M. et al., 2018, Astrophys. J. Let. 869, L41.
- [9] Zhang, S. et al., 2018, Astrophys. J. Let. 869, L47.
- [10] Bowler, B. P. and Nielsen, E. L., 2018, in Handbook of Exoplanets, 1.
- [11] Dong, R. et al., 2018, Astrophys. J. 860, 124.
- [12] Ansdell, M. et al., 2018, Astrophys. J. 828, 46.
- [13] Cieza, L. A. et al., 2019, Mon. Not. Roy Astro. Soc 482, 698.
- [14] Williams, J. P. et al., 2019, Astrophys. J. Let. 875, L9.
- [15] Kida, S., 1981, J. Phys. Soc. Japan 50, 3517.
- [16] Ono, T. et al., 2018, Astrophys. J. 864, 70.
- [17] Sheehan, P. D. and Eisner, J. A., 2017, Astrophys. J. Let. 840, L12.
- [18] Takahashi, S. Z. and Muto, T., 2018, Astrophys. J. 865, 102.
- [19] Pérez, S. et al., 2019, arXiv:1902.05143.
- [20] Zhang, K. et al., 2016, Astrophys. J. Let. 818, L16.
- [21] Kataoka, A. et al., 2015, Astrophys. J. 809, 78.

特集「ALMAで迫る惑星科学」 惑星形成領域からの様々なガス輝線のALMA観測

野村 英子

2019年6月16日受領, 査読を経て2019年7月22日受理.

(**要旨**) ALMA による惑星形成領域の高解像度・高感度観測は、ダスト放射のみならず、ガス輝線観測にも 劇的な進展をもたらした.惑星形成領域における分子の空間分布が明らかになり、また、これまで検出が困 難であった分子種の発見が相次いている.本稿では、原始星天体中の円盤の撮像観測や新たな分子種の発見、 原始惑星系円盤における有機分子と同位体分子の新たな検出、また、円盤中の水とスノーライン、および炭 素・酸素元素組成比分布にもとづく系外惑星大気との関連、残骸円盤におけるガスの検出に関するこれまで の研究成果の一部をレビューし、今後の原始惑星系円盤から太陽系や系外惑星系への物質進化に対する ALMA 観測の展望と期待を述べる.

1. はじめに

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)による原始惑星系円盤からの分子輝線の高 解像度・高感度観測により,円盤内の分子の分布が明 らかになり,また一方で,これまで円盤では検出され ていなかった分子や希少同位体分子も続々と発見され ている.原始惑星系円盤からは,ALMA以前の電波 望遠鏡や光赤外線望遠鏡などで約15種類の分子が観 測されていた.その後,スピッツァー宇宙望遠鏡やハ ーシェル宇宙天文台による中間・遠赤外線観測により, さらに新たな分子種が5種類ほど発見された.ALMA 以降,現在に至るまでに,新たな分子種が6種類,新 たな希少同位体分子が4種類ほど発見されている.

このような観測をもとに、原始惑星系円盤から太陽系 天体あるいは系外惑星大気にいたる物質進化に関する 議論がされ始めている。特に、観測より得られる水と 有機分子の空間分布およびそのスノーラインの位置に 関する情報は、惑星系における生命起源の研究につな がる一方で、ダスト合体成長から岩石惑星・ガス惑星 形成にいたる惑星形成過程を理解する上でも重要であ る.本稿では、ALMAにより急速に進展した、有機 分子およびスノーラインの観測に特に重点を置き、原 始星天体から原始惑星系円盤、残骸円盤にいたる、諸 進化段階における円盤からの様々なガス輝線観測の一 部をレビューする.

2. 原始星天体からの分子輝線観測

分子雲コアの重力収縮により星が形成される際に星 の周囲に円盤が形成されると考えられている. ALMAによる高解像度・高感度観測は,原始星天体 をとりまくガスとダストの塊(エンベロープ)に埋もれ た円盤の存在を明らかにした.ガス遷移線の放射波長 のドップラーシフトによるずれを測定することで,天 体内の速度構造の情報を得ることができる.ALMA により原始星天体から放射される様々な分子輝線の速 度構造を調べることで,エンベロープから円盤へのガ ス降着,エンベロープと円盤の境界の温度が~50 K 以上の暖かな領域,および円盤内の回転運動が明らか になった.それぞれの領域の物理状態に応じて豊富に 存在する分子種が異なるので,様々な分子輝線の速度 構造を調べることで,原始星天体内の構造が明確に示



図1:原始星天体中の様々な分子輝線の速度構造のALMA観測.重力収縮するエンベロープと回転円盤,その境界面をトレースして いる.[2]

されたのである(図1) [1,2]. また, 原始星天体の中で も特に明るいFU Ori型バースト天体では, 温度が 100 K程度の高温になった円盤から複雑な有機分子が 多数検出された. 原始星天体に円盤が付随することは これまでの赤外線観測などでも示唆されていたが, エ ンベロープ中のダストを見通すことができるミリ波の 波長帯において高解像度観測を行うことで, 円盤の撮 像観測が初めて可能となったのである.

また、ALMAによる高感度観測により、原始星天 体から様々な複雑な有機分子が新たに検出されている. 星間空間において複雑な有機分子は、星が生成される 直前の分子雲コアなど、温度が10 K~数10 K程度の 低温高密度領域において主にダスト表面反応により生 成されると考えられている. 分子雲コア中で星が生成 されると周囲のダストが暖められ、ダスト表面の分子 が気相に蒸発し、ガス輝線として観測できるようにな る.これまでは、明るい大質量星形成領域で複雑な有 機分子探査が主に行われてきたが. ALMA による高 感度観測は、より暗い、太陽型原始星天体での複雑な 有機分子探査を可能にした. すなわち, やがて惑星に もたらされうる複雑な有機分子の探査が可能になった のである。例えば、地球上では微生物によっても生成 されるクロロメタン(CH₃Cl),核酸のアデニンの前駆 体でもあるグリコロニトリル(HOCH₂CN)やZ-シア ノメチルアミン(HNCHCN)などが、ALMAにより原 始星天体で初検出されている. また、NaClやKClと いった塩が星形成領域で初検出された. 二炭糖である グリコールアルデヒド(HOCH₂CHO)や尿素のもとに もなるシアナミド(NH₂CN)は、これまで大質量星形

成領域では検出されていたが,太陽型原始星天体では ALMAで初検出された.特に,原始星天体IRAS 16293-2422では分子輝線のサーベイ観測が行われ, 分子が続々と新たに検出されている[3].

3. 原始惑星系円盤中の有機分子

原始星天体が進化すると、周囲のエンベロープが散 逸してエンベロープからの降着がなくなり、中心星は 前主系列星と呼ばれる天体となる。本稿では、この前 主系列星周囲の円盤を原始惑星系円盤と呼ぶ。原始星 は進化と共に暗くなり、周囲のダストが暖められる領 域が小さくなる.これに伴い、ダスト表面から蒸発し て、ガス輝線として観測される複雑な有機分子の輝線 強度が弱くなる。従って、原始惑星系円盤は惑星系へ
 の進化がより進んだ段階である一方で、有機分子輝線 の検出は、原始星天体に比べて難しい、しかし原始惑 星系円盤からも、地上光赤外線/電波望遠鏡やスピッ ツァー宇宙望遠鏡などを用いて有機分子が検出されて きた. ALMA以前の観測では, 主に構成原子数が4 以下の比較的小さい分子しか検出されていなかったが. ALMAの初期運用開始直後にIRAMミリ波望遠鏡に よるHC₃Nの検出が報告された.その後、ALMAに よりc-C₃H₂が検出され、さらに構成原子数6のシアン 化メチル(CH₃CN)やメタノール(CH₃OH)といった、 いわゆる『複雑な有機分子』が円盤から初検出された (図2) [4,5]. さらに最近では、ギ酸(HCOOH)やチオ ホルムアルデヒド(H2CS)も検出されている.

原始惑星系円盤で検出された複雑な有機分子は,



図2:原始惑星系円盤中のメタノールのALMA観測.円盤半径30-60 auの領域から輝線が放射されている. [5]

CH₃CN, CH₃OHともに円盤外縁部(半径30-100 au, au:天文単位)に存在していた.HC₃NやCH₃CNは, その後,複数の天体から検出されている.また,太陽 型前主系列星であるTW Hya円盤からはCH₃CNの輝 線が7本検出されており,温度や分子柱密度に強い制 限を与えている.これらの輝線は励起エネルギーが高 く,円盤中の30-50 K以上の比較的暖かな領域をトレ ースしていると考えられている.

CH₃OHに関しては低励起エネルギーの輝線が検出 されており,20K程度の低温領域をトレースしてい ると考えられる.前述のように,星間空間において複 雑な有機分子は、ダスト表面反応により生成されると 考えられているが、円盤外縁の低温領域では、ダスト 表面の分子は熱的には気相に脱離しないため、非熱的 過程により脱離したと考えられる.実際、原始惑星系 円盤中の有機分子生成のモデル計算では、ダスト表面 で複雑な有機分子が生成された後、中心星からの紫外 線や星間空間からの宇宙線起源、反応熱などで分子が 非熱的に気相に脱離することが示されている[6].

CH₃OHが検出されたTW Hya円盤では、ハーシェ ル宇宙天文台により最も低励起の水分子輝線が検出さ れており、こちらもダスト表面から水分子が非熱的に 気相に脱離したものと解釈されている. 観測された CH₃OHと水分子の存在量比は0.7-5%程度であり、太 陽系内の彗星中の分子の存在量比とよい一致を示した. これは、原始太陽系円盤において、今回観測された水 分子やCH₃OHを脱離したダスト表面の氷と同様のも のが、彗星に取り込まれた可能性を示唆する. ただし、 ダスト表面から非熱的に脱離した分子の組成比は、必 ずしも元の氷の組成比を反映しているとは限らないの で、注意が必要である. 最近のロゼッタ彗星探査機による67P/チュリモコ フ・ゲラシメンコ彗星の観測は、ALMA観測と相補 的に原始惑星系円盤内の有機分子生成過程を検証した. ロゼッタ探査機搭載の質量分析計を用いたその場観測 により、多数の複雑な有機分子が彗星から検出された. これまでにALMAで観測された複雑な有機分子は、 10-20 K程度の低温環境下においてダスト表面で水素 付加反応により生成されたと推察される.一方で、ロ ゼッタ探査機で検出された分子とモデル計算を比較す ると、一部の分子は存在量比がよく一致しており、こ れらはより暖かな30-50 K程度の環境下のダスト表面 でラジカル同士の反応により生成された分子と考えら れる. 今後もALMA等による原始惑星系円盤の分子 輝線観測と円盤モデル計算、太陽系内天体の観測を比



図3:原始惑星系円盤からのDCO⁺輝線のALMAによる撮像観測 [7] Credit:K. Oberg, CfA; ALMA (NRAO/ESO/NAOJ); B. Saxton (NRAO/AUJ/NSF)



図4:原始惑星系円盤5天体におけるHCN/HC¹⁵N vs. DCN/HCN のALMA観測[9]

較することで、太陽系内物質起源の研究が進展すると 期待される.

4. 原始惑星系円盤中の同位体分子

ALMAによる高解像度・高感度観測により、円盤 中の希少同位体分子が新たに検出されている. ALMA以前にも¹³C, ¹⁸O, ¹⁷O, 重水素(D)などを含む希 少同位体分子は検出されてきたが、ALMA はこれら の希少同位体分子の撮像観測を可能にした(図3)[7]. ALMA以前もDCN, DCO⁺の重水素分子は観測され ていたが、その解像度は悪く、主に円盤外縁の10-20K程度の低温領域をトレースしていた。一方 ALMAによる高解像度観測は、低温領域のみならず、 円盤内縁の30 Kを超えるような比較的暖かな領域に おいても重水素分子が豊富に存在することを明らかに した、これまでの重水素分子の生成過程としては、低 温環境下においてH2D⁺を介して進む反応が主に考え られてきたが、このALMA観測により、暖かな領域 においてもCH4D⁺など別の分子を介した反応により、 重水素分子が豊富になりうることが明らかになった [8].

またALMAにより、新たに¹³C¹⁸O, HC¹⁵N, C¹⁵N, N₂D⁺などの希少同位体分子が円盤から検出された.



図5:N₂H^{*}輝線によるCOスノーラインのALMA観測. 青丸がス ノーラインの位置を表す.[12] Credit:ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)

円盤中に¹⁵Nを含む分子を検出したのは、ALMAが初 めてである. ALMAによるHCNの同位体の観測結 果は、重水素と¹⁵Nの濃集を示した(図4) [9]. 太陽系 内の彗星でも重水素や¹⁵Nが濃集しており、隕石や惑 星間塵中の有機化合物では特に、重水素、¹³C、¹⁵Nの 同位体比が非常に高い値を示すことが知られている. 今後、様々な円盤、様々な分子に対して¹³Cも含めた 同位体比を測定することで、円盤内のどのような分子 がどのような過程を経て太陽系内天体中の有機分子の 起源となったのかを探る研究が進展すると期待される.

5. 原始惑星系円盤中の水とスノー ライン

原始惑星系円盤からの水分子輝線の観測は,地上望 遠鏡の近中間赤外線観測や赤外線宇宙望遠鏡を用いて 行われてきた.特に,スピッツァー宇宙望遠鏡やハー シェル宇宙天文台では,中間・遠赤外線にて水分子輝 線が多数の原始惑星系円盤から検出された.また,赤 外線天文衛星あかりやすばる望遠鏡により,近赤外線 にて水の吸収線も検出されている.ミリ波・サブミリ 波においてもこれまで重水素を含む水分子の観測が試 みられてきたが,検出には至らなかった.ALMAでは, 円盤からの高励起の水分子線の仮検出や輝線強度の上 限値の報告がされている[10,11]. ALMAのような地 上観測では,天体からの水の遷移線は地球大気中の水 に吸収されるため,H₂Oの低励起線の観測は不可能で あるが,H₂Oの高励起線やHDO,H₂¹⁸Oといった希少 同位体分子は観測可能である.

ALMAの初期成果の1つに、原始惑星系円盤中の 一酸化炭素(CO)のスノーラインの観測がある.極性 の低いCOは、極性の高い水分子に比べて昇華温度が 低い. すなわち、COの昇華領域(スノーライン)の位 置は、水分子に比べて円盤外側に現れる、太陽型前主 系列星であるTW Hya周囲の円盤で、N₂H⁺分子を用 いて半径約30 auの位置にCOスノーラインの存在が 報告された. COはN2に比べプロトン親和力が高いた め、COが気相に存在するとN₂H⁺と反応してHCO⁺を 生成する.よって、COがダストに凍結する領域で、 N₂H⁺の存在量が高くなることが分子雲コアの観測な どにより知られている.本観測ではこの性質を原始惑 星系円盤に応用し、高感度・高解像度のALMAにより、 COスノーラインの撮像観測に成功したのである(図 5) [12]. その後に観測された光学的に薄い¹³C¹⁸O 輝線 もまた、同様の位置にスノーラインを検出している. またDCO⁺輝線の観測により、COスノーラインの検 出を試みた例もある。DCO⁺はCOを材料として生成 され、かつ低温領域でより豊富に存在することから, COスノーライン付近で存在量が多くなると考えられ る. 実際, 高解像度のALMAにより, DCO⁺がリン グ状に分布する様子が撮像観測されている.

水分子のスノーラインに関しても、中心星の光度が 高く、スノーラインの位置がより大きな半径に現れる 原始星天体では、HCO⁺やCH₃OHを用いた間接的な 水分子のスノーラインの撮像観測がALMAで試みら れた.COに比べて水分子はプロトン親和力が高いた め、水分子が気相に蒸発すると、HCO⁺が反応して H₃O⁺を生成する.従って水分子のスノーラインの内 側でHCO⁺の存在量が減少するのである.また、 CH₃OHの昇華温度は水分子の昇華温度に近いため、 CH₃OHの空間分布の観測より、水分子の分布が予想 される.

一方で、太陽型前主系列星周りの原始惑星系円盤内 の水分子のスノーラインは、半径約数au付近の位置 に現れると考えられ、ALMAでも撮像観測は難しい. そこで、高励起の水分子輝線を用い、ケプラー回転に



図6: β PicからのCOガスの観測 [16] Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) and NASA's Goddard Space Flight Center/F. Reddy

よるドップラーシフトを利用したスペクトロ・アスト ロメトリーの手法により,撮像観測ではなく,分光的 に水分子のスノーラインの位置を検出する観測が試み られている[10,11,13]. これまでスピッツァー宇宙望 遠鏡やハーシェル宇宙天文台で観測されてきた水輝線 は,円盤の外縁の表層部をトレースするものであった. 高感度のALMAにより初めて,円盤赤道面付近のス ノーラインをトレースする水輝線の検出に迫ろうとし ている.

6. 原始惑星系円盤中のC/O組成比分布

スピッツァー宇宙望遠鏡により円盤からH₂O, OH, HCN, C₂H₂, CO₂といった分子が検出された一方で, 系外惑星大気中にも同様の分子種が検出されるように なった.これらの観測より,円盤と系外惑星大気の元
素組成の関連について、特にC/O比の観点から議論 が行われるようになった.

惑星形成論によると、巨大ガス惑星は水分子のスノ ーラインの外側で形成される. 系外惑星系で発見され た短周期巨大ガス惑星は、惑星形成後、軌道進化した 結果、恒星近くを公転するようになったと考えられて いる.このシナリオの観測的検証法の1つとして、円 盤ガスと系外惑星大気のC/O比を比較する方法が提 案されている.円盤内のダスト表面の氷の主成分は水 分子(H₂O)であり、円盤内ガスのC/O比は、水のスノ ーラインの内外で変化すると考えられる. スノーライ ンの内側では水が蒸発してガス中の酸素量が増加し. 逆に外側ではガス中の酸素量が減少するのである.こ のような変化は、水だけではなく、二酸化炭素(CO₂) など他の分子のスノーラインの内外でも起こる. すな わち、様々なスノーラインの内外でC/O比が変化し ていくと考えられる、よって、ガス惑星大気の元素組 成が形成時の円盤ガスの元素組成を反映すると考える と、惑星大気中のC/O比を指標として、惑星が円盤 内のどの場所で形成されたかに関する情報が得られる [14, 15].

現在,ALMAによる様々な分子輝線の高感度・高 解像度観測を用いて,円盤内のC/O比分布を調べる プログラムが実施されている.将来,次世代光赤外線 望遠鏡により系外惑星大気のC/O比の観測が進めば, ALMA観測で得られた円盤内のC/O比分布と比較す ることにより,惑星形成とその後の軌道進化のシナリ オ,特に短周期ガス惑星形成過程を検証することがで きると期待される.

7. 残骸(デブリ)円盤中のガス

残骸円盤は主系列星に付随する円盤であり,前主系 列星に付随する原始惑星系円盤内のガスとダストが散 逸した後,小天体の衝突などにより2次的に生成され たダストで主に構成されていると考えられている. ALMA以前には,残骸円盤からのガスの観測はごく 限られた天体のみであった.しかし,ALMAによる 高感度観測により,残骸円盤中にわずかに存在するガ スの検出が可能となった.β Pic周囲の残骸円盤中に 検出されたCOは非軸対称な分布をしており,円盤内 の彗星や氷小惑星同士の衝突により生じた可能性が示 唆されている(図6) [16]. 一方で49 Ceti周囲の残骸円 盤のように,ガスが軸対称に存在している円盤もあり, 原始惑星系円盤内の始原的ガスがまだ散逸しきれずに 残っている可能性も,特に若い天体では示唆されてい る[17].

また,いくつかの天体では,COに比べて中性炭素 の量が多いことがALMAやASTE観測で明らかにな った.これは,原始惑星系円盤とは異なり,ダストが 光学的に薄い残 骸円盤中では,中心星からの紫外線 が円盤内に浸透し,COが光解離するためである.また, このような残骸円盤中のCOと中性炭素の存在量比に は,水素分子がどのくらい存在しているかが影響する と考えられている[18].

残骸円盤中のガスは,円盤中の天体の進化を考える 上でも重要である.今後様々な残骸円盤に対してガス 観測が統計的に行われることにより,原始惑星系円盤 ガス散逸や残骸円盤中の天体衝突などに関する理解が 進展すると期待される.

8. おわりに

ALMAによる惑星形成領域の高解像度・高感度観 測は、ダスト放射のみならず、ガス輝線観測にも劇的 な進展をもたらした.本稿で紹介した研究は. ALMAのこれまでの成果のごく一部にすぎない. 今 後も新たな発想にもとづく研究が続々と現れるであろ う. 最近のダスト連続波の超高解像度ALMA観測に より、円盤内にリング・ギャップ構造が普遍的に存在 することが明らかになってきている。一方で、これま で分子輝線で観測されたリングやギャップ構造は、比 較的解像度の低いものであった、今後、分子輝線の超 高解像度観測により、ダスト連続波のリング・ギャッ プ構造に対応する化学的効果で現れる分子輝線の空間 構造が見えてくるだろう.また一方で,これまでは個々 の天体の観測が多かったが、今後は統計的観測の重要 性も大きくなると思われる. 円盤からの分子輝線の超 高解像度観測や統計的観測に基づき、原始惑星系円盤 から太陽系,系外惑星系内への物質進化に関する我々 の理解が大きく進展すると期待される.

謝 辞

本稿を丁寧に査読していただいた古家健次氏に心よ り感謝します.また、本稿のために図を作成していた だいた大屋瑤子氏とCatherine Walsh氏に深く感謝し ます.筆者は、JSPS科学研究費新学術領域研究 (18H05441)、基盤研究(C)(19K03910)およびALMA 共同科学研究事業2018-10Bからの補助を受けていま す.

参考文献

- [1] Sakai, N. et al., 2014, Nature 507, 78.
- [2] Oya, Y. et al., 2016, ApJ 824, 88.
- [3] Jørgensen, J. K. et al., 2016, A&A 595, A117.
- [4] Oberg, K. I. et al., 2015, Nature 520, 198.
- [5] Walsh, C. et al., 2016, ApJL 823, L10.
- [6] Walsh, C. et al., 2014, A&A 563, A33.
- [7] Oberg, K. I. et al., 2015, ApJ 810, 112.
- [8] Aikawa, Y. et al., 2018, ApJ 855, 119.
- [9] Guzman, V. V. et al., 2017, ApJ 836, 30.
- [10] Carr, J. S. et al., 2018, RNAAS 2, 169.
- [11] Notsu, S. et al., 2019, ApJ 875, 96.
- [12] Qi, C. et al., 2013, Science 341, 630.
- [13] 野津翔太, 2018, 遊星人 27, 120.
- [14] Oberg, K. I. et al., 2011, ApJL 743, 16.
- [15] Mordasini, C. et al., 2016, ApJ 832, 41.
- [16] Dent, W. R. F. et al., 2014, Science 343, 1490.
- [17] Hughes, A. M. et al., 2017, ApJ 839, 86.
- [18] Higuchi, A. E. et al., 2017, ApJL 839, L14.

特集「ALMAで迫る惑星科学」 アルマ望遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に 見出した惑星形成の種

(要旨) 惑星系の形成過程を知る上では、その母体となる原始惑星系円盤の構造と進化を調べることが重要 である.近年のアルマ望遠鏡を用いた高分解能・高感度観測により、これまでの我々の理解を打ち破る、複 雑な円盤の内部構造が明らかにされており、惑星系形成を探る上で革新的な成果を生みつつある.我々の研 究グループでも、最も近傍の原始惑星系円盤を保有する若い恒星うみへび座TW星について、アルマ望遠鏡 を用いた高分解能観測を推進してきている.本記事では、その最新の研究成果Tsukagoshi et al. 2019, ApJ, 878, L8 について紹介する.

1. 研究の背景

本記事では、若い恒星を取り巻く原始惑星系円盤と、 形成中の惑星を取り巻く周惑星円盤の二種類の円盤に ついて取り上げる.両者の混同を避けるため、周惑星 円盤については周惑星円盤と明記することとし、原始 惑星系円盤については、原始惑星系円盤、もしくは円 盤と省略して記載する.

1.1 惑星系形成と原始惑星系円盤

太陽系のような惑星系は、若い恒星を取り巻く原始 惑星系円盤で生まれると考えられている.原始惑星系 円盤内で形成中の惑星を観測的に見出すことは、惑星 系の形成過程を調べる上で極めて重要である.近年の アルマ望遠鏡(以降アルマ)による高解像度観測では、 原始惑星系円盤の穴構造やギャップ構造、スパイラル・ アーム構造など、複雑な内部構造が普遍的に存在する 様子が明らかにされつつある[例えばアルマ・ラージ プロジェクトの一つであるDSHARP; 2]. このような 内部構造の要因は現在も活発な議論が続いているが、 惑星系の形成過程に起因した円盤の構造変化だと考え られている.

理論計算によると、原始惑星系円盤内で形成されつ つある惑星は、その周囲に周惑星円盤を形成すると考 えられており、その周惑星円盤を通して物質が惑星に 取り込まれることで、惑星は成長していく[3]. 周惑 星円盤は、形成中の惑星の間接的証左として着目され ている構造であり、アルマのようなミリ波・サブミリ 波長帯の観測においても,検出可能性のある構造であ ると考えられている[4]. しかしながら、これまでの アルマによるミリ波・サブミリ波観測では、周惑星円 盤で期待されるような、小スケールの非軸対称性は見 出されていない[5]. いくつかの原始惑星系円盤にお いて、数10から数100 au相当の比較的大きい非軸対 称放射は見つかっているものの、このような大きい(サ ブ)ミリ波放射の偏りは周惑星円盤と考えるには大き すぎる構造であり、円盤内に発生したガス渦により塵 が局所的に堆積した結果を見ていると解釈されている [例えば6].

1.2 うみへび座TW星

原始惑星系円盤の構造を調べるためには,適切な観 測天体を選定する必要がある.本研究で観測したうみ へび座TW星(TW Hya)は,0.8太陽質量程度の重さ をもつ若い恒星で,年齢はおよそ1000万年程度である. 地球からの距離はおよそ60 pc であり[7],地球から最

^{1.} 国立天文台科学研究部

takashi.tsukagoshi@nao.ac.jp

も近い位置にある原始惑星系円盤である。円盤の回転 軸は視線方向に対しおよそ7度で視線方向とほぼ平行 であり、円盤構造を真上から眺めることが可能なため、 円盤構造を詳しく調べるのに適した天体である。

惑星系形成過程の観測研究において,TW Hyaの原 始惑星系円盤は重要なサンプルと考えられており,こ れまで多くの観測研究が波長を問わず行われてきてい る.近年では特に,大型の望遠鏡を用いた高解像度の 電波・赤外線観測が多数行われてきており,円盤内に おける複数のギャップ構造や穴構造といった,複雑な 内部構造の解像に大きな貢献をしている[例えば8-10].

1.3 先行研究と残されていた課題

我々の研究グループでも, TW Hyaの原始惑星系円 盤に対し、アルマを用いた高解像度観測を推進してき た. Tsukagoshi et al. (2016)[11]では、およそ3 auと いう高い空間分解能で、バンド4(波長2.1 mm)およ び6(波長1.3 mm)の2波長における連続波放射のデー タを取得しており、両データを組み合わせたマップ作 成(Multi-frequency synthesis method: MFS)を行う ことで、高解像度ミリ波画像だけでなく、スペクトル 指数 α の高解像度画像も作成している。観測で得られ たミリ波画像では、円盤内の半径25,41 auの位置に、 二つの明瞭なギャップ構造を描き出しており¹,円盤 内側では半径5 au程度の穴構造も見出された. これ らは同時期に行われたバンド7の高解像度の観測[8] でも、同様に示された構造である。一方、 α の分布を 見ると、こちらも軸対称分布をしており、円盤外側か ら内側にかけて α の値が減少する傾向が見られた. ま た、ミリ波画像で見られた25 auの位置にあるギャッ プに対応する形で、局所的にαが増加する様子が見ら れた

この α の増加は、ダスト吸収係数 κ_{ν} のスペクトル 指数 β において、およそ β ~1.5に対応している.こ の値は、星間空間のダストに対して見積もられた値と ほぼ同等であり、ギャップ内における、ある程度成長 した(~mm程度)ダストの欠乏を示唆している.こ のような特徴的なダストサイズ分布となるには様々な 要因が考えられるが、例えば惑星形成起因の理論的解 釈と対応が良い[12]. もし惑星によって作られたギャ ップだとすると、ギャップ形状と理論計算[13, 14]と の比較から、およそ数海王星質量の惑星がギャップを 作り出していると期待される.

これまで見出されていた構造は、ギャップや穴のような内部構造も含めて、軸対称な円盤構造であった。 一方、形成中の惑星が存在していた場合、周惑星円盤 のような局所的な構造が付随すると考えられるが、そ のような小規模な軸対称構造は見つかっておらず、更 なる観測的な検証を必要としていた。

2. アルマによる高解像度・高感度観測

そこで我々の研究グループでは,TW Hyaを取り巻 く原始惑星系円盤に対し,更に高感度・高解像度を目 指したアルマによる観測を行なった.今回の観測はバ ンド6(波長1.3 mm)のミリ波で行なっており,ダス ト円盤からの熱放射を効率良く捉える事を目的とし, 連続波に特化した観測設定を用いている. 観測は 2017年の5月と11月にそれぞれ異なるアンテナ配列 で行われており,最大基線長はおよそ8.6 kmを達成 している.特に長基線配列での観測では,約200分と いう非常に長時間の積分を行っており,高空間分解能 に相当するデータで高い感度を実現している.

データ解析にはアルマの解析ソフトウェアパッケー ジCASAを用いた. CLEANアルゴリズムを用いた画 像作成を行っており,得られた観測画像を用いたセル フ・キャリブレーション²も併用することで高い感度 を実現している. 画像の空間分解能は46.88×41.56秒 角であり,これはTW Hyaの距離に換算すると2.79 × 2.48 auに相当する.最終的な画像のノイズレベル は9.1 μ Jy beam⁻¹を達成しており,先行研究に比べて およそ3倍という非常に高い点源応答感度を達成して いる.

Tsukagoshi et al. [11]内ではそれぞれ22, 37 auとなっている. これは当時見積もられていたTW Hyaの距離54 pcを想定した 値となっている. TW Hyaまでの距離は,近年のガイア衛星 を用いた観測[7]により更新され59.5 pcとなっており,それに 伴いギャップの半径も更新した.

^{2.} 自身の輝度分布を構造モデルとして、そこから予想されるビジビリティ分布と観測ビジビリティを比較することで、位相や振幅の誤差を取り除く手法. 誤った放射をモデルとしないよう、反復的に行うことで徐々に誤差を減らしていく.構造モデルとなる放射が単純(例えば点源)かつ十分な信号雑音比がある場合に有効な手法となる.



図1: 取得されたTW Hyaの原始惑星系円盤のバンド6(波長1.3 mm)連続波画像. 図中左下の白い楕円は観測分解能を示 す. (a)円盤の全景. (b)超過放射近傍, a内の点線で示した0".4 × 0".4範囲内の拡大図. 超過放射を見やすくする ためカラースケールを変更している. (図はTsukagoshi et al. (2019)[1]より改変して引用)

3. 観測結果:円盤内に局所的なミリ 波放射の超過を検出

図1(a)に示した観測結果の通り,先行研究で見出 されていた,ギャップ構造や穴構造をより鮮明に捉え ることに成功した.円盤全体の積分強度は560.9±0.4 mJyであり,過去の観測と同程度である.非常に高感 度となる画像の作成に成功したが,25 auのギャップ 位置において,Tsukagoshi et al. (2016) [11]で予想さ れていた惑星の存在を示唆するような特徴的な構造は, 残念ながら見られなかった.

しかしながら、図1(a)を見ると、中心星から南西 側の半径およそ52 auのあたり、円盤の端に近い箇所 で局所的なミリ波放射の超過を見出すことができる. 図1(b)は超過放射の周囲を拡大したものであり、こ の成分が数au程度の広がりしか持たないことが見て 取れるこの超過放射は信号雑音比で32ほどあり、背 景となっている円盤成分の強度に比べても1.5倍ほど 明るい.背景となっている原始惑星系円盤の放射に比 べての有意性は、図2で示した動径・方位角輝度プロ ファイルも参照されたい.超過放射の強度は原始惑星 系円盤に比べ、信号雑音比でおよそ11-12程度であり、 本観測より3倍程度感度の悪い過去の観測では検出の 難しい構造である。原始惑星系円盤のミリ波放射分布 において、このような極めて小さい内部構造を見出し たのは初めてのことである. 超過放射のある半径には その他の同様の放射は見られず, またギャップのよう な構造も存在していないことを注記しておく.

超過放射の検証のため、バンド7(波長0.8 mm)の アーカイブデータを用いてイメージを作成したところ、 ノイズが大きいもののほぼ同じ位置に超過放射が見ら れた.このアーカイブデータにおける高解像度データ は、2015年に取得されたものであり、本研究で行わ れた観測のおよそ二年前に相当する[8].TW Hyaで 見積もられている固有運動は大きく、二年間でおよそ 136 mas yr⁻¹が期待されるが、両データにおいて超過 放射の位置にそこまでの差異は見られなかった.つま り、アーカイブデータと本研究の両方で超過成分が見 出されたことは、この超過放射が背景天体ではなく、 TW Hyaの円盤内に存在する放射であることを示して いる.

超過放射をより浮かび上がらせるため、円盤放射の 軸対称成分を差し引いたものを図3に示す.着目して いた超過放射は明らかな非軸対称成分であり、背景に 対して12σで検出されていることがわかる.抽出さ れた超過放射に対して、二次元ガウシアンを用いたビ ジビリティフィッティングを行ったところ、超過放射 の大きさは(4.4±0.2)×(1.0±0.2) auほどであること がわかった.これは、超過放射のある半径でのダスト 円盤のスケールハイトと同程度か、やや小さい構造と



図2: 円盤の傾き角を補正した後の動径・方位角方向の輝度プロファイル.各図右上の囲い内にある線は観測分解能を示 す.(a) 超過放射を通る動径方向輝度プロファイル(実線;方位角236°-238°)と,超過放射近傍の平均プロファイル (点線;方位角222°-236°および238°-252°を平均).左下のパネルは,超過放射のある52 au付近を拡大し,縦軸を 線形スケールにしたもの.(b) 半径45,52,59 auにおける方位角方向輝度プロファイル.(図はTsukagoshi et al. (2019) [1]より改変して引用)



図3:軸対称成分を差し引いた後のバンド6(波長1.3 mm)連続波放射の残差放射画像.軸対称成分はビジビリティで差し 引いた後,図1と同様のパラメータで作図している.図中左下の白い楕円は観測分解能を示す.(a)残差画像の全 景.(b)超過放射近傍の拡大図.等高線は3σレベル毎に引いてある.(c)摘出した超過放射成分に対するガウシア ンフィットの結果.等高線は最適解のガウシアン関数を示し,bと同じレベルで引いてある.カラーは抽出した超 過放射成分から最適解のガウシアン関数を差し引いた残差を示す.(図はTsukagoshi et al.(2019)[1]より改変して 引用)

なる[15]. 積分強度は250±5 μ Jyであり,放射が光 学的に薄いとし、ダスト温度 T_{dust} =18 K [10],ダスト オパシティ κ_v =2.3 cm² g⁻¹[15]を仮定すると、超過放 射のダスト質量はおよそ(2.83±0.06)×10⁻²地球質量 と見積もることができる. 最後に,上述の超過放射以外のミリ波放射の非軸対 称性についても言及しておきたい.TW Hyaのミリ波 放射は全体的に軸対称分布であるが.円盤の内側に近 づくにつれ,方位角方向2πで一周期となる強度変動 を示す傾向を見ることができる(図2b).変動強度は 半径45 auでおよそ1%程度と微弱であり,過去の観 測の感度では検出の難しい変動成分である. TW Hya の円盤では過去の可視光観測において,円盤表面輝度 の方位角方向の変化が報告されており,それは円盤内 側の構造変化が引き起こす円盤表面に生じる影による ものと考えられている[16].今回の観測で見つかった ミリ波放射の方位角方向の揺らぎは,可視光で見られ た揺らぎと同様の変動周期を示しており、このような 円盤表面の影の構造と関連しているかもしれない.本 研究では超スケールの超過放射に焦点を当てており, この方位角方向の揺らぎに関してはここではこれ以上 議論しない.

4. 超過放射の起源は何か?

超過放射の起源については,現在のデータではまだ 切り分けが難しい.大きく分けて以下の二つの可能性 が挙げられるが,どちらも惑星系形成に繋がる重要な 構造であると考えられる.

一つの可能性として挙げられるのは、原始惑星系円 盤に生じた小規模なガス渦に、ダスト粒子が補足され ている、という解釈である.このような解釈は、比較 的大きいスケールの円盤非軸対称性の説明としてしば しば参照されている[17].ガス渦ができると圧力勾配 力が働くため、ある程度の大きさに成長したダスト(~ mm)には流体抗力が働き、ガス渦の中心にダストが 集積していく.理論計算によると、安定したガス渦の 形状は、アスペクト比一桁程度の楕円状になることが 予想されている[18].ダストはガス渦の中心に集積す る傾向を持つが、集積するダスト分布のアスペクト比 は、ガス渦の形状と似た分布になると期待される[19]. 今回見出された超過放射の形状は、アスペクト比でお よそ4程度であり、上述の様な理論予想とは整合的で ある.

もしガス渦に捉えられたダスト粒子だった場合,円 盤ダストの柱密度が局所的に2倍程度となっているこ とを示唆している.円盤全体のガスダスト比100を仮 定すると,この超過放射の領域では,ガスダスト比 50程度となっていることを示唆している.このよう な比較的弱いダスト集積は,比較的弱いガス渦でも達 成可能だろう.

ガス渦説に対する問題は、今回の観測で超過放射が

ただ一つしか見つかっていないことである. 円盤が乱 流状態にあれば,上述のような弱いガス渦が多数存在 すると期待される. 同じ軌道長半径に存在するガス渦 は,いずれ大きな一つの渦となると期待されるが[18, 20],異なる軌道上に複数の渦が存在しうるだろう. 小さいガス渦が観測可能な水準で長時間存在しうるか どうかもよく分かっていない. 観測的には,今回見出 された超過放射が,複数の小さいガス渦におけるダス ト集積の「氷山の一角」を見ている可能性もある.本 当に複数の小さいダスト集積が存在しているかどうか, より感度の良い観測を行い調査する必要がある.

超過放射が一つしか見つかっていないことを説明し うるもう一つの解釈としては、形成中の惑星を取り巻 く周惑星円盤である、形成中の惑星が存在すると、母 体の原始惑星系円盤からガスとダストを降着し、局所 的に密度と温度が上昇するとともに、惑星の周囲に周 惑星円盤を形成する[3].検出された超過放射は、こ のような周惑星円盤か残存エンベロープのような構造 を捉えているのかもしれない。

超過放射が周惑星円盤起源だとした場合,そのサイ ズから惑星質量を推測することができる.超過放射に 対して見積もった短軸サイズの半値(~0.5 au)を周惑 星円盤の半径だと仮定し,周惑星円盤の半径として典 型的にヒル半径の1/3程度とする[21].ヒル半径は,

$$r_{\rm H} = r_{\rm p} \left(\frac{M_{\rm pl}}{3M_*}\right)^{1/3} \tag{1}$$

で記述され,r_Hはヒル半径,r_pは惑星の軌道長半径, M*は中心星質量,M_{pl}が推測したい惑星質量である. 適切に値を代入すると,見積もられる惑星質量は海王 星質量程度となる.

海王星質量という比較的軽い惑星質量は、いくつか の観測結果と整合的である.TW Hyaの円盤では、 3.8 µm(L'バンド)の観測で惑星質量の上限値が得ら れており、52 auの半径において、少なくとも1~2木 星質量の惑星は存在しないことが示唆されている.逆 に言えば、海王星質量程度の惑星はまだ棄却されてい ない、ということになる.また、我々の観測結果では 52 auの半径においてギャップ構造が見られておらず、 これも軽い惑星の存在を示唆している.海王星質量で あれば中心星質量との比はおよそ10⁵ほどとなり、理 論計算に従うと[22]、ガス分布にもダスト分布にも大 きなギャップを作ることが難しいことが予想される. 粘性の小さい円盤($\alpha \leq 10^{-4}$)であれば海王星質量程度 の惑星でもギャップを開けうるが[23], TW Hyaの円 盤の粘性に対しては, 十分な観測的上限値は得られて いない[$\alpha \leq 7 \times 10^{-3}$; 24].

しかしながら、周惑星円盤とするシナリオでは、観 測で得られたミリ波のフラックス密度を全て説明する ことが難しい、という問題がある.シンプルな周惑星 円盤の粘性円盤モデルに従うと[4],海王星質量の惑 星を取り巻く周惑星円盤で期待されるフラックス密度 は、最大でもおよそ100 µJy程度である.観測で得ら れたフラックス密度は倍以上の差異があるため、例え ば、惑星と周惑星円盤を取りまくエンベロープのよう な構造も考える必要があるのかもしれない.

5. 研究の発展

本研究では、原始惑星系円盤のミリ波放射の中に、 数auスケール程度の小さな構造を見出すことに成功 している。一方でこの超過放射の要因、とりわけ中心 に形成中の惑星が存在するかどうかについては、ミリ 波観測だけでは判断が難しい。そのため、異なる方法 で予想される惑星の存在を検証する必要がある。

形成中の惑星が存在する場合,最も顕著な特徴とし ては,惑星近傍において物質が高温(> 1000 K)とな ることである.本研究での分解能では,超過放射自体 を空間分解しきれておらず,冷たいダスト放射を全体 的に捉えるのみとなっている.アルマでより高い分解 能での観測を行うことができれば,中心部に高温とな ったダストが存在するかどうか検証が可能となるだろ う.もしくは,高解像度の赤外線観測により直接高温 のダストを捉えることでも,同様の検証が可能となる.

惑星の兆候を捉えるもう一つの方法は,惑星への質量降着に起因した電離水素ガスの放射を見つけることである.よく用いられるのは,バルマー系列の $n = 3 \rightarrow 2$ となる輝線(H α 輝線)で,高感度の可視光観測を行うことで,海王星質量の惑星の検証が可能となるだろう.

謝 辞

けて実行されました(課題番号:17K14244,17H01103, 18H05441,19K03932).この研究では、アルマ観測デ ータADS/JAO.ALMA#2017.1.00520.S,2016.1.00842.S, 2015.1.00308.S,2015.1.00686.S,2016.1.00229.S, 2016.1.00311.S,2016.1.00440.S,2016.1.00464.S, 2016.1.00629.S,2016.1.01495.Sを使用しています.デ ータ解析の一部には、国立天文台天文データセンター の共同利用データ解析システムを使用しています.

参考文献

- [1] Tsukagoshi, T. et al., 2019, ApJ 878, L8.
- [2] Andrews, S. M. et al., 2018, ApJ 869, L41.
- [3] Canup, R. M. and Ward, W. R., 2002, AJ 124, 3404.
- [4] Zhu, Z. et al., 2016, ApJ 832, 193.
- [5] Isella, A. et al., 2014, ApJ 788, 129.
- [6] van der Marel, N. et al., 2013, Science 340, 1199.
- [7] Gaia Collaboration et al., 2016, A&A 595, A2.
- [8] Andrews, S. M. et al., 2016, ApJ 820, L40.
- [9] van Boekel, R. et al., 2017, ApJ 837, 132.
- [10] Huang, J. et al., 2018, ApJ 852, 122.
- [11] Tsukagoshi, T. et al., 2016, ApJ 829, L35.
- [12] Zhu, Z. et al., 2012, ApJ 755, 6.
- [13] Kanagawa, K. D. et al., 2015, ApJ 806, L15.
- [14] Kanagawa, K. D. et al., 2016, PAS 68, 43.
- [15] Andrews, S. M. et al., 2012, ApJ 744, 162.
- [16] Debes, J. H. et al., 2017, ApJ 835, 205.
- [17] Raettig, N. et al., 2015, ApJ 804, 35.
- [18] Richard, S. et al., 2013, A&A 559, A30.
- [19] Lyra, W. and Lin, M.-K., 2013, ApJ 775, 17.
- [20] Ono, T. et al., 2018, ApJ 864, 70.
- [21] Quillen, A. C. and Trilling, D. E., 1998, ApJ 508, 707.
- [22] Dipierro, G. and Laibe, G., 2017, MNRAS 469, 1932.
- [23] Dong, R. et al., 2017, ApJ 843, 127.
- [24] Flaherty, K. M. et al., 2018, ApJ 856, 117.

212

本稿で紹介した研究は科学研究費補助金の補助を受

原始惑星系円盤の電波観測入門(1): 惑星系の母胎を探る

百瀬 宗武'

2019年6月20日受領, 査読を経て2019年7月28日受理.

(要旨)「原始惑星系円盤」は,星間物質と完成された惑星系とを繋ぐ天体構造であり,天文観測により惑星 系形成過程を探る際の研究対象である.本稿は,原始惑星系円盤の電波観測と関連する基本的事項を整理し た上で,「惑星系の母胎としての側面」から原始惑星系円盤を調べた研究例を示しながら,どのような情報 が観測結果から得られているかを解説する.

1. 原始惑星系円盤とは

主系列星より前の進化段階にある若い星々(Young stellar objects = YSOs)に付随している星周円盤を, 原始惑星系円盤と呼ぶ.これらは,標準的な太陽系起 源論で仮定された惑星形成の初期状態(原始太陽系星 雲)と類似しており,宇宙に遍く存在する系外惑星の 母胎に違いないと信じられている.

すばる望遠鏡に搭載された新型コロナグラフHi-CIAOや大型電波望遠鏡ALMAの登場により,近年, 飛躍的に詳しい原始惑星系円盤の画像が得られるよう になった[1,2].しかし,「見えた」からといって直ち に対象の「理解」が得られるわけではない.天文観測 では,ある結果を再現する状況が一つとは限らないた め,尚更である.観測結果から示唆される可能性を漏 れなく洗い出し,多角的な診断を行うことが,より深 い理解を得る方策になる.

そこで本稿では、電波観測との関連に絞り、円盤画 像を「診る」ために必要となる背景知識を、実際の結 果と照合させながら紹介する.全体の構成は以下の通 りである. §2では円盤の基本的な構造について、太 陽系起源論を踏まえながら紹介する. §3,4では円盤 物質の放射機構にも焦点をあて、一般の星間物質の基 本的性質を交えながら関連する観測例を議論する.§ 3ではガス成分を、§4では固体微粒子(ダスト)成分を、 それぞれ取り上げる. §4までは円盤を空間的に十分 分解した観測を想定して議論を進めるが、最後の§5 では、空間的な解像度が不十分な場合の解析手法を概 説する. 多数の円盤を統計的に扱うサーベイ研究では、 ここで述べる解析手法が依然として重要である.

本稿は、2016年9月に実施した惑星科学フロンティ アセミナーでの講演内容を、それ以降の研究進捗も反 映させて再構成したまとめの前編にあたる。若手読者 への便宜に加え、星間物質での常識が円盤環境下では 当てはまらないことが多い事情も踏まえ、可能な限り 基本に遡って解説する。フロンティアセミナーで議論 した内容のうち、原始惑星系円盤の形成やその初期進 化に関連する話題は、星形成過程の基礎も含め、別に 用意する後編で解説する。

2. 円盤構造の基礎

古典的な太陽系起源論では,惑星形成の初期条件と して軸対称の原始太陽系星雲の存在を仮定した.その 代表例である林モデル[3]は,現在の視点からみると 古い内容も含まれるシナリオではあるが,一方で観測 がターゲットとする原始惑星系円盤の構造が手際良く 提示されている面もあり,依然として学ぶべき「生き た古典」と言える.そこで§2では,林モデルを題材 に原始太陽系星雲の特徴を整理し,実際の観測結果の

^{1.} 茨城大学·理工学研究科(理学野)

munetake.momose.dr@vc.ibaraki.ac.jp

解釈においてもこれらが有用な概念であることを確認 する.

2.1 古典的太陽系起源論(林モデル)

原始太陽系星雲は,現在の太陽系の姿から遡る形で 構築された(復元円盤モデル).その基本骨格は,現在 の太陽系天体に含まれる固体成分を砕き,その質量を 動径方向に滑らかに分布させた構造である.この際, 水(H₂O)については,その昇華線半径(スノーライン) より外側でのみ固相として加える.この骨格に,ガス・ ダスト質量比(g/d)を近傍の星間物質の値(≈100)と 一致させるようにガスを付加する.以下では,上記の 筋道で構築された原始太陽系星雲の円盤構造を特徴付 ける諸量を紹介する.なお,これ以降出てくる座標 (r, z)は,太陽を原点とする円筒座標系の2成分を表す.

(1)動径構造

円盤内の温度分布を、光度 L_{\star} の光源周囲にある黒体の輻射平衡温度で与える、具体的には、 σ_{SB} をステファン・ボルツマン定数として、

$$T(r) = \left(\frac{L_{\star}}{16\pi\sigma_{\rm SB}r^2}\right)^{1/4}$$
$$= 280 \left(\frac{L_{\star}}{L_{\odot}}\right)^{1/4} \left(\frac{r}{1\,\rm{au}}\right)^{-1/2} \rm{K}$$
(1)

とおく. すると, スノーラインの位置 r_{snow}は, H₂Oの 昇華温度 T_{snow}の標準値を170 Kとして,

$$r_{\rm snow} = 2.7 \left(\frac{T_{\rm snow}}{170\,{\rm K}}\right)^{-2} \left(\frac{L_{\star}}{L_{\odot}}\right)^{-1/2} {\rm au} \tag{2}$$

と与えられる. 林モデルでは, 原始太陽の光度 $L_{\star} = 1L_{o}$ として, T(r), r_{snow} を与えていた.

一方の物質分布は、円盤の内径(r_{in})と外径(r_{out})の 間で、z軸に沿って積分した柱密度として与える(図1). 基本的に、固体(Σ_d)とガス(Σ_g)いずれの柱密度も $r^{-3/2}$ に比例する形で与えるが、 Σ_d には r_{snow} がH₂O氷 の有無の境界である点を反映した段差がつけられてい る.林モデルでは当時の太陽系に関する知見を反映し、 $r_{in} = 0.35$ au, $r_{out} = 36$ auにとられていたが、この範 囲で Σ_g を積分して得られる円盤質量は0.013 M_0 であ る. これは、現在の太陽系を形作る最小限の質量を含 むモデルという意味で、「最小質量円盤モデル」とも 呼ばれる.



図1: 原始太陽系星雲で仮定された柱密度分布[3].

(2)ガスの平衡形状

温度分布と物質分布が決まると、それを踏まえたガ スの力学平衡形状が決まる。円柱座標での運動方程式 は、圧力b、密度ρ、回転角速度をΩとして、

$$r\Omega^2 = \frac{GM_{\odot}}{r^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r},$$
 (3)

$$0 = \frac{GM_{\odot}}{r^3}z + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$$
(4)

となる. さらに状態方程式として理想気体モデルを採 用すると, μを平均分子量, c_sを等温音速として,

$$p = \frac{k_{\rm B}T}{\mu m_{\rm H}} \rho \equiv c_{\rm s}^2 \rho, \tag{5}$$

$$c_{\rm s} = 1.0 \times 10^5 \left(\frac{\mu}{2.3}\right)^{-1/2} \left(\frac{T}{280\,{\rm K}}\right)^{1/2} \,\,{\rm cm\,s^{-1}} \eqno(6)$$

が成り立つ.すると、ガスの回転則や密度分布が導出 される.まず回転則は、式(3).(5)から.

$$\Omega = \Omega_{\rm K} (1 - \delta), \tag{7}$$

$$\vec{\uparrow}_{-} \vec{\uparrow}_{-}^{s} \, \bigcup_{,} \quad \Omega_{\rm K} = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r^{3}}}; \; \delta = -\frac{1}{2} \left(\frac{c_{\rm s}}{r\Omega_{\rm K}}\right)^{2} \frac{\partial \ln p}{\partial \ln r}$$

である. 林モデルでは $\frac{\partial h}{\partial r} < 0$ であるため $\delta > 0$, つまり, 圧力勾配の影響でガスはケプラー角速度 Ω_{K} よりわずかに遅く回転する. 例えばr = 1 auでは, 式(6)

も参考に $\delta \sim 10^{-3}$ であると確かめられる.一方,式(4), (5)から導かれるガス密度分布 $\rho_g(r, z)$ は,

$$\rho_{\rm g}(r,z) = \frac{\Sigma_{\rm g}(r)}{\sqrt{2\pi H^2}} \exp\left(-\frac{z^2}{2H^2}\right), \eqno(8)$$

$$\begin{split} H(r) &\equiv \frac{c_{\rm s}}{\Omega_{\rm K}} \\ &\approx 0.034 \left(\frac{M_{\star}}{M_{\odot}}\right)^{-1/2} \left(\frac{T}{280\,{\rm K}}\right)^{1/2} \left(\frac{r}{1\,{\rm au}}\right)^{3/2} {\rm au}. \end{split} \tag{9}$$

H(r)はpressure scale heightと呼ばれ、半径rでのガ ス円盤の膨らみ具合を表す。林モデルのように $T \propto r^{-1/2}$ の場合、式(9)から円盤のアスペクト比 $H/r \propto r^{1/4}$ となり、rに関する増加関数になる。このよ うな形状は、しばしば「フレア」と呼ばれる。

2.2 ダストの振る舞い

京都モデルでは上の初期条件から微惑星を介した惑 星形成を議論したが、円盤構造の観点からもダストは ガスとは異なる進化をたどると考えるのが自然である。 その理由は、ダストはガスに比べて密度が著しく高い ため、圧力勾配で生じる力の作用がほぼ無視できるた めである。ガス成分の力学平衡に圧力勾配が寄与して いる状況においては、圧力勾配が作用しないダストは 高圧領域へ集積する傾向がある。例えば、式(4)から z軸に沿ったガスの成層構造(8)が導かれたが、ダス トは太陽重力のz成分からのみ影響を受けるため、よ り高圧な赤道面へと沈殿する傾向を持つ¹. また、r軸 に沿った動径移動(ダスト落下)や,圧力の極大領域(惑 星ギャップや地衡風で生じる高気圧性の渦)へのダス ト濃集も、定性的には全てこの傾向で理解できる。

より詳細なダストの振る舞いの分析には、ダスト粒 子が受けるガス抵抗(制動時間)のサイズ依存性も考慮 すべきである.この点の詳細は、過去の「遊・星・人」 の解説記事[4]も参照していただきたい.一言でまと めると、ガス抵抗に強く影響される小サイズダストは ガスと相似な分布をとる一方、ガス抵抗の影響をほど ほどに受けるより大きなダストはガスと分離し高圧領 域に濃集しやすい傾向がある.



 図2: HH30周囲の原始惑星系円盤画像. 円盤を真横から見ている. (a) ハッブル宇宙望遠鏡による可視光(λ = 675 nm) 画像. https://hubblesite.org/image/998/news/25-stellarjetsを改変(©NASA/STScl). 縦に伸びているのは両極方 向に噴出するジェット[5]. (b) ALMAによるミリ波(λ = 1.3 mm) 画像. 左下に示した点源応答関数(半値全幅で36 au ×25 auのガウス関数)では円盤の厚みは分解されず,大部 分のダスト質量が |z|<12 auに含まれることが示された[6] (reproduced with permission ©ESO).(a) と(b) は空間的 に同一の縮尺である.



図3: ALMA初期科学観測で得られたTタウリ型星TW Hyaのダス ト連続波(左), CO輝線(中央), N₂H*輝線(右)[9]. 気相に COが存在するとN₂H^{*}の破壊促進とN₂H^{*}の形成抑制の両方 に寄与するため,N₂H^{*}の気相中での存在度は低下する.ガ ス輝線に対するパネル2枚で示された赤点線より内側では COが強くN₂H^{*}は弱いが,これは赤点線(T=17 Kに相当) がCOスノーラインで,ここを境界に気相中のCO存在度が 大きく変わり,N₂H^{*}の気相中の存在度も逆に変化したと考 えることで統一的に説明される.

2.3 観測データの解釈への応用

林モデルはその単純さ故に,観測が明かす円盤構造 の解釈にも適用しやすい.図2の2枚の画像は,Tタ ウリ型星HH 30に付随する円盤をほぼ真横から捉え たものである.可視光では円盤表面に漂うサブミクロ ンサイズのダストによる散乱光が捉えられており,そ れに挟まれた「影」として,林モデルを思わせるフレ ア円盤の存在が確認できる.一方,ALMAによるミ リ波画像ではダストの熱放射が捉えられているが,そ の厚みは式(9)で導かれたH(r)より有意に薄い.これ

^{1.}式(8)は密度分布だが、温度分布はrだけの関数であると仮定 しているため、圧力のz依存性も同様になる.



図4: 星間物質の相. コロナル・ガスとHII領域が電離水素の相, 雪間媒質とHIクラウドが水素原子の相,分子雲が水素分子 の相である. [11]を元に作成.

は、大部分のダストが赤道面付近に沈殿していること を示している.このように林モデルの枠組みは、観測 された円盤の大局的構造を整理するのに大変有効であ る.

スノーラインもまた、天体観測のターゲットになっ ている.H₂Oスノーラインは、多波長ダスト連続波観 測の結果に基づく間接的議論に依拠した検出報告[7] はあるものの、直接検出は今後の課題といえる[8]. 一方、COに対するスノーラインは明瞭な結果が得ら れており、円盤ガス化学との関連が議論されている. 図3に示した例では、COスノーラインの位置が、CO 自身の放射だけでなく、気相でCOと排他的関係にあ るN₂H⁺の放射でも同定されている[9].また、スノー ライン近傍ではダスト粒子の力学特性も変化すると考 えられる.その効果はダスト円盤構造に刻印されるだ けでなく、ダストの成長・破壊過程にも重要な影響を 与えうるとして、惑星形成の観点からも注目を集めて いる[10].

3. 惑星系の材料物質(1):ガス成分

原始惑星系円盤は星形成過程の中で出現する天体構 造である.星形成過程は星間物質の高密度領域が自己 重力によって収縮する現象であるから,惑星の材料物 質は元をたどれば星間物質といえる.そこでここから は、星間物質の性質を概観し、物質と電磁波の相互作 用の考察から導かれる情報にも焦点を当てる.この §3ではガス成分について議論をし、次の§4ではダ スト成分を議論する.

3.1 星間空間におけるガスの存在形態

星間物質は幅広い温度・密度を取りうるが、その中 で熱力学的に安定な領域は離散的に存在する.このた め、実際の星間物質はいくつかの「相」に分かれており、 それらは最も存在度の高い元素である水素の存在形態 で区別される(図4).

星間物質の低温・高密度な相である分子雲が星・惑 星系形成の舞台であり、そこで最も豊富に存在するガ ス種は水素分子(H₂)である.しかし、H₂は電気双極 子遷移が禁止されている上に励起に必要なエネルギー が比較的高いことから、分子雲や原始惑星系円盤外域 の低温領域では強い放射を出さない².ハーシェル宇 宙望遠鏡により、重水素化水素分子HDの純回転電気 双極子遷移(波長112 μm, 56 μm)がごく少数の原始惑 星系円盤で検出されている[12]ものの、円盤低温領域 の主たる観測手段は、COをはじめとするその他の分 子の回転遷移である³.

3.2 分子ガスの回転遷移

最も単純な形状である直線分子を例に,回転遷移を 概観する.分子の内部エネルギー構造には電子軌道や 原子間結合の振動も含まれるが,これらは回転に比べ 準位間のエネルギー差が十分大きい.そこで回転準位 の解析には,原子間結合を剛体棒とするモデル(剛体 回転子近似)が有効である.この場合,回転エネルギ ー準位E_rに関するシュレーディンガー方程式は,回 転のハミルトニアンをH_rとして.

$$H_{\rm r}\psi = \left(\frac{L^2}{2I}\right)\psi = E_{\rm r}\psi,\tag{10}$$

ただし、*I*は分子の重心周りの慣性主軸に対する慣性 モーメント、*L*²は角運動量演算子で

$$\boldsymbol{L}^{2} = -\hbar^{2} \left[\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) + \frac{1}{\sin^{2}\theta} \left(\frac{\partial^{2}}{\partial\phi^{2}} \right) \right]$$

^{2.} 電気四重極放射が波長30 μmより短波長側に存在するが、上位 準位への励起エネルギーは500 K以上に相当する.

^{3.} 中心星近傍の高温領域では、分子の振動回転遷移や原子・イ オンの主量子数遷移が、赤外線やそれより短波長側で観測される。また本稿では割愛するが、低温領域をトレースする手 段としては、遠赤外線やサブミリ波帯のC、O原子の微細構 造遷移がある。HD 純回転遷移は、次世代赤外線天文観測衛星 SPICAの主要なターゲットである。



図5: (a) ALMA初期科学運用で得られたHD163296に付随する円盤のCO (J = 3.2) 輝線の平均速度図. 速度は 太陽近傍の恒星運動の平均にのった慣性系 (局所基準系)で計ったもの. (b) 回転円盤を斜め45度から見た ときの, 円盤全体を積分したスペクトル (中央) と各速度成分におけるガス分布. Beckwith et al. (1991) [14]を参考に作成. (c) (a) で示したデータのうち, ある視線速度成分に対する輝度分布. (b) でBに相当 する速度成分にほぼ対応しているが, パターンが二対見える. (d) (c) で二対の放射が見えることの説 明. COガスが表層付近のみに存在するため, 傾き角が異なる2枚の回転円盤が存在しているかのように なる. (a),(c) は論文[13]で用いられたScienceVeri.cation Data[15]より作成. 左下が楕円は点源応答関 数 (beam)で, 半値全幅 (FWHM) で0.52× 0.38秒角のガウス関数. (c) の表面輝度の単位に含まれる1Jy = 10⁻²⁶Wm⁻²Hz⁻¹である

である. L^2 の固有値は、0以上の整数Jとプランク定数 $\hbar = h/2\pi$ を用いて $\hbar^2 J(J+1)$ と表され、その固有関数 ψ は球面調和関数 $Y^{\text{M}}(\theta, \phi)$ (ただし $|M| \leq J$)である. すると式(10)の E_r の固有値は、

$$E_J = \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2I} = \frac{\hbar^2 J(J+1)}{8\pi^2 I} \equiv \hbar B J(J+1), \qquad (11)$$

$$B = \frac{h}{8\pi^2 I} \tag{12}$$

となる. ここでBは分子の慣性モーメントに依存する 回転定数と呼ばれる量で,周波数の次元を持つ.天文 観測において重要な電気双極子遷移は $\Delta J = \pm 1$ の場 合にあたり,そのエネルギー差は式(11)から

$$E_{J+1} - E_J = 2hB(J+1) \tag{13}$$

となる. つまり, ある分子の輝線は周波数(v)軸上で

2Bごとに出現する.

3.3 ガス輝線で探る円盤構造:HD163296を 例に

電波観測の大きな特徴は電磁波の位相情報を保存す る受信方式にあり、これが他波長観測を遥かに凌駕す る高い周波数分解能比 $\Delta v/v \leq 10^6$ をもたらす原動力 である。そのため、電波でのガス輝線観測からは、ド ップラー偏移を利用した「速度構造」や、特定分子の 輝線検出による「ガス化学」に関する豊かな情報が得 られる。ガス化学については図3で一例を示したので、 ここでは円盤の速度構造についての研究を2つ紹介す る。どちらも、2.3 M_0 の前主系列星HD163296に付随 する円盤に対してALMAが得た、CO輝線データを用 いた研究である。

最初の例は、ガス公転運動を利用した円盤構造の解 析である[13]. 図5は、ALMAで得られたCO(J= 3-2)データを示した。(a)はガス輝線が示すドップラ ー偏移を速度に換算して作成した平均速度図である. 長軸に沿った速度勾配が見られ、その運動は中心星重 力で決まるケプラー回転でよく説明される. ところが 特定の速度成分における分布(c)には、(b)で示した単 純な回転円盤で期待されるパターンが二重に見られた. これは、中心星からの光が十分届かずCOが凍結する ほど低温になっている領域が赤道面付近に広がってお り、円盤の表側と裏側の双方が見えている状況(d)を 想定すると、自然に説明できる、つまり円盤内の温度 分布は、式(1)で示したrのみの関数ではなく、z方向 にも勾配を持ち、 スノーラインにも鉛直構造があるこ とがわかる、実際このような2方向の温度勾配は、§ 4で議論するダスト光学特性の波長依存性を考慮する と自然に導かれる[16]. さらに図5(c)で捉えられた「パ ターンのずれ具合」から、ガスのフレア度合いが式(9) と良く一致していることも確かめられる.

もう一つの例は、円盤内の乱流測定である[17].円 盤内の乱流強度は、ガスの降着効率やダストの成長・ 破壊を支配する鍵となるパラメータである.ガスの公 転運動が、平均速度図上での速度勾配として検出され るのに対し、ガス乱流成分は、各所での速度分散から 熱速度成分を引いた残差として検出される.このよう な解析を行った結果、この円盤では乱流が式(6)で表 される音速c_sの4%以下と、極めて弱いことがわかっ た.このような弱い乱流は他の複数の円盤でも確認さ れており、原始惑星系円盤では普遍的な現象であるら しい.これらの結果は、乱流が抑制される理由や弱乱 流の下での質量降着のメカニズムといった、今後取り 組むべき新たな課題を提示している.

3.4 複数輝線観測の重要性

円盤物理構造の高精度な推定には、複数輝線の同時 解析が威力を発揮する. ALMA は84-950 GHz を観測 周波数としてカバーしており、この範囲にはCO回転 遷移のうちJ = 1-0からJ = 8-7が含まれる⁴. 同じ分 子であっても励起状態はガスの温度・密度に依存する ため、複数の遷移を組み合わせた解析からガス物理状 態の正確な導出が可能である. また同位体の輝線が、 その慣性モーメントの違いを反映してわずかに異なる 周波数に現れる(式(11),(13)参照). 最も存在度の高 い同位体(例えばCO⁵)の輝線では光学的に不透明にな り円盤深部まで見通せなくても,存在度が低い種 (¹³CO, C¹⁸O等)の輝線では見通すことができる場合も ある[18].

ガス輝線観測で得られる表面輝度は「分子集団の励 起状態を特徴づける温度(励起温度)」に依存するが、 その決まり方はやや複雑である.分子の励起状態は輻 射場とガス主成分(H₂, He)との衝突の両方から影響を 受けるが、両者を特徴づける温度はお互いに異なるの が普通で、完全な熱平衡にはないからである.考えて いる輝線に関わる自発放射の遷移確率がH₂, Heとの 衝突頻度よりも小さい場合は、励起温度がガスの運動 温度と等しいという近似(局所熱力学平衡,LTE)が 有効であり、物理量を直接的に推定できる.CO輝線 は遷移確率が比較的小さいため、円盤観測ではLTE 近似がおおむね有効である.一方LTE近似が適用で きない場合は、「輻射場との相互作用」と「励起の統計 平衡」を無矛盾に解いた上で、輻射輸送計算を実行す る必要がある.

最後に, ガスの総質量を推定するためには, 観測し た分子のH₂に対する相対存在度が必要であることを 忘れてはならない. 分子雲中では化学的に安定でその 相対存在度が比較的良く把握されているCOでさえ, 円盤内では有意に存在度が低くなっている可能性が理 論・観測両面から指摘されている[19, 20]. これはCO が凍結すると, ダスト表面で起こる化学反応によって COが別の分子に変換されうるためである. 観測結果 の解釈にあたっては, この分子存在度の不定性にも注 意を払う必要がある.

4. 惑星系の材料物質(2):ダスト成分

4.1 希薄な星間雲における減光曲線

星間物質中には、ガス成分に加えてダストが含まれ る.ガスとダストの質量比(g/d)は複数の手法で推定 されており、それら推定値の間には若干ばらつきはあ るものの、太陽近傍の標準値としては§2.1で触れた

^{4.} ただし J=5-4は地球大気による吸収が激しい周波数帯にある ため、地上からは観測できない.

^{5.} 正確には¹²C¹⁶O と書くべきであるが、慣習により、もっとも 存在度の高い核種の質量数は省略する.

g/d=100が広く使われている[21].

ダストの量や性質の推定法のうち特に基本的なのが, 希薄な星間雲(diffuse clouds)の背景にある恒星が受 ける減光量を用いる方法である.減光の絶対量は観測 者と恒星の間に存在するダストの柱密度に比例するの に対し,減光量の波長依存性は,後述するようにダス トの組成やサイズと関係する.この点を利用し,観測 で得た減光量の波長依存性を逆に解けばダストの性質 を推定できる.具体的には,diffuse clouds中のダス トは珪酸塩と炭素質の二成分からなり,いずれの個数 密度分布も粒子半径を aとして

$$\frac{dn}{da} \propto a^{-3.5} \ (0.005\,\mu\text{m} \le a \le 0.25\,\mu\text{m}) \tag{14}$$

に従う場合に、観測で明かされた減光の波長依存性が 良く再現された[22, 23].

原始惑星系円盤が存在する分子雲はdiffuse clouds に比べて低温・高密度であり、そこでは揮発性分子が 凝結した氷がダストの表面を覆っている.また、式 (14)で示したよりも大きなサイズの粒子も含まれるか もしれない.しかし大筋では、最初にサブミクロンサ イズのダストが原始惑星系円盤に取り込まれたとする 見方が受け入れられている.

4.2 ダスト光学特性のサイズ波長依存性

星間減光を起こす素過程は、ダストによる吸収と散 乱である.吸収や散乱の効率を特徴づけるダスト光学 特性の理解が天文観測の解釈には不可欠であり、それ らは単位質量あたりの断面積(κ_{abs}, κ_{sca})で定量化され る.光学特性はダストの組成や形状(サイズを含む)で 決まるが、特に赤外線では、ダストや氷に含まれる原 子間結合に対応したフィーチャーが特定の波長域に出 現し、組成の手がかりを与える.一方、電波領域のダ スト放射はフィーチャーに乏しい連続波である.本稿 では、組成の変化は深く考えず、標準的な組成を持つ ダストの半径αと波長λとの間の関係に絞り、光学特 性を概観する.

ダスト光学特性の波長依存性を考える上で最も重要 なのが、サイズパラメーター $x \equiv \frac{2\pi a}{\lambda}$ である. λ に 比べてダストサイズが十分大きい $x \gg 1$ の領域では幾 何光学近似が有効で、 $\kappa_{abs}, \kappa_{sca}$ は λ に依らずにダスト の物理的断面積で決まる($\propto \lambda^0$). 一方、 $x \ll 1$ の範囲 (式(14)で示したものでは $\lambda \ge 30 \mu$ mに相当)では, $\kappa_{abs} \propto \lambda^{-2}$, $\kappa_{sca} \propto \lambda^{-4} (\nu \wedge \eta - \hbar)$ に漸近する[24]. そして両者をつなぐ $x \sim 1$ では光子との相互作用が最 も効率的であり, κ_{abs} , κ_{sca} は極大値をとる. つまり大 まかには, 観測波長 λ に近いサイズのダストが結果に 最も強く影響を与えると考えて良い.

星間物質に対するダスト電波観測では普通 $x \ll 1$ で あるが、散乱の寄与はその強い波長依存性のために無 視できる.つまり、吸収、あるいはエネルギー収支の 上で裏表の関係にある熱放射だけを考えれば良い.一 方、原始惑星系円盤内ではダストが成長しうるため、 ミリ波・サブミリ波帯でも $x \ll 1$ とは限らない.実際、 円盤観測では星間ダストとは異なる様相が捉えられて いる.すなわち、(a)ダスト成長に伴うと見られる κ_{abs} の波長依存性の変化と、(b)散乱が無視できない ことを示す偏光成分の検出である.本稿では以後(a) に絞り、観測結果と対照させながらさらに詳しく議論 する⁶.

4.3 ダスト熱放射の表面輝度

まず手始めに、一様温度*T*, 柱密度 Σ_d のダスト層 からの熱放射を観測したときに得られる結果を具体的 に示す.ダスト放射を空間分解した場合に得られる観 測量は表面輝度 I_v であり、それは

$$I_{\nu} = [1 - \exp(-\tau)]B_{\nu}(T)$$
 (15)

と表される. ただし $B_{\nu}(T)$ は輻射強度で表したプラ ンク関数で, $k_{\rm B}$ をボルツマン定数, cを光速として,

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{k_{\rm B}T}\right) - 1 \right]^{-1} \tag{16}$$

である. また、 τ は光学的厚みと呼ばれる無次元量で、 $\tau = \kappa_{abs} \Sigma_d$ である. 電波領域では κ_{abs} は非常に小さ いため、多くの領域で $\tau \ll 1$ が成り立つ. この場合、 式(15)は

$$I_{\nu} \approx \tau B_{\nu}(T) = \kappa_{\rm abs} \Sigma_{\rm d} B_{\nu}(T) \tag{17}$$

となる. この式を複数周波数における観測結果に適用 すれば, T, Σ_d , \mathcal{D} び κ_{abs} の周波数依存性(普通, κ_{abs} $\propto v^{\beta}$ という, べき関係で表す)が求められる. また, ミリ波帯では $hv \ll k_{\rm B}T$ のときに成り立つレイリー・

^{6. (}b) に挙げた、ダスト散乱に伴う 偏光が円盤から検出された ALMA観測の解説は [25]を参照のこと.



図6: FT Tauに付随する原始惑星系円盤の複数波長観測とモ デル化. 上段から順に, CARMAによるλ = 1.3 mm, 2.6 mm, J-VLAによるλ = 8 mm, 9.8 mmの結果. 左が観測結 果, 中央がモデルイメージ, 右が両者の差[30] (reproduced with per-mission ©ESO).

ジーンズ近似

$$B_{\nu}(T) \approx \frac{2k_{\rm B}T}{c^2}\nu^2 \tag{18}$$

が有効な場合が多い. すると式(17)は $I_v \propto v^{2+\beta}$ という関係が成り立つから,複数周波数データから β を推定できることが容易にわかる.

宇宙背景放射の精密測定を行なったPlanck衛星は, $v = 100-350 \text{ GHz}(\lambda = 3-0.85 \text{ mm})の範囲で複数の銀$ 河面マップを得た. これらを用いて式(17)を適用した $解析から,分子雲を含む高密度領域では<math>\beta \approx 1.66$ が示 された[26]. これは,式(14)に現実的なダスト組成を 加味すれば十分説明可能である. 一方,原始惑星系円 盤では、 $\beta \leq 1$ なる値をとることが1990年代より観測 的に示唆されていた. これをダスト成長の間接的証拠 とみなすのが,最も有力な解釈である. すなわち、ダ ストが式(14)の範囲を超えミリメートル以上に成長し た結果、 $\beta \approx 2 \geq \beta \approx 0$ のものが混合された状態にあ ると考える[27, 28].

ダスト成長が起きたときにも適用可能な κ_{abs}の絶対 値は、様々な組成や形状・サイズのダストモデルに対 して理論や実験で見積もられており、その推定値には



図7: FT Tauに付随する原始惑星系円盤の複数波長観測から導 出された物理量の動径分布.(上) β ,(中央)g/d=100とし てダスト柱密度を Σ_g に換算したもの,(下)温度.なお,引 用元の[30]における導出では、図6に示したイメージでは なく,干渉計の直接の観測量であるビジビリティを用いて いる[30] (reproduced with permission ©ESO).また柱密 度の導出にあたっては、式(19)を仮定するのではなく、ダ ストの最大サイズを決めて $\kappa_{abs} \geq \beta$ を決める方式をとって いる.

相当な幅がある[28]. そして式(17)からもわかる通り, この不定性はΣ_dの見積もりにも直接影響する. この 点には十分留意しつつも, 観測データからダスト質量 を見積もる際には

$$\kappa_{\rm abs} = 10 \left(\frac{\nu}{10^{12} \rm Hz}\right)^{\beta} \rm cm^2 g^{-1}; \ \beta = 0 - 2$$
(19)

が広く使われている[29]⁷.

4.4 観測で探る円盤内のダスト分布やダスト成長

最近行われた電波帯での複数周波数高解像度撮像は, 円盤全体で平均したβだけでなく,円盤内でのβ分布

 ^{7.}式(19)はダスト1g当たりの表現.[29]ではg/d=100を前提にした表現だったが、ALMA観測でg/dは円盤内で大きく変化しうることが明らかになったため、近年はこちらが主流となった. [28]とも矛盾のない式である。



図8: TW Hyaの λ = 2.1 mm及び1.3 mmのALMA観測の結果 [32].(上)2つの波長データを組み合わせ,有効波長λ = 1.6 mmでのダスト連続波画像.(下)λ = 2.1 mm及び 1.3 mm の表面輝度間の比を波長比のべきで表した時のべき指数 (α).光学的に薄くレイリー・ジーンズ近似が成り立つの で,式(17),(18)から,α ≈ β+2なる関係が成り立つ.半 径22 auのギャップの位置でβが大きい兆候が見られる. 塚越崇氏(国立天文台)提供.

を明かし始めている. 非軸対称な高圧渦に大きなダス トが集積しているとみられる様子が β マップで明らか になった結果は別稿[18]で紹介されているので,ここ では動径方向での Σ_{d} 分布, β 分布に関する研究例を2 つ紹介する.

第一は、動径方向の大局的な変化を明らかにした例 である[30]. 図6は、Tタウリ型星FT Tauに付随す る原始惑星系円盤のミリ波帯における複数波長観測の 結果である.これを用いて、式(15)を直接解くことに よって T, Σ_d , 及び κ_{abs} のスペクトル指数 β の分布を 得たのが図7である. rが小さくなるにつれてβの値 が小さくなる動径勾配の存在がわかる. これは,円盤 内域ほど大きなサイズにダストが成長している様子を 捉えたものと解釈される.

第二の例は、我々から最も近傍(距離54 pc)にあり 図3でも紹介したTタウリ型星TW Hyaの多波長撮像 である。TW Hvaは、ALMAで最高の実空間分解能 で撮像されている原始惑星系円盤である. λ = 870 µmでのダスト連続波観測の結果、中心星周辺2 auに 広がる穴のほか、半径22 au, 37 auに惑星ギャップを 思わせる同心円状の空隙が確認されていた[31]. これ をさらに、 $\lambda = 2.1 \text{ mm}$ 及び1.3 mmで観測し、 β の空 間分布を調べた結果が図8である[32]. 半径22 auのギ ャップで B が周辺に比べて大きくなっている兆候が確 認できる、これはギャップ中のダストサイズが周囲に 比べて相対的に小さいことを示唆するが、惑星ギャッ プの理論で予言されていた状況でもある。 画像から読 み取れるギャップの幅と深さは、海王星程度の質量を 持つ惑星が掘ったギャップの理論的予想と良く一致す る. 一方, TW Hvaの年齢は約10⁷年と推定されており, 微惑星を経由した形成過程でも成長時間は十分ある. 太陽系起源論が想定した微惑星の衝突合体により作ら れた惑星が、このギャップには潜んでいるのものかも しれない.

このように、柱密度やβの推定が可能なのはダスト 連続波で円盤が見通せるためであり、これが電波領域 での大きな強みとなっている.ただし,いつでも円盤 が光学的に薄く柱密度や B の情報が得られるとは限ら ない. 例えば、ALMAで良く使われる ν =340 GHz(λ = 0.88 μ m)では、式(19)で β =1を当てはめると κ_{abs} = 3.4 cm²g⁻¹となり、ダスト円盤が光学的に不透明な $\tau = 1$ を与える柱密度は $\Sigma_d = 0.29 \text{ g cm}^{-2}$ となる.こ れを図1に示した林モデルの Σ_d に当てはめると, $r \leq$ 22 auで円盤は不透明である。実際にALMAが観測し た原始惑星系円盤においても、中心星の近傍10 auス ケールで光学的に不透明な状況がしばしば見られる. その代表例が、美しい同心円リング構造が見つかった HL Tauの円盤で, v = 345 GHzのダスト連続波は中 心星から30-50 auの範囲まで、 τ ≥1であると見ら れている[33]. τが大きいと表面輝度は温度だけの関 数になる点は、式(15)でτを大きくする極限をとれば 容易にわかる、円盤を空間分解することによって初め

て、円盤の物理状態の紛れのない推定、特に $\Sigma_d \ge T$ の切り分けが可能になる.

5. 解像度が不十分なデータの解析手法

§3,4では、空間的に十分分解された円盤画像から 導かれる情報を議論した.しかし、円盤を十分に高い 空間分解能で撮像するには、たとえALMAであって も比較的長い観測時間が必要とされるため、多数の円 盤を対象にした統計的研究(サーベイ)には適用しにく い.このため、空間的に十分解像されていないデータ からモデルを介して円盤物理量を推定する手法も、実 用面では依然として重要である.ここではその手法の エッセンスを概説し、関連する最新の研究成果にも触 れる.

5.1 円盤モデルを介した物理量の導出

まず,「円盤が空間的に十分解像できている」とい う意味を明確にしておく.これは,式(15)で示されて いる円盤の表面輝度が,物理量を導出できるほど空間 的に十分細かく得られている状況を指す.例えば,円 盤画像の画素内での物理量の変化が十分小さければ, その画素で観測された表面輝度を用いて物理量の画素 内での平均値を導出することに意味がある.逆に,そ れほどシャープな画像が得られていない場合は,観測 で得られた表面輝度から直接物理量を導出するのでは なく,円盤構造モデルを仮定し,有限な観測分解能を 仮定したときに結果が再現されるような物理量を探索 する必要がある.

その極端な例として、ダスト熱放射を題材に、円盤 が全く空間分解されていない場合を考えよう.このと きの観測量は、円盤全体を含む立体角で表面輝度を積 分したエネルギーフラックスF^(disk)である。円盤が軸 対称で、z方向に十分に薄く物理量の変化が無視でき るときには、

$$F_{\nu}^{\text{(disk)}} = \frac{2\pi\cos i}{d^2} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} B_{\nu}(T(r)) (1 - \exp[-\tau(r)]) r dr, \qquad (20)$$

$$\tau(r) = \frac{\kappa_{\rm abs} \Sigma_{\rm d}(r)}{\cos i} \tag{21}$$

と表される.ただし、dは円盤までの距離、iは視線 と円盤の対称軸(z軸)がなす角度であり、星間減光の 寄与は無視した.また、 κ_{abs} は円盤内で一様とした⁸. 一方、円盤モデルとしては $\S20$ 太陽系起源論を参考 にした境界付きべき乗モデルが良く用いられる.具体 的には、適当な $r_n \le r \le r_{out}$ の範囲で

$$T(r) = T_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-q},\tag{22}$$

$$\Sigma_{\rm d}(r) = \Sigma_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-s} \tag{23}$$

が成り立つとする. Tタウリ型星に付随する典型的質量の円盤では,円盤が中心星のごく近傍まで広がっていさえすれば赤外線の大部分(およそ $\lambda \leq 60 \ \mu m$)で円盤は光学的に厚く($\tau \gg 1$)なる. このとき,式(20), (21), (22)を用いると,

$$F_{\nu}^{\text{(disk)}} \propto \nu^{3-2/q} \tag{24}$$

という関係が導かれる.つまり,エネルギースペクト ル分布を周波数のべき関数で表したとき,温度分布の 情報が得られる.これは,温度と円盤半径に対応関係 があることに加え,ある温度のプランク関数(16)が特 定の周波数でピークを持つことも踏まえれば納得しや すい.一方,電波波長帯($\lambda \ge 300 \ \mu m$)では円盤はよ り透明に近づき, $\tau \ll 1$ なる状況もあり得る.このと き式(20)は,式(17)を適用して

$$\begin{split} F_{\nu}^{(\text{disk})} &\approx \frac{2\pi\cos i}{d^2} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} \tau(r) B_{\nu}(T(r)) r dr \\ &= \frac{1}{d^2} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} \kappa_{\text{abs}} \Sigma_{\text{d}}(r) B_{\nu}(T(r)) 2\pi r dr \end{split}$$
(25)

となる.式(24)などから温度分布が推定できるときは, 上式のT(r)にそれを代入し,観測された $F_{\nu}^{(dist)}$ を再現 する Σ_{d} や $\kappa_{abs}($ あるいは β)を探せば良い.実際,こ の方針に沿った解析は,ALMA登場以前の研究の進 捗に大きく貢献した[29].

温度分布の情報が与えられない場合でも、円盤質量 M_d は電波観測に基づき大まかに見積もられる. 具体 的には、 $r_{in} \ll r_{out}$ かつ(s+q) < 2のときは、主に円盤外 域の寄与が式(25)の $F^{(disk)}$ には効くため、 $T(r) \approx$ $T(r_{out})$ とみなせる. § 2で紹介した林モデルではs =3/2, q = 1/2であったが、実際の原始惑星系円盤を十 分に空間分解して得られた柱密度分布は $s \approx 1$ のもの

^{8.} 円盤が空間的に分解されてダストの τ が円盤各所で見積もら れる場合でさえ、式(21)からわかる通り、 $\kappa_{abs} \ge \Sigma_d$ の寄与は原 理的に切り分けられない。そのため、便宜的に $\kappa_{abs} を - 様$ 、も しくは周波数依存性を含める場合は β だけを考慮した式(19) に従う、と仮定する場合が多い。



図9: おおかみ座領域での v = 340 GHzでのダスト連続波円盤サーベイの結果. 同領域に含まれる89個のTタウリ 型星全てに対し、1天体あたり30秒積分で0.2-0.4M_☉のダスト質量検出感度を実現した結果、62個の円盤か ら放射を検出した(オリジナルの出典は、Figure 2 in "ALMA SURVEY OF LUPUS PROTOPLANETARY DISKS. I. DUST AND GAS MASSES[19]").



図10:太陽近傍の5つの若い星団に対する中心星質量と円盤質量の関係. 右下パネルは全ての星団で得られた相 関をまとめたものであり. 星団年齢に沿った進化傾向が見られる(オリジナルの出典は, Figure 7 in "An ALMA Survey of Protoplanetary Disks in the σ Orionis Cluster[34]").

が多いため、比較的現実に即した条件といえる.する と式(25)はさらに簡単になり、

$$\begin{split} F_{\nu}^{(\text{disk})} &\approx \frac{\kappa_{\text{abs}} B_{\nu}(T(r_{\text{out}}))}{d^2} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} \Sigma_{\text{d}}(r) \, 2\pi r \, dr \\ &= \frac{\kappa_{\text{abs}} B_{\nu}(T(r_{\text{out}})) M_{\text{d}}}{d^2}. \end{split} \tag{26}$$

これは、単一温度のダスト集団からの放射が途中で減 光されずに観測者に届いた場合の関係式であり、 $T(r_{out})$ を適当に仮定すれば M_d が推定できる。円盤全 体が $\tau \ll 1$ と見なせる複数の周波数で $F_{\tau}^{(dick)}$ が得られ れば、円盤全体で平均した β も推定できる。

5.2 具体的な研究例

惑星形成過程の全貌を知るためには、YSOsの全期 間に起こる円盤進化を理解する必要がある.しかし中 心星が太陽程度の質量である場合,その時間スケール は10⁷⁻⁸年に及ぶため,個々の円盤内でおこる時間変 化はほぼ認識できない.そこで.多数の円盤をサーベ イして得られる統計的性質を中心星年齢と関連づけて 解釈する.ただし,十分な天体数を確保するためには, 現実的な観測時間の制約から解像度は妥協せざるを得 ない.§5.1で触れた解析手法に付随する個々の円盤 物理量の不確実性の影響は,サンプル内での統計を取 ることで緩和させる.

ALMAは、このタイプの研究も大きく進展させた. 近傍の星形成領域に含まれる円盤の場合。ALMAは わずか30秒から3分の積分時間で、地球質量(M_⊕)の 10-40%しかないダストからの放射をそこそこの解像 度(おおむね40 au程度)で検出する(図9). この装置 性能を活かして、近傍の星形成領域に含まれる全ての 前主系列星をカバーするサーベイが複数行われた. 星 は「集団」で生まれるため、それぞれの星形成領域は 特定の年齢層の円盤を代表しているとみなせる。この 発想に沿って太陽近傍の5つの星団中に含まれる円盤 に対して結果をまとめたのが図10である。ここに示 した全ての領域で、中心星質量とダスト円盤質量の間 には正の相関が見られる。また、星団年齢が経過する につれて、 質量の小さい中心星に付随する円盤ダスト 質量が著しく低下する様子も示された. このようにサ ーベイ観測は、円盤の物理量だけでなく、ダスト円盤 消失の時間スケールについての情報も提供する.

5.3 注意点と今後の展望

図10の結果は印象的だが、これらが式(26)で示し た簡易解析に強く依存している点は注意したい. 例え ば. 式(26)の導出には円盤全域で τ ≪1であることが 必要だったが、それが必ずしも適切でないことはすで に§4で指摘した通りである。円盤が十分空間分解さ れていないとはいえ、図9を一見しただけでもリング や広がりを持つ放射分布が確認される、つまり、これ らのデータには空間構造に関わる情報も含まれている。 今後の解析では、これらをフルに活用する努力が求め られるだろう、実際、干渉計データに含まれる空間情 報を抽出するような再解析によって円盤物理量を見直 そうとする研究が出始めており、温度分布や外径に制 約を与えることで、推定された物理量が大幅に見直さ れるケースも報告されはじめている[35.36]. 提示さ れた結果を鵜呑みにするのではなく. 解析過程に潜む 問題点にも十分な注意を払う姿勢が、今後も求められ るだろう.

6. 終わりに

本稿では、原始惑星系円盤の電波観測から情報を読 み解くのに必要とされる基本的な考え方を紹介した. その内容は、天体物理学と宇宙物質科学の広い範囲に 及ぶため、研究をこれから始めようという人にとって は敷居が高く感じられたかもしれない.しかし、これ らの基本に立ち戻って診断することにより、単に眺め ているだけでも美しいALMAの高解像度画像の背後 にある情報を深く把握でき、想像力がより掻き立てら れることがわかっていただけたと思う.本稿をきっか けに、この研究分野への関心をさらに深めていただけ れば幸いである.

謝 辞

本稿は,筆者が2016年9月に実施した惑星科学フロ ンティアセミナーの講演内容を,最近の研究進捗も含 めて再構成したものである.フロンティアセミナー事 務局代表の千秋博紀氏(千葉工業大学),現地でお世話 をいただいた北海道むかわ町の関係各位に感謝する. 本稿の執筆に当たり,JSPS科研費JP17H01103, JP18H05441の助成を受けた.

参考文献

- [1] 武藤恭之, 2016, 遊·星·人 25, 36.
- [2] 秋山永治, 2018, 遊·星·人 27, 4.
- [3] Hayashi, C., 1981, Prog. Theor. Physics Suppl. 70, 35.
- [4] 奥住聡, 2014, 遊·星·人 23, 371.
- [5] Stapelfeldt, K. R. et al., 1999, ApJ 516, L95.
- [6] Louvet, F. et al., 2018, A&A 618, A120.
- [7] Cieza, L. et al., 2016, Nature 535, 258.
- [8] 野津翔太, 2018, 遊·星·人 27, 120.
- [9] Qi, C. et al., 2013, Science 341, 630.
- [10] Okuzumi, S. et al., 2016, ApJ 821, 82.
- [11] Myers, P., 1978, ApJ 225, 380.
- [12] Bergin, E. A. et al., 2013, Nature 493, 644.
- [13] de Gregorio-Monsalvo, I. et al., 2013, A&A 557, A133.
- [14] Beckwith, S. V. W. and Sargent, A. I., 1991, ApJ 402, 280.
- [15] http://almascience.org/alma-data/science-verification
- [16] Chiang, E. and Goldreich, P., 1997, ApJ 490, 368.
- [17] Flaherty, K. M. et al., 2017, ApJ 843, 150.
- [18] スンカンロウ, 2019, 遊・星・人, 投稿中.
- [19] Ansdell, M. et al., 2016, ApJ 828, 46.
- [20] Yu, M. et al., 2017, ApJ 841, 39.
- [21] Tielens, A. G. G. M., 2006, The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, Cambridge Univ. Press.
- [22] Mathis, J. S. et al., 1977, ApJ 217, 425.
- [23] Draine, B. D. and Lee, H. M., 1984, ApJ 285, 89.
- [24] Draine, B. D., 2003, ARAA 41, 241.
- [25] 片岡章雅, 2017, 天文月報 110, 333.
- [26] Planck Collaboration, 2014, A&A 564, A45.
- [27] Miyake, K. and Nakagawa, Y., 1993, Icarus 106, 20.
- [28] Draine, B. D., 2006, ApJ 636, 1114.
- [29] Beckwith, S. V. W. et al., 1990, AJ 99, 924.
- [30] Tazzari, M. et al., 2016, A&A 588, A53.
- [31] Andrews, S. M. et al., 2016, ApJ 820, L40.
- [32] Tsukagoshi, T. et al., 2016, ApJ 829, L35.
- [33] ALMA Partnership et al., 2015, ApJ 808, L3.
- [34] Ansdell, M. et al., 2017, AJ 153, 240.
- [35] Tripathi, A. et al., 2017, ApJ 861, 64.
- [36] Ballering, N. P. and Eisner, J. A., 2019, AJ 157, 144.

ー番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その39 「第74回藤原セミナー/International Venus Conference 2019」 開催報告 高木 聖子¹

1. はじめに

2019年5月31日(金)~6月3日(月)の日程で、「第 74回藤原セミナー /International Venus Conference (IVC)2019」がヒルトンニセコビレッジ(北海道ニセコ 町)にて開催された(図1,2).本会議は、2018年9月 11日(火)~14日(金)に同場所にて開催予定だったが、 開催直前に北海道胆振東部地震に見舞われ、今回の日 程に再調整された経緯がある. 被害に遭われた方々に 心よりお見舞いを申し上げる. そして、延期に見舞わ れながらも本会議を滞りなく終えられたのは、変わら ぬご支援を賜った公益財団法人 藤原科学財団の皆様 と、余震の不安が残る北海道へ足を運び、会議遂行に ご協力頂いた皆様のおかげと、実行委員一同心より御 礼申し上げる、また、本会議は日本地球惑星科学連合 (JpGU)2019年大会(5月26日(日)~30日(木).幕張) と連続した日程で開催された. 千葉県から北海道への 金星人大移動は、金星コミュニティの団結を感じる会 議の幕開けだった.



図1. 本会議の看板.

2. 会議概要

前回のIVCは、2016年4月にマートンカレッジ(オ ックスフォード)にて行われた.金星探査機あかつき (JAXA)が5年越しの軌道投入再挑戦に成功した直後 の会議であったため、会場が歓喜の雰囲気に包まれて いた.あれから約3年、すなわちあかつきが金星観測 を開始してから約3年となる今回の会議では、



図2. 会議の集合写真(2019年5月31日撮影).

^{1.} 北海道大学大学院理学研究院 seiko@ep.sci.hokudai.ac.jp



The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2019 (Niseko, Hokkaido, Japan)

図3. 会議のプログラム.

"Geology: Observation and Lab Measurements", "Geology and Evolution", "Clouds and Chemistry", "Atmospheric Dynamics", "Future Mission", "Atmospheric Structure". "Aeronomy and Plasma Environment"という、多岐にわたるセッションが設 けられた(図3,4). 2006年から8年間にわたり大気組 成などの化学的観測に重点を置いたVenus Express (ESA)に続き、大気の3次元的な運動を捉え金星気象 力学の確立を目指すあかつきが加わった今、多くの成 果を想像させるプログラム構成である.本会議は、本 会議実行委員長である林祥介氏(神戸大学)による開会 の辞から始まった、続いて、本会議開催へご支援いた だいた公益財団法人 藤原科学財団の岩瀬広徳氏・小 林誠氏よりお話いただき、藤原科学財団設立の経緯や 事業を紹介するDVDを鑑賞した.続いて行われた各 セッションについて、以下に報告する、

2.1 "Geology: Observations and Lab Measurements", "Geology and Evolution" (Day1 PM)

なぜ地球は水や生命に満ちた惑星へ進化し,他の地 球型惑星はその進化を別ったのか。1960年代から金 星へ探査機を送り込んだアメリカや旧ソ連の調査によ れば,金星は地球と同程度の大きさと質量を持つ一方 で、二酸化炭素と主成分とする分厚い大気は地表面で 90気圧にも達し、地表面は約500℃という灼熱の世界 である.海はなく、大気中の水蒸気は0.003%程度に 乾燥した極限的環境である.また、硫酸を主成分とす る雲の層(高度40-70 km)と固体微粒子の層(もや層、 70-90 km)が浮かび、全球を一様に覆っている.双子 惑星と呼ばれる両惑星が、かくも大きく異なる進化を 遂げた所以は未だに不明である.会議初日の午後には、 "Geology : Observations and Lab Measurements"と "Geology and Evolution"の2つのセッションが組まれ、 金星の地質と進化について、国内外から11名の研究 者が講演を行った.金星内部の運動が地表面に及ぼす 影響の考察や、Venus Expressの分光観測及び実験結 果に基づく地表面組成の研究、表層環境と生命存在可 能性の議論など、多種多様な講演が行われた.

2.2 "Clouds and Chemistry" (Day2 AM, Day3 AM)

金星雲は,光化学エアロゾルの性質と大気運動によ り生成する凝結雲の性質を併せ持つが,現段階では, 雲に働く化学過程や輸送過程が部分的に提案されてお り,雲は化学と物理が複雑に絡み合い形成・維持され ているのであろうという極めて初歩的な理解にとどま



図4. ロ頭講演会場の様子. 後方はポスター会場.

っている.本セッションでは, 雲形成や維持機構について, 12名の国内外の研究者が講演を行った. Venus Expressやあかつきに基づく二酸化炭素・オゾン・未 同定吸収物質等の全球分布推定やそれらと雲との関連, 金星大気中の一酸化炭素が金星の気候に及ぼす影響の 考察, 雲粒径の推定,光化学モデル・大気大循環モデ ルと観測を相互に参照し雲内部に働く化学過程解明に 追る研究など,長年謎の金星雲形成・維持機構の解明 に向け,現状の知見と課題を共有した.

2.3 "Atmospheric Dynamics" (Day2 AM, Day4)

金星の自転周期は243地球日であり、赤道域におけ る自転速度は約1.6 m/sと非常に遅い. 大気と地面と の間に働く摩擦により、自転の遅い惑星上で吹く風は 自転と同程度に遅いと予想される.しかし、金星大気 は雲頂高度で100 m/sもの高速で自転方向に流れ、約 4地球日で1周している.この「スーパーローテーショ ン」の生成・維持メカニズムは、古くから存在する金 星気象学の未解決問題の1つであるが、今なお確定的 な理論は存在していない.本セッションでは、金星大 気力学について、13名の国内外の研究者が講演を行 った、金星大気スーパーローテーションの自転角速度 依存性という地球流体力学的な研究から、あかつきや Venus Express および地上観測に基づく大気の温度構 造や波活動の研究, さらには放射過程や現実地形を備 えた大気大循環モデルによる研究まで、多種多様で充 実した研究発表が行われた. Venus Expressとあかつ き以前には、金星大気力学の研究はシンプルな理論お よび力学モデルに限られ、観測との比較も殆どなかっ

たことが嘘のようなセッションだった.また、4日目 午後の同セッションでは、特にあかつきが捉えた新た な金星気象に注目が集まっていた.あかつき搭載中間 赤外カメラ(LIR)により、金星の南北方向に約1万km にもわたる弓状構造が観測された.この構造は地理的 にはほぼ同じ場所に出現しており、スーパーローテー ションの影響を受けることなくその形状が保たれてい る.シミュレーションにより、この弓状構造は、下層 大気における局所的な気圧変化が重力波となって上空 へ伝搬し形成されることが分かった.またあかつき搭 載近赤外カメラ(IR2)は、中・下層雲領域の風の流れ が赤道付近に軸を持つジェット状になる現象を観測し た.これまで、この高度領域の風速は水平一様性が高 く時間変化も少ないと考えられてきたが、予想外に大 きな変動があることが明らかになった.

2.4 "Future Missions" (Day2 PM)

金星探査の歴史は古く、アメリカ・旧ソ連が相次い で探査機を送り込んできた.旧ソ連のベネラシリーズ は、プローブを大気中に直接投入し、大気組成、圧力、 温度などの情報を取得した.また、アメリカのパイオ ニアビーナスは金星の電離層と太陽風との関連性を明 らかにし、マゼランはレーダー観測により金星表面地 形を明らかにしている.本セッションでは、将来の金 星探査について、国内外から8名の研究者が講演を行 った.近年金星に送り込まれたVenus Express やあか つきに相次ぎ、早くも本セッションで提案された EnVisionやVenera-Dという次の金星探査が計画され ているところに、金星の謎の深さと重要性を強く認識 した.

2.5 "Atmospheric Structure" (Day4 AM)

金星大気は96.5%の二酸化炭素と,3.5%の窒素, 微量の二酸化炭素・アルゴン・水蒸気などから成る. 大気量は多く,地表面気圧は90気圧にもなる.金星 に届く太陽光は分厚い雲にほぼ吸収され,地表面に届 く量は地球の10分の1であるが,膨大な二酸化炭素に よる温室効果により,地表面温度は約500℃という灼 熱の世界である.海はなく,大気中の水蒸気は0.003 %程度に乾燥した極限的環境である.本セッションで は,金星大気構造について,国内外から7名の研究者 が講演を行った.将来の金星地表面探査に向けた地上 実験の報告,大気組成・大気光の高高度鉛直構造を備 えた光化学モデルや大気大循環モデルによる研究など, 地表から高高度まで網羅する大気構造の知見が示され た.

2.6 "Aeronomy and Plasma Environment" (Day4 PM)

金星には固有磁場が殆ど存在しないことがパイオニ アビーナスの観測により確認されている.固有磁場の 欠如により,金星では地球の磁気圏のような太陽から のプラズマ流に対する巨大な磁場の障害物は形成され ず,太陽風は金星表面のごく近傍にまで直接到達し, 様々な過程によって金星大気を剥ぎ取っていく.本セ ッションでは,太陽風が金星大気に及ぼす影響につい て,国内外から13名の研究者が講演を行った.Venus Expressに基づく90 km以上の高高度における大気光 の振る舞いや,大気散逸,あかつき電波掩蔽観測によ る金星電離層の研究など,多彩な講演が行われた.



図5. ポスター会場の様子. この後行われるエクスカーションの 案内が上映されている.



図6. 羊蹄山の麓に広大な自然が広がる.



図7. エクスカーションのしおりの表紙.各コースの案内やバス の時刻表をまとめた(全7ページ).

2.7 ポスターセッション (Day2 PM, Day3 AM)

2日目午後と3日目午前にはポスターセッションが 組まれ,セッション冒頭には各自1分間でポスター講 演の概要を紹介するフラッシュトークが行われた.2 日間で合計59件(Day2:29件,Day3:30件)のポス ター講演が揃い,幅広い研究分野を横断する様々な議 論が交わされるとともに,新たな連携研究の提案など 多彩なコラボレーションの場となった.全てのポスタ ーは口頭発表と同じ会場に会期を通して貼られたので, コアタイム以外の時間でもポスターを前にした議論が 散発的に行われ,参加者にも好評であった(図5).

2.8 エクスカーション(Day3 PM)

ニセコは羊蹄山の麓に広がる自然豊かなリゾート地 である(図6).肥沃な大地が広がり,四季折々の壮大 な景色を楽しめる.3日目午後のエクスカーションで は、北海道の雄大な自然を無理なく堪能できるよう, 行き先(アンヌプリ登山・五色温泉などの温泉巡り・ 神仙沼散策・ホテル周辺アクティビティ)や出発・帰 宅時間を各自で選択できる循環バスプランを計画した. しかし、さすが6月の北海道,役場によれば今年は積 雪でアンヌプリ山の山開きが数日遅れており、エクス カーション当日はまだ開いていないとのこと.さらに JpGU 2019と連続した開催で,登山の装備まで持参す るのも大変だろうし,海外の方は温泉に抵抗があるだ ろうし・・と悶々と考えたが,とにかく遭難者が出な いことを祈りつつ準備を進めた.しおりは事前にメー ルとホームページにて展開し,会期中も完全版と簡略 版を受付にて配布した(図7).当日は天気に恵まれ, 参加者はしおりとタオル(IVC2019ロゴ入り,初日受 付にて配布)を片手に貸し切りバスで出発した.その後, 参加者の皆様から,楽しく参加者同士親睦を深めたと いう声を聞き安心した.翌日午前のセッションでは若 干の疲労が会場に広がってい(るような気がし)たが, 少しでも研究の息抜きや金星コミュニティの団結に貢 献できていたら光栄である.

2.9 ウェルカムディナーとバンケット

初日の夜には、ウェルカムディナー(図8)、最終日 の夜にはバンケット(図9)が同ホテル内で催され、立 食形式で北海道の幸を堪能した.互いに研究を紹介し たり、会期中の自身の講演を宣伝するなど、これまで 学会等では縁がなかった分野の研究者同士が「金星」 を合言葉に交流する場となった.あかつきプロジェク トマネージャーの中村正人氏(ISAS)がウェルカムデ ィナー冒頭で仰った「金星コミュニティの団結と今後 の発展を願う」というメッセージがまさに現実となる 催しとなった.

3. 最後に

今回の会議は、国内外から合計113人の参加者が集 まり、大盛況のうちに終えることができました。4日 間にわたり、セッションの時間以外にも活発な議論が 展開された濃密な合宿となりました。本会議は、公益 財団法人 藤原科学財団からのご支援により「藤原セミ ナー」を冠して実現するに至りました。心より感謝申 し上げます。加えて、JpGU宇宙惑星科学セクション ならびに大気水圏科学セクションからもご支援を頂き、 若手への参加補助等を行うことができました。JpGU に加え、NASA、SGEPSS、日本惑星科学会には開催 への協賛を頂きました。会議運営には、株式会社イー サイドならびに惑星科学研究センター(CPS)の皆様に お力添えを頂きました。日本惑星科学会からは、事務 局会計システムの提供も頂きました。LOCとしてご



図8. ウェルカムディナーの様子(2019年5月31日).



図9. バンケットの様子(2019年6月3日).

尽力頂いた「あかつき」科学チームをはじめとして, オーガナイザーの皆様,多くの興味深い話題提供を頂 いた発表者の皆様,そして会議を盛り上げて頂いた全 ての参加者の皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げ ます.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その19 ~ Hayabusa2 DCAM3 デジタル系の開発~

小川 和律¹, 白井 慶², 澤田 弘崇², 荒川 政彦¹, 本田 理恵³, 石橋 高⁴, 和田 浩二⁴, 門野 敏彦⁵, 坂谷 尚哉², 中澤 暁², 早川 基²

(要旨)小型・分離型のカメラシステムDCAM3(分離カメラ)は、Hayabusa2が小惑星 Ryugu上で衝突実験 を行う際に探査機から分離され、近傍から衝突の観測を行なった。DCAM3は、イジェクタ飛散の詳細な様 子を高い空間分解能で撮影するための科学観測用カメラシステム「デジタル系(DCAM3-D)」を持つ、このデ ジタル系は、Hayabusa2がより高いレベルの科学目的を達成するために遅れて搭載が決定されたもので、提 案から開発・完成に至るまでの全てが険しい道のりだった。様々な課題を克服して成功を収めた成果は挑戦 的な科学観測機器の開発の重要性を訴えている。

1. はじめに

DCAM(Deployable Camera: 分離カメラ)とは, 惑 星探査機本体から分離された後に. 探査機から離れた 場所で可視光撮像を行い、無線通信によってデータを 探査機に送るというコンセプトを持つ,大きさ10 cm 程度の小型・分離型のカメラシステムのことである. IAXA エンジニアの澤田弘崇が中心となって開発し. 現在までDCAM1からDCAM3までの3機が実際に探 査機に搭載された. DCAM1・DCAM2はソーラ電力 セイル実証機IKAROSの本体から放出され、宇宙空 間でIKAROSが正しく帆を張ったかどうかを確認す る役目を果たした. DCAM3は小惑星探査機 Havabusa2に搭載されて、同じく探査機から分離され る SCI (Small Carry-on Impactor: 衝突装置) [1] が小惑 星衝突実験を行う様子を間近で観測する役目を担った (図1). この時, Havabusa2本体はSCIの爆発片や衝 突イジェクタの直撃を避けるために小惑星の裏側遠方 に退避するので、衝突の瞬間を観測することができな

1. 神戸大学

- 3. 高知大学
- 4. 千葉工業大学
- 5. 産業医科大学

い. DCAM3は衝突~イジェクタ飛散の様子を確認す る唯一の手段である.

DCAM3はその小さい筐体の中に、リアルタイム性 を重視したモニタカメラと、衝突イジェクタの詳細な 様子を記録するための高空間分解能な科学観測用カメ ラの2種類を内蔵していて、カメラの出力方式の違い から前者をアナログ系(DCAM3-A)、後者をデジタル 系(DCAM3-D)と呼んでいる.このうちデジタル系は Hayabusa2開発期間の後期になって追加で実装が決定 したもので、その生い立ちと開発には様々な困難と紆 余曲折があった.以下では、恐らくHayabusa2の中 でも最も特異な機器である、この「DCAM3デジタル 系」がこれまで辿ってきた道のりを紹介したい、それ は小型で目立たないが、科学観測機器としてゼロから 開発し、リスクの高い挑戦的機器として成功した、近 年では稀な機器である.このことは理学分野での観測 機器開発の重要性を投げかけている.

2. 事の起こり

2011年夏, Hayabusa2は既に計画が認可され, 探 査機や搭載機器の検討・開発が進んでいた. 特に小惑 星地下物質を掘り起こす目的で, Hayabusa初号機に は無いSCIの搭載と, それを使って行う衝突実験が大

^{2.} 宇宙航空研究開発機構

kazunori.ogawa@topaz.kobe-u.ac.jp



図1:DCAM3デジタル系が撮影したRyugu上でのSCI衝突実験前後の画像(2019年4月5日).(左)SCI作動の約185秒前.Ryugu 上空にSCI本体が見える.(右)SCI作動の約3秒後.着弾と同時にイジェクタが噴出し始める様子が確認できた.以降の 時間帯の画像は,順次探査機から地上へ送信して,解析を進めている.(画像のクレジット:JAXA,神戸大,千葉工大, 高知大,産業医科大)

きな目玉となっており,工学的な挑戦に注目が集まっ た.一方で,探査計画の理学目的とその重要性の検討 がまだ手薄であるとの指摘が宇宙科学研究所(ISAS) 内外から出されており,理学側の体制強化が課題であ った.これを克服するには国内の惑星科学者から更な る協力を得ることが必須だが,当時の固体惑星探査は 現在ほど学会に浸透しておらず,簡単ではなかった. それは日本の固体惑星探査が未だ駆け出しで, Hayabusa初号機は工学実験探査機として理学研究者 が少数参加するに留まり,次の月周回衛星Kaguyaが 固体惑星系の科学探査としてようやく成功を納めた状 態だったからである.科学コミュニティから見れば, 固体惑星探査はISASを中心とする一部の関係者が行 うもので,情報共有と協力関係が圧倒的に不足してい た.

この課題に対して目論んだことの一つは、天体衝突 現象の専門家で、かつ科学コミュニティに多くの繋が りを持つ研究者らをSCI衝突実験の理学検討に加える ことだった、その説得で鍵となったのは、DCAM3に よる衝突現象の科学観測である。SCIによって作られ るクレータの観測に加えて、衝突の瞬間に発生する衝 突イジェクタを詳細に観測できれば、それは世界的に 類を見ない新しいデータを得る絶好の機会で、SCIの 衝突実験に天体衝突科学の先鋭的な意義を与える。特 にイジェクタコーンの高さ・幅・角度を正確に知るこ とがクレータスケール則の検証と小惑星表層の物理状 態の推定のために必要だった(詳しくは[2,3]を参照さ れたい).しかし当時のDCAM3は,理学ではなく工 学を目的とした,いわゆる工学機器として設計が進ん でおり,限られた予算の中でDCAM1,2の設計を極力 流用し,SCI衝突弾丸の小惑星着弾の有無を確認する 目的に特化したカメラ(現在のアナログ系)のみの構成 となっていた.これではイジェクタの詳細観測には撮 像性能が足りない.斯くして,緊急にイジェクタの科 学観測に耐えるカメラの検討を始めることになった.

3. 検討と提案,動乱,搭載決定まで

新しいカメラシステムには、高解像度のモノクロ CMOSイメージセンサと高性能レンズを使い、また 無線通信にはその画品を落とすことなく探査機に伝え る高速デジタル通信を採用する方針として、これらの 概念検討を急ピッチで進めて搭載を提案することにな った.しかしこの時点でDCAM3は全体の基本設計を 終えていたので、その全てをひっくり返す提案が容易 に承諾されないことは想像に難くない、事実、これに はDCAM3の開発責任者である澤田はもとより、プロ ジェクト全体が難色を示し、大変に揉めた、新カメラ の検討チームは、前述の通りデジタルカメラシステム の搭載がHayabusa2理学の強化の要だと信じて、覚



図2: Hayabusa2衝突実験の弾丸射出時におけるSCI, DCAM3, 小惑星の位置関係.



図3: DCAM3分離カメラ部の構造. 突起部を除く円筒形筐体のサイズは Φ80 x 78 mm.

悟を持って主要関係者のもとに日参し、時には「理学 こそ正義」と揺すったり、時には泣き落としながら、 あの手この手で説得と調整を試みた、何とも迷惑な話 であったと思う、しかしその実は、澤田こそ一見意に 介さない姿勢の裏で理学側の度を超えた提案を真面目 に検討し、現実的な解を模索していたのである。

当時, 我々の取れる道は3つあった. すなわち(a) 既存のDCAM3を全て撤廃して新しいカメラシステム に置き換える. これはシンプルで電気設計がしやすく, サイズ・重量も節約できるが、ほぼ全てが新たな設計 になる.(b)DCAM3を拡張して新しいカメラシステ ムと無線通信機を追加する.これは構造が複雑でサイ ズ・重量が増えるが、新旧カメラが目的の一部を共有 する冗長系になる.あるいは(c)あきらめる.方針は しばらく(a)と(b)の間で揺れた.どちらを選択する にせよ、それまで積み上げたものの大部分を崩すこと になるので、関係者全員の目的意識を徐々に同じ方向 に向くよう修正していく中で、明に暗に多くの葛藤と 攻防があったことを覚えている. 無数の調整と数回の 有識者会議を経て,既存設計の一部を流用でき,また 冗長性を持つことを評価して,最終的に上記(b)を採 用することになった. さらに,カメラと無線通信の方 式の違いにより既存系統をアナログ系,新しい系統を デジタル系と呼び分けて,両者は筐体と電源のみを共 有ながら完全に独立な電気系統を持つこととした.

最後の山場は、デジタル系の追加搭載と、それに伴 うDCAM3の抜本的な設計変更をプロジェクトに正式 に認めてもらうことである.これにはDCAM3の詳細 設計審査(CDR)まで待たねばならなかった.デジタ ル系の科学的重要性の浸透に時間を要したことと、新 しいDCAM3の技術的成立性が不透明だったことが理 由である.これらの説明のため審査会でDCAM3チー ムが準備した資料は600ページ以上に及んだ.このよ うな経緯を経て、2013年の始め、新しいDCAM3の 搭載がついに正式に決定した.

4. 苦難の設計-あと100ミクロンだけ

DCAM3は複雑なシステムである。分離される小型 カメラユニットには電源系.アナログ系・デジタル系 それぞれのカメラ・制御部・無線送信機・アンテナが あり、自動観測や画像圧縮の機能なども持つ、探査機 本体の側では、カメラユニットを比較的高速(0.7 m/s)に分離・放出して、同時に姿勢安定用のスピン を与える分離機構を始め,受信アンテナ,無線受信機, システム全体の制御ユニットと大容量データストレー ジがあり、自動シーケンスやメモリパトロールの機能 も持つ. サンプラホーンモニタカメラ(CAM-H)も DCAM3アナログ系の一部である。DCAM3は探査機 本体から分離後、分離カメラ側と探査機側の各コンポ ーネントが息を合わせて自動で衝突現象の撮像を行な っていく.このようなシステムにデジタル系を追加で 共存させたことはDCAM3全体で様々な課題を呼び起 こした.

デジタル系システム内の開発課題も無数にあったが、 その全てを紹介することは困難なため、以下にその中 の幾つかのエピソードを紹介する.特に初期の課題と なったのはSCIの視認問題である.まず図2にSCI弾 丸射出時のDCAM3の観測条件を示す.弾丸は指定時 刻にSCIの作動によって射出され、小惑星上の地球直 下点 ± 200 mの範囲のどこかに着弾する. DCAM3 は これを側面の約1 km 遠方から観測することになる. なお. 撮像した画像は探査機本体に順次無線送信され る. SCIとDCAM3は探査機本体からの分離時に初速 度誤差があるため、SCI作動時にはそれぞれおよそ図 に示す範囲のどこかに存在する. 科学目的のためには 弾丸の衝突角度を決定することが必要なので. DCAM3はこの範囲のどこに居たとしても、SCI作動 後のイジェクタコーンに加えて、作動直前のSCI本体 を視野に収めて検出できることが条件になる。しかし SCI本体は存在範囲が広い上に小型で検出が難しく. 加えてDCAM3は姿勢安定のために視線軸回りに約 100 deg/secで回転させるので露光時間を長く取ると 画像が滲んでしまう. そのため広角で明るく結像性能 が高い、かつ小型軽量な特別な光学系が必要だった. 最終的にこの部分はコスト配分を高めて、非球面レン ズを用いて設計・製作することで、視野角74°×74°. F1.7, 結像性能(2×2-pixels ensquared energy)>50 %をΦ30×43 mmの小型サイズで実現した.

同時に問題となったのは、やはり小型化だった.探 査機全体の設計が既に進んでいたためDCAM3システ ムに与えられた体積は変更できない. 前述の通りアナ ログ系・デジタル系の同居を方針としたので、特に分 離するカメラの内部では、電池を共有しつつ、光学系、 イメージセンサ,電源用基板,制御用基板,通信用基 板のアナログ系・デジタル系の2セット分を直径7 cm の円筒形の筐体内に配置しなければならない(図3). 光学系とセンサは必要な撮像性能を満たす以上は小型 化に限度があるので、課題は電子基板の小型化に集約 される.これは実際には開発期間.開発コスト.基板 のノイズ耐性・放射線耐性とのトレードオフになるた め、全体配置を調整しながらサイズの落とし所を探る 作業である.これは協力メーカ、またアナログ系側と の膨大な調整と試行錯誤を要する、最も苦労した課題 になった. 最終的には、 筐体設計を担当する澤田に円 筒形筐体の直径を8 cmに拡大することを許容しても らい何とか収めることができたが、終盤では「あと 100ミクロンだけください」などと涙ながらに嘆願す ることになった。出来上がった電子基板は端をヤスリ で削るなど、ミクロンオーダーまで小型化に務めた.

厳しい小型化と低コストの要求のため,デジタル系 の主要な電子部品には宇宙グレードではなく産業用部 品を用いた. これは電子基板の小型化・省電力化に有 効だが、一方で幾つかの問題への対処が必要となる、 その一つは耐環境性(特に放射線への耐性)の検証と保 証が不十分なことである。 基板設計・製作に当たって は全ての電子部品に対して独自に放射線照射試験を行 って耐性を確認したが、偶発的に発生することが避け られないラッチアップ¹とアップセット²のリスクに対 しては,発生確率を試験で確認したのち,設計で対処 した. ラッチアップに関して、DCAM3はSCI衝突の 前後数時間のためだけに存在する機器で、この間は何 が起きても観測を停止するわけにはいかない. そのた め電源部に過電流検知回路を追加して、ラッチアップ 発生時は自動で電源停止・再起動されるようにし、ま た自動観測中の状態を常に不揮発メモリ記録しておき. 再起動されると観測シーケンスの続きを自発的に再開 する機能を実装した、アップセットに関しては、まず デジタル系は数時間の観測で1 GB以上のデータを得 る. 探査機本体のデータレコーダは容量が小さく使用 できない上,全てを地球に送信するには長期間必要な ので、独自に大容量の不揮発メモリを持たせた、その 上で、データを長期保存する間にアップセットのリス クがあるため、全データを三重冗長で記録し、さらに 多数決でビット反転を修復するメモリパトロール機能 を実装した.

新しいDCAM3の設計では1つだけ妥協しなければ ならなかったものがある.それはアンビリカルケーブ ルである.もともとDCAM3は「可能な限りシンプル に」というコンセプトから,分離カメラ部と分離機構 との間は電気的な結線(アンビリカル)が無く,分離時 にマイクロスイッチが解放されることで初めて内部電 池から通電される仕組みになっている.つまり,分離 カメラは打ち上げから分離までの間は電源を投入でき ず,軌道上での動作テストや高性能カメラの撮像など もできない.新しいDCAM3はデジタル系を加えて複 雑化・高機能化・高性能化したため,この点はバラン スを欠く.しかしHayabusa2の中でDCAM3に与え られたリソースと開発期間では,アンビリカルケーブ ルと,それを分離前に分断する機能はどうしても追加 することができなかった. その結果, 衝突観測時の動 作を打ち上げ前に全て精密に決定して, 分離後にそれ が自動駆動されるように仕込む必要に迫られただけで なく, DCAM3の正に「1か0か」という挑戦的な特性 をより色濃いものにした. しかしそれ以上に, 打ち上 げから本番の観測までの4年間,「果たして本番でカ メラが正常に起動してくれるのか」と心臓を掴まれる 思いで心配し続けなければならないことが精神衛生上 の大きな負担になった.

DCAM3の再設計はHayabusa2の他の機器へも影響 を与えている.その一例は図4に示すSCI側面に巻き つけた拡散反射膜である.この部分はもともと多層断 熱膜(MLI)の金色の鏡面反射面だったが、これでは太 陽光の当たり方が偶然良好にならない限り宇宙空間で 真っ黒くなり、DCAM3からは視認できない.そのた めSCIの側面をベータクロス(国際宇宙ステーション 外面に使われている白色の素材)で覆うように何とか お願いすることになった.これはSCI開発責任者の佐 伯孝尚が「腹巻」と称して以降、そのように呼ばれて いる.

このような数々の課題を克服して,新しいDCAM3 は明確な理学・工学目的を達成するために改めて最適 化され,より確かな科学観測機器に生まれ変わったの である.

完成まで-木曜日の朝4時に

DCAM3の開発では、試作機やフライトモデルを製作した後の機能・性能の検証試験も大きな山場の連続だった.その理由は5つある.(a)後発のため開発期間が一般的な機器の半分だったこと,(b) DCAM3が「JAXAインテグレーション機器」であったこと,(c) ほぼ全ての電子部品が産業用グレードであったこと,(d)科学観測用カメラを持つこと,(e)コンポーネント数が多く構成が複雑だったこと、である.

それぞれについて、(a)は言わずもがな、(b)につ いて、DCAM3は一部の設計・製作に加えて組み立て や検証試験の多くを、協力メーカの手を借りずに機器 開発チームが行うことにしていた。そのため必然的に 機器担当研究者に多くの作業負荷がかかった。この方 式は小型機器の低コスト化や柔軟な開発に有効だが、 問題が発生した時の責任分担が曖昧になるため近年は

高エネルギー粒子の衝突によって、半導体内に意図しない電流パスが発生して過電流が流れる現象。多くの場合は一旦電源をOFFにすれば解消する。

^{2.}メモリ内に高エネルギー粒子が当たり、ビットの1と0が反 転する現象.



図4: DCAM3からの視認性の向上のためSCIの側面に追加され たベータクロス(黒い矢印).通称「腹巻」.

避ける傾向にある。

恐らく今後の中型・大型の惑星探 査ではこのスタイルは無くなり、DCAM3は研究者ら が自分たちでネジを締めた最後の科学観測機器になる かもしれない. (c)から(e)は互いに関連している. (c) については前章で述べた内容に加えて、特別に設計・ 製作した光学系でも、使用したい硝材の幾つかに放射 線耐性が不明なものがあった(レンズは放射線により 着色する)ので、このための放射線耐性確認試験を行 う必要があった[4].(d).(e)について、製作後に必 要となる検証試験の数は、大雑把には「コンポーネン ト数×機能・性能・耐環境性の設計要求項目の数 | と なる. DCAM3システムは構成コンポーネントの多さ に加えて、さながら1つの超小型衛星のような機能を 持っており、さらには科学を目的とした観測に特有の 精密な性能要求があったため、試験の数は一般的な機 器の数倍に及んだ.

機器開発の多くの場合で共通ではあるが,特に DCAM3では上記の状況が相まって,開発終盤は時間 との戦いだった.その中で特に印象に残っているのは 熱真空試験である.この試験では,真空環境に晒した 機器に温度変化を与えて,所定温度での動作,温度変 化の耐性,熱設計との整合性などを確認する.とにか くスケジュールが押していたため,1時間単位で定義 した作業要求に従って24時間体制を取り,準備を含 めて1ヶ月以上の間,コンボーネントを入れ替えなが ら休みなく試験を継続した.ちょうどこの頃だったと 思うが,澤田に次回の打ち合わせを申し込んだ際,「木 曜日の朝4時なら」という返事が返って来たので快諾 したことがある.とりわけ珍しいことではないかもし



図5:熱真空試験(熱バランス試験)にて真空槽内に分離カメラを 設置した様子.

れないが、その頃のスケジュールの逼迫具合を象徴す る出来事として記憶している.試験方法も特徴的で面 白く、図5は分離カメラを真空槽の中に設置した時の 写真である.筐体表面の熱特性を検証するために宇宙 空間で浮遊した状態を模擬する必要があったので、市 販の釣り糸で吊ることを考案して試験を行った.見た 目があまりにも心臓に悪いということで、筐体の下に 落下防止のための防護ネットが取り付けられている.

最終的に、アンビリカルケーブルの心残りを除いて DCAM3の全ての製作と検証試験は問題無く完了させ ることができた.図6はDCAM3全コンポーネントの フライトモデルの写真である.開発の成果と検証試験 の結果の詳細については、アナログ系は[5]、デジタ ル系は[6]をそれぞれ参照されたい.また科学観測に 重要となるデジタル系カメラの性能検証試験の詳細な 結果は[7]にまとめた.この後、DCAM3は種子島宇 宙センターにて無事Hayabusa2の探査機本体に取り 付けられ、地上での最後の動作試験を終えて、2014 年12月3日に小惑星Ryuguに向けて打ち上げられた.

6. おわりに-挑戦的な科学観測機器

Hayabusa2が現在までに得たデータの科学的価値は 大きいが、その価値を生み出す鍵となったのは、多く が推進や姿勢制御などの探査機本体に関する工学研究 課題への取り組みだった。その中で、デジタル系を組 み入れたDCAM3は、機器のコンセプト自体に多くの リスクを抱えながらも、明確な科学目標に従ってゼロ から開発を行って、様々な技術課題を克服して成功を



図6: DCAM3システムの構成コンポーネントのフライトモデル. それぞれ「DCAM3」とあるのが分離カメラ部と分離機構, DCAM3-ANTはアナログ系受信機とデジタル系受信機を内包し,上部にアナログ系用の受信アンテナを乗せたもの, DCAM3-ANT2はデ ジタル系用の受信アンテナ, CAM-Hはサンプラホーン用のモニタカメラ, CAM-CはDCAM3システム全体のための制御ユニット でアナログ系用制御基板とデジタル系用制御基板が入っている.

収めた. 近年の観測機器の中では数少ない,新しいコ ンセプトや新しい技術開発を伴う挑戦的な機器だった と言える. その結果として,SCIと共に,世界に全く 類を見ない希少な,独創性の高い科学データを得るこ とが出来た.同時に,理学研究者が膨大な開発作業を 担当したことは,観測機器開発を担当できる次世代人 材の育成に極めて効果的だった.

惑星探査機の観測機器から得られるデータの価値や 希少性は、技術的課題を克服した先に生まれる.これ は地上の室内実験やシミュレーションなど、技術を伴 う理学研究でも同様である.国内のこれまでの固体惑 星探査の多くは、工学技術の挑戦を目的として工学研 究者が牽引しており、得られたデータの革新性や科学 的価値はそれらの努力によって担保された部分が大き い.一方で,搭載される科学観測機器の方は確実性(低 リスク)と低コストを重視する傾向にあり、特に近年 はこれが顕著である.その結果、選定される科学観測 機器は、挑戦的な要素をできるだけ排除して、過去に 宇宙実績のある機器に最低限の改良を施したものや、

あるいは国外の有力機器をそのまま導入したものが主 力になっている.また、より高いレベルの観測機器を 実現するための基礎研究、基礎開発といった活動も下 火で、それらと先端の理学研究とのコネクションも十 分ではない.このままでは、固体惑星探査における国 内の観測機器のレベルが停滞し,世界的に見劣りする ものになる.今後,探査技術が成熟していくにつれ, 特に月・火星など到達が比較的容易な領域においては, 探査機本体の技術課題は相対的に減少し,反対に新し いコンセプトや技術を伴う観測機器,過去に無い高い 性能を持つ観測機器など,挑戦的な科学観測機器が価 値の高いデータを生む鍵となって,その重要性がます ます高まることが予想される.これに対応するために は,観測機器開発に対する腰を据えた取り組みが必要 だろう.

国内では伝統的に,科学観測機器の開発の大部分を 理学研究者が担ってきた.これには賛否あるが,少な くともこの方式には,観測機器で最も重要な問いであ る「何のために,何をどのような精度で知りたいのか」 の答えが開発者自身に内在する点で大きな利点があり, その情熱が効果的に作用して,前例に無い優れた観測 機器を実現する可能性を秘めている.惑星科学研究者 コミュニティの中で上記の問題と観測機器開発の重要 性をより強く認知して,(研究室内で優れた実験装置 を構築することと同じように)理学研究の一部として その活動が活発になることを願う.それはやがて,日 本の惑星探査が世界をリードし,さらには国際協力の 中で日本が重要な役割を果たすことにも繋がる.

謝 辞

DCAM3デジタル系の立ち上げと実現は、JAXAの 故・飯島祐一さんの固体惑星科学探査にかける情熱が 結実したものである.

DCAM3デジタル系の開発は、明星電気株式会社の 奈良修さん、田中紀子さん、保坂正光さん、高橋宏さ ん、水本訓子さん、安藤享平さん、谷本和夫さんと技 術者の皆様、株式会社日放電子の技術者の皆様、光学 系の開発はフォトコーディングの池田優二さんに支え られた.通信系の開発ではJAXAの戸田知朗さん、川 原康介さんに多くのご支援を頂いた、カメラ性能試験 ではJAXA誘導・制御グループの皆様にご協力頂いた. 環境試験ではJAXAの星野健さん、坂本和敏さんに ご協力を頂いた.DCAM3デジタル系の搭載と運用は 多くのHayabusa2プロジェクトメンバのご協力で成 し得たものである.皆様に深く感謝申し上げたい.

参考文献

- [1] Saiki, T. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 165.
- [2] 荒川政彦 ほか, 2013, 日本惑星科学会誌 22, 152.
- [3] Arakawa, M. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 187.
- [4] 石橋高 ほか, 2016, 宇宙科学研究所報告, JAXA-RR-15-005.
- [5] Sawada, H. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 143.
- [6] Ogawa, K. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 125.
- [7] Ishibashi, K. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 213.

遊星百景 その17 ~スプートニク平原~ 鎌田 俊一1

「生き方や内面はその人の顔に出る」などと言われ ますが、これは固体天体についてもよく当てはまりま す. つまり、地形からはその天体の歴史や内部構造に 関する情報を得ることができます. 今回は、「これで もか!」というほど多様な情報をもたらしてくれた、冥 王星のスプートニク平原を取り上げます.

スプートニク平原は冥王星の「白いハート」の左半 分にあたり、1300×900 km 程度の楕円型の地域です (図1左). 冥王星の大部分は他の氷天体と同様に多数 の衝突クレータで覆われていますが、この平原だけは 例外です(図2)[1]. 衝突クレータは一つも確認されず、 代わりに細く浅い溝が多数走り、特徴的な多角形模様 をつくっています. この平原は柔らかい固体窒素で覆 われていることから[2], それが対流することで衝突 クレータが消し続けられていると同時に多角形模様を 形成していると考えられています[3].

周囲と比較してこの平原に大量の窒素が蓄積してい ることから、大気進化に関する示唆が得られます. 冥 王星は窒素を主体とする薄い大気(表面気圧は~10 μ bar)を持っており、昇華によって地表と大気の間で物 質交換が起きていますが、固体窒素で覆われたスプー トニク平原はまさに中心的役割を果たす場所です. こ のスプートニク平原は、実は巨大な盆地になっていま す(図1右). このことから、冥王星ではこの盆地の上 空で選択的に「窒素の雪」が降り続けていることが示 唆されます[4,5]. 直感的には降雪は盆地ではなく山で 起こるように思いますが、これは冥王星の大気が非常 に薄く対流圏が発達していないことが原因と考えられ ています[4].

また、スプートニク平原が巨大な盆地であることとそ の位置から、内部構造に関する示唆が得られます. こ の巨大盆地は、赤道、しかも衛星カロンとの潮汐軸の 近くに存在しています(図1左). 盆地というのは周囲 に比べて物質が少ないわけですから、そこでの重力は 周囲に比べて小さくなると思われます。しかしそのよ うな重力分布を持つと自転が不安定になり、盆地が極 に向かうように天体が回転してしまいます. このよう な回転は「真の極移動」と呼ばれ、どの天体でも起こ ると考えられており、 冥王星も例外ではありません. ということは、この巨大盆地では重力は弱いのではな く強いのです、この「強い重力を持つ盆地」というのは、 実は月でも多数見つかっており、「マスコン盆地」と 呼ばれています、このことが、内部構造についての情 報を与えてくれます、つまり、地下には分厚い海があ り、しかも盆地の下では内部海が分厚く、逆に内部海 の上にある氷地殻は薄くなっていると考えられるので す[5.6]. そして、そのような内部構造を長期間維持す るためには、氷地殻と内部海の間にガスハイドレート の薄い層が必要なことも分かってきました[7]. さらに, この地下のガスハイドレート層がメタンや一酸化炭素 の貯蔵庫となることで、極端に窒素に富んだ表層と大 気を作り出していることも分かってきました[7]. このように大気・表層・内部の歴史を教えてくれるス プートニク平原は、まさに「冥王星の生き方と内面を 映した顔 | と言えるのではないでしょうか.

引用文献

- [1] Stern, S. A. et al., 2015, Science 350, aad1815.
- [2] Grundy, W. M. et al., 2016, Science 351, aad9189.

^{1.} 北海道大学大学院理学研究院 kamata@sci.hokudai.ac.jp



図1:スプートニク平原の特徴.(左)見た目(カラー強調).スプートニク平原は「白いハート」の左半分に相当し,その中 心はカロンとの潮汐軸付近に存在する.(テクスチャ画像:NASA/JHUAPL/SwRI)(右)地形図.スプートニク平原 は巨大な盆地になっている.



図2:スプートニク平原. 衝突クレータは一つもなく,代わりに対流セル模様が見えている. (PIA20007. NASA/JHUAPL/SwRI)

- [3] McKinnon, W. B. et al., 2016, Nature 534, 82.
- [7] Kamata, S. et al., 2019, Nat. Geosci. 12, 407.
- [4] Bertrand, T. and Forget, F., 2016, Nature 540, 86.
- [5] Keane, J. T. et al., 2016, Nature 540, 90.
- [6] Nimmo, F. et al., 2016, Nature 540, 94.
第11回月惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英¹, 晴山 慎², 園家 俊³, 平田 成¹, 本田 親寿¹, 小川 佳子¹, 天野 香菜⁴, 遠藤 雅巳⁵, 荻島 葵⁶, 清水 雄太⁷, 森田 晃平⁸, 神田 志穂⁶, 小川 武⁵, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 第11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『機械学習による画像の自動 分類』でした。月の探査機画像データを主な対象として、機械学習を用いて自動的に分類する手ほどきをお こないました。受講生の内訳は5大学(東北大,大阪大,東京大,日本大,会津大)で,講師と併せた参加機 関数は6,参加者数は18名となりました。ここ数年では最も多い部類になります。座学は,晴山氏より月地 質図の概論が講義され,出村から写真(テクスチャ)に基く地質分類の事例紹介がありました。続いて,園家 氏から機械学習の基本が解説がありました。本実習会は、日本惑星科学会と神戸大CPSのご支援を頂きま した。

第11回目となった月惑星探査データ解析実習会で は、機械学習による画像の自動分類をテーマに取り上 げました.月の探査機画像データを主な対象として、 機械学習を用いて自動的に画像を分類する手ほどきを おこないました.例年通り、必要な知識とソフトウエ アの導入を初日に行なって、残りの会期中受講生が実 際に手を動かし、最後に成果発表するスタイルで行い ました.月惑星科学のデータ解析のみに留まらないテ ーマだったためか、実施場所である会津大学の学部1 年生からも参加がありました.内訳は5大学(東北大、 大阪大、東京大、日本大、会津大)で、講師と併せた 参加機関数は6、参加者数は18名となりました.ここ 数年では最も多い部類になります.

座学は,晴山氏より月地質図の概論が講義され,出 村から写真(テクスチャ)に基づく地質分類の事例紹介

- 2. 聖マリアンナ医科大学
- 3. 会津大学コンピュータ理工学研究科
- 4. 東北大学
- 5. 会津大学コンピュータ理工学部
- 6. 大阪大学
- 7. 東京大学
- 8. 日本大学
- demura@u-aizu.ac.jp



図1:実習会集合写真.

がありました. 続いて, 園家氏から機械学習の基本が 解説され, 事前周知されていた機械学習環境が構築で きているかの確認と, 不十分な場合は受講生一人ずつ のフォローがありました. 画像ベースの機械学習があ っさり実行できたことに驚いた受講生もいました. ほ とんどの受講生にとって機械学習による解析は初めて だったのにも関わらず, 最後の成果発表会は非常に質 の高いものになりました.

本実習会は、参加者の旅費助成で日本惑星科学会、 講師の旅費助成で惑星科学研究センター(CPS)のご支

^{1.} 会津大学宇宙情報科学研究センター

援を頂きました.この紙面を借りて,深く御礼申し上 げます.

開催日程:2019年3月4日 12:20~3月6日10:30
開催場所:会津大学研究棟3階M11/M12教室 **主** 催:月惑星探査育英会

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-11

- 講 師:晴山 慎(聖マリアンナ大),出村裕英(会 津大),園家 俊(会津大)
- 世話人:出村裕英・平田 成・小川佳子 (会津大)
- **当日参加者**:18 名(講師・世話人5名, 受講生13名. 受講生の内訳は,修士4,学部9)

成果発表した受講生とその内容(発表順,当時の所属)

- ・天野香菜(東北大)『テクスチャを用いた Ceresの表 面年代分類』
- ・遠藤雅己・粟森達朗(会津大)『LROC 地質分類』
- ・猪俣恭久・手代木研史(会津大)『月面のボルダーの 検出』
- ・梁取悠史(会津大)『機械学習モデルのチューニング』
- ・荻島 葵(大阪大)『月極域の地質分類』
- ・清水雄太(東京大)『Phobosの地形×色のマルチ分類』
- ・森田晃平(日本大)『流星線の端点検出』
- ・神田志穂(大阪大)『NEAs表面Boulderの形状分類』
- ・小川 武・三瓶美鈴(会津大)『機械学習による月面 画像の自動認識』
- ・田辺直也(東京大)『リュウグウ画像を用いたボルダ ー存在度の機械判別』

講師ならびに受講生から寄せられた感想等

晴山慎講師:今回の講習会には多くの学部生が参加され、その中は月・惑星科学に馴染みの薄い1年生や2年生も含まれており、機械学習の人気の高さを実感しました.そのような低学年の学生たちも参加されていることから、講習会初日に月の基本的な知識を講義した上で、各自の講習会中の解析テーマを決



図2:晴山講師の講義.



図3:出村講師の講義.

定していただきましたが,積極的に参加し,議論を 行う姿勢に感心しきりでした.最終日の成果発表で も、十分ではない解析時間にもかかわらず成果があ り、それをわかりやすく説明をされていることが印 象に残りました.機械学習の威力を見せつけられた とともに、参加された学生たちの将来を期待した講 習会となりました.

清水雄太さん:この度第11回惑星探査データ解析実 習会参加にあたり、日本惑星科学会の皆様から旅費 の補助をいただき、大変有意義な時間を過ごすこと ができました.誠にありがとうございました、3日 間通して、機械学習による画像の自動分類を自分の 研究テーマに応用し、ある程度の成果と問題点を洗 い出すことができました。テーマの決定から技術的 な問題点解決まで、あらゆる点で世話人の皆様にお 世話になり、とりわけ機械学習の技術の部分で未熟 な私にとって、質問に対して迅速にかつ正確にお答 えいただけた点が心強かったです、短期間の実習会 のため、2日目がかなり大変でしたが、一度最後ま



図4: 園家講師の講義.

でやりきるという会の方針は力をつける上で非常に 良いと感じました.ありがとうございました.

- 天野香菜さん:今回の実習では、いま惑星科学が迎え ているビッグデータの時代において、より効率的か つ客観的にデータを取り扱い、処理していく方法を ご教授いただいた.日頃は実験に携わっているため、 初めは不慣れな作業・考え方にかなり戸惑ったが、 世話人・参加者の方々にお力添えいただき、一連の 解析を体験することができた.参加者はコーディン グに詳しい方から惑星科学に明るい方まで様々で、 たいへん良い刺激を受けた.今後は作成したモデル の精度を高めるとともに、今回触れたような画像の 自動識別に限らず、普段の実験で得ているデータの 解析処理にも深層学習を応用したいと考えている.
- 神田志穂さん:普段は実験を行っておりプログラミン グについては全く明るくない中で,自身の実験を現 実の探査と繋げる,また実験結果の画像解析に活か す事ができればと考え今回の実習への参加を決めま した. CNNを用いた画像分類を学び,自ら手を動 かし体験する事が出来ました.実習を行う際,世話 人,講師の方々には丁寧なご指導やアドバイスを頂 き,初心者ながら得る物の多い実習にする事ができ たと考えております.コンピュータを用いて研究を 行う学生との交流は新鮮で,惑星科学を専攻する学 生とは異なる着眼点や実習の進め方を知る事が出来 ました.
- 荻島 葵さん:機械学習を学ぶのもPythonに触るの も初めてという完全初心者でしたが、大変勉強にな りました.今回はCNNについて学びましたが、と ても有用で興味深い手法でした.主に実験を行なっ



図5:実習風景1.

ているため自分の研究に取り入れられるかどうかま だわかりませんが、今のうちに知って手を動かすこ とができて良かったと思っています.また同年代の 惑星科学の研究を行なっている人たちと交流できた ことでモチベーションが上がりました.世話人・講 師の皆様方には大変お世話になりました.ありがと うございました.

森田晃平さん:機械学習を学べる機会が少なく,今回 実際のデータをいじりながら学べるということでこ れしかないと思った.さらに自分の研究は観測デー タを扱うのでそれに適用できないか見極めるために 受講した.機械学習のことはもちろん,それを実際 いじることで3日という短い期間で自分の研究への 応用まで昇華させることができるとは正直思わなか ったがそれができた.それによって自分の研究と機



図6:実習風景2.

械学習の相性を講師の先生方と話し議論できた.非 常に良いツールを得られて良かったと思った.機械 学習の精度を高めていく事と別のところにも機械学 習を適応して、どんどん解析をしていきたい.

- 遠藤雅己さん:この度実習会に参加させていただき, とても有意義な時間を過ごすことができました.こ の場を借りてお礼を申し上げます.
- 小川 武さん:今回は初参加でしたが大変良い経験を させていただき有難うございました.



●秋季講演会

- **日 程**:2019年10月7日(月)~9日(水)
- **場**所:京都産業大学神山ホール(〒603-8555 京都 市北区上賀茂本山)
- 講演数:□頭76件(最優秀発表賞選考7件を含む),□ 頭発表付きポスター38件,ポスターのみ76件(最 優秀発表賞選考7件を含む),最優秀研究者賞受 賞講演2件
- *会場にWi-Fi設備はございません.eduroamは利用 可能です.それ以外でインターネット接続環境が 必要な方は各自ご用意下さい.



京都産業大学へのアクセス

京都駅から,地下鉄で「国際会館駅」下車 → 京都バ

1. 京都産業大学

kawakthd@cc.kyoto-su.ac.jp

ス(40系統)で「京都産業大学前」下車(所要時間約 10分),もしくは地下鉄で「北大路駅」下車 → 市 バス(北3号系統)または京都バスで京都産業大学 前下車(所要時間約20分).

【バス増便の予定について】

会期中,「国際会館駅」と京都産業大学との間 でバスの増便が行われる予定です.「北大路駅」 と京都産業大学との間でのバスの増便は行われま せんので,行き帰りともになるべく「国際会館駅」 発/行のバスをご利用ください.また朝は8:45よ りも前に「国際会館駅」もしくは「北大路駅」を出 発するバスは非常に混み合いますので,可能な限 り8:45以降のバスへのご乗車をお願いいたしま す.

●プログラム概要

- 〇 10月7日(月)
- 9:00 開場·受付開始
- 9:40 LOC挨拶
- 9:45 特別セッション 最優秀発表賞選考
- 11:50 **口頭発表セッション** 太陽系外縁天体・氷天 体・アストロバイオロジー
- 13:12 2分ポスター紹介セッション
- 13:42 昼食
- 14:40 口頭発表セッション 小惑星・流星・惑星大気
- 16:50 2分ポスター紹介セッション
- 17:36 ポスターセッション

○10月8日(火)

- 9:00 開場·受付
- 9:30 口頭発表セッション 月
- 11:16 **ロ頭発表セッション** はやぶさ2・小惑星リ ュウグウ
- 13:04 昼食
- 14:20 **ロ頭発表セッション** はやぶさ2・小惑星リ ュウグウ
- 15:40 総会
- 16:50 最優秀研究者賞受賞講演
- 18:30 懇親会

○10月9日(水)

- 9:00 開場·受付
- 9:30 口頭発表セッション 火星
- 11:28 **口頭発表セッション** 衝突現象・惑星形成 13:16 昼食
- 14:30 **口頭発表セッション** 惑星形成・衛星形成
- 15:52 **口頭発表セッション** 系外惑星
- 17:04 閉会

●口頭発表

最優秀発表賞選考は15分講演(3分間の質疑時間お よび交代時間を含む),一般講演は12分講演(3分間の 質疑時間および交代時間を含む),ポスター紹介は2 分間(質疑時間無し)です.時間厳守でお願いします. 以降のプログラムでは講演番号,開始時間,表題,講 演者を掲載しています.

●ポスターセッション

ポスターは10月7日(月)9:00 - 10/9日(水)17:15の 間, 常時掲示可能です.以降のプログラムでは, 講演 番号,表題, 講演者を掲載しています. 10月7日(月) 17:36 - 19:00でポスターセッションの時間を設けて います. 一般ポスターのコアタイムは, 奇数番号が 17:36 - 18:20, 偶数番号が18:20 - 19:00です.

《口頭発表プログラム》

10月7日(月)

- 9:40 LOC委員長挨拶
- **特別セッション** 最優秀発表賞選考 (座長:黒澤 耕介)
- O1 9:45 火星の化学組成 吉崎 昂(東北大)
- O2 10:00 高空隙ダストの引張強度と原始惑星系
 円盤内での回転による破壊 辰馬 未沙
 子(東大)
- O3 10:15 太陽系探査を目指したOrbitrap型質量 分析器の開発 川島 桜也(東大)
 10:30 休憩(10分)
- O4 10:40 太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化 荒川 創太(東工大)
- O5 10:55 原始惑星によって駆動される3次元ガス 流構造がペブル降着に及ぼす影響 桑 原歩(東工大)
- O6 11:10 地球の揮発性元素組成の起源:コア形成と天体衝突による大気散逸の影響
 機庭 遥(東工大)
- O7 11:25 土星衛星EnceladusとMimasにおける
 メタンハイドレートの形成と熱進化
 西谷 隆介(阪大)
 - 11:40 休憩(10分)

太陽系外縁天体・氷天体・アストロバイオロジー

(座長:大野 宗祐,木村 淳)

- O8 11:50 恒星掩蔽観測によって明かされる太陽系外縁天体 有松 亘(京大)
- O9 12:02 冥王星の窒素氷の昇華と凝結による反 射率分布の変化 松井 弥志(阪大)
- O10 12:14 モンゴル塩湖の凍結時における氷への 塩取り込みと太陽系氷天体への応用 依田 優大(東工大)
- O11 12:26 エウロパ表面での塩化物酸化過程に関する実験的・観測的研究 丹 秀也(東大)
- O12 12:38 粘土鉱物存在下での蒸発乾固を用いた
 核酸塩基とリボースからのヌクレオシ
 ド合成 橋爪 秀夫(NIMS)
- O13 12:50 大気球を用いた成層圏微生物採取実験:Biopauseプロジェクト 大野 宗祐(千)

247

葉工大)

13:02 休憩(10分)

2分ポスター紹介 (座長:佐々木 貴教)

- P1 13:12 月惑星探査アーカイブサイエンス拠点 に令和元年度認定された会津大学宇宙 情報科学研究センターについて 出村 裕英(会津大)
- P2 13:14 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam による木星L5トロヤ群小惑星のサイズ分布 測定 上畑 琴美(神戸大)
- P3 13:16 小惑星探査画像の画素単位DBによる解析と小天体地理情報システムAiGISと
 連携した結果の可視化 平田 成(会津大)
- P4 13:18 小惑星セレスへのアンモニア氷の供給 からみるパラメータ制約 奈良 悠冬(東 工大)
- P5 13:20 地球接近天体2012TC4母天体における 衝突イベント時期の推定 浦川 聖太郎 (スペースガード協会)
- P6 13:22 衝突閃光の実験的研究:真空度と発光 メカニズムの関係 布施 綾太(日大)
- P7 13:24 アーク加熱風洞を応用した流星体の機 械的強度と熱伝導率が流星アブレーシ ョンヘ与える影響評価 大木 紘介(日大)
- P8 13:26 2018年ふたご座流星群に伴う月面衝突 閃光の低分散スペクトルII 柳澤 正久 (電通大)
- P9 13:28 67P/Churyumov-Gerasimenko彗星の密 度分布構造の推定 金丸 仁明(阪大)
- P10 13:30 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた分裂彗星核
 P/2016 BA14と252P/LINEARの可視
 光測光・分光・偏光観測 山形 稜(北教
 大)
- P11
 13:32
 木星氷衛星探査衛星 JUICE, 日本からの

 貢献 プロジェクトの概況、現状、そして展望
 笠羽 康正(東北大)
- P12 13:34 潮汐変形と位相の遅れを考慮した
 Ganymedeの強制秤動 小島 晋一郎(阪大)
- P13
 13:36
 ALMAアーカイブデータを用いたイオ

 大気の供給源の推定
 鈴木 達也(名大)

- P14 13:38 小規模衝突による傾斜地形緩和に関す る実験的研究 大村 知美(名大)
- P15 13:40 多孔質氷天体を模擬した雪のクレータ
 一形成実験:衝突溶融と衝突残留熱に
 関する研究 笹井 遥(神戸大)
 13:42 昼休み

小惑星・流星・惑星大気

(座長:杉山耕一朗,藤谷渉)

- O14 14:40 Aguas Zarcas (CM2) 隕石の有機物分析: Typical CM2 or not? 癸生川 陽子(横国大)
- O15 14:52 熱変成作用を受けたCMコンドライト Jbilet Winselwan隕石の加熱源について 藤谷 渉(茨城大)
- O16 15:04 非集積岩ユークライト中シリカ多形が 示す熱変成履歴 大野 遼(東大)
- O17 15:16 L5コンドライト隕石に対する衝突実験
 ~X線CT撮像による隕石内部クラックの3次元分布 道上 達広(近畿大)
- O18 15:28 地上観測・室内実験・6U超小型探査機
 を用いた月面衝突閃光の総合理解 阿部新助(日大)
- O19 15:40 京都大学 MU レーダと東京大学木曽観 測所 Tomo-e Gozen による微光流星同
 時観測 大澤 亮(東大)
- O20 15:52 DESTINY+ミッションにおける小惑星
 (3200) Phaethonのフライバイ撮像観測
 石橋 高(千葉工大)
- O21 16:04 ALMAを用いたタイタン大気アセトニトリルCH3CNにおける窒素同位体比の初計測と、銀河宇宙線由来大気化学過程への制約 飯野 孝浩(東大)
- O22 16:16 金星大気の平均子午面循環 高木 征弘 (京産大)
- O23 16:28 大学規模の太陽系地上観測所、その将
 来計画:東北大の場合 笠羽 康正(東北
 大)
 - 16:40 休憩(10分)

2分ポスター紹介 (座長:瀧川 晶)

P16 16:50 木星型惑星の大気における湿潤対流の

Grand Tackのような幅の狭い円盤は不 適 ソフィア リカフィカ パトリック (近畿大)

- P32 17:22 周木星円盤における光泳動:ガリレオ 衛星の軌道共鳴の起源に対するひとつ の説明 荒川 創太(東工大)
- P33 17:24 イジェクタ層分布と基盤岩衝撃変成に 基づくオーストラリア・アジアテクタ イトイベントの衝突地点推定 多田 賢 弘(東大)
- P34 17:26 火星巨大衝突により生じる衝突破片の 長期力学進化のN体計算 石城 陽太 (東大)
- P35 17:28 準惑星ハウメアのリング形成シナリオ の提案 角田 伊織(京大)
- P36 17:30 共鳴鎖にある惑星系の軌道不安定条件:
 中心星質量の進化 松本 侑士(中央研究院)
- P37 17:32 系外惑星大気中の雲形成における粒子 サイズ・空隙率分布の共進化 大野 和 正(東工大)
- P38 17:34 SPICAによる原始惑星系円盤からの複
 雑な有機分子輝線の観測予測 野村 英子(国立天文台)

17:36 ポスターセッション

奇数番号コアタイム/17:36-18:20

偶数番号コアタイム/18:20-19:00

19:00 終了

○10月8日(火)

- 月 (座長:嵩由芙子,諸田智克)
- O24 9:30 かぐや搭載スペクトルプロファイラ
 (SP)データから発見された水氷吸収プ
 ロファイルの解析 小野寺 圭祐(総研大)
- O25 9:42 月極域探査:ミッション概要と検討状況況 星野 健(JAXA)
- O26
 9:54
 月極域及び低緯度領域における表層温

 度シミュレーション
 嵩由美子(会津大)
- O27 10:06 着氷月模擬土壌の近赤外スペクトル観 測 荻島 葵(阪大)
- O28 10:18 月リモートセンシングのための人工火

禁止条件: NH3とH2Sの化学反応によ る NH4SH生成の場合 中島 健介(九大)

- P17 16:52 NH4SH 生成反応による対流抑制条件を
 念頭においた木星型惑星の雲対流の数
 値計算 杉山 耕一朗(松江高専)
- P18 16:54 近赤外エシェル分光器/PIRKA望遠鏡 による金星大気微量分子の観測 築山 大輝(大阪府立大)
- P19 16:56 10m 電波望遠鏡SPARTとALMA 12m-Array/ACA/TP同時観測による金星中 層大気の微量分子スペクトルの解析と 整合性の評価 冨原 彩加(大阪府立大)
- P20 16:58 Web地図技術を用いた大規模惑星大気
 数値シミュレーションデータの可視化
 松村 和樹(松江高専)
- P21 17:00月極域探査:既存データの課題と観測
要求要求大竹 真紀子(JAXA)
- P22 17:02 月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計
 画の搭載機器と観測計画の検討 岩田
 隆浩(JAXA)
- P23 17:04 月面探査車搭載型中性子検出器の開発 の現状 晴山 慎(聖マリアンナ医科大)
- P24 17:06 レーダによる月表層・小惑星内部探査 の計算機実験 熊本 篤志(東北大)
- P25 17:08 162173リュウグウ表面の高解像度画像 から探る岩塊の熱疲労 佐々木 晶(阪大)
- P26 17:10 リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒 標的に対するクレーター形成実験 山 本 裕也(神戸大)
- P27 17:12 火星 Web-GIS "Red Ace" におけるユー ザーによるスペクトルデータ管理 福地 裕範(会津大)
- P28 17:14 MMX 搭載近赤外分光撮像器
 MacrOmegaの観測計画と開発状況 岩
 田 隆浩 (JAXA)
- P29 17:16 岩石ターゲットからの高速度エジェク
 タのサイズ-速度同時測定 野村 啓太
 (神戸大)
- P30 17:18 Class 0/I 段階におけるペブル集積による巨大惑星の形成条件 田中 佑希(東北大)
- P31 17:20 太陽系における地球型4惑星の形成:

248

成岩の合成と分光観測 荒木 亮太郎(阪 大)

- O29 10:30 SLIMマルチバンドカメラエンジニアリングモデルによる観測性能確認 佐伯和人(阪大)
- O30 10:42 月の縦孔下の溶岩チューブの形状確認 による溶岩物性値の同定 本多力(火山 洞窟学会)
- O31 10:54 月火星の縦孔地下空洞直接探査 (UZUME)計画の科学と探査構 春山 純一(JAXA)
 - 11:06 休憩(10分)

はやぶさ2・小惑星リュウグウ(1)

(座長:亀田 真吾,保井 みなみ)

- O32 11:16「はやぶさ2」のリュウグウ近傍探査の総括 渡邊 誠一郎(名大)
- O33 11:28 「はやぶさ2」サンプラー:試料採取完了 と回収準備 橋 省吾(東大)
- O34 11:40 はやぶさ2搭載レーザー高度計LIDAR
 の地形データに基づく小惑星Ryuguの
 表面ラフネス 増田 陽介(日大)
- O35 11:52 はやぶさ2搭載近赤外分光計によって 観測された小惑星リュウグウの表面組 成 北里 宏平(会津大)
- O36 12:04 小惑星リュウグウにおける 0.7 μ m吸収 分布の地形との関係 石田 茉莉花(立教 大)
- O37 12:16 小惑星リュウグウのブライトスポットのスペクトル分類 杉本 知穂(東大)
- O38 12:28 はやぶさ2ONC-Tカメラによる分光デ
 ータを用いたRyuguのレゴリス流動解
 析 高木 直史(東大)
- O39 12:40 多バンド可視観測による小惑星リュウ グウとベヌーの比較 杉田 精司(東大)
- O40 12:52 小惑星の高速自転変形の数値計算とリ ュウグウなどのコマ型小惑星の形成に ついて 杉浦 圭祐(東工大)
 - 13:02 昼休み

はやぶさ2・小惑星リュウグウ(2)

(座長:北里宏平, 嶌生有理)

- O41 14:20 はやぶさ2SCIによる小惑星リュウグウ 上での衝突実験 荒川 政彦(神戸大)
 - O42 14:32 「はやぶさ2」搭載中間赤外カメラ (TIR)観測によるSCI(小型衝突装置)運 用で発生したクレータイジェクタおよ びタッチダウン地点(C01)付近の熱的な 特徴について 田中 智(JAXA)
 - O43 14:44 小惑星リュウグウのクレーターと周辺
 ボルダーの関係に着目した表層の層構
 造の推定 赤羽 大貴(名大)
 - O44 14:56 地震波伝搬モデリングを用いたリュウ
 グウの弾性的特性の制約とseismic
 shakingの可能性の検討 西山学(東大)
 - O45 15:08 小惑星Ryugu表層を模擬した粉粒体へのクレーター形成実験 保井 みなみ(神戸大)
 - O46 15:20 遠心法で測定した隕石粉の固着力と小
 惑星レゴリス粒子への応用 長足 友哉 (神戸大)
 - 15:32 休憩(8分)
 - 15:40 日本惑星科学会総会
 - 16:40 休憩(10分)

最優秀研究者賞受賞講演

 (座長:田中智)
 16:50 惑星系の形成と進化 黒川 宏之(東工大)
 17:35 紀元前太陽系を探る:質量放出星から 太陽系への物質進化 瀧川 晶(京大)
 18:20 会場移動
 18:30 懇親会

○10月9日(水)

- 火星 (座長:臼井 寛裕, 黒川 宏之)
- O47 9:30 炭酸塩コンクリーションにおける形成 メカニズムと形態条件の推定 井原 貴 之(名大)
- O48 9:42 火星タルシス地域アスクラエウス山北 西麓における火山と氷河の相互作用 神崎 友裕(東大)
- O49 9:54 火星古環境の3次元大気圏・水圏結合シ ミュレーション:タルシス山地による

全球水循環への影響鎌田 有紘(東北大)O50 10:06非静力学全球火星大気循環モデルの開発と高解像度計算樫村 博基(神戸大)

- O51 10:18弱い固有磁場環境下における火星大気流出機構堺 正太朗(東大)
- O52 10:30 光化学反応と放射冷却を考慮した地球・
 火星における還元型原始大気の流体力
 学的散逸 吉田 辰哉(北大)
- O53 10:42 原始火星大気に包まれた火星衛星系の
 進化: 微惑星の捕獲と衛星の衝突・軌
 道進化 松岡 亮(北大)
- O54 10:54火星衛星探査計画 MMX の進展とサイエンス倉本 圭(北大)
- O55 11:06 火星衛星探査計画(MMX)のサンプルサイエンス検討 臼井 寛裕(JAXA)
 11:18 休憩(10分)

衝突現象・惑星形成 (座長:黒崎 健二,藤井 悠里)

- O56 11:28 フラッシュ X線を用いた衝突破壊現象の観測:多孔質標的の破片速度分布に対する空隙の効果 中村 誠人(神戸大)
- O57 11:40 岩石の塑性変形加熱:炭酸塩岩からの 衝撃脱ガス量を用いた検証 黒澤 耕介 (千葉工大)
- O58 11:52 低強度標的を用いたクレーター形成実
 験:エジェクタ放出過程の解析 杉村
 瞭(神戸大)
- O59 12:04 数値計算によるイジェクタカーテン模様の解析 末次 竜(産業医大)
- O60 12:16 進化する原始惑星系円盤中での圧力極
 大点の位置について 瀧 哲朗(国立天文
 台)
- O61 12:28 ダスト-ガス摩擦と乱流粘性が駆動する
 原始惑星系円盤の永年不安定性の非線
 形発展 冨永 遼佑(名大)
- O62 12:40 原始惑星系円盤のダストと温度構造の 共進化 奥住 聡(東工大)
- O63 12:52 自己重力不安定な円盤におけるダストの運動と微惑星形成過程への示唆
 古賀 駿大(九大)
- O64 13:04
 巨大衝突起源の破片がもたらす地球型

 惑星の軌道進化
 小林浩(名大)

13:16 昼休み

- **惑星形成・衛星形成** (座長:瀧哲朗, 兵頭 龍樹)
- O65 14:30 ダスト摩擦反作用が巨大惑星移動に与 える影響について 金川 和弘(東大)
- O66 14:42 水素大気を持つ天体の衝突合体 黒崎 健二(名大)
- O67 14:54 Uranian Satellite Formation by Evolution of a Water Vapor Disk Generated by a Giant Impact 井田茂 (東工大)
- O68 15:06 非理想 MHD計算により与えられた周惑
 星円盤における微衛星形成 芝池 諭人 (ベルン大)
- O69 15:18 周惑星円盤起源の単一衛星を持った衛 星系の形成について 藤井 悠里(名大)
- O70 15:30 長周期彗星の分布を用いたオールト雲
 形成仮説の検証 樋口 有理可(国立天文 台)
 - 15:42 休憩(10分)

系外惑星 (座長:平野 照幸, 堀 安範)

- O71 15:52 詳細な惑星形成過程を考慮したシミュ レーションによるスーパーアースの形 成と大気量進化 荻原 正博(国立天文台)
- O72 16:04 系外蒸発惑星のダストテイルの理論透 過光スペクトル:惑星組成の制約に向 けて 奥谷 彩香(東工大)
- O73 16:16 HD142527 に付随する原始惑星系円盤 のガス・ダスト質量比分布 百瀬 宗武 (茨城大)
- O74 16:28 WSO-UV計画 海を持つ惑星探し-亀田 真吾(立教大)
- O75 16:40 次世代赤外線天文衛星 SPICA: ミッション概要 山村 一誠(JAXA)
- O76 16:52 SPICAサイエンス検討会「太陽系・系外 惑星班」の活動報告 平野 照幸(東工大)
 17:04 終了

《ポスター発表プログラム》

○ 最優秀発表賞応募ポスター

- 01 火星の化学組成 吉崎 昂(東北大)
- O2 高空隙ダストの引張強度と原始惑星系円盤内での回転による破壊 辰馬 未沙子(東大)
- O3 太陽系探査を目指したOrbitrap型質量分析器の開発 川島 桜也(東大)
- O4 太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化 荒川 創太(東工大)
- O5 原始惑星によって駆動される3次元ガス流構造 がペブル降着に及ぼす影響 桑原 歩(東工大)
- O6 地球の揮発性元素組成の起源:コア形成と天体 衝突による大気散逸の影響 櫻庭 遥(東工大)
- O7 土星衛星 Enceladus と Mimas におけるメタンハ
 イドレートの形成と熱進化 西谷 隆介(阪大)
- ○一般ポスター(コアタイム:奇数番号17:36-18:20, 偶数番号18:20-19:00)
- P1 月惑星探査アーカイブサイエンス拠点に令和元 年度認定された会津大学宇宙情報科学研究セン ターについて 出村 裕英(会津大)
- P2 すばる望遠鏡Hyper Suprime-Camによる木星 L5トロヤ群小惑星のサイズ分布測定 上畑 琴 美(神戸大)
- P3 小惑星探査画像の画素単位DBによる解析と小 天体地理情報システムAiGISと連携した結果の 可視化 平田成(会津大)
- P4 小惑星セレスへのアンモニア氷の供給からみる パラメータ制約 奈良 悠冬(東工大)
- P5 地球接近天体2012TC4母天体における衝突イベント時期の推定 浦川 聖太郎(スペースガード協会)
- P6 衝突閃光の実験的研究:真空度と発光メカニズ ムの関係 布施 綾太(日大)
- P7 アーク加熱風洞を応用した流星体の機械的強度 と熱伝導率が流星アブレーションへ与える影響 評価 大木 紘介(日大)
- P8 2018年ふたご座流星群に伴う月面衝突閃光の低 分散スペクトルⅡ 柳澤 正久(電通大)
- P9 67P/Churyumov-Gerasimenko彗星の密度分布 構造の推定 金丸 仁明(阪大)

- P10 1.6m ピリカ望遠鏡を用いた分裂彗星核P/2016
 BA14と252P/LINEARの可視光測光・分光・
 偏光観測 山形 稜(北教大)
- P11 木星氷衛星探査衛星 JUICE, 日本からの貢献 ー プロジェクトの概況、現状、そして展望 笠羽 康正(東北大)
- P12 潮汐変形と位相の遅れを考慮したGanymedeの 強制秤動 小島 晋一郎(阪大)
- P13 ALMAアーカイブデータを用いたイオ大気の 供給源の推定 鈴木 達也(名大)
- P14 小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的 研究 大村 知美(名大)
- P15 多孔質氷天体を模擬した雪のクレーター形成実 験:衝突溶融と衝突残留熱に関する研究 笹井 遥(神戸大)
- P16 木星型惑星の大気における湿潤対流の禁止条件
 : NH₃とH₂Sの化学反応によるNH4SH生成の
 場合 中島 健介(九大)
- P17 NH₄SH生成反応による対流抑制条件を念頭に おいた木星型惑星の雲対流の数値計算 杉山 耕一朗(松江高専)
- P18 近赤外エシェル分光器/PIRKA望遠鏡による金 星大気微量分子の観測 築山 大輝(大阪府立大)
- P19 10m電波望遠鏡SPARTとALMA 12m-Array/ ACA/TP同時観測による金星中層大気の微量 分子スペクトルの解析と整合性の評価 冨原 彩加(大阪府立大)
- P20 Web地図技術を用いた大規模惑星大気数値シ ミュレーションデータの可視化 松村 和樹(松 江高専)
- P21 月極域探査:既存データの課題と観測要求 大 竹 真紀子(JAXA)
- P22 月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計画の搭 載機器と観測計画の検討 岩田 隆浩(JAXA)
- P23 月面探査車搭載型中性子検出器の開発の現状 晴山 慎(聖マリアンナ医科大)
- P24 レーダによる月表層・小惑星内部探査の計算機実験 熊本 篤志(東北大)
- P25 162173リュウグウ表面の高解像度画像から探る 岩塊の熱疲労 佐々木 晶(阪大)
- P26 リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒標的に対 するクレーター形成実験 山本 裕也(神戸大)

- P27 火星 Web-GIS "Red Ace" におけるユーザーに よるスペクトルデータ管理 福地 裕範(会津大)
- P28 MMX 搭載近赤外分光撮像器 MacrOmegaの観 測計画と開発状況 岩田 隆浩(JAXA)
- P29 岩石ターゲットからの高速度エジェクタのサイズ-速度同時測定 野村 啓太(神戸大)
- P30 Class 0/I 段階におけるペブル集積による巨大 惑星の形成条件 田中 佑希(東北大)
- P31 太陽系における地球型4惑星の形成: Grand Tackのような幅の狭い円盤は不適 ソフィア リカフィカパトリック(近畿大)
- P32 周木星円盤における光泳動:ガリレオ衛星の軌 道共鳴の起源に対するひとつの説明 荒川 創 太(東工大)
- P33 イジェクタ層分布と基盤岩衝撃変成に基づくオ ーストラリア・アジアテクタイトイベントの衝 突地点推定 多田 賢弘(東大)
- P34 火星巨大衝突により生じる衝突破片の長期力学 進化のN体計算 石城 陽太(東大)
- P35 準惑星ハウメアのリング形成シナリオの提案角田 伊織(京大)
- P36 共鳴鎖にある惑星系の軌道不安定条件:中心星 質量の進化 松本 侑士(中央研究院)
- P37 系外惑星大気中の雲形成における粒子サイズ・ 空隙率分布の共進化 大野 和正(東工大)
- P38 SPICAによる原始惑星系円盤からの複雑な有 機分子輝線の観測予測 野村 英子(国立天文台)
- P39 UZUME 計画における月の縦孔 ~楕円クレー ター,縦孔の形成過程の実験的考察 道上 達 広(近畿大)
- P40 月の最終期マグマ活動と縦穴周辺の若い溶岩流探査 諸田 智克(東大)
- P41 ルナ16号試料L1613のキャラクタリゼーション 渡邊 宏海(阪大)
- P42 月形成年代毎のクレーターの空間分布について 本田 親寿(会津大)
- P43
 着陸探査におけるオートフォーカス機能の有用

 性
 佐藤 広幸(JAXA)
- P44 月の表面を模擬した混合物組成による宇宙風化 実験 島名 亮太(阪大)
- P45 月火星の縦孔地下空洞探査(UZUME)計画での磁場計測 正島 充(JAXA)

- P46 SLIM マルチバンドカメラ(エンジニアリング モデル)の光学特性評価 仲内 悠祐(JAXA)
- P47 月のDavyチェーンクレーターの形成は潮汐力 破壊により分裂した彗星の衝突によるものなの か 齋藤 晶也(東海大)
- P48 将来月探査計画HERACLESの着陸地点検討 唐牛 譲(JAXA)
- P49 短周期ガス惑星からの電波放射を用いた内部構 造の制約 堀 安範(ABC)
- P50 陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する大 気大循環モデル実験 吉田 哲治(北大)
- P51 火星全球気候モデリングの精緻化に向けて:水 循環とHDO/H2O比 黒田 剛史(東北大)
- P52 火星古気候モデルに向けた積雲対流スキームの 定量的評価 鳥海 克成(東北大)
- P53 火星隕石の放出に与える火星地下氷層の影響 脇田 茂(ブラウン大)
- P54 炭素流出が火星大気組成進化に及ぼす影響:酸素分圧の変化 八木 亮輔(東北大)
- P55 火星のクリュセおよびアキダリア平原における 地下構造の探索 大浦 愛菜(東北大)
- P56 火星のコプラテス カズマにおける地下氷圏の 分布可能性検討 野口 里奈(JAXA)
- P57 粉体のレオロジーに着目したRecurring Slope Lineae(RSL)の形成模擬実験 植村 千尋(総研 大)
- P58 火星衛星探査計画MMX(Martian Moons eXploration)探査機搭載用イオンエネルギー質 量分析器MSA(Mars moon mass Spectrum Analyzer)の設計 出口雅樹(阪大)
- P59 小惑星(3200) Phaethon による恒星食の観測キャンペーン 吉田 二美(千葉工大)
- P60 火星探査機MAVENの観測に基づく火星からの電離大気散逸の質量依存性に関する研究 関 華奈子(東大)
- P61火星衛星探査ローバに搭載するラマン分光装置
(RAX)の開発
長
勇一郎(東大)
- P62 火星衛星探査計画における望遠、広角カメラの 開発 加藤 博基(立教大)
- P63 数値モデルに於ける月と火星の初期進化の比較 小河 正基(東大)
- P64 火星表面で生命の兆候を検出する生命探査顕微

鏡の開発 吉村 義隆(玉川大)

- P65 量子化学計算による星間空間における複雑有機 物の反応経路探索 小松 勇(ABC)
- P66 放射により駆動される雲対流の基礎的数値実験 中島 健介(九大)
- P67 地球類似惑星における遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション:外圏底近傍の断熱 冷却について 寺田 直樹(東北大)
- P68 大気大循環モデルを用いた金星雲分布の再現 安藤 紘基(京産大)
- P69 ハワイIRTF/iSHELL赤外分光データによる木 星大赤斑上空を含む熱圏温度観測 神原 歩(東 北大)
- P70 可視マルチバンドイメージング観測による木星 表層大気ダイナミクスの研究 伊藤 颯(明大)
- P71 ERG衛星の観測に基づく、リングカレントN+の観測研究 津田 洸一郎(阪大)
- P72 球間焼結ネックの弾性定数 城野 信一(名大)
- P73 スノーライン付近での微惑星形成 兵頭 龍樹 (東工大)
- P74 不均質分子雲コアによる同位体異常生成:初期 不均質と同位体異常の量的関係 中本 泰史(東 工大)
- P75 球対称ガス大気による微惑星の捕獲 末次 竜 (産業医大)
- P76 TW Hya周囲の原始惑星系円盤におけるダスト 付着度の制約 松浦 孝之(東工大)
- P77 タンデム惑星形成論による岩石惑星形成 二村 徳宏(スペースガード協会)
- P78 物質強度を考慮した岩石に対する斜め衝突加熱 脇田 茂(ブラウン大)
- P79 天王星衛星のその場形成の軌道進化 石澤 祐 弥(京大)
- P80 リュウグウ表層にみられるクレーターの深さ/ 直径比の空間分布 野口 里奈(JAXA)
- P81 小惑星 Ryuguでの宇宙衝突実験におけるクレー
 ターからの放出物のその場観測 門野 敏彦(産業医大)
- P82 Hayabusa2 人工衝突クレータ生成による岩石 サイス頻度分布への影響 坂谷 尚哉(JAXA)
- P83 Ryugu クレーターの熱物性 嶌生 有理(JAXA)
- P84 はやぶさ2衝突装置によって生成されたイジェ

クタカーテンの解析から推定される小惑星リュ ウグウの表層物性 和田 浩二(千葉工大)

- P85 Hayabusa2 ONC 画像のアーカイブ化と公開計 画本田理恵(高知大)
- P86 小惑星 Ryuguのブライトスポットのスペクトル 特徴と存在量の推定 末満 雅徳(名大)
- P87 リュウグウでみられるリニアメントの空間分布 特性 菊地 紘(JAXA)
- P88 はやぶさ2タッチダウンからあきらかになった 小惑星Ryuguの表面の色変化と層序 諸田 智 克(東大)
- P89 162173リュウグウの大クレーターと赤道バルジ の地形 並木 則行(国立天文台)
- P90 Hera搭載熱赤外カメラによる地球近傍小惑星 の観測計画 岡田 達明(JAXA)
- P91 教師無し分類手法を用いた小惑星ベスタの地質 分類の試み 石原 吉明(国環研)
- P92 炭素質地球近傍小惑星の宇宙風化トレンド 櫻井 祥(会津大)
- P93 近赤外線分光観測による小惑星族母天体の内部 構造探査計画 臼井 文彦(神戸大)
- P94 太陽系小天体の内部構造探査を目指した重力偏 差計の研究開発 野村 麗子(国立天文台)
- P95
 DESTINY⁺搭載用ダストアナライザの開発とサ

 イエンス検討状況
 荒井 朋子(千葉工大)
- P96 DESTINY⁺搭載カメラの機上校正方法について の検討 岡本 尚也(JAXA)
- P97 DESTINY⁺計画の理学ミッション検討状況 荒井 朋子(千葉工大)
- P98 Comet Interceptor 搭載イオン質量分析器の設計 笠原 慧(東大)
- P99 Q型小惑星:風化した表層である可能性 長谷川 直(JAXA)
- P100 木星トロヤ群、ヒルダ群、およびメインベルト 小惑星のサイズ頻度分布の比較研究:太陽系初 期の惑星移動への手がかり 吉田 二美(千葉工 大)
- P101 表面凹凸のある小天体の Yarkovsky 効果および YORP 効果の数値計算 千秋 博紀(千葉工大)
- P102 彗星探查計画 Comet Interceptor 新中 善晴 (京産大)

- P103 土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の反発及 び付着に関する実験的研究 豊田 優佳里(神戸 大)
- P104 21P/Giacobini-Zinner 彗星の中間赤外線スペクトルにおける複雑な有機分子の検出 河北 秀世(京産大)
- P105 相対論カー・ニューマン解を利用した 太陽系 惑星軌道ティティウス・ボーデ法則、土星リン グ個数 および ファイン リング径 の導出 犬 山 文孝(九電産業株式会社)
- P106 リュウグウ・イトカワの起源,小惑星帯の起源 ---分化は何時・何処で起きたのか△私が惑 星の起源,水星コアリッチの謎,ボーデの法則 の謎をアブダクションで解明した. 種子 彰 (SEED SCIENCE Labo.)
- P107 月の起源・太陽系の起源,理論仮説で検証でき るのは進化の複数の統一的な結果を利用した創 造的推論(Abduction)だけである.シミュレーシ ョンも一項目だけのAbductionである. 種子 彰(SEED SCIENCE Labo.)

2019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,宇宙科学の発展に寄与した若 手研究者を顕彰し,宇宙科学奨励賞を授与いたします. ここに2019年度の第12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)に掲示しておりま 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,是非ともご推挙いただきますよ うお願い申し上げます.

*

- 表彰の趣旨:宇宙理学(地上観測を除く)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:2019年10月31日(木)必着.

表 彰 式:選考結果は2020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2020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)をご覧いただき, 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

JSPS Information

◇日本惑星科学会第133回運営委員会議事録

◇日本惑星科学会第51回総会議事録

◇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133回運営委員会議事録

日 時:2019年5月26日(日)18:30-20:50

場 所:日本地球惑星科学連合2019年大会会場

幕張メッセ国際会議場301A

(千葉市美浜区中瀬2-1)

運営委員会委員:

出席者 19名

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

欠席者 3名(委任状:議長2通) 和田浩二,田近英一,渡部潤一

オブザーバー:

田中 智(学会賞選考委員長) 濱野 景子(連合大会プログラム委員) 出村 裕英(月惑星探査アーカイブサイエンス拠点)

議題·報告事項:

委員自己紹介

第15期運営委員会の初顔合わせ.自己紹介を行なった.

1. 月惑星探査アーカイブサイエンス拠点の説明(出村会員)

文科省共同利用・共同研究拠点に公立大学法人会津大学ARC-Spaceの月惑星探査アーカイブサイエンス拠 点が採択されたことが報告された.附置研として設置される.ARC-Spaceメンバーを中心とし,アーカイブ サイエンスを担う.今後,公募事業・研究集会の案内がされることが報告された. 2. 連合大会プログラム委員からの報告(濱野連合大会プログラム委員)

来年度の惑星科学セッションコンビーナは仲内悠祐会員,嵩由芙子会員.プログラム委員に(主)堀安範会 員,(副)田中佑希会員が推薦され承認された.

3. 会計第14期下期決算(竹広財務専門委員)

第14期下期決算報告があった.一般会計の予算額は約71万円の赤字であったが結果的に,約24万の赤字で 抑えられた. EPS分担金増額の予備費としていた28万円が不要となったことが主な要因. 遊星人のページ数 が増えたため印刷費が予算額よりも約30万増であったが,数年前の印刷費と同程度.

4. 会計第15期上期予算執行状況報告(佐伯財務専門委員長)

収入支出ともに予算案どおり進んでいる.寄付金があり,発表賞に使用予定.

5. 第14期下期活動報告ならびに第15期上期活動計画(北里総務専門委員長)

第14期下期活動報告,第15期上期活動計画について説明があった.

6. 入退会について(北里総務専門委員長)

昨年の同時期と比較して,会員数に大きな変動はないが,正会員一般からシニア会員への移行が18名あった.

7. 学会賞選考委員の入れ替え(北里総務専門委員長)

現委員のはしもとじょーじ会員,上椙真之会員,黒澤耕介会員,脇田茂会員に加え,諸田智克会員,浦川 聖太郎会員,野村英子会員,藤谷渉会員が推薦され,承認された.

8. その他総務からの案件(議長・書記の承認等)(北里総務専門委員長)

総会の議長と書記に佐々木貴教会員,岡本尚也会員がそれぞれ推薦され,承認された.

9.2018年度最優秀研究者賞について(田中学会賞選考委員長)

選考の経緯と受賞者の説明があった.まず応募者7名から2名に絞った.投票の結果,同票となり,黒川宏 之会員と瀧川晶会員の2名が推薦され認められた.

10. 2019年秋季講演会・学会賞実施案(竹広2019年秋季講演会組織委員)

秋季講演会の説明があった.会期は10月7日から9日.組織委員長は河北秀世会員.京都産業大学と京都大 学の連合で組織する.会場は京都産業大学(上賀茂キャンパス).主会場は神山ホールで約1200名収容可能.

11. 2020年秋季講演会について(平田 2020年秋季講演会組織委員)

会津大でLOCを担当する.2020年9月23日-25日か2020年9月16日-18日を検討中.他学会の講演会予定,各 大学の主イベント日程を調査する.

12. 広報専門委員会の設置について(中本会長)

新委員会の設置の提案があった.主な仕事はホームページの充実,外部からの問い合わせ対応.現状,ホ ームページは主に情報化専門委員会,総務専門委員会が分担して管理している.

まずは総務専門委員会の下に広報専門委員会設立準備作業部会を設置し,情報化専門委員会とともに作業 内容を具体化することが提案され,承認された.部会長に奥住聡委員,委員に黒澤耕介会員,黒川宏之会員, 鎌田俊一会員が推薦され、承認された.

13. RFI改定について(寺田RFI回答文書改訂2018作業部会長)

2018年改訂版について、改定作業の経緯の報告があった。今後も毎年改定する予定であり、透明性の高い 手順で進める方針であることが説明された。主査は会長経験者に2年担当していただくことにしたいとの提 案があり、承認された。2019年改訂版については、2019年10月6日(秋季講演会前日)に検討会を開催予定で、 2019年12月末に完成を目指す。

負荷軽減のために、学生アルバイトの雇用の提案があった. 主な作業内容は改定原稿のバージョン管理, 作業メンバーのリスト作成やメーリングリスト作成管理, 原稿のチェックなど. 2019年度は912月までの4 ヶ月間に月3万円程度を予定. 2019年度は会長預かりの事務補助費として計上し, 必要な金額が具体化され る時期に申請を予定. 以上, 異論なく承認された.

14. 日本地球惑星科学連合の報告(中本会長, 倉本副会長)

来年度, AGUと共催を予定. EPSと共同で申請していたPEPS出版のための科研費が採択された.

15. 遊星人の発行状況報告(和田編集専門委員長,代読:北里総務専門委員長)

つつがなく発行されている. 遊星人記事の転載許可手続きについて行事部会と共同で案を練っている.

16. 科研費採択とEPS新賞設立の報告(玄田欧文誌専門委員長)

PEPSと共同で科研費を申請し、無事に採択された. 2/3をPEPS, 1/3をEPSの分担とする. 新賞設立を予 定しており、重要なデータ、標準モデルを提案する論文を対象とする.

◇日本惑星科学会第51回総会議事録

日 時:2019年5月27日(月)12:30-13:30

場 所:日本地球惑星科学連合2019年大会会場 東京ベイ幕張ホールA01 (〒261-0021 千葉県千葉市美浜区ひび野2-3)

正会員:575

定足数:58

参加人数:48名(開会直前),63名(議事3.1採択時),64名(議事3.2採択時)

委任状:66通

議長 64通

はしもとじょーじ会員 1通

佐々木 晶会員 1通

1. 開会宣言

北里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佐々木貴教会員,書記に岡本尚也会員が選出された.

3. 議事

3.1 第14期下期(2018年度)活動報告

・基調報告(中本会長)

事業概要,学会員数,連合大会概要,秋季講演会概要,学会誌の発行状況,欧文誌の発行状況,学会賞 受賞者,フロンティアセミナー概要,惑星探査データ解析実習会概要,学会運営について説明がなされた.

·会計報告(竹広財務専門委員)

第14期下期の決算について報告された.当期収支差額は-238,427円の赤字.当初は-71万円の赤字予 算だったが,EPS関連の予備費が必要なくなったことと秋季講演会の余剰金が入ったことから,圧縮され て-23万円に収まった.学会誌の出版費(ページ数)が数年前のレベルに戻った.

・会計監査報告(門野会計監事)

収支決済に誤りがないことを確認したとの報告がなされた.

· 各種専門委員会報告

なし

- ・2018年度最優秀研究者受賞者発表(田中学会賞選考委員長) 黒川宏之会員と瀧川晶会員の両名が受賞されたとの報告がなされた.
- ・質疑応答及び討論

なし

・採択

第14期下期活動報告の採択が行われ、賛成:129(うち出席者63)、反対:0、保留:0により採択された、

3.2 第15期上期(2019年度)活動方針

·基本方針(中本会長)

事業概要,秋季講演会予定,学会賞選考について説明がなされた.

· 各種専門委員会活動方針

佐伯財務専門委員長より,第15期上期の会計中間報告がなされた.収入支出ともほぼ予算案通り進行している.今年度も寄付金(5万円)を頂いた.発表賞の賞金に使用する.

·質疑応答

なし

・採択

第15期上期活動方針の採択が行われ、賛成:130(うち出席者64)、反対:0、保留:0により採択された.

4. 報告事項

4.1 2019年秋季講演会について(竹広2019年秋季講演会組織委員) 日程,場所,LOCメンバー,発表資格,口頭付きポスター発表,保育室,スケジュール等について説 明がなされた,宿の手配はお早めに.

4.2 その他

・RFI回答文書の改訂について(寺田RFI回答文書改訂2018作業部会委員長)
 2018年改訂版の公開と2019年改訂作業の着手について報告がなされた。
 2018年改訂版を5月22日に学会ウェブサイトで公開した。
 2019年改訂作業の主査は倉本圭会員。
 秋季講演会前日(10月6日)に検討会を京都駅前で開催予定。

・フロンティアセミナー 2019について(はしもとじょーじ会員) 日程,場所,講師について説明がなされた.

・月惑星探査アーカイブサイエンス拠点について(出村裕英会員) 会津大学ARC-Spaceが惑星科学会を母体となる学協会として,文科省共同利用・共同研究拠点に採択さ れたとの報告がなされた.

5. 議長団解任

6. 閉会宣言

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2019年9月25日までに, 賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです. 社名等を掲載し, 敬意と感謝の意を表します. (五十音順)

Harris Geospatial株式会社 株式会社ナックイメージテクノロジー

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a)場所,(b)主催者,(c)ウェブページ/連絡先など.

転記ミス,原稿作成後に変更等があるかもしれません.各自でご確認ください.

2019/10

10/7-9 日本惑星科学会 秋季講演会

(a)京都府京都市(b)日本惑星科学会(c)https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2019/

10/23-25 第60回高圧討論会

(a)北海道札幌市(b)日本高圧力学会(c)http://highpressure.jp/new/60forum/index.html

2019/11

11/6-8 第63回宇宙科学技術連合講演会

(a)徳島県徳島市
(b)日本航空宇宙学会
(c)https://branch.jsass.or.jp/ukaren63/

編集後記

今号は「ALMA 特集」をお送りします. ゲストエデ ィターの秋山永治さん・編集委員の関口朋彦さんのご 尽力により充実した誌面になりました.「ALMA 特集」 は次号に続きますのでご期待ください. 加えて, 惑星 科学フロンティアセミナーのテキストとして, 百瀬宗 武さんに原始惑星系円盤の電波観測入門を執筆頂きま した. 基礎的なことから解説して頂いていますので, ALMA 特集との相乗効果が期待できますし, 遊星人 読者の皆さん(特に観測を志す若い皆さん)にとって有 益なものとなると考えます.

今号も連載記事や研究会報告を多く投稿頂きました. 毎号に載せるために各連載記事の幹事の皆さんは大変 なご尽力をされています.改めて感謝申し上げます.

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

(杉山)

編集委員 和田浩二[編集長]

杉山 耕一朗 [編集幹事] 秋山 永治 [特集「ALMAで迫る惑星科学」ゲスト・エディター] 上椙 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 三浦 均, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2019年9月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第28巻 第3号

 定価 一部 1,750円+消費税(送料含む)
 編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)
 印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社
 発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階 株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会
 e-mail:staff@wakusei.jp TEL:03-6435-8789/FAX:03-6435-8790
 (連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています.

複写される方へ

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

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

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

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

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