

---

---

# 日本惑星科学会誌 遊・星・人

## 第24巻 第4号

### 目次

---

---

巻頭言 上野 宗孝	317
月内部のレオロジー構造から考察する月震の発生メカニズム 東 真太郎, 片山 郁夫	318
Dawnが照らす惑星誕生の鍵：ベスタとHED隕石 山下 直之	326
系外惑星「遠い世界の物語」その7～原始惑星系円盤観測から探る系外惑星～ 金川 和弘	332
一番星へ行こう！日本の金星探査機の挑戦 その25 ～搭載機器5年越しの覚醒～ 山崎 敦, 山田 学, 福原 哲哉, 大月 祥子, 田口 真, 岩上 直幹, その他2名 あかつきプロジェクトチーム	339
遊星百景「私のお気に入りの地形」その2～Baltis Vallis～ 押上 祥子	342
研究会開催報告「衛星系研究会2015：衛星系と噴火現象」 谷川 享行, 木村 淳, 関根 康人, 倉本 圭, 大槻 圭史, 田中 秀和, 奥住 聡	343
「iSALE 講習会」参加報告 脇田 茂	346
第8回月惑星探査データ解析実習会を終えて 本田 親寿, 巽 瑛理, 昆 憲英, 平田 成, 出村 裕英, 小川 佳子, 北里 宏平 第8回月惑星探査データ解析実習会世話人一同	348
新刊書評 佐々木 貴教	351
JSPS Information	352

---

# Contents

---

<b>Preface</b>	M. Ueno	<b>317</b>
<hr/>		
<b>Mechanism of moonquakes inferred from rheological structure of moon interior</b>	S. Azuma and I. Katayama	<b>318</b>
<hr/>		
<b>Dawn illuminates the key to the birth of planets: Vesta and HED meteorites</b>	N. Yamashita	<b>326</b>
<b>Tales of distant exoplanet worlds (7) — Extrasolar planets in protoplanetary disks —</b>	K. Kanagawa	<b>332</b>
<b>Road to the first star: Venus orbiter from Japan (25) — The cameras awoken after 5 years of sleep —</b>		<b>339</b>
A. Yamazaki, M. Yamada, T. Fukuhara, S. Ohtsuki, M. Taguchi, and 3 authors, and Akatsuki project team		
<b>My favorite topography (2) — Baltis Vallis —</b>	S. Oshigami	<b>342</b>
<b>Report of Workshop on Satellite Systems 2015</b>		<b>343</b>
T. Tanigawa, J. Kimura, Y. Sekine, K. Kuramoto, K. Ohtsuki, and 2 authors		
<b>Report of iSALE shock physics code workshop in Chiba, Japan</b>	S. Wakita	<b>346</b>
<b>A report on the 8th school of lunar and planetary exploration data analyses</b>		<b>348</b>
C. Honda, E. Tatsumi, K. Kon, N. Hirata, H. Demura, Y. Ogawa, K. Kitazato, and Executive committee of the 8th school of lunar and planetary explanation data analyses		
<b>Book review</b>	T. Sasaki	<b>351</b>
<b>JSPS Information</b>		<b>352</b>

## 巻頭言

マネジメントという言葉がもてはやされている。宇宙開発は、組織とプロジェクトのマネジメントが特に重要となる分野である。昨年から、世界の宇宙機関のプロジェクトマネジメントとシステムズエンジニアリングをとりまとめる委員会の議長をつとめているが、個々のマネジメントプロセスについては、宇宙機関という組織においても、プロジェクトチームと言う単位で見ても、その置かれた境界条件によって異なるものである。このため、単一の宇宙機関の中でも分野ごとに多様性を有する。一つの組織において多様性を包含する事は、組織としてのマネジメント上の困難を生じ、組織としての包容力を必要とするが、国家や組織において多様性を内在する事こそが、強い持続性において本質的に重要である(例えば、『ローマ人の物語(塩野七生)』、『文明の衝突(S. P. Huntington)』)。

異なる環境に置かれている事から、宇宙機関ごとに必要な役割も当然異なってくる。欧州と米国そして日本では、大学の組織としてのあり方、宇宙予算の考え方、宇宙に関わる企業の實力、安全保障分野における開発の考え方、に大きな違いがあり、ESA、NASA、JAXAでは必要とされる役割が自ずと異なるものとなる。また外的条件は時代とともに常に変化するものであり、それに呼応して行く必要がある。社会の要求に応じて組織の役割を見直して行くことの重要性は、営利企業に限った話では無い。民間事業者では、自分たちが良いと思ったことを続けていても、それが社会から必要とされなくなった時点で淘汰されるというメカニズムが働き、社会的な健全性が最低限担保されるのに対して、単一の宇宙機関においてはこのようなメカニズムが存在しない。

さて、宇宙科学研究所はどうであろうか。宇宙科学研究所がこれまで行ってきたやり方は、世界のどの宇宙機関と比較しても、極めてユニークである。さらに組織としての強みと弱みは常に物事の表裏をなし、一方だけを変化させる事も不可能である。しかし、自らへの問いかけは怠ってはいけないのである。宇宙科学研究所の、これまでの進み方については、例えば田中靖郎先生が2013年のAnnual Review of Astron. & Astrophys.の巻頭言として極めて格調の高い文章を書かれている。

上野 宗孝(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所)

# 月内部のレオロジー構造から考察する月震の発生メカニズム

東 真太郎<sup>1</sup>, 片山 郁夫<sup>2</sup>

2015年8月9日受領, 査読を経て2015年9月9日受理.

(要旨) アポロ計画で設置された地震計によって月にも地震(月震)が起きることがわかっている. 月震は発生領域や発生メカニズムによって, 浅発月震, 深発月震, 熱月震, インパクトによる月震に分類されており, 我々はこの月震の中でも深さ約800-1200 km付近で起きる深発月震について, 月内部のレオロジー構造とともに考察した. 月内部の温度構造から考察されるレオロジー構造から, 深発月震は明らかに塑性変形領域で発生していることがわかった. 通常は破壊や滑りが起こらない塑性変形領域で深発月震が起こるメカニズムを, 地球で起きる地震の発生メカニズムのモデルを参考に考察した.

## 1. はじめに

1959年ソビエト連邦の無人探査機ルナ2号が月に訪れ, 1960年代のアポロ計画によって人類が月に降り立ってから, 我々は月に関する多くの物理的・化学的情報を得てきた. 特にアポロ11号が地震計を初めて設置し, 続いてアポロ12号, 14号, 15号, 16号が地震計を置き, 8年以上にわたって弾性波の観測が行われることで月の内部構造に関する理解は大きく前進した. まず月にも地震が起きること(地殻変動が起きている), 月の内部は分化しており地殻とマントルが存在すること(核の存在, その大きさについてはまだ議論がある), 月の地殻は斜長石, マントルは地球と同様に苦鉄質鉱物(かんらん石や輝石)が主成分であることなどが月震データからも支持されている(reviewed by [1]). このように月震から様々な月の内部についての知見が得られたが, それらの情報を我々に与えてくれる月震の発生メカニズム自体についてはいまだに議論がある. これまでの月震についての先行研究では, 主に震源パラメーターを解析することで議論がされてきた(例えば[2, 3]). 震源パラメーターは震源メカニズムを考察する上で欠かすことができない情報であり,

この震源パラメーターに基づく議論から, マグニチュード, 応力降下量, 断層面積, すべり量などの重要な報告がされてきた. 例えば, 深発月震については発生領域が深く, その場の高い圧力に対して, 非常に小さなマグニチュードと応力降下量( $\sim 0.01-0.1$  MPa)が推察されており(例えば[2, 3, 4]), 一般的に地球の浅い部分で起きているような地震とは異なるメカニズムで起きている可能性が示唆される.

月震は発生メカニズムや発生領域, 観測された波形によって分類されている(例えば[5]). 一つは比較的月の浅い部分(50-200 km)で発生する浅発月震である. この浅発月震を引き起こすトリガーは未だ謎の部分が多いが, 発生メカニズムについては地球の比較的表層部分で起きている地震と同様, 岩石の摩擦や破壊によって起きていることが予想される(後述). そして月の半径1737 kmに対して, 約800-1200 kmという深い所で起きる深発月震, これについては公転周期や秤動から潮汐力がトリガーとなっていることが先行研究から示唆されている(例えば[6]). 他にも隕石などのインパクトによっておきる月震や, 月の昼と夜の温度差によって発生する熱月震などがある. 本論では特に深発月震に焦点を当てて, そのメカニズムについて検証する.

1. 東京工業大学地球生命研究所

2. 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻  
shintaro.azuma@elsi.jp

## 2. 月内部のレオロジー構造

地震や月震の発生メカニズムを考察する際、惑星内部のレオロジー構造を検証することが有力な手段となり得る。月のレオロジー構造を検証する前に、レオロジー構造とは何かについて少し触れておく。岩石(鉱物)の変形挙動は温度、圧力、含水量などによって変化する[7-9]。比較的溫度が低く浅い領域では岩石は摩擦すべりや破壊(脆性破壊)によって歪みを解消する。この領域では、岩石の破壊強度は垂直応力(圧力)に依存し、鉱物の種類による違いはほぼ見られない[10]。一方惑星の深い領域では温度と圧力は上昇し、それによって岩石の変形挙動は脆性破壊から塑性変形へと遷移する。この塑性変形領域では特に温度に強く依存し、高温になるほど岩石の強度は減少する。他にも塑性変形領域では、変形強度は鉱物によって大きく異なる。結果として、惑星内部には化学的層構造の他に力学的層構造が生み出され、これをレオロジー構造と呼んでいる[11, 12]。

月内部のレオロジー構造を検証する際、月内部の温度構造を見積もる必要がある。これについては先行研究において観測された熱流量などから推察されている温度構造を用いる[13, 14](図1)。圧力については、地殻の密度を $3000 \text{ kg/m}^3$ 、マンツルの密度 $3300 \text{ kg/m}^3$ 、モホ面の深さを $60 \text{ km}$ に設定し[13]、上載岩圧を計算した。(モホ面の深さについては2000年以降の解析結果からは、より薄い地殻(30–40 km)が示唆されているが[15]、月のレオロジー構造に関して結果は変わらない。月の浅い部分では十分に温度が低く、脆性破壊が支配的であり、物質の種類に依存しないByerleeの法則[10]で計算されるためである。)上記の温度・圧力構造を基に、脆性破壊領域はByerleeの法則を用いて強度の計算を行い[10]、塑性変形領域においては流動則を用いて計算を行った。特に地殻については斜長石の流動則[16]を適用し、マンツル部分についてはかんらん石の流動則[9]を適用した。歪速度については不確定なので $10^{-14} \text{ s}^{-1}$ と $10^{-19} \text{ s}^{-1}$ の二通りの歪速度を仮定し計算を行った。そして流動則について、一般的には高温の岩石変形実験から得られたベキ乗則が用いられるが、最近の研究で比較的低温側では転位滑りが律速するPeierls型の流動則が支配的になることが明らか

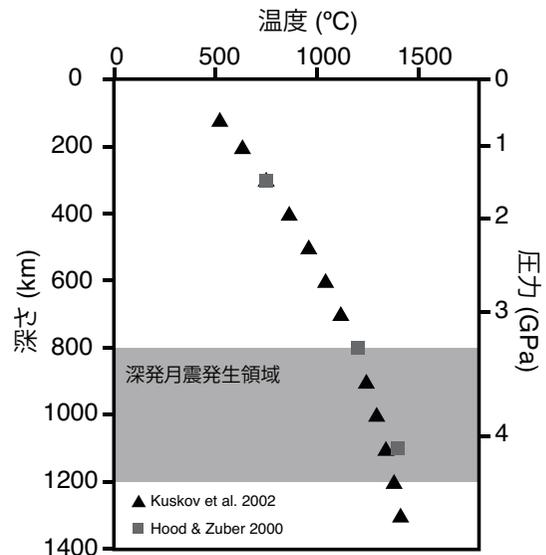


図1：月内部の温度圧力構造[13, 14].

になっている[17-19]。今回このPeierls型の流動則も取り入れ[18]、最も強度の低いメカニズムが全体の変形を支配するとして月内部のレオロジー構造を計算した。それと月内部にはこれまで考えられてきたよりも水が存在することがサンプルリターンされた岩石の含水量測定やLCROSS計画によって明らかにされてきたが、深部についてはまだ明らかになっていない。そのため今回は月内部がドライ(含水量0)であると仮定して強度の計算を行った。

上記のような計算から得られた月内部のレオロジー構造は図2のようになる。比較的浅い部分の脆性破壊領域では、圧力に依存するため深くなるにつれて強度は増加していく。しかし、あるところで変形挙動は塑性変形へと遷移し(BDT; Brittle-ductile transition)、温度が増加するにつれて強度は減少していくのが見てとれる。このレオロジー構造と月震の発生領域を対応させて考察すると、浅発月震は主に脆性破壊領域で起きていることから摩擦滑りや破壊によって起きていることがわかる。しかし、月にはプレートテクトニクスや火成活動等は現在確認されていないため、浅発月震のトリガーについては謎の部分が多い。一方で深発月震の発生領域は深さ $800\text{--}1200 \text{ km}$ であることから、明らかに塑性変形領域で発生していることがわかる(図2)。一般的には塑性変形領域において、岩石は歪みを

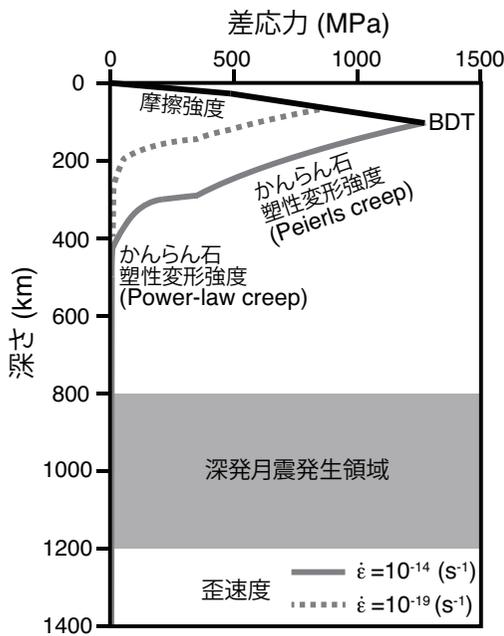


図2：月内部のレオロジー構造。地殻とマンツルの強度をそれぞれ斜長石[16]とかんらん石[9, 18]の流動則から求めた。このとき最も強度の低いメカニズムが全体のレオロジーを支配すると仮定し計算した。歪速度は $10^{-14} \text{ s}^{-1}$ (実線)と $10^{-19} \text{ s}^{-1}$ (点線)、地殻の厚さを60 km[13]とした。

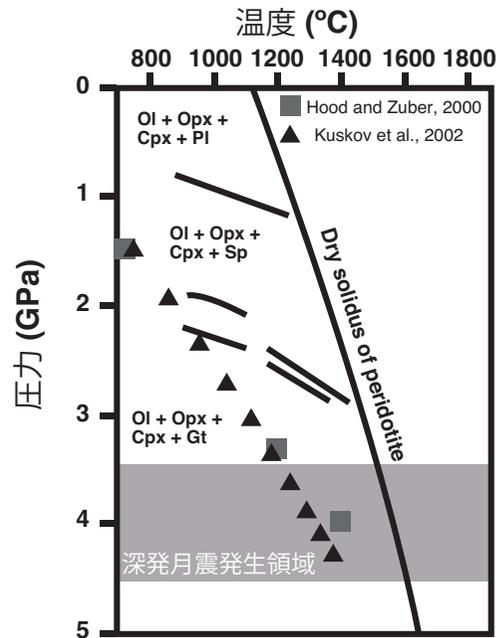


図3：月の温度圧力構造[13, 14]と地球の上部マンツルにおける鉱物構成[37]。Ol: かんらん石, Opx; 斜長輝石, Cpx; 単斜輝石, Pl; 斜長石, Sp; 尖晶石(スピネル), Gt; ざくろ石。文献[37]図3から改変。

塑性変形によって解消するため、摩擦滑りや破壊は起きない。なぜ深発月震はそのような深い塑性変形領域で起きているかは、地球で起きる深発地震と比較・考察することによってヒントが得られるかもしれない。

### 3. 月震の発生メカニズムの考察

月内部のレオロジー構造を計算することによって、深発月震は塑性変形領域で起きていることがわかった。塑性変形領域で深発月震が起きるメカニズムについては、地球で起きている深発地震の発生メカニズムについての先行研究を参考に考察する。地球でも深発地震が起きており、その発生メカニズムについてはまだ議論があるが、いくつかのモデルが提案されている。一つは相転移によって滑りが引き起こされるモデル(transformation faultingモデル)[20]や、断熱不安定によって滑りが引き起こされるモデル[21, 22]、そして含水鉱物のアモルファス化によって不安定が引き起こされるモデル[23]などが提案されている。含水鉱物のアモルファス化によって地震が引き起こされるモデ

ルや相転移によって引き起こされるモデルは、温度と圧力の定常的な変化を必要とし、沈み込みプロセスの存在しない月に応用するのは困難に思える。特に相転移のモデルに関しては、月内部の圧力構造を考察した際、深発月震の発生領域(深さ800-1200 km, 圧力約3.5-4.5 GPaに相当)に対応する鉱物の相転移は考えにくい。例えば、オリビン-スピネル相転移の起きる条件と比べて、深発月震の起きている領域の圧力は小さすぎるし、スピネル-ガーネット相転移を考えたとしても深発月震発生領域の圧力は高い(図3)。Weber et al.(2009)[24]では、グリッドサーチ法を深発月震のデータに対して行い、深発月震の発生が潮汐力による垂直応力と剪断応力の線形結合により説明できることから、相転移が深発月震の原因である可能性を示唆しているが、その相転移する鉱物については言及できていない。断熱不安定[21, 22]によって滑りが引き起こされるモデルというのは、ある岩石の一部に変形が集中することを考える、その部分は変形によって加熱され、温度が上昇し、より変形が進む。その変形が進んだ箇所の温度はさらに加熱され…といったように正のフィ

ードバックがかかる。結果として変形の局所化(応力集中)に伴う温度上昇によって部分溶融が起きることで、その部分の強度が著しく減少し、部分溶融している箇所が断層の役割を果たすことで滑りが起きるというモデルである。このモデルであれば、プレートの沈み込みプロセスの無い月でも潮汐力によって変形の局所化が起きれば実現できそうである。しかし問題点もあり、このモデルを実現するには、変形による温度上昇が熱拡散を上回ること(断熱変形)、その温度上昇に伴う強度の減少が変形による加工硬化を上回る必要がある(例えば[25, 26])。唐戸(2000)[25]やKarato et al(2001)[26]で、この断熱不安定現象が起きる条件や、その計算方法などについて議論されているのでそちらを参照してほしい。結論としては、まず断熱変形の条件は、

$$\frac{\dot{\epsilon}L^2}{\kappa} > 1 \quad (1)$$

と表すことができ(ε:歪速度, L:物体の大きさ, κ:熱拡散率)、かつ温度上昇による物質の軟化が加工硬化を上回り不安定現象が起きる条件は、

$$\Theta = \frac{H^* \sigma \epsilon}{nhRT^2 \rho C_p} \beta > 1 \quad (2)$$

と書ける(σ:応力, ε:歪, H\*:活性化エンタルピー, n:応力指数, h:加工硬化に関するパラメーター, R:気体定数, T:温度, ρ:密度, Cp:比熱)。βは力学的エネルギーを熱に変換する際の効率を表すパラメーターであり、以下のように書ける。

$$\beta = 1 - \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon}L^2}{\kappa}\right) \quad (3)$$

断熱不安定によって滑りが起きるには、これら式(1)と(2)を同時に満たす必要がある。つまり変形速度が大きく(式(1))、比較的低温(式(2))でなくてはこの現象は起きない。まず深発月震の起きている領域について断熱変形(式(1))が起こりえるかを考えてみる。例えば、物体の大きさを0.1-10 kmと仮定し、マントル物質の熱拡散率  $\kappa = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [27]を代入すると、歪速度  $\dot{\epsilon} \sim 10^{-14} - 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ を得ることができる。しかし、太陽、月、地球の潮汐によって生み出される典型的な応力の値は、深発月震の起きている深度で0.01-0.1

MPaと、kPaのオーダーでかなり小さいことが示唆されており(例えば[3, 4])、このような比較的大きい変形速度を実現することは非常に困難に思われる。深発月震の起きている温度・圧力条件下(約1000-1500 °C, 3.5-4.5 GPa) (例えば[13, 14])において、マントル物質(オリビン)と応力0.1 MPa, ドライ条件を仮定すると、実現される歪速度は  $\dot{\epsilon} = 10^{-21} - 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ となる。かなり高温側(>1400 °C)なら断熱変形が起こりえそうだが、全体的に断熱変形に必要な歪速度( $10^{-14} - 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ )と潮汐力によって実現される歪速度( $10^{-21} - 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ )の間にはギャップがあることがわかる(図4)。そして、この歪速度の条件をクリアしたとしても、1400 °C以上の高温条件では温度の上昇による物質の軟化の割合が小さく、式(2)を満たせない可能性が高い。例えば、応力を0.1 MPa[4]、物体の大きさを10 kmとすると、断熱変形に必要な歪速度  $10^{-14} \text{ s}^{-1}$ を得る。これらの条件を基に、式(2)から熱的不安定になる条件を考察してみると、歪にもよるが、比較的低温側で熱的不安定が起きやすくなることがわかる(図5)。そしてもう一つ考えなければならないのが、物体の大きさ(断層サイズ)についてである。これまでの先行研究では深発月震の断層サイズの大きさは~1 km程度であるという報告もある(例えば[2])。もし物体の大きさが1 kmほどだと仮定すると、まず断熱変形を実現するた

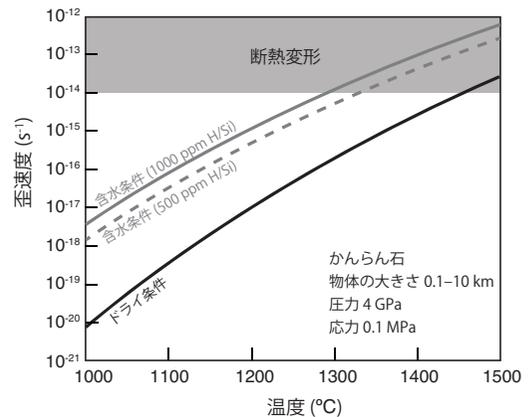


図4: 断熱変形が起きる条件と月内部で実現されるかんらん石の歪速度。かんらん石とその物体の大きさを0.1-10 km, 圧力は4 GPa[14]、応力0.1 MPa[4]と仮定し、ドライ条件とウェット条件(500ppm H/Siと1000ppm H/Si)でかんらん石の流動速[9]から歪速度を計算し、断熱変形の起こり得る温度条件を検討した。ウェット条件の方がドライ条件と比べて実現できる歪速度が大きくなり、低温で断熱変形を実現できることがわかる。

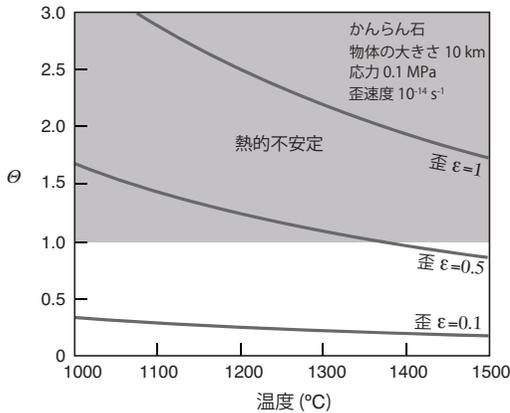


図5：熱的不安定と温度の関係。かんらん石に対して、物体の大きさ10 km、応力0.1 MPa[4]、歪速度 $10^{-14} \text{ s}^{-1}$ を仮定し、式(2)から熱的不安定の起きる条件を計算した。 $\Theta > 1$ で熱的不安定が起きる[26]。歪にもよるが、低温側で熱的不安定が起きやすいことが示唆される。

めに歪速度 $10^{-12} \text{ s}^{-1}$ 程度が必要となり(式(1))、月内部においてドライ条件でこの歪速度を実現するのは容易ではないだろう(図4)。いずれにせよ、月内部においてドライ条件を仮定したとき、断熱不安定現象が起きる可能性は低いといえる。この断熱不安定現象は、ある限られた領域(例えば低温で歪速度の大きい地球の沈み込むプレート内)では起こり得るが、月内部の深発月震にそのまま適用するのは難しいかもしれない。

上記のような低い応力(0.01–0.1 MPa)で深発月震を引き起こすには、既存の断層(もしくはそれに類似するもの)を起点として繰り返し起きていることを想定するのが妥当だと考えることもできる[6]。実際に月震波の観測からも、これら深発月震は局所的に同じ領域(クラスター)で繰り返し起きていることがわかっている(例えば[24, 28, 29])。これは月内部の不均一性に起因している可能性がある。不均一性を生み出す原因として考えられるのは、水の分布やメルトの分布が挙げられるだろう。例えば、もし月内部に水が存在し、その分布が不均一である場合、水が存在している領域は周囲と比べて岩石の強度は下がり、変形の局所化へとつながるだろう。さらに言えば、水があることで、潮汐によって実現される変形速度も飛躍的に大きくなり、断熱変形を比較的低温で起こすことも可能となる(図4)。月内部における水の存在についてはまだ議論があるが、水があることで熱的不安定を引き起こす条件を比較的低温でクリアでき、月深部で観測されてい

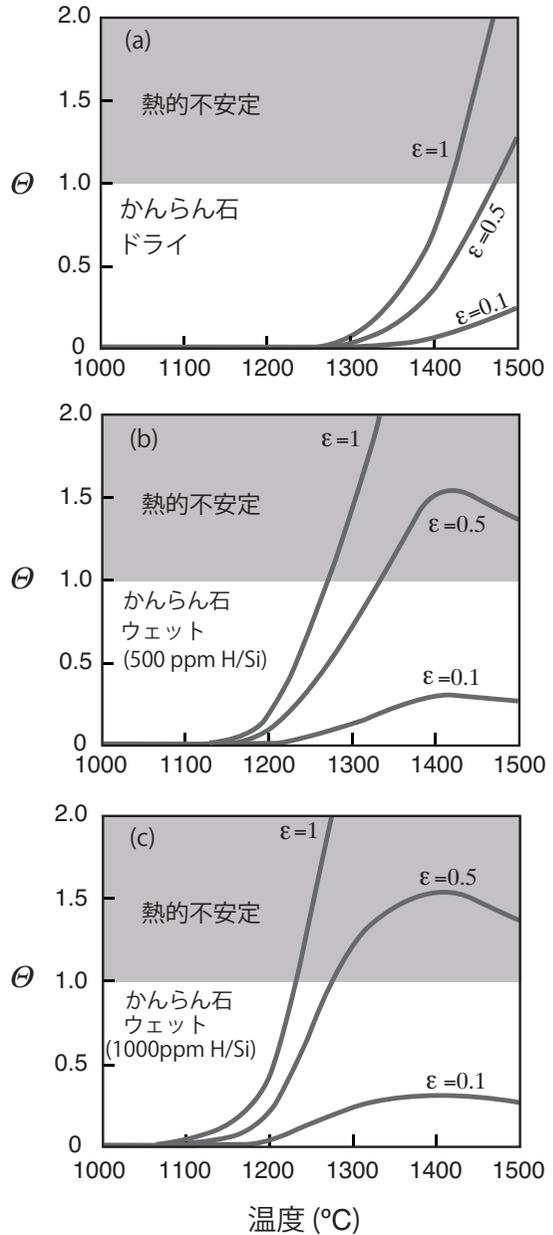


図6：ドライ条件とウェット条件(500ppm H/Si or 1000ppm H/Si)における熱的不安定。かんらん石に対して、深発月震が観測されている温度圧力[14]、応力0.1MPa[4]、含水量を仮定すると、流動速から実現される歪速度が決定できる[9]。それらの歪速度と式(2)から熱的不安定の起きる領域を計算した。 $\Theta > 1$ で熱的不安定が起きる[26]。ウェット条件の方が低温側で熱的不安定が起きやすくなることが示唆され、深発月震が起きている温度条件とも整合的になる。

る深発月震をうまく説明できるかもしれない。例えば、深発月震の起きる領域での温度圧力条件(約1000–

1500 °C, 約3.5-4.5 GPa.)[14]において, かんらん石, 応力0.1 MPa [4], そしてドライ条件orウェット条件 (500 or 1000 ppm H/Si)を仮定すると, 流動速から実現される歪速度が決まる [9]. その歪速度を用いて, 式(2)から熱的不安定の起きる条件を検証してみると, ドライ条件のときは熱的不安定が起きる領域は非常に狭いのに対し(図6a), ウェット条件の場合だと, 熱的不安定の起きる領域(条件)は低温側に拡大され, 観測されている深発月震の温度圧力条件(深さ)と合ってくることがわかる(図6b, c). ただ注意点として, ドライ条件を仮定したときにも述べたように, ウェット条件でも, これまで報告されてきた物体の大きさ(断層サイズ~1 km程度)より [2], やや大きめの断層サイズ(1-10 km)を想定しなければこの不安定現象を起こすのは難しいかもしれない(図4). そして, そもそも月深部に水が存在するのか, 存在するのであればどの程度の水が存在しているのかという疑問について考えなければならない. 最近の研究では月のQ値や電気伝導度などから月内部にはこれまで考えられていたよりも水が存在している(地球のアセノスフェア程度の水~0.01 wt%)可能性が示唆されている [30]. この深発月震の引き起こされる原因を解明するにあたって, 月内部の水の存在が鍵になるかもしれない. 逆に深発月

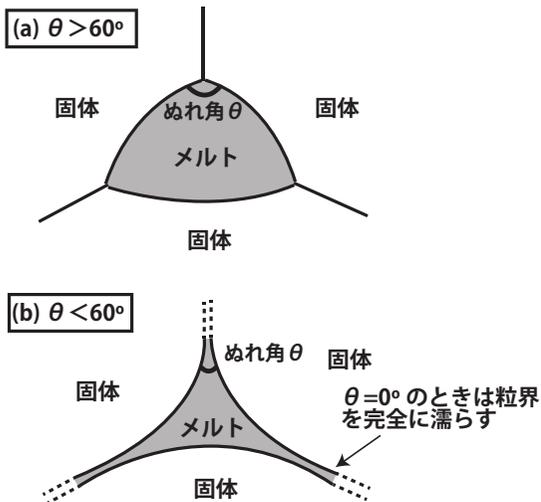


図7: (a):  $\theta > 60^\circ$ ★メルトのぬれ角の形状. (a)  $\theta > 60^\circ$ のとき, メルトは三重点に孤立して存在し, 界面を完全には濡らさない. (b)  $\theta < 60^\circ$ のときは図のようにメルトは粒界を濡らし始める. 特に  $\theta = 0^\circ$ のときは完全に粒界を濡らし, 力学的挙動を支配すると考えられる.

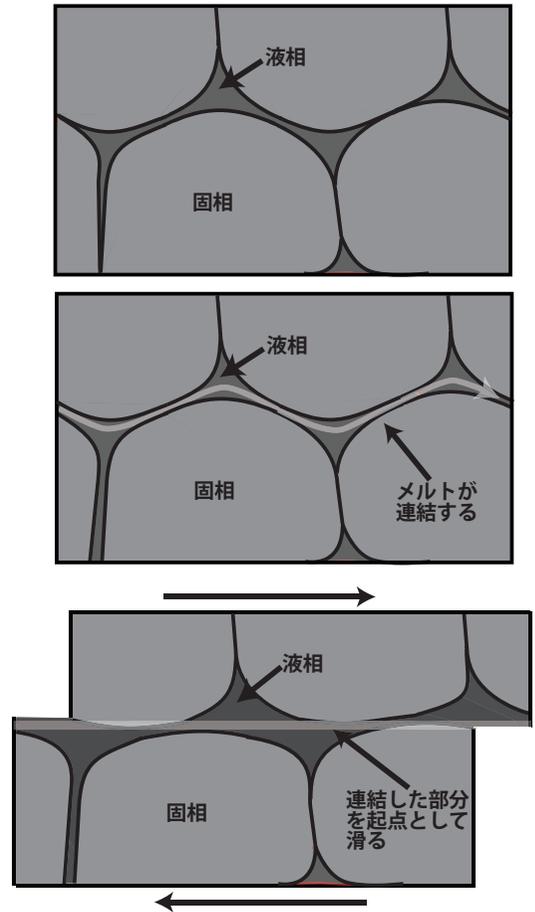


図8: メルトが連結することで滑りが起きるモデル. 高圧下においてメルトが連結し, その部分が断層のような役割をし, 最終的にそこを起点として滑りが起きる.

震の解明こそが月内部の水の存在とその分布を示唆するものになるかもしれない.

そして, もう一つ触れておきたいのがメルトの存在についてである. 月震波のデータ(弾性波の減衰領域)や, 月深部におけるメルトの密度に関する実験結果などから月の深部には部分溶融層が存在していることが示唆されている(例えば[31, 32]). メルトの存在によって, 岩石の強度は下がることは分かっているが[33-35], これまでの先行研究のほとんどは低圧下(~200 MPa)で行われており, 高圧下におけるレオロジーに対するメルトの影響はほとんど分かっていない. 特に高圧下ではメルトのぬれ角が小さくなることが分かっており [36], 最終的に約7 GPaでぬれ角は0°になる(結

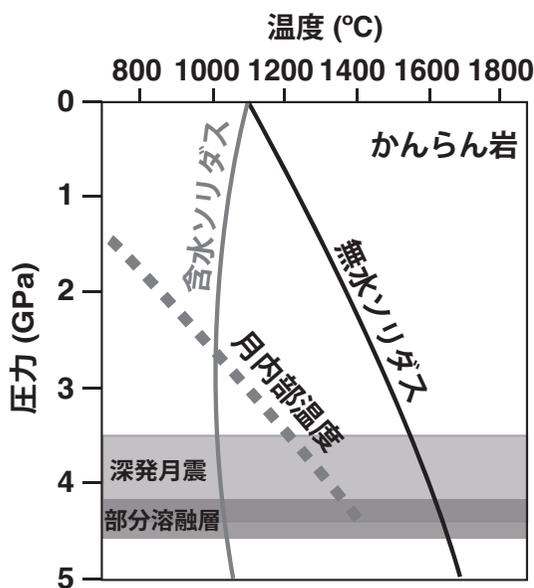


図9：月内部の温度圧力プロファイル[14]とかんらん岩のソリダス[38]の関係。先行研究から予想されている部分溶融層については[31]、無水で発生させるのは難しそうである。文献[38]図3から改変。

晶の界面がメルトによって完全に濡らされる) (図7)。つまり低圧下よりも高圧下の方がレオロジーに対するメルトの影響は大きくなるのが予想され、メルトによる岩石の軟化の割合は大きくなるだろう(圧力効果との競合にもなるが)。このメルトが存在する領域が変形の局所化を引き起こし、前述した不安定につながる可能性もある。もしくはこのメルト部分そのものが連結することで断層のような役割を果たし、滑りを引き起こすのかもしれない(図8)。高圧下でメルトが存在することにより、岩石レオロジーにおいて少なくとも3つの効果が生じると考えられる。①ぬれ角が小さくなることで、メルトが連結し物質の拡散を促進、変形挙動を支配する。②鉱物の結晶から水がメルトへと溶け込むことによって、周りの岩石(固体部分)を硬くする効果(つまり固体部分とメルト部分の強度差は大きくなる)。③メルトが間隙水圧として働き、物体にかかる有効圧を下げる効果。②の効果に関しては、月内部に水が存在することが条件ではあるが、いずれの効果も変形の局所化に一役買うだろう。そして、かんらん岩のソリダスと月内部の温度圧力構造を見比べると、水の存在無しにメルトを月内部に発生させるのは難しそうである(図9)。つまり、もしメルトによって

深発月震が引き起こされているのであれば、間接的に月内部の水の存在を示唆する可能性もあり、月内部の状態や月形成を考察する上で非常に有益な情報となる。いずれにせよ、深発月震を解明することは月内部の情報を得るために非常に重要であり、深発月震を解明するにあたって、高圧下における岩石レオロジーに対するメルトの影響も今後研究される必要があると言える。

#### 4. おわりに

惑星内部の力学的挙動や進化を考える上で岩石レオロジーの解明は必要不可欠である。本論では、深発月震についてレオロジーの観点と地球の深発地震を参考に考察を行った。深発月震を解明する上で、キーワードとなってくるのは水or/andメルトによる変形の局所化である可能性がある。今後は高圧下における変形実験に加え、これらの不安定現象を捉えるためにアコースティックエミッション、そしてX線CTや電気伝導度測定による微細組織のその場観察が重要になってくるだろう。もちろん、より詳しい月震波データの取得や解析、熱流量などから予測される月内部の温度構造の精度向上も必要不可欠である。

#### 参考文献

- [1] Wiczcerek, M. A. et al., 2006, Rev. Mineral. Geochem. 60, 221.
- [2] Nakamura, Y., 1978, Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th, 3589.
- [3] Goins, N. R. et al., 1981, J. Geophys. Res. 86, 378.
- [4] Cheng, C. H. and Toksoz, M. N., 1978, J. Geophys. Res. 83, 845.
- [5] Nakamura, Y., 1977, Phys. Earth Planet. Inter. 14, 217.
- [6] Lammlein, D. R., 1977, Phys. Earth Planet. Inter. 14, 224.
- [7] Karato, S. and Wu, P., 1993, Science 260, 771.
- [8] Hirth, G. and Kohlstedt, D., 2003, Geophys. Mongr. 138, 10.1029.
- [9] Karato, S. and Jung, H., 2003, Philos. Mag. 83, 401.
- [10] Byerlee, J., 1978, Pure Appl. Geophys. 116, 615.
- [11] Kohlstedt, D. et al., 1995, J. Geophys. Res. 100, 17587.
- [12] Burgmann, R. and Drasen, G., 2008, Annu. Rev. Earth

- Planet. Sci. 36, 531.
- [13] Hood, L. L. and Zuber, M. T., 2000, Origin of the Earth and Moon. University of Arizona Press, pp. 397.
- [14] Kuskov, O. L. et al., 2002, Phys. Earth Planet. Inter. 134, 175.
- [15] Lognonne, P. et al., 2003, Earth Planet. Sci. Lett. 211, 27.
- [16] Rybacki, E. and Dresen, G., 2002, J. Geophys. Res. 111.
- [17] Tsenn, M. C. and Carter, N. L., 1989, Tectonophysics. 136, 1.
- [18] Katayama, I. and Karato, S., 2008, Phys. Earth Planetary Inter. 168, 125.
- [19] Demouchy, S. et al., 2013, Phys. Earth Planet. Inter. 220, 37.
- [20] Green, H. W. II and Burnley, P. C., 1989, Nature 341, 733.
- [21] Griggs, D. T. and Baker, D. W., 1969, in Properties of Matter Under Unusual Conditions, New York, Interscience Publishers, pp. 23-42.
- [22] Ogawa, M., 1987, J. Geophys. Res. 92, 13801.
- [23] Meade, C. and Jeanloz, R., 1991, Science 252, 68.
- [24] Weber, R. C. et al., 2009, J. Geophys. Res. 114, doi: 10.1029/2008JE003286.
- [25] 唐戸俊一郎, 2000, レオロジーと地球科学, 東京大学出版会.
- [26] Karato, S. et al., 2001, Phys. Earth Planetary Inter. 127, 83.
- [27] Gibert, B. et al., 2003, Geophys. Res. Lett. 30, 2172, doi:10.1029/2003GL018459.
- [28] Nakamura, Y., 1981, J. Geophys. Res. 88, 677.
- [29] Nakamura, Y., 2005, J. Geophys. Res. 110, doi:10.1029/2004JE002332.
- [30] Karato, S., 2013, Earth Planet. Sci. Lett. 384, 144.
- [31] Weber, R. C. et al., 2011, Science 331, 309.
- [32] Van Kan Parker et al., 2012, Nat. Geosci. 5, doi:10.1038/NGEO1402.
- [33] Hirth, G. and Kohlstedt, D., 1995a, J. Geophys. Res. 100, 1981.
- [34] Hirth, G. and Kohlstedt, D., 1995b, J. Geophys. Res. 100, 15,441.
- [35] Mei, S. et al., 2002, Earth Planet. Sci. Lett. 201, 491.
- [36] Yoshino, T., et al., 2007, Earth Planet. Sci. Lett. 256, 466.
- [37] 大谷栄治, 地学雑誌 114, 338.
- [38] Hirth, G. and Kohlstedt, D., 1996, Earth Planet. Sci. Lett. 144, 93.

# Dawnが照らす惑星誕生の鍵： ベスタとHED隕石

山下 直之<sup>1</sup>

(要旨) NASAのDawnミッションは、惑星誕生の鍵を探るべく小惑星ベスタと準惑星ケレスを周回して元素、鉱物の分布調査や地質学的、地球物理学的観測を行っている。Dawn衛星に搭載されたガンマ線及び中性子検出器(GRaND)はベスタ赤道域において、炭素質コンドライト起源と考えられる水素が濃集する領域を発見した。南極域ではダイオジェナイト的な下部地殻が露出していることが確認された。またベスタの平均元素組成から、HED隕石のベスタ起源説を強く支持する結果が得られた。

## 1. はじめに

Dawnミッションは空間と時間を遡る旅である。太陽から離れた天体は、揮発性物質や有機物の量、温度が地球近傍とは異なる環境で誕生したと考えられ、より始原的な源物質を持つと考えられている。その中でも小天体は集積後、進化の過程が早期に終わっており、原始惑星に近い、大昔の情報を保持していると期待される[1]。この2点から、原型をある程度保持しているメインベルト小惑星は惑星誕生の過程を調査するのに最適である。さらに、凍結線をまたいで複数の小惑星を調査することで、惑星の形成・進化における水の役割を探ることが理想的である[2]。こうした理由から、小惑星4ベスタと、現在は準惑星に分類される1ケレス(セレス)がDawnミッションの探査対象天体選ばれた。

またベスタを特徴付ける事実として、ホルダイト・ユークライト・ダイオジェナイト(HED)隕石の存在が挙げられる。HED隕石は現在までに1.5トンを超える量が地上で見付かっており[3, 4]、隕石・天体サンプル量としては月、火星のものを大幅に上回る。酸素同位体比や反射スペクトル観測[5]から、これらHED隕石は共通の起源を持ち、それは小惑星ベスタであると考えられてきた。

これらHED隕石の起源説を検証することができれば、わざわざ宇宙空間を往復してサンプル・リターン・ミッションを行わずとも、膨大な量の小惑星サンプルを手に入れたことになる。ベスタの破片(と思いきものは我々の手中に既にあるのである。これを利用しない手はない。

## 2. Dawnミッションについて

Dawnミッションは2つの天体を周回観測するよう設計、実行された史上初の計画である。その観測対象は上記の理由から小惑星ベスタと、太陽から異なる距離にある準惑星ケレスに決定された。2007年9月27日、Dawn衛星はケープ・カナベラルから打ち上げられた。日本の月探査衛星、セレーネ打ち上げの13日後である。セレーネは3週間で月に到着したが、Dawnは火星フライバイを経て、最初の観測対象天体ベスタに到着したのは4年後の2011年7月である。DawnはNASA初のイオン噴射エンジンを用いた人工衛星であり、加減速に時間がかかるが、優れた燃料効率を持っている。これにより複数の天体について、フライバイだけではなく、1天体半径程度の高度まで接近した周回観測が可能となった。

Dawnには3つの観測機器(加えて、衛星自身を用いた電波科学)が搭載されている。1つ目はFraming Camera(FC)であり、ステレオカメラによる撮像を行

1. Planetary Science Institute  
yamashita@psi.edu

う [6]. 2つ目は Visible-InfraRed spectrometer (VIR) と呼ばれ、分光観測を行っている [7]. 3つ目はガンマ線及び中性子検出器 (Gamma Ray and Neutron Detector, GRaND) である [8, 9].

ベスタ軌道投入後、Dawn は3種類の高度から科学観測を行った。測量軌道 (3000 km)、高高度軌道 (950 km)、低高度軌道 (475 km) である。括弧内の距離はベスタの重心から軌道までの距離である。それぞれ、FC, VIR, GRaND による観測に適した軌道となっている。ベスタの平均半径は約 265 km と判明したので、低高度軌道ではベスタ表面から平均 210 km のところを周回したことになる。一般的にガンマ線や中性子分光計の空間分解能はおおよそ高度と同じオーダーであるので、天体半径ほどしか近づけなかったことは後の元素分布地図作成の大きな制限となった。

14ヶ月にわたる周回観測を終え、Dawn 衛星はベスタを 2012年9月に離脱、2年半の巡航後、第2の観測対象であるケレスの軌道に 2015年3月、投入された。本稿では主に GRaND によるベスタ観測について紹介する。

### 3. GRaNDについて

GRaND は天体表面から放出されるガンマ線と中性子を計測する核分光計である。過去のミッションで使用実績のある検出器と、新技術実証のため新型の検出器の両方が織り交ぜられ、21個の検出器から構成されており、様々な同時及び反同時計数を行っている。現在までに GRaND は惑星間空間、火星及びベスタ近傍で計測を行っており、ケレスの本格的観測も始まりつつある。

#### 3.1 検出原理

宇宙空間では、銀河宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子 (主に陽子やアルファ粒子) が等方的に飛び交っている。大気が薄い、もしくは存在しない天体にはそれら粒子が降り注いでいる。そうした天体の表面では、物質と宇宙線粒子の様々な原子核反応の結果、中性子及びガンマ線が生成され、宇宙空間に漏れ出している。また、天然放射性元素 (K, Th, U) は宇宙線の到達に関係なく自発的に崩壊し、ガンマ線を常に放出している。これら放射線を精度よく計測することにより、放射

線を発した物質についての情報が得られる。ガンマ線のエネルギーは放出した原子核固有の値を持っており、例えば 2.223 MeV のエネルギーを持ったガンマ線は水素 ( $^1\text{H}$ ) から、7.631 MeV のガンマ線は鉄 ( $^{56}\text{Fe}$ ) から放出されるということが分かっている。こうした離散的エネルギーを持ったガンマ線強度から、天体表面を構成する元素の組成や分布を決定することができる。また高速中性子 (> 0.7 MeV) は主に平均原子量を、熱外中性子 (0.5 eV ~ 0.7 MeV) は水素の存在量を、熱中性子 (< 0.5 eV) は中性子吸収断面積 (Fe, Ca, Al など) が大きく寄与 [8]) などの情報をもたらす。こうした放射線は透過性が高いため、惑星核分光法では天体表面から数十 cm の深さまでの元素組成を探索することができる。

#### 3.2 検出器

メインのガンマ線検出器として、Bismuth Germanate (BGO) シンチレータが採用された。これは NASA の Lunar Prospector (LP) ミッションで用いられた実績を持つ検出媒体 [10] で、エネルギー分解能は 10% (@662 keV) である。セレーネ (かぐや) ミッションで用いられたゲルマニウム検出器 (~0.5% @662 keV) [11, 12] と比較して 20 倍も分解能は劣るが、冷却の必要がなく、高い検出効率を誇る。0.4 - 9 MeV の範囲をカバーする。

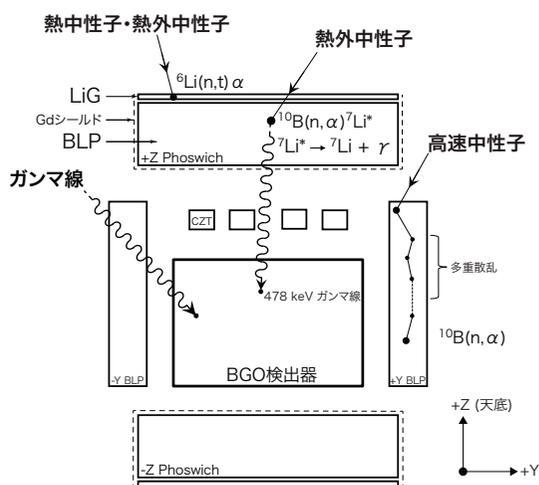


図1: Dawn衛星搭載のガンマ線及び中性子検出器 (GRaND) の模式図。21個の検出器の出力が独立に記録され、天体から放出されたガンマ線と中性子線の同時・反同時計数を行っている。略語については本文参照のこと。

サブのガンマ線検出器として、Cadmium Zinc Telluride (CZT) 半導体検出器も搭載している。4×4個のアレイを構成する。これは技術実証実験であり、残念ながら今のところ、BGOを上回るほどにはサイエンスに貢献していない。エネルギー分解能は打ち上げ前試験において1%以下(@662 keV)、3 MeVまでの範囲をカバーする。

中性子検出器は、ガンマ線検出器を囲むように、その上下、左右の4箇所(+Y, -Y, +Z, -Z)に設置されている(図1参照)。左右のもの(+Y, -Y)はL字型をしており、ホウ素添加のプラスチック・シンチレータ(boron-loaded plastic, BLP)である。これは多重散乱を検出して高速中性子を測定する。上下のもの(+Z, -Z)はBLPとlithiated glass (LiG) のphoswich(2つのシンチレータを光学的に接続し、1つの光電子増倍管で両方の光量を同時に測定する配置)になっており、LiGにおいて主に熱中性子を、BLPにより熱外中性子を、BLP多重信号により高速中性子を測定する。BLPはNASAのLP(月探査)、Mars Odyssey(火星探査)、MESSENGER(水星探査)ミッションで用いられた実績がある。LiGは惑星探査に初めて採用された。

GRaND内の全ての検出器は連動している。3つ以上の検出器が同時に信号を検出した場合は、宇宙線高エネルギー粒子が突き抜けたと判断する。天体からの放射線は宇宙線により励起されたものがほとんどなので、宇宙線の強度変動を補正することは元素組成導出のために不可欠である。また、CZTとBGOの同時計数を行うことでコンプトン望遠鏡を実現し、人工衛星起源のバックグラウンド・ガンマ線を除去するモードも同時に記録している。

## 4. これまでの成果

ベスタ表面の元素組成は、月に比べて変化に乏しい。これはベスタの大きさから、月ほど大規模な火成活動が期待できないこと、HED隕石の組成変動などから予想はされていた。月とは違って斜長石やかんらん石に乏しく、ましてや嵐の太平洋周辺のような、放射性元素が濃集した領域は見つかっていない。よって例えるならば、月から高地、西側の海、南極エイトケン盆地を除いた領域、すなわち東側の海のみを観測しているようなものである(さらに言えばチタンもほとんどな

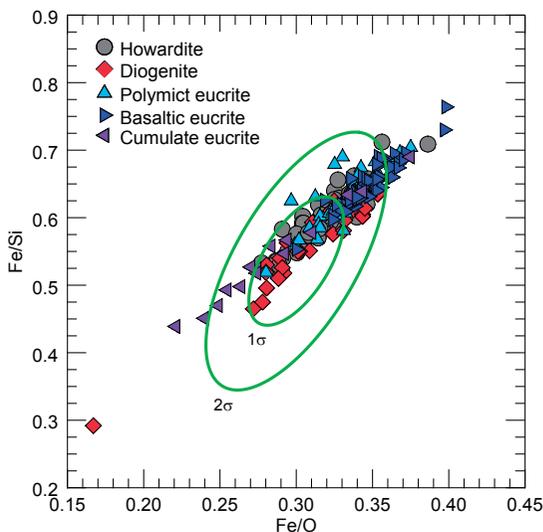


図2: ガンマ線分光によるベスタの平均元素組成(誤差範囲 $1\sigma$ ,  $2\sigma$ )と、HED隕石との比較\*。

い)。したがって分布図を作成できるほどの十分な統計精度をもって変動が確認できた観測量は現在のところ、水素[9]、鉄[13]、中性子吸収量[14]、平均原子量[15]、高エネルギーガンマ線[16]のみである。鉄・酸素比、ケイ素・酸素比、カリウム、トリウム存在量については、全球平均値を導出した[9, 17]。しかしながら、今後の解析で新たな元素情報が導出される可能性も十分に残されている。

ベスタ表層の鉄・酸素比、ケイ素・酸素比は、幅広い隕石の値の中でもHED隕石のものによく一致したが、ややダイオジェナイトとキュムレイト・ユークライトよりの結果となった(図2)。観測結果はHED隕石のベスタ起源説を強く示唆している[9]。

図3にベスタ地形図[18, 19]、及び水素[9]、鉄[13]分布図を示す。地形図より、赤道付近が盛り上がり、北極、南極域が低い、南北に潰れた歪な形をしていることが分かる。南半球にはベネネアと、それよりも新しいレアシルビアと呼ばれる2つの巨大なベースン[19]が折り重なって存在する(図3a)。水素は赤道領域に濃集しており、逆に南極域、特にレアシルビア・ベースン内は極端に欠乏していることが分かった(図3b)。この巨大ベースン内での熱外中性子量最低点を水素量ゼロとすると、赤道域には約400  $\mu\text{g/g}$ 、全球

\* カラー図は電子版を参照のこと。

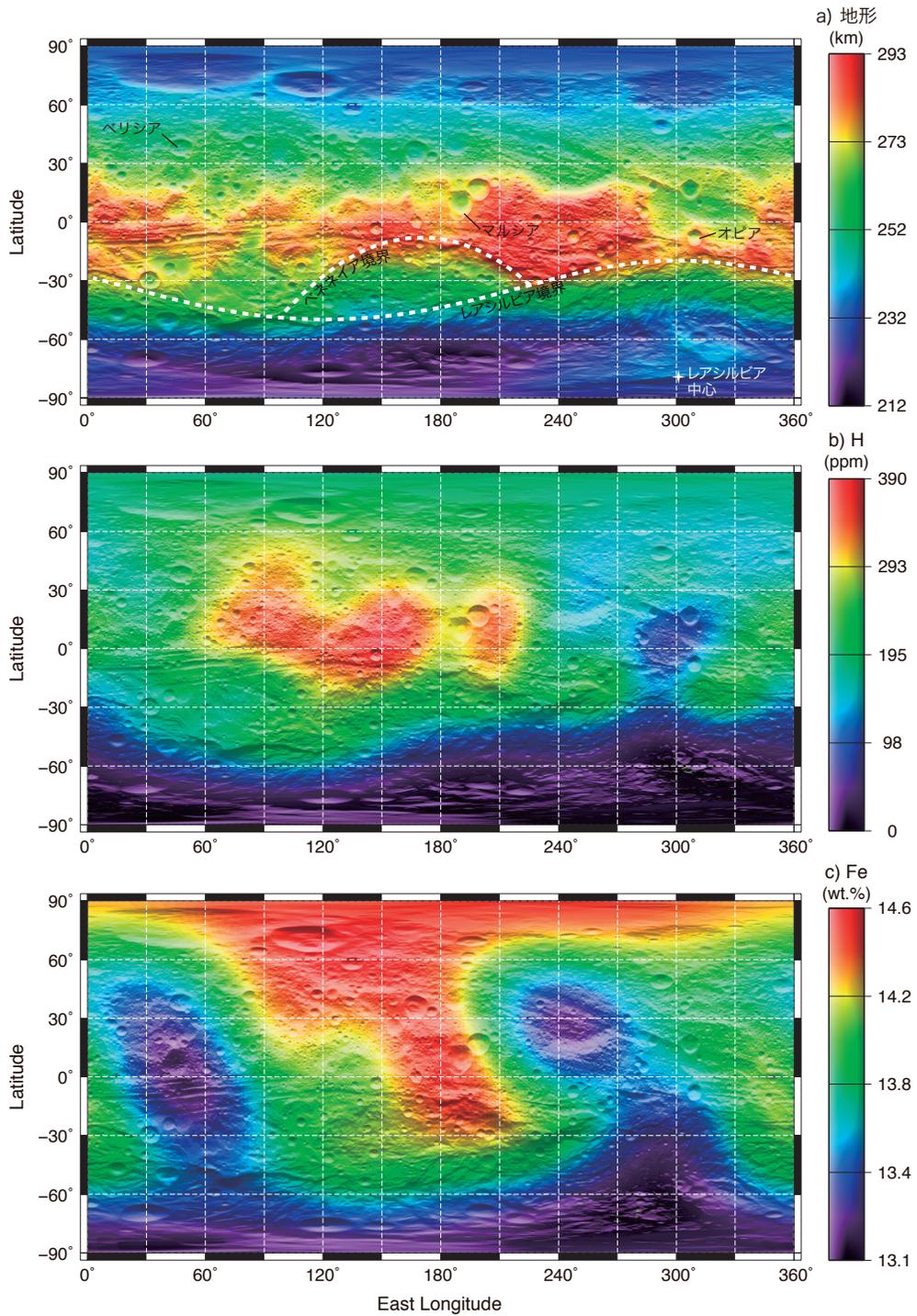


図3： Dawnミッションにより得られたベスタの a) 地形図[18, 19] 及び b) 水素[9], c) 鉄[13]の分布図. ベネネシア, レアシルビア・ベースンのおおよその境界を白の破線で示した. Claudia座標系. 地形図はベスタ重心からの距離を示す.

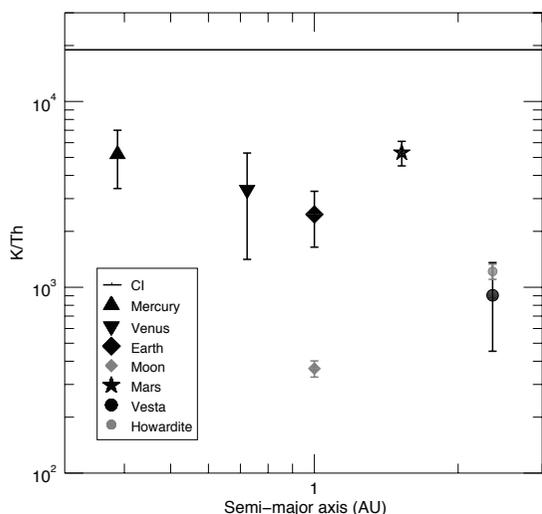


図4：主な太陽系天体のK/Th比の観測結果[17, 21-26]。太陽からの距離の関数として示した。

平均で約200  $\mu\text{g/g}$ 程度の水素が存在することになる。赤道域には極域と違い、水や氷を日照から守って極低温に保てるような永続的な陰はないので、水素原子は水和物の形で保持されていると解釈されている。水素分布はクレータ密度、及びアルベドとよい相関をもっており、炭素質コンドライトによって運ばれてきた水素が表層に降り積もり、レアシルビア・ベースンを形成した衝突イベントによって撒き散らされた物質によって覆い隠された結果、作られた分布と考えられている[9]。

鉄存在量はレアシルビア内で低く、逆に北極域で高いことが明らかになった(図3c)。このベースン内では鉄量と中性子吸収量[14]の両方が非常に低い。よって、レアシルビア・ベースン内はHED隕石の中でもダイオジェナイト成分が比較的多く含まれると考えられる[13, 14]。このベースンの深さと地殻厚を考えた場合、下部地殻が露出していると考えられるが、组成的にもこの説と矛盾しない。またこの成分は東側(北を上としたとき、子午線の右側、東経0°から90°あたり)において葉状に北に伸びており、北半球まで達していることが分かった。これは巨大衝突で地殻が深く掘り下げられダイオジェナイトが露出したこと、その時の噴出物が降り積もったと考えられている。

また西側(子午線の左側)には鉄量が少なく、中性子吸収量が中程度の低地(北緯30°、東経240°付近)があ

る。これはHED隕石の組成のうち、キウムレイト・ユークライトに相当する[13]。同様に鉄量と平均原子量の分布から、北極域の広範囲にわたってYamato Type-Bダイオジェナイトに対応すると考えられる領域が報告されている[4]。

比較的揮発性の高いカリウムと、難揮発性のトリウムの存在量からも、HED隕石のベスタ起源説がさらに支持された。Wasson(2013)はGRaNDの初期観測結果(カリウムの上限値1000  $\mu\text{g/g}$  [9])から、ベスタ起源説を否定的にとらえていたが[20]、解析が進んだ結果、カリウムの全球平均値が $595 \pm 35 \mu\text{g/g}$ 、トリウムが $657 \pm 59 \text{ ng/g}$ と導出されたことにより[17]、この主張は論駁された。図4にベスタを含む太陽系の主な天体のK/Th比[17, 21-26]を示した。ベスタのK/Th比は $900 \pm 400$ となり、カリウムが若干欠乏していることから、ベスタの形成時期は早く、熱くて完全に凝結していない太陽系星雲から集積したか、衝突等によりカリウムが取り除かれたと結論付けられた[17]。

## 5. 観測データについて

GRaNDの観測データはすべてNASAのPlanetary Data System(PDS)内の、Small Bodies Nodeで公開されている[27]。処理レベルによって複数の種類があり、Level-1Aは工学値変換を終えた(ほぼ)生データであり、可逆な校正のみが適用されている。これは時系列データで、取得された全てのイベントを含む。Level-1Bは不可逆な校正が適用されており、ゲイン補正を中心とした様々な校正、補正、データ選別を行い、惑星科学の研究に適した形で提供されている[28]。Level-1Bデータも時系列スペクトルである。Level-2データはマップ・データであり、様々な観測量が緯度、経度ごとにまとめられている。これらデータは一般公開されており、誰でも自由に利用できる。またベスタの地形データはDawn Public Dataサイトで公開されている[18]。両サイト共、ケレス観測結果も順次追加されている。さらなるデータ利用が進み、サイエンスが促進されることを願う。

## 6. まとめ

GRaNDを用いた中性子、ガンマ線観測によって、

ベスタの元素組成が明らかになりつつある。赤道域のクレータ密度が高く、アルベドの低い領域に水素が濃集していることから、炭素質コンドライトが長期間にわたり降り注いだことによってベスタ表面に水素がもたらされたと考えられる。南極域にあるリアシルビア・ベースンは上部地殻を剥ぎ取っており、ダイオジェナイトの物質を露出、拡散させている。主要元素、天然放射性元素の組成比は、HED隕石のベスタ起源説を強く示唆している。GRaNDの空間分解能は限定的であるが、一部の地域は特定のHED隕石の組成と一致するような特徴を示している。ベスタ上でかんらん石がほとんど見付からないなど、謎はまだ多く残されているが、原始惑星に近いと考えられる天体の理解が進むことで、惑星の誕生・進化の過程に光が照らされつつある。観測データは逐一公開されている。FC、VIRによる観測データも含めて、惑星科学コミュニティ全体による更なる解析にも期待したい。また、ケレスの本格的な元素組成観測は2015年12月から始まる。謎の白点や高さ約5 kmのピラミッド型地形など、話題の多いこの準惑星の観測結果にも注目である。

## 謝 辞

本稿で利用したデータは、NASAのDawnミッションにより取得、解析されたものです。Dawn PI(Prof. C. T. Russell)、ステレオ写真傾斜測定チーム(Drs. R. Gaskell and N. Mastrodemos)、FC PI(Dr. A. Nathues)、GRaND PI(Dr. T. H. Prettyman)、及びDawnミッション関係者各位に深く感謝いたします。さらに、本稿に対し有益なコメントをいただいた唐牛讓氏にこの場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Keil, K., 2002, in *Asteroids III*, 573.
- [2] Russell, C. T. et al., 2012, *Science* 336, 684.
- [3] The Meteoritical Bulletin Database, <http://www.lpi.usra.edu/meteor/>.
- [4] Beck, A. W. et al., 2015, *MAPS* 50, 1311.
- [5] McCord, T. B. et al., 1970, *Science* 168, 1445.
- [6] Sierks, H. et al., 2011, *SSR* 163, 263.
- [7] De Sanctis, M. C. et al., 2012, *Science* 336, 697.
- [8] Prettyman, T. H. et al., 2011, *SSR* 163, 371.
- [9] Prettyman, T. H. et al., 2012, *Science* 338, 242.
- [10] Feldman, W. C. et al., 2014, *JGR* 109, E07S06.
- [11] Yamashita, N. et al., 2010, *GRL* 37, L10201.
- [12] Yamashita, N. et al., 2012, *EPSL* 353–354, 93.
- [13] Yamashita, N. et al., 2013, *MAPS* 48, 2237.
- [14] Prettyman, P. H. et al., 2013, *MAPS* 48, 2211.
- [15] Lawrence, D. J. et al., 2013, *MAPS* 48, 2271.
- [16] Peplowski, P. N. et al., 2013, *MAPS* 48, 2254.
- [17] Prettyman, T. H. et al., 2015, *Icarus* 259, 39.
- [18] Dawn Public Data, <http://dawndata.igpp.ucla.edu>.
- [19] Jaumann, R. et al., 2012, *Science* 336, 687.
- [20] Wasson, J. T., 2013, *EPSL* 381, 138.
- [21] Peplowski, P. N. et al. 2011, *Science* 333, 1850.
- [22] Surkov, Y. A. et al., 1986, *JGR* 91, E215.
- [23] Lodders, K. and Fegely, Jr., B., 1998, *The Planetary Scientist's Companion* (Oxford: Oxford University Press).
- [24] Prettyman, T. H. et al., 2006, *JGR* 111, E12007.
- [25] Taylor, G. J. et al., 2006, *JGR* 111, E03S06.
- [26] Barrat, J. A. et al., 2009, *MAPS* 44, 359.
- [27] Prettyman, T. H. et al., 2014, *NASA Planet. Data Sys., Dawn at Vesta Reduced Data Records*.
- [28] Yamashita, N. and Prettyman, T. H., 2014, *NASA Planet. Data Sys., Dawn at Vesta Reduced Data Records*.

# 系外惑星「遠い世界の物語」その7

## ～原始惑星系円盤観測から探る系外惑星～

金川 和弘<sup>1</sup>

(要旨) 近年のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA望遠鏡)やハワイ・マウナケアの大型光学赤外望遠鏡(すばる望遠鏡)など大型望遠鏡を用いた原始惑星系円盤観測の進歩により惑星形成領域にギャップ構造をもつ円盤が多数発見されている。このような円盤ギャップ構造の形成を説明する有力なメカニズムとして、惑星と円盤との重力相互作用が挙げられる。本稿では、観測されたギャップが惑星によって形成されたかとする、その構造からギャップを形成した惑星にどのような制限をつけることができるのかについて紹介する。また、ALMAの長基線観測キャンペーンで得られたデータを元にHL Tau円盤のギャップの構造から惑星質量を見積もった結果も併せて紹介したい。

### 1. はじめに

原始惑星系円盤は、星の誕生と同時に星の周囲に形成され、水素ヘリウムからなるガス成分と、塵(ダスト)成分から構成される。我々の地球に代表される岩石惑星や木星のような巨大ガス惑星は、その名が表すとおり、原始惑星系円盤の中で生まれる。円盤に含まれるダスト成分の集積によって、岩石惑星や巨大ガス惑星のコアが形成される。そのうち、巨大惑星のコアは周囲の円盤ガスを捕獲し、大量のガスをまとった巨大惑星へと成長すると考えられている。また、ガス円盤との重力相互作用はある程度大きな岩石惑星や巨大ガス惑星を円盤の内側(または外側)に移動させてしまう。このように、ガス惑星の存在は惑星の質量および軌道半径の進化に強く影響する。その後、円盤ガスが散逸すると、現在の太陽系のようなガス成分を周囲に持たない中心星と惑星から成る系ができあがる。視線速度法やトランジット法などで観測されるのは主にこの段階の惑星である。このような系外惑星観測からは、太陽系惑星では見られない中心星に非常に近い位置を公転する巨大ガス惑星(ホットジュピター)や地球サイ

ズの惑星、それとは逆に中心星から非常に遠方に存在する惑星が多数観測されている。系外惑星発見以後の惑星形成論の大きな課題として、このような太陽系惑星とはかけ離れた惑星を持つ惑星系の形成を説明できるように太陽系の形成モデルを拡張していく必要がある。どのようにして多彩な惑星系が形成されたのか? その一つの原因として考えられているのが、原始惑星系円盤と惑星の相互作用である。

観測的な制約から、これまでは主に理論面から原始惑星系円盤中の惑星形成および進化の研究が進められてきた。しかし、近年ではALMAやすばる望遠鏡などによって原始惑星系円盤の惑星形成領域の直接観測が可能になり、円盤中の惑星形成および進化に対して理論研究だけでなく、観測的にアプローチすることもできるようになってきた。実際に、ALMAやすばる望遠鏡によって惑星が作ったと考えられるスパイラルやギャップ構造を持った原始惑星系円盤が多数発見されている。このような観測からは円盤ギャップの深さ、幅およびガス温度を読み取ることができる。原始惑星系円盤のギャップ構造が惑星と円盤の相互作用で形成されたかとする、円盤観測から得られた観測量からそのギャップを作った惑星の情報を得ること可能だろうか? 本稿では、まず惑星が原始惑星系円盤にギャップを作るメカニズムについて簡単に触れた後、実際に観

1. 北海道大学低温科学研究所  
2016年1月よりポーランド シュチェチン大学に異動。  
kanagawa@lowtem.hokudai.ac.jp

測されたギャップ構造からどのようにして惑星質量が見積もられるのかについて、筆者の最近の論文[1-3]を元に紹介していきたい。

## 2. 巨大惑星による円盤ギャップ構造の形成

この節では、原始惑星系円盤中に誕生した巨大ガス惑星によるギャップ形成のメカニズム(円盤-惑星相互作用)について簡単に説明していきたい。さて、まずは円盤にギャップを開けないような比較的小さな惑星(月質量から数地球質量程度)を考えよう。惑星が形成されるような段階にある円盤は、中心星重力と遠心力がほとんど釣り合った状態、すなわちケプラー回転していると考えられる。このような差動回転(ケプラー回転)する円盤の中に、惑星が存在すると図1のように、惑星重力によって生じた密度揺らぎ、いわゆる密度波が励起される。密度波は惑星との相対速度が超音速であるような領域で励起されるため、波は惑星が存在するという情報をもって惑星から離れる方向に伝播していく。円盤内側ほど速い回転速度を持つため、図1のように、惑星より外側( $x > 0$ )では惑星の後方に、惑星より内側( $x < 0$ )では惑星の前方に密度波が存在する。このため、惑星の後方にある密度波( $x > 0$ )は惑星を後方に引っ張ることで惑星の回転速度を遅くする。逆に、惑星の前方にある密度波( $x < 0$ )は惑星を前方に引っ張るため、惑星の回転速度を速くするように働く。このような重力相互作用は惑星にトルクを及ぼし、惑星の惑星の軌道長半径を変化させる。また、惑星が受けたトルクの反作用として密度波も惑星から角運動量を受け取る。すなわち、惑星の後方にある波は正の角運動量を、惑星の前方にある波は負の角運動量をそれぞれ惑星から受け取ることになる。惑星から受け取った角運動量は波と共に惑星から離れる方向に運ばれ、やがて密度波が減衰すると周囲の円盤ガスに受け渡されることになる。このプロセスは、後述する円盤ギャップの形成において非常に重要である。

木星のような巨大惑星は、周囲の円盤ガスとのやり取りによって惑星軌道に沿ったギャップ構造を形成する。円盤と惑星の重力相互作用は惑星質量が大きくなるほど強くなり、惑星から円盤ガスに受け渡される角運動量は多くなる。前述のように惑星軌道の内側のガスは負の角運動量を惑星から受け取るため、円盤の内

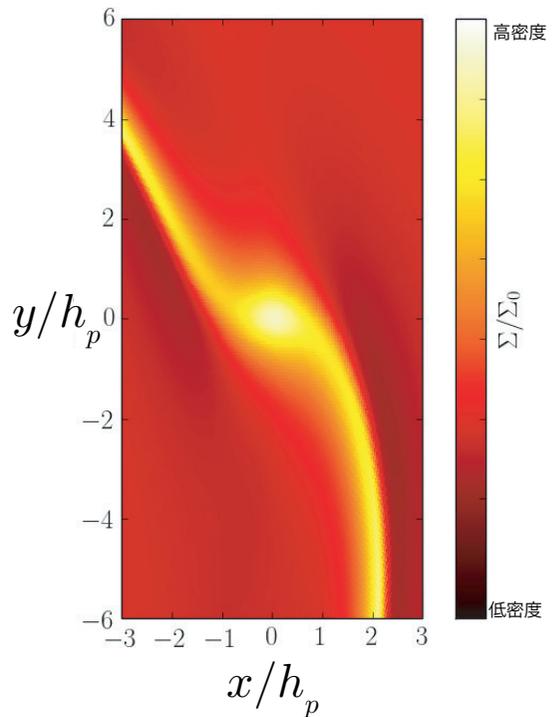


図1: 2次元数値流体計算によって得られた惑星近傍の原始惑星系円盤のガス面密度構造。円盤ガスとの重力相互作用によって惑星が円盤に密度波を励起していることが分かる。図は、惑星質量が $M_p = 3$ 地球質量、円盤の温度を反映する円盤の鉛直方向の厚み( $h_p$ )が惑星の軌道長半径( $R_p$ )の5%、および円盤粘性の強さを表すパラメータ $\alpha$ が $10^{-3}$ のときの計算結果。(粘性のパラメータ $\alpha$ の値が大きいかほど円盤粘性が強いことを表している。)

側方向に移動する。同様に、惑星軌道の外側のガスは正の角運動量を惑星から受け取るため、円盤外側に移動する。このような角運動量の交換に伴う円盤ガスの移動によって惑星の近傍領域からガスが取り除かれ、惑星軌道に沿った低ガス密度領域(円盤ギャップ)が形成される(図2)。一方で、このようなギャップ構造は円盤内の乱流に起因する実効的な粘性によるガスの拡散によって徐々に埋められる。最終的なギャップの深さは、惑星が円盤に及ぼす重力トルクの大きさとガスの粘性拡散の強さの釣り合いで決まる。惑星トルクの大きさは惑星質量に関係しているため、ギャップの深さは惑星質量を反映している。すなわち、質量が大きな惑星ほど深いギャップを開けることができる。後述のように、この関係を利用してギャップの深さからそれを作った惑星の質量を見積もることができる。

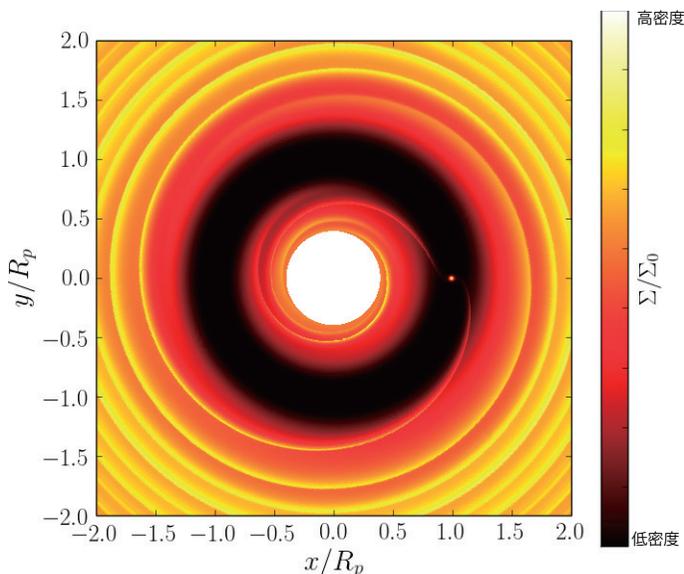


図2：数値流体計算から得られた巨大惑星周りの原始惑星系円盤の構造。巨大惑星の軌道に沿って軸対称な低ガス密度領域(ギャップ領域)が形成されているのが分かる。図は、 $M_p = 1M_J$ ,  $h_p/R_p = 0.05$ ,  $\alpha = 10^\circ$ の場合の計算結果。( $M_J$ は木星質量。)

ギャップの幅については密度波の伝播および減衰過程と密接に関係していると考えられている。密度波は円盤内を惑星から遠ざかる方向に伝播していく内に、円盤粘性や波の非線形発展に伴う衝撃波によって徐々に減衰する。波が減衰した場所で波が運んでいた角運動量が円盤ガスに受け渡され、ガス密度の勾配が形成される。すなわち、密度波の減衰プロセスがギャップの幅を決定しているのである。しかしながら、従来の波の減衰モデルは地球質量程度の比較的小さな惑星の場合ではギャップの幅をよく再現するのだが、木星のような巨大惑星が作るギャップの幅を説明できない[4]。このようにギャップの幅を決めるメカニズムは未だ分からない部分が多いが、数値流体シミュレーションの結果によると惑星質量が大きくなるほど幅の広いギャップが形成されることが分かっている[5, 6]。もし、ギャップ幅と惑星質量の定量的な関係が得られればギャップの幅から惑星質量を見積もることが可能となる。次節では、筆者の最近の研究で得られたギャップ深さおよびギャップ幅と惑星質量の定量的な関係を示し、実際に円盤観測(特にミリ波やサブミリ波観測)から得られる観測量からどのように惑星質量を見積もれるのかを見ていきたい。

### 3. 円盤ギャップ構造の直接観測による惑星質量の見積もり

現在までにミリ波やサブミリ波の観測によって、ギャップ構造を持つ原始惑星円盤が多数発見されている[7-10]。このようなギャップ構造の形成過程として、前節で説明した惑星-円盤相互作用の他に、例えば、ダストの焼結によるもの[11]、円盤のデットゾーン形成に伴うもの[12]、またダストとガスの摩擦を考慮した永年重力不安定性によるもの[13]など様々な形成モデルが提唱されている。しかしここではギャップは惑星によって形成されたものとして話を進めていきたい。円盤ギャップ構造を観測したとき、観測量としてギャップの深さ、幅および円盤温度を得ることができる。このような観測量と惑星質量の定量的な関係が得られれば、その関係を用いて観測量からギャップ中の惑星質量を見積もることができるだろう。ギャップの深さと惑星質量の関係は、最近の幅広いパラメータ空間の高空間解像度の数値流体シミュレーションを用いた研究[5, 6, 14]によって調べられている。また、筆者の最近の研究[1, 2]では、上記の数値流体シミュレーションで得られたギャップ深さを再現するような簡単な理論モデルを構築した。その理論モデルによると、ギャ

ップの深さ(ギャップの底のガス密度 $\Sigma_{\min}$ とギャップ端のガス密度 $\Sigma_0$ の比)は以下のように表される.

$$\frac{\Sigma_{\min}}{\Sigma_0} = \frac{1}{1 + 0.04K}, \quad (1)$$

ここで, 無次元のパラメータ $K$ は以下のように定義される.

$$K = \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-5} \alpha^{-1}. \quad (2)$$

ここで,  $M_p$ ,  $M_*$ ,  $R_p$ ,  $h_p$ ,  $\alpha$  はそれぞれ惑星質量, 中心星の質量, 惑星の軌道長半径と惑星位置での円盤の厚み, およびShakura & Sunyaevの粘性パラメータ[15]を表す. また, 惑星位置での円盤の厚み $h_p$ と惑星の軌道長半径 $R_p$ の比を円盤アスペクト比と呼ぶ. 図3は式(1)と数値流体シミュレーションで得られたギャップの幅を示している. 式(1)は数値流体シミュレーションの結果をよく再現していることが分かる. 無次元パラメータ $K$ は惑星質量, 円盤アスペクト比, 円盤粘性の組み合わせであるので円盤のアスペクト比, 円盤粘性の大きさが分かれば, ギャップの深さから惑星質量の見積もりを行うことができる[2]. しかしながら, ギャップの深さによる見積もりにはギャッ

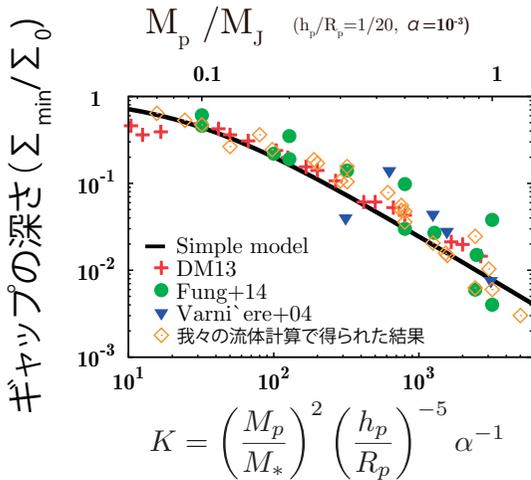


図3: 惑星が作るギャップの深さ. 縦軸はギャップ深さ(ギャップ底とギャップ端のガス密度の比), 横軸は無次元のパラメータ $K$ . シンボルは数値流体計算[5, 6, 14]で得られたギャップの深さを表している. 黒線は筆者らのモデルと与えられるギャップ深さ(式[1]). (Kanagawa et al. 2015b [2] Figure 1を改変.)

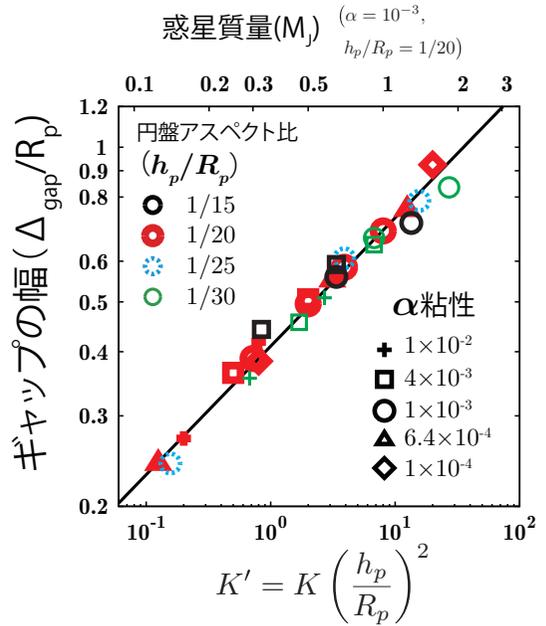


図4: 筆者らの数値流体計算で得られたギャップの幅(縦軸)と無次元のパラメータ $K'$ (横軸)との関係. ギャップの幅 $\Delta_{\text{gap}}$ はギャップの端をガス面密度がギャップ外側の値の半分になった場所とし, その間の距離として定義している. (Kanagawa et al. 2015c [3] Figure 3を改変.)

プ底ではガス密度が小さくそこから発せられる放射も弱いため, 深いギャップであるほど正確にギャップのガス密度を見積もることが困難になってくるという弱点がある. 一方で, ギャップの幅はギャップの底に比べてガス密度が大きいので観測が容易である.

ギャップの幅と惑星質量の間にはどのような関係があるのだろうか? 筆者らはその関係を調べるために, 様々な惑星質量, 円盤アスペクト比, および円盤粘性を持つ円盤についてギャップ形成の数値流体シミュレーションを行った[3]. その結果得られたギャップの幅が図4である. ここで, ギャップの幅 $\Delta_{\text{gap}}$ はギャップの端をガス面密度がギャップ外側の値の半分になった場所とし, その間の距離として定義している. この図から分かるように, ギャップの幅は以下で定義される無次元のパラメータ $K'$ でよくスケールされ,

$$\begin{aligned} K' &= \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-3} \alpha^{-1}, \\ &= K \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^2, \end{aligned} \quad (3)$$

ギャップ幅は以下のような経験式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p} &= 0.41 K' \\ &= 0.41 \left( \frac{M_p}{M_*} \right)^{1/2} \left( \frac{h_p}{R_p} \right)^{3/4} \alpha^{-1/4}. \quad (4) \end{aligned}$$

この関係式を用いることで、ギャップ深さを用いた惑星質量の見積もりの場合と同じように、ギャップの幅から惑星質量を求めることができる。

この節ではギャップの観測量から惑星質量を見積もる方法としてギャップの深さを用いる方法(式[1])とギャップの幅を用いる方法(式[4])を紹介した。もし観測されたギャップが惑星が作ったもので、かつギャップの深さ・幅共に十分な精度で観測されたとする、そのギャップ深さ、幅からそれぞれ見積もった惑星質量は一致するはずである。すなわち、式(1)と(4)から惑星が作ったギャップと深さと幅が満たすべき以下の関係を導き出すことができる。

$$\left( \frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p} \right) \left( \frac{\Sigma_{\text{min}}}{\Sigma_0 - \Sigma_{\text{min}}} \right)^{1/4} \left( \frac{h_p}{R_p} \right)^{-1/2} = 0.92. \quad (5)$$

ここで、円盤のアスペクト比は観測量であるガス温度から見積もることができるので、式(5)の左辺は観測量だけで構成されていることが分かる。つまり、式(5)を使えば、観測量だけから観測されたギャップが惑星が作ったものかどうかを判別することができる。

次節では上記の関係式の観測への応用について述べるが、その前にこの節で紹介した惑星質量の見積もりを観測に適用する際の注意点を述べていきたい。ここで我々のモデル(式(1)と(4))は円盤ガスのギャップ構造に適用されるべきものである。一方で、ALMAなどによるミリ波サブミリ波連続光の観測で得られるのは、円盤ガスに含まれているダスト成分の分布である。したがって、ダストとガスのカップリングが弱い場合にはこのような観測で得られた結果には我々のモデルは適用できない。ダストとガスで同じギャップ深さ、幅が観測されるかどうかは円盤のガス密度、円盤粘性に依存しており、ガス密度円盤粘性が大きいとダストとガスと同じギャップ深さ、幅のギャップが観測される[16]。例えば、この後の節で紹介するHL Tauの円盤のような比較的思い円盤ではガス密度が高いため、

ガスとダストで同じギャップ深さ、幅が観測される可能性は十分にある。このようにダスト連続光の観測に我々のモデルを適用する際にはダストとガスがよく混ざっているかどうかには注意する必要がある。

## 4. HL Tau の場合

ここまで円盤ギャップ構造から惑星質量を見積もる方法について述べてきた。最後にこの方法をALMA望遠鏡の長基線のキャンペーン観測で得られたHL Tau円盤のギャップ構造[10]に適用して惑星の質量を見積もってみたいと思う。この観測でHL Tau円盤は異なる3つの周波数帯で観測されている。そのうち230 GHz帯(Band 6)と345 GHz帯(Band 7)のデータを使うことで、円盤の光学的厚さ、円盤温度を見積もることができる(詳しい解析方法は[2]をご覧ください)。この解析にはダストの性質を仮定する必要がある。ここではよく使われるダストの吸収係数が波長の $\beta$ 乗に比例するモデルを用いる。図5aはALMA Band 6で得られたHL Tau円盤の輝度温度の分布、円盤長軸(x=0方向)に沿った方向のガス密度および円盤の厚みを示している。光学的厚みからガス密度を見積もる際にはダストの吸収係数として $\kappa = 2 \times 10^2 \text{ g/cm}^2$  ( $\beta = 1.5$ , ガス-ダスト比を50と仮定)を使っている。図5bからも分かるように、HL Tauの円盤は比較的質量の大きな円盤である。円盤粘性の大きさにもよるが、このようなガス密度の大きな円盤ではダスト分布は円盤ガスの分布と分離しにくい。以下では円盤ガスとダスト粒子はよく混ざっているとして、ギャップの深さおよび幅を見積もる。図5から見積もったギャップの深さ、幅およびそこから見積もった惑星質量を表1にまとめている。30 AUおよび80 AUにあるギャップ構造はギャップの深さ、幅の両方から見積もった惑星質量がほぼ一致しており、これらのギャップが惑星によって作られたと考えても矛盾しない。一方で、10 AU付近のギャップ構造はギャップ幅から見積もった惑星質量に対してギャップの深さから見積もった惑星質量が小さい。すなわち、このギャップは惑星起源のものでない可能性がある。しかし、ここで注意したいのは10 AUや30 AUにあるギャップは幅が観測のビームサイズと同程度であるため、完全に空間分解されていない可能性がある。その場合にはギャップ構造

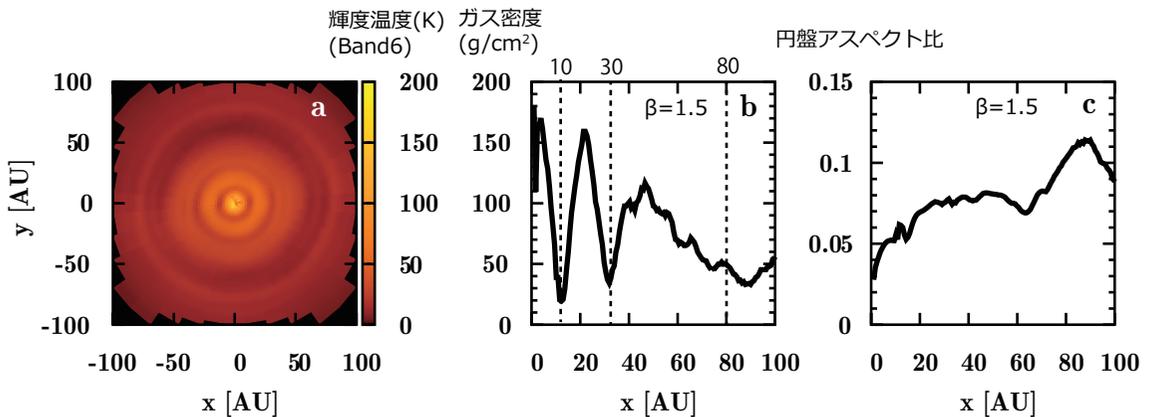


図5: HL Tau円盤の230GHz帯(Band6)での輝度温度(a)と、 $x = 0$  方向に沿った円盤ガス密度(b)と円盤アスペクト比(c)。この図はALMA 長基線キャンペーン観測で得られたデータを用いている。円盤ガス密度(b)、アスペクト比(c)を計算する際はダストの吸収係数を波長の $\beta$ 乗に比例するとして $\beta = 1.5$ と仮定している。また、観測データの解析には茨城大学の塚越崇氏、百瀬宗武氏に協力していただきました。

表1: HL Tau円盤のギャップの深さ、幅とそこから見積もられる惑星質量。ギャップの深さ、幅は図5のガス密度分布(b)から見積もっている。また、10AUギャップ、30AUギャップの深さは観測の観測のビームサイズでならされている可能性を考慮して上限値(惑星質量では下限値)として見積もっている。ここで $M_J$ は木星質量を表している。

ギャップの位置 ( $R_p$ )	ギャップの深さ ( $\Sigma_{\min}/\Sigma_0$ )	ギャップの幅 $\Delta_{\text{gap}}$	ギャップの深さ から見積もった惑星質量	ギャップの幅 から見積もった惑星質量
10 AU	< 0.1	9.5 AU	> 0.3 $M_J$	1.4 $M_J$
30 AU	< 0.3	7.5 AU	> 0.3 $M_J$	0.2 $M_J$
80 AU	0.4	24 AU	0.7 $M_J$	0.5 $M_J$

は周囲の構造にならされてしまうため、ギャップの深さは浅くなってしまふと考えられる。もし、この効果で細いギャップが浅く見えているとすると10 AUのギャップは惑星起源であるという可能性も残されている。

最後に、表1に示した惑星質量の精度について言及しておきたい。表1の見積もりでは $\beta = 1.5$ を仮定したが、ギャップの深さおよび幅はダストの性質( $\beta$ の値)に依存することにも注意する必要がある。例えば、10 AUのギャップの場合、 $\beta = 1$ または2とした場合では、ギャップ幅はそれぞれ13.5 AU、9 AUとなる。従って、幅から見積もった惑星質量は3.3  $M_J$ ( $\beta = 1$ のとき)、1.3  $M_J$ ( $\beta = 2$ のとき)となる。このような $\beta$ の不定性から、表1の惑星質量の見積もりにはファクター2程度の不定性があると考えられる。また、ここではダスト粒子は円盤ガスとよく混合していると仮定したが、円盤粘性が小さな場合や円盤ガスの量が図5bの見積もりよりも小さい場合はダスト分布はガスの分

布と大きく違っているかもしれない。その場合には、ダストの濾過作用によって実際のガスのギャップの深さ、幅は図5で見られるよりも大幅に浅く、狭くなることが知られている[16, 17]。したがって、ダスト分布とガス分布が大きく乖離している場合は、実際の惑星質量は表1の見積もりよりも大幅に小さくなる。より正確な惑星質量の見積もりを行うためには、ガスとダストの分布の違いといった円盤の詳細な物理状態の解明が必要である。

## 5. まとめと今後の展望

本稿では、原始惑星系円盤のギャップ構造が惑星で形成されたとすると、円盤観測から得られるデータでどのように惑星質量を見積もるのか、その方法を紹介した。また、その方法をALMAで観測されたHL Tau円盤のギャップ構造に適用し、ギャップの中に惑星が存在した場合、その質量を見積もった。今後、

ALMA やすばる望遠鏡によって今回紹介したHL Tau 円盤の観測のような惑星形成領域まで分解したギャップ構造を持つ原始惑星系円盤の直接撮像イメージが多数得られることが期待される。このような観測結果を説明する際に、我々のモデルは非常に有用であろう。

原始惑星系円盤と惑星との相互作用は、系外惑星の質量・軌道の多様性を生み出す起源の1つであると考えられている。円盤ギャップの観測から円盤内の惑星を特定することで、円盤内での惑星進化に観測的な面から制限を与えることができるだろう。今後、このように原始惑星系円盤の観測の面からも系外惑星の多様性の起源に迫ることができると期待される。

## 謝 辞

本原稿は、田中秀和氏、武藤恭之氏、谷川享行氏、竹内拓氏、塚越崇氏、百瀬宗武氏との共同研究の結果をまとめたものです。共同研究者の方々には、この場をお借りしてお礼申し上げます。また、筆者が博士課程の内からご指導をいただきました田中秀和氏には特に感謝申し上げます。筆者はこれまでに、新学術領域研究(23103004, 26103701)、ALMA 共同利用PIサポートプログラム(NAOJ-ALMA-0135)の助成を受けました。また、本稿の図5はALMA長基線観測キャンペーンで得られたデータを用いています。本研究で行った数値流体シミュレーションは国立天文台シミュレーションプロジェクトのスーパーコンピュータCray XC30と北海道大学低温科学研究所の環オホーツク情報システムを用いて行いました。最後に本稿の執筆の機会を与えていただき、また注意深く原稿を読んでくださった成田憲保氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Kanagawa, K. D. et al., 2015, MNRAS 448, 994.
- [2] Kanagawa, K. D. et al., 2015, ApJ 806, L15.
- [3] Kanagawa, K. D. et al., submitted, ApJ.
- [4] Duffell, P. C., 2015, ApJ 807, L11.
- [5] Varniere, P. et al., 2004, ApJ 612, 1152.
- [6] Duffell, P. C. and MacFadyen, A. I., 2013, ApJ 769, 41.
- [7] Casassus, S. et al., 2013, Nature 493, 191.
- [8] Fukagawa, M. et al., 2013, PASJ 65, L14.
- [9] Osorio, M. et al., 2014, ApJ 791, L36.
- [10] ALMA Partnership, et al., 2015, ApJ 808, L3.
- [11] Okuzumi, S. et al., 2015, ArXiv e-prints.
- [12] Flock, M. et al., 2015, A&A 574, A68.
- [13] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S.-i., 2014, ApJ 794, 55.
- [14] Fung, J. et al., 2014, ApJ 782, 88.
- [15] Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A., 1973, A&A 24, 337.
- [16] Zhu, Z. et al., 2012, ApJ 755, 6.
- [17] Dong, R. et al., 2015, ApJ 809, 93.

# 一番星へ行こう!

## 日本の金星探査機の挑戦 その25

### ~搭載機器5年越しの覚醒~

山崎 敦<sup>1</sup>, 山田 学<sup>2</sup>, 福原 哲哉<sup>3</sup>, 大月 祥子<sup>4</sup>, 田口 真<sup>5</sup>,  
岩上 直幹<sup>6</sup>, 佐藤 毅彦<sup>1</sup>, 今村 剛<sup>1</sup>,  
あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 2015年7月に軌道制御を行った金星探査機「あかつき」は、金星周回軌道投入への再挑戦へ向けて着々と準備を進めている。搭載機器についても再度機能チェックを行った。4から5年間電源を入れていなかったが、機能チェックの結果は良好で周回軌道投入直後から観測が開始できる見通しが立った。

## 1. これまでの道のり

2010年5月21日に種子島宇宙センターよりH-IIAロケット17号機にて打ち上げられた「あかつき」に搭載された観測機器は、2010年5月から6月にかけて初期チェックアウト運用を実施した。各機器は2010年12月の金星周回軌道投入失敗直後の金星撮像[1, 2]、2011年の測光観測[3, 4]を実施した後、温度条件を鑑みて電源オフとして休眠状態に入った。2015年7月の軌道制御[5]の結果金星周回軌道投入を再挑戦できる遷移軌道に入った。金星周回軌道投入運用直後から観測が開始できるように、2015年10月に搭載機器の健全性を再確認した。

## 2. 初期立上げ運用リターンズ

### 2.1 準備

2010年の初期運用の記憶と記録を遡り、事前準備に十分な時間を費やした。初期動作手順書により消費

1. 宇宙航空研究開発機構  
2. 千葉工業大学  
3. 情報通信研究機構  
4. 専修大学  
5. 立教大学  
6. 東京大学  
yamazaki@stp.isas.jaxa.jp

電力と温度の正常範囲、ステータス確認項目等を確認し、5年前の記憶をあらかじめ頭の引き出しからも出しておいた。ただし、前回と異なる点は地球との距離であり、往復伝搬遅延時間が10分程度でありコマンド送信してから動作確認までにこの時間が必要であること、太陽に近いために温度条件から衛星の向きに制約があり高利得アンテナを地球に向けることができず中利得アンテナによる低い通信レート下でのデータ確認を強いられたこと、画像データのみならず観測中ステータスの確認も一旦データレコーダに記録した後に再生する必要があること、である。このため、5年前に実施した初期動作手順書通りではことが運ばなかった。温度や軌道・姿勢の制約条件から、チェックアウト項目は、1 $\mu$ mカメラ(IR1)、紫外イメージャ(UVI)、中間赤外カメラ(LIR)の各カメラ撮像、2 $\mu$ mカメラ(IR2)の冷凍機駆動エレキの消費電力とした。

### 2.2 結果

#### 2.2.1 紫外イメージャ(UVI)

2015年10月14日実施。一次電源(PCU)からUVIの制御エレキへ短時間の電源供給を行い正常な消費電力値であることを確認した後、観測シーケンスにより試験観測を実施した。再生した観測中ステータスよりフィルタホイールが正常に回転したことを確認するとともに、図1に示すチェックアウト用の撮像を取得した。



図1：UVI取得画像。使用フィルタ365nm(昼用)、露出時間11秒、機上画像処理にてスミア補正済み。



図3：IR1取得画像。使用フィルタ0.90um(昼用)、機上画像処理にてダーク引き済み。



図2：LIR取得画像。

明るい恒星は視野内に存在しなかったためダーク画像のような深宇宙画像である。5年にわたるクルーズ期間に浴びた放射線の影響で白傷だらけになっていることを心配していたが、明らかな白傷のピクセルは見当たらず検出器が健全であることを示している。

### 2.2.2 中間赤外カメラ(LIR)

2015年10月16日実施。一次電源(PCU)からLIRカメラの制御エレキへ短時間の電源供給を行い正常な消費電力値であることを確認した後、観測シーケンスにより試験観測を実施した。再生した観測中ステータスよりペルチェ動作による温度安定性、シャッターの正常駆動を確認するとともに、図2に示すチェックアウ

ト用の撮像を取得した。LIRの深宇宙画像は、視野中央部のレンズと周辺部のバッフルからの熱放射を測定することとなる。相対的に冷えたレンズと温かいバッフル像の周辺増光がみられる期待通りの画像であり、過去の試験結果と比較しても検出器が健全であることが示された。

### 2.2.3 1 $\mu$ mカメラ(IR1)

2015年10月19日実施。一次電源(PCU)からIR 1/2カメラの制御エレキへ短時間の電源供給を行い正常な消費電力値であることを確認した後、観測シーケンスにより試験観測を実施した。再生した観測中ステータスよりフィルタホイールが正常に回転したことを確認するとともに、図3に示すチェックアウト用の撮像を取得した。IR1の深宇宙画像は、明るい恒星は視野内に存在しなかったためダーク画像のような深宇宙画像での評価となるが、明らかなデッドピクセルは見当たらないことが確認できた。また、CALランプを点灯させた画像も取得し、検出器の健全であることを示している。

### 2.2.4 2 $\mu$ mカメラ(IR2)冷凍機

2015年10月19日実施。一次電源(PCU)から冷凍機駆動エレキへ短時間の電源供給を行い正常な消費電力値であることを確認した。

### 2.2.5 ROI(Region of Interest)機能の実装

再生データ量リソースを有効に活用するために、カ

メラの撮像領域のうち金星像が写る領域の画像データのみデータレコーダに記録するROI機能を追加した。小惑星探査機「はやぶさ2」からの逆輸入技術である。打上当初の計画より遠金点が遠い金星周回軌道に投入されることになり遠金点付近での観測は解像度が低下することになったが、このROI機能により、記録する画像領域を取捨選択することが可能となり、データレコーダに記録可能な画像枚数を増やして、画像品質の低下をある程度補うことができるようになった。その機能確認を2015年10月26日実施した。ROI機能を使ったIR1画像が地上で問題なく復元されることを確認した。

### 3. 地上データ処理

投入軌道変更に伴う制約からROI画像処理が追加となった。これに対応するべく地上データ処理システムを改良する必要がある。今回の再チェックアウト運用は、地上データ処理システムを最上流から試験できる最初の画像データであり、この機会を活用し地上データ処理システムの検証を行った。予定通りの処理が行われたことを確認した。

### 4. まとめ

振り返るとUVIは1528日、LIRは1530日、IR1は1533日ぶりに撮像観測を実施した。一旦動作させた観測機器をこれほどの時間をおいて再度観測した経験はなく、再立ち上げ後正常に動作するのか非常に不安であった。しかしながら、私たちの心配をよそに各搭載カメラの画像は特に異常事態には陥っていない。機器開発の実力が証明された格好である。感度劣化計測については今後恒星観測などで較正する計画である。

7月の軌道修正制御[4]の結果、「あかつき」は打ち上げから2026日目、2015年12月7日に金星に到着、金星周回軌道に投入される予定である。もちろんプロジェクトチームは遷移軌道飛翔中から周到かつ詳細な試験・調整を行い、万端の体制で周回軌道投入運用に臨む所存である。この文面が世に出るころには金星周回軌道投入成否の結果が出ているが、金星観測に勤しんでいることを思い描いている。大気循環のメカニズムの解明から地球との比較による「惑星気象学」の発展

に向けて私たちの当初の願いが結実することを期待する。

### 謝辞

「あかつき」の運用に関して紙面に記しつくせない関係各方面のたくさんの方々に多大なるご協力・ご支援をいただいております。この場を借りて深甚の謝意を表します。

### 参考文献

- [1] 中村正人, 2011, 遊星人 20, 68.
- [2] Taguchi, M. et al., 2012, Icarus 219, 502.
- [3] 山田学ほか, 2011, 遊星人 20, 222.
- [4] Satoh, T. et al., 2015, Icarus 248, 213.
- [5] 廣瀬史子, あかつきプロジェクトチーム, 2015, 遊星人 24, 126.

# 遊星百景「私のお気に入りの地形」 その2

## ～Baltis Vallis～

押上 祥子<sup>1</sup>

前号からスタートした連載コラムの二回目は、地球の双子星と言われる金星の地形を取り上げます。初回は月の代表的な火山地形である蛇行谷でしたが、金星にもそれと瓜二つの谷地形が存在します。金星には火山性起源をもつと思われる平原やドーム構造、その他の大規模構造が豊富です。蛇行谷を始めとする谷地形の多くも火山性起源と考えられており、谷地形だけでも200以上存在していることが知られています。金星の谷地形は月の谷地形と比べると多様性に富んでおり、平面的な形態的特徴に基づいて9つものタイプに分類されています。その中の1つが蛇行谷です。コブラの頭のような窪みと尻尾に向かって先細りする曲がりくねった胴体が特徴です。コブラヘッド状の窪みは火口であると考えられ、火口から流出した熱い溶岩が徐々に冷えながら天体表面を侵食したことが推測されます。その他に、金星には人工的な谷地形である“運河”のような特徴をもつタイプの谷も存在します。運河谷は全長が数百kmから数千kmに及ぶにも関わらず、分岐や合流はほとんどなく、幅がほぼ一定であるという特徴を持っています。また、その形成年代は比較的古いと考えられています[e.g., 1].

今回紹介するのは運河谷の一つ、「Baltis Vallis」です(図1)。私にとってこの運河谷は、お気に入りのレベルを超えた思い入れの強い地形です。この連載コラムの初回の著者であり私の兄弟子にあたる本田親寿さんにとっての月の蛇行谷、といったところでしょうか。私が学部四年生の時に卒業論文の研究対象として選んだ地形であり、その後、博士号を取得するまで格闘し続けた、私の研究人生のまさに原点です。

「Baltis Vallis」は全長約6800 kmで、地球で最も長い谷地形であるナイル川を僅かに上回り、現在太陽系

最長の谷地形とされています。その不可解な形態的特徴から、「Baltis Vallis」を始めとする運河谷の形成過程について、様々な仮説が唱えられています。私は金星探査機マゼランの合成開口レーダ画像を解析し、推定される深さ変化や横断面形状に基づいて、この運河谷は低温で噴出した炭酸塩の溶岩流によって形成されたのではないかと考えました[2]。多くの仮説が溶岩流を前提としていたのに対し、地球の海底谷のように、金星大気が生み出す密度流によって形成されたとする仮説も新たに登場しました[3]。金星の谷地形の面白さは、タイプ毎に異なる形成年代と、多様な形態的特徴から推測される多様な形成過程から、金星の物質循環や熱進化などに至るまで想像を巡らすことができる点ではないかと思います。

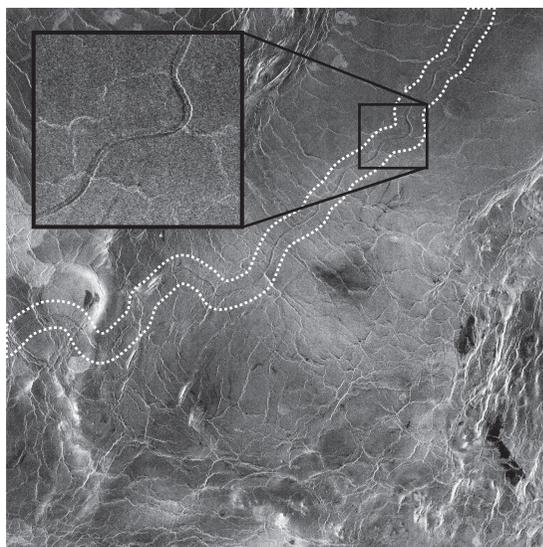


図1：北緯49度、東経165度付近のマゼラン合成開口レーダ画像 (PIA00225を改変)。

1. 国立天文台RISE月惑星探査検討室  
oshigami.shoko@nao.ac.jp

[1] Komatsu, G. et al., 1993, *Icarus* 102, 1.

[2] Oshigami, S. and Namiki, N., 2007, *Icarus* 190, 1.

[3] Waltham, D. et al., 2008, *J. Geophys. Res.* 113, E02012.

## 研究会開催報告

# 「衛星系研究会2015：衛星系と噴火現象」

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

衛星系研究会を2015年7月21-22日の日程で、北海道大学低温科学研究所の主催により開催した。今年で第4回となる本研究会は、衛星(系)を対象とした研究を行う様々な分野の研究者が相互に交流することを目的として、2012年に発足したものである。

今回は、「衛星系と噴火現象」というテーマを設定した。地球外天体における volcanism (噴火・噴出現象) は、過去の活動も含めれば太陽系内でも様々な天体で確認されている。特に、外惑星の衛星系では、木星衛星イオが現在も活発にシリケートマグマを噴出していることが発見されて注目を集め、さらに最近では、エウロパや土星衛星エンケラドゥスで大規模な水蒸気噴出が確認された。この主な熱源は衛星系特有のコンパクトな軌道に起因する潮汐加熱であると考えられており、volcanism は巨大惑星の衛星系では珍しくない現象であることが分かってきた。このように、衛星系の volcanism は地球でのそれと比べ、化学的・物理的特徴およびその規模など様々な面で異なっているため、その理解は現時点では極めて限定的である。そこで本研究会では、まず衛星における volcanism を横断的に概観し、地球のそれと比較しつつ特徴を整理し理解を深めることで、volcanism から衛星系形成の起源に迫るための糸口を探ることを目的とした。

そこで、衛星の volcanism を鍵にして、4名の招待講演者にそれぞれの専門領域についてレビューを行っ



図1：研究会中の様子。

て頂いた。まず、衛星系における volcanism や衛星熱進化の熱源として鍵となる、惑星と衛星の潮汐相互作用の理論について、東大地震研の栗田敬氏にご講演頂いた。潮汐相互作用は力学的に古くから考えられている問題であり、その基礎的部分から、例えば軌道進化とカップルした潮汐熱進化についての最新の話までわかりやすいレビューを行って頂いた。

次に、地球上における噴火現象について、九大の寅丸敦志氏にレビューをして頂いた。地球については当然ながら詳細な観測例がたくさんあるため、今回は主にそれらをどのように分類するとわかりやすいかについてお話し頂いた。出席者の多くは惑星科学や天文が専門のため、地球上における噴火現象についてのこのような基礎的なレビューは大変役に立ったのではないと思われる。また、間欠泉のメカニズムについての興味深い模擬実験もお見せ頂き、衛星における間欠泉との関連性についても議論がなされた。

2013年に打ち上げられ、現在エキサイティングな

1. 産業医科大学 医学部  
2. 東京工業大学 地球生命研究所  
3. 東京大学 大学院理学研究科  
4. 北海道大学 大学院理学研究科  
5. 神戸大学 大学院理学研究科  
6. 北海道大学 低温科学研究所  
7. 東京工業大学 大学院理工学研究科  
t-tanigawa@med.uoeh-u.ac.jp

結果を提供し続けている惑星分光観測衛星「ひさき (SPRINT-A)」の成果について、東北大学の土屋史紀氏と理研の木村智樹氏にそれぞれの立場からご講演頂いた。今回は、詳細に観測が行われているイオ・プラズマトーラスについての最新の結果を中心に話し頂いた。イオ火山から噴出した物質の一部は衛星重力圏を脱出し、イオ軌道付近にトーラス状のプラズマ領域を作り、ひさき衛星はこの領域を重点的に観測しているわけだが、今回のお二人のお話から、このプラズマトーラスの観測を通じて現在のイオ火山についての情報が多く得られることを実感した。

イオやエンケラドゥスに代表される衛星からの噴出現象、およびそれらが重力圏を脱出して衛星軌道上などに形成するより大きな構造の観測を通じて、これまで主に理論的に考えるしかなかった衛星の軌道進化・衛星の内部熱進化という問題が、実証可能になりつつあることを実感させられた。さらに、我々の良く理解している地球における噴火現象からの外挿を効かせつつ研究を進めることの重要性も認識できた。また、一般講演・ポスター講演も、(個別に触れることはしないが)今回のテーマに直接的に関係するしないにかかわらず、招待講演の内容の間をつなぐものもたくさんあり、充実したものだった。本研究会での各講演テーマが今後さらに進展することで、衛星系を鍵とした太陽系・惑星系形成史の統合的に理解が進むことを願っており、また本研究会がその一助となれば幸いである。



図2: 集合写真。

最後に、招待講演者の皆さんをはじめ、すべての発表者の方々、および参加して会を盛り上げて頂いたすべての参加者の皆様に感謝したい。また、研究会の準備

を積極的に手伝って頂いた低温研・理論惑星グループの皆さんに感謝したい。低温科学研究所の共同研究により参加者の旅費を支援して頂いた。参加申込システム及び講演資料の保管・公開にはCPSのサーバを使わせて頂いた。

## プログラム<sup>1</sup>

- 
- 7/21**
- 
- 09:30-09:35 はじめに
  - 09:35-09:40 低温科学研究所所長挨拶
  - 09:40-11:40 栗田 敬(東大地震研) 衛星火山と潮汐相互作用
  - 11:40-12:00 (ポスター講演の紹介)
  - 12:00-13:30 (昼休み・個別討論)
  - 13:30-15:30 寅丸 敦志(九大理) 地球における噴火現象
  - 15:30-16:30 (ポスターコアタイム)
  - 16:30-17:00 関根 康人(東大理) 氷衛星における地質現象の再現実験と理論研究: レビュー
  - 17:00-17:30 鎌田 俊一(北大理) Tidal deformation of Ganymede covered with a conductive ice shell
  - 17:30-18:00 平田 直之(神大理) 氷衛星のクレーター生成率についての考察
- 
- 7/22**
- 
- 09:30-11:00 土屋 史紀(東北大) ひさき衛星がとらえた衛星イオの火山活動変動
  - 11:00-11:30 三上 峻(北大理) 巨大氷衛星の原始大気
  - 11:30-13:00 (昼休み・個別討論)
  - 13:00-14:30 木村 智樹(理研) 衛星周囲のプラズマ環境と惑星-衛星電磁相互作用
  - 14:30-15:00 末次 竜(神大理) ガス抵抗による微惑星の捕獲過程
  - 15:30-16:00 倉本 圭(北大理) 火星衛星サンプルリターン計画とその科学について
  - 16:00-17:00 (総合討論)

---

## ポスター講演

---

- 古賀 亮一(東北大) ひさき衛星を用いたイオ

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

周辺の酸素原子発光解析

- 野口 里奈(東大地震研) 可視画像・地形データを用いた火星の火砕丘の判別及びそれから推察される火星内部熱源の存在形態
- 樋口 有理可(東工大理) 衛星の捕獲：周太陽軌道から周惑星軌道への移行
- 樋口 有理可(東工大理) フォボス・ダイモスの力学的起源のレビュー2
- 金川 和弘(北大低温研) 巨大惑星による原始惑星系円盤ギャップ構造形成の理論モデルと観測への応用
- 谷川 享行(産医大医) 周惑星円盤へのガス流入履歴
- 田中 今日子(北大低温研) 液相からの気泡核生成の大規模分子動力学計算と古典的理論の改良
- 山本 広大(京大理) 衛星大気の観測的研究の検討
- 加藤 伸祐(名大環) 月の海の組成・地形解析からみた月マンツルの熱進化史

# 「iSALE 講習会」参加報告

脇田 茂<sup>1</sup>

iSALE講習会が2015年8月5日から8日にかけて千葉工業大学津田沼キャンパスにて開催された。

iSALE (impact SALE)とは数値衝突流体計算コードであり、SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)コードを基にして開発された。弾性・塑性モデル、破壊モデル、空隙モデルなどが導入されており、地球惑星科学分野での天体衝突等を扱えるようになっている。iSALEは科学目的に関する限りは申請を行うことで使用できるコードで、欧米のみならず日本の研究者らに利用されている。

千葉工業大学の黒澤耕介氏が中心となって立ち上げられた「iSALE users group in Japan」には36人が参加しており、日本での惑星科学や衝突科学研究者らへiSALEを広げる役割を担っている[1]。グループのwikiページ(<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE>)にはiSALEのインストール方法から使用法まで多彩な情報がまとめて記載されているので、興味がある方は是非訪れてもらいたい。黒澤氏らグループのメンバーが中心となって、2014年2月には第一回iSALE勉強会[2]、2014年10月には第二回勉強会[3]が開催されてきた。過去の勉強会以上にiSALEの実践と解析に重きを置いた4日間にわたる講習会が開催されたので、その報告を行う。

今回の講習会では実践が主のためiSALEのインストールに関する相談会が初日に開かれて、参加者全員がiSALEが稼働可能な環境を整えることができた(ノートパソコンにインストールできずにデスクトップを持ち込むことになった参加者もいたが)。iSALEはソースコードが配布されるため各自でコンパイルする必

要がある。コンパイルに慣れていないと戸惑う事もあるかもしれないが、これまでにいくつかのプラットフォームに応じたiSALEのインストールマニュアルが「iSALE users group in Japan」のwikiページに用意されているのでご安心頂きたい。それでもうまくできない場合にはグループに問い合わせると優しく教えてもらうことができる(可能性が高い)。2日目の午前中には黒澤講師からiSALEに関する説明が行われた。iSALEの簡単な使用法はもちろんのこと、衝突流体計算の基礎から状態方程式に関する話題までと、短い時間ながらも密度の濃い授業内容であった。午後からはよいよiSALEの実践となり、まずはiSALEを動かす上で重要となる初期条件を設定するファイルの説明、iSALEに付属されている計算結果の描画ソフト(VIMoD)の使用法の説明がなされた。自分で計算に必要なパラメータを変更してiSALEを動かすことができるようになり、VIMoDを使用して計算結果を簡単に視覚的に確認することができるようになった。

3日目からは本格的な解析方法を実践していった。VIMoDでは定性的な議論には向いているが、定量的な議論にはもう少し踏み込んだ方法が必要となる。iSALEでは計算領域を基盤の目状に区切ることで計算を行っているが、トレーサ粒子を設定することで計算時間内の粒子の移動や温度圧力履歴を追うことができるようになっている。トレーサ粒子の結果を出力するにはiSALEに付属されているもう一つの計算結果の描画ソフト(iSALEPlot)を用いた。そこからさらなる解析を行うためには、プログラム言語の一つで

[1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 103.

[2] 常見, 2014, 遊星人 23, 156.

[3] 末次竜, 2015, 遊星人 24, 63.

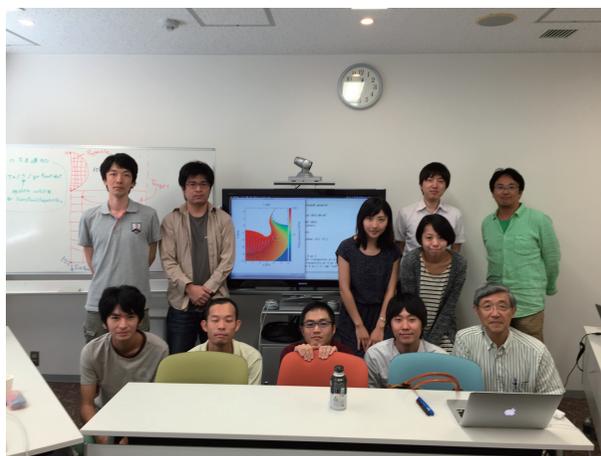


図1：参加者の集合写真。

あるC言語を用いた解析とオープンソースの描画ソフトであるgnuplotを用いた解析結果の出力も必要となったのだが、これらに不慣れな参加者たち[図1]は大いに苦戦することになった。しかし、4日目ともなるとiSALEに慣れて余裕が出てきたのか、各自の研究に応用できそうな設定方法を学びたいなど意欲的な質問も増えてきた。本来の予定にはなかったと思われることであっても黒澤講師が丁寧に対応してくれたおかげで、初期条件を少し変更するだけで衝突体や被衝突体を好みの形状に変更することができるようになり、よりiSALEへの理解を深めることができた。トレーサー粒子のある時刻における衝突点からの距離、角度、そして速度までの解析といった提示されたお題をこなすことができ、最終的にはトレーサー粒子の速度ベクトルの描画[図2]までを行えるようになった。

月や火星の衛星などの天体への衝突過程にiSALEを使いたい方や隕石に見られる鉱物と衝突を組み合わせたい方など参加者はそれぞれ興味が多くなっていったが、iSALEの実行からトレーサー粒子の解析までを全員が行えるようになったのは、講師の指導と参加者の努力の成果であろう。今回の講習会の内容を各人の研究に活かしていくためには、iSALEを使い続けることこそが重要であろうと講習会中の昼食時などにも話題になった。本記事を読まれている参加者の方々が今まさにiSALEを使用した研究を行っているのであれば同じ参加者としても嬉しい限りである。最後になったが、本講習会を企画された黒澤講師を始めとする開催場所である千葉工業大学の皆様方に感謝したい。

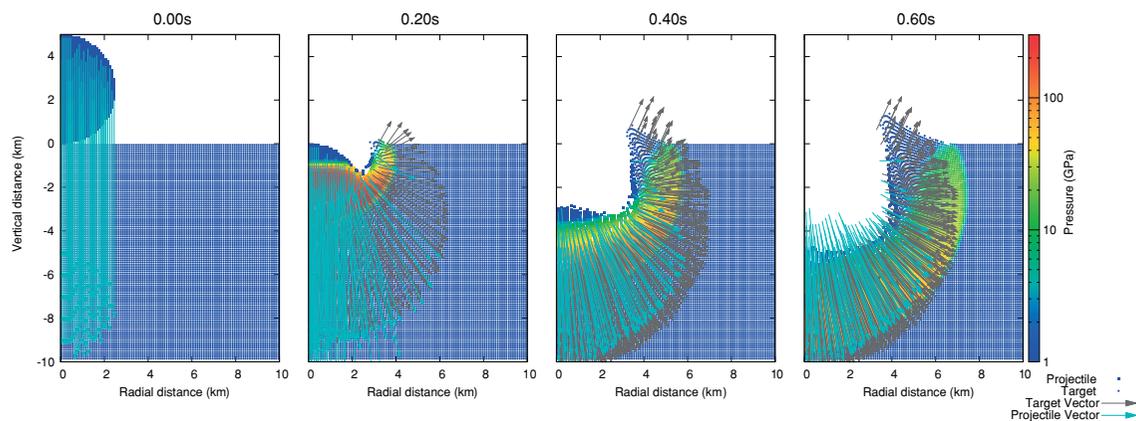


図2：講習会を受講した成果[トレーサー粒子の圧力とその速度ベクトルの時間変化図]。

## 第8回月惑星探査データ解析実習会を終えて

本田 親寿<sup>1</sup>, 巽 瑛理<sup>2</sup>, 昆 憲英<sup>3</sup>, 平田 成<sup>1</sup>, 出村 裕英<sup>1</sup>,  
小川 佳子<sup>1</sup>, 北里 宏平<sup>1</sup>,  
第8回月惑星探査データ解析実習会世話人一同

2009年に始まった月惑星探査データ解析実習会は2015年9月に8回目が開催されました。本実習会は普段惑星探査データから自分の研究との間に少し距離がある方を対象にしています。本実習会が少しでも両者の距離を詰めていただくための一助となることを期待しています。

8回目を迎えた今回の実習内容は、6回目の内容を発展する形で実施することができました。講師は近畿大学の道上達広さん、APLのO. S. Barnouinさん、会津大学の平田成さんに講師をお願いしました。実習会には月惑星探査データ(特に画像)解析の初心者である学部生から教職員レベルまでさまざまな技術・知識を持った17名(学部生6名, 大学院生5名, PD以上が6名)が参加し、「はやぶさ」の取得した画像データの解析を体験しました。

今回実習対象に取り上げたのは第1, 6回目にテーマとした小惑星Itokawaでした。小惑星探査機「はやぶさ2」が打ち上がってもうすぐ1年、初号機のデータを振り返ってもらい解析手順などイメージしてもらうことを目的としました。6回目は「形状モデル」に着目した講義・演習を行いました。今回はAPLで開発が続いているSmall Body Mapping Tool(SBMT)を利用した探査データの表示および解析を中心とした演習を行いました。今回はSBMTの開発を主導されているBarnouinさんによる詳細な説明が実習会の目玉となりました。

初日は道上さん講演による小惑星boulder計測の科

学的意義と実例の紹介、2日目はBarnouinさんによるSBMTの詳説および平田さんによる会津大学で開発しているGISアプリ(AiGIS)の紹介とそれに続いて3日目午前中までSBMTを用いた解析実習および実習報告会という流れで実習会が進みました。

前回の反省点として準備したツールの動作確認が十分ではなく、動作可否が解析環境依存性に大きく依存していた点がありましたが、今回も幾つか問題ができました(特にWindows環境で問題がありました)。大学の個人または小さなグループベースで作成される汎用な解析用アプリケーションに常に付きまとう課題でしょう。開発元による十分なバグ出し作業は当然必要ですが、それに加えて多くの研究者に探査機到着の前に利用してもらいフィードバックを受けることが大事なのではないかと感じました。

今回の実習をきっかけとしてより多くの月惑星探査データを利用して頂き、皆さんの研究活動に活かされることを期待しております。

最後に、本実習会を資金面にてご支援いただいた日本惑星科学会、惑星科学研究センター(CPS)、会津大学(国際戦略本部)に厚くお礼申し上げます。

**開催日程**：2015年9月27日13:40～9月29日14:00

**開催場所**：会津大学M11教室

**主催**：月惑星探査育英会

**後援**：日本惑星科学会、惑星科学研究センター(CPS)、会津大学

**実習会の詳細および資料**：[https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school\\_mission-8](https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school_mission-8)

**世話人**：会津大学先端情報科学研究センタ宇宙情報科

1. 会津大学先端情報科学研究センタ宇宙情報科学クラスタ  
2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻  
3. 会津大学大学院コンピュータ・情報システム学専攻  
chonda@u-aizu.ac.jp

学クラスター同(会津大学)

**講師**：道上 達広(近畿大学), O. S. Barnouin (APL, ジョンズ・ホプキンス大学), 平田 成(会津大学)

**参加者**：17名(学部生6名, 大学院生5名, PD以上が6名)

**参加者の声**：

**巽 瑛理**(東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻)

画像というのは視覚を通して一度にわたしたちに詳細な大量の情報をもたらしてくる。その性質から、火を見るよりも明らか、などと思ってしまう節があり、「画像があるのだから、計ればいいじゃないか」と思いがちである。しかし、画像は3次元を2次元にしているという時点で情報量を落としているため、実際に2次元の画像から3次元の情報を読み取ることは思ったよりも簡単ではない、と挑戦してみると初めてわかる。わたしたちの目であっても距離を推定するためにステレオ視している。さらに、探査データというのは実験などのように常にベストなポジションでデータを取得するわけではないので、その点にも難しさがあることが分かった。

今回の実習では、小惑星の画像からどのように地理情報を引き出すかということを学んだ。実際には、2次元の画像から3次元形状モデルを作るという行程はすでに偉い人が行ってくれているので、下々の一人であるわたしはそれを有難く活用させて戴く技術を学んだと言った方が適当だろう。わたし自身は小惑星イトカワ上を模擬したクレーター形成実験や小惑星のクレーターに注目しスペクトル解析を行っている。そこで、小惑星地形の計測やスペクトル解析結果と地形との比較をしたいという欲求があった。この実習では、特に Small Body Mapping Tool (SBMT) を使って、それらのことに挑戦してみた。

イトカワの地形解析という意味では、2つの方法があり、LIDARに基づく計測と3次元モデルに基づく計測である。3次元モデル(Gaskellモデル)はもともと2次元画像データから作られたものなので、3次元データとしてより生のデータという意味ではLIDARのデータであるが、LIDARの計測領域は限られている。必ずしも3次元モデルとLIDARのデータは一致しないので少し混乱するのだが、最初に大雑把に(といっ

ても、very high resolutionはかなり細かい凹凸を再現している)3次元モデルで計測し、より細かい評価をLIDARで行うのが良いようである。

解析データのマッピング機能(小惑星3次元モデルの表面に自分で作ったマップを貼り付ける)は非常に有用だと感じた。緯度経度指定したデータで全球地図的なものを作ると簡単にマッピングできるようである。わたしが使ったデータはもう少し単純で、AMICAで撮影された画像(トリミングなし)ものに色付けしたものであり、これも機体やカメラの視点情報がすでにSBMTにあるため比較的簡単にできた(くるくる回せてとても便利)ので、今度は全球マップにも挑戦したいと思う。

このような解析はソフトウェアに頼らずやろうとすれば膨大な時間がかかることであるが、実習の機会を設けていただきわずか3日のできるようになったと思うとお得な気分である。3次元モデル、ソフトウェアの開発者の方々、実習会を開催していただいた方々に感謝申し上げたい。

**昆 憲英**(会津大学大学院コンピュータ・情報システム学専攻)

9月27日から29日の3日間にかけて、第8回惑星探査データ解析実習会が開催された。今回は、日本と海外の各大学や研究機関の方々に参加されたグローバルな実習会となった。このような実習会への参加は初めてであり、自分は毎日程よい緊張感があつた事を覚えている。

初日は、近畿大学の道上達広さんによる、小惑星 Boulder 計測の科学的意義、及び、解析実例に関する講義をしていただいた。小惑星の Boulder のサイズや数を計測するために、ツールを使用した調査や、実際の衝突実験を行う方法があることを知り、また、それらの解析結果が、小惑星の形成過程を推測するために重要である事を学ぶことができた。

次に、惑星探査データ解析を行うためのツールの使い方を、実習を通して学んだ。今回使用した解析ツールは、天体の画像やデータの可視化を行う事を目的とした SAOImage DS9、及び、The Johns Hopkins University Applied physics Laboratory (以下 APL) で開発された、小惑星を対象としたデータ解析ツールである Small Body Mapping Tools (以下 SBMT) を使用した。今回

は特に、SBMTを用いたデータ解析実習を行った。SBMTの実習は、会津大学の平田先生、APLのOlivier Barnouinさんに講師をしていただいた。今回自分は、研究対象である小惑星イトカワを用いて、任意地点の標高を調査するためのツールの使用方法を学ぶ事を目的とした。SBMTの画面上には、小惑星の3次元形状モデルが表示されており、自分が調べたい場所を直感的に指定可能であるため、任意の場所の小惑星データ解析を行うという点で、非常に利用しやすいツールだと感じた。そして、今回の講習の目的としていた、イトカワの標高の解析方法を学ぶことができた。この講習を受講する前に、SBMTを使用した経験があったが、ツールの機能が多く、使用方法を理解できない所があった。しかし、この講習を通して、先生や学生の方々に教えていただき、SBMTの様々な使い方を身につけることができた。今回の講習で学んだことを、今後の研究で活かしたいと思う。

最後に、この実習会を通して、解析ツールの使い方を学ぶだけでなく、他の大学の先生や学生の方々と交流することができ、とても良い機会であった。他大学の研究活動や学生生活の話をお聞きし、とても良い刺激を受けることができた。この実習会では、皆様には大変お世話になりました。本当にありがとうございました。



図1：実習会の講師および参加者一同。

## 「基本法則から読み解く 物理学最前線【6】巻」

惑星形成の物理～太陽系と系外惑星系の形成論入門～

井田 茂・中本 泰史 著 須藤 彰三・岡 真 監修

共立出版

2015年3月刊行 全144ページ 定価2,000円+税

ISBN: 9784320035263

佐々木 貴教<sup>1</sup>



今から遡ること30年前、京都大学の林忠四郎らによって太陽系の形成に関する理論的枠組みがまとめられた。この太陽系形成標準モデルは「京都モデル」と呼ばれ、物理法則を理論的に積み上げていくことで、複雑な太陽系の成り立ちを見事に説明した。その後も細かなモデルの修正は行われていったものの、太陽系形成論の根幹が揺らぐことはなかった。これにより惑星形成の研究は、良く言えば成熟期を迎えた、悪く言えば重箱の隅をつつくだけの研究分野になってしまったかに見えた……。

ところがその10年後、我々は衝撃的な現実を目の当たりにする。1995年に最初に発見された系外惑星は「ホットジュピター」と呼ばれる、太陽系には存在しないタイプの惑星だった。その後も「エキセントリックジュピター」や「スーパーアース」など、太陽系の常識を超えた異形の惑星たちの姿が次々と明らかになっていく。こうした惑星たちの存在は、従来の太陽系形成論では予言されておらず、惑星形成理論そのものに対して大きな変更を迫ることになった。

これにより、惑星形成の分野は再び盛り上がりを見せる。太陽系というただ1つのサンプルを説明するために作られた「太陽系形成論」を超克し、大量の系外惑星系についての多様性や普遍性を統計的に議論する「汎惑星形成理論」を構築すべく、世界中ですさまじい勢いで研究が進められていった。他分野からの新規参加者も多く、現在最も盛り上がっている研究分野の一つであると言っても過言ではない。しかしその一方で、短期間のうちに急激に発展してきた学問分野であ

るため、標準的なテキストはわずかに数えるほどしか出版されておらず、特に学部生レベルで読み通すことのできる教科書に関しては、国内外通してもほぼ皆無だというのが現状であった。

そこで、本書の登場である。本書の主なターゲットは、惑星形成の分野に魅力を感じ始めている学部生や、これから本格的に研究をスタートさせようとしている大学院生である。学部レベルの物理学・物理数学の知識さえあれば、最新の惑星形成理論の枠組みや各論を無理なく学ぶことができるようになっている。特に、複雑な式の導出を厳密に追うようなことはせず、むしろその背後にある物理の本質を直感的に理解できるよう、丁寧に説明を行っている点が本書の最大の特徴である。読者は、単に知識をつけるだけでなく、物理的なセンスも身につけることができる。さらに最終章では「惑星分布生成モデル」の概要についても簡潔にまとめられており、理論モデルがどのように組み上げられていくのか、その雰囲気を楽しむことができるようになっている。研究者を志す読者にとっては、研究の「方法論」を学べる貴重なテキストでもあるといえる。以上のとおり、多角的な学びが可能な有意義な一冊として、多くの学生に一読を勧めたい。

さて、2015年は人類初の系外惑星発見から20周年の年である。これはつまり、系外惑星が発見された年に生まれた子どもたちが、いよいよ大学で専門的な勉強を始めようとしている年でもあるわけだ。彼ら彼女らが、本書を通して惑星形成の研究の面白さを知り、様々な形でこの分野を一緒に盛り上げていてくれることを、同じ分野の研究者のひとりとして楽しみにしている。

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

## JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第112回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第44回総会議事録
- ◇日本惑星科学会第113回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

### ◇日本惑星科学会第112回運営委員会議事録

期 間：2015年8月27日(木)～8月31日(月)

議 題：学会賞選考委員の新任の承認

運営委員：

倉本 圭, 渡邊 誠一郎, 荒川 政彦, 田近 英一, 中村 昭子, 千秋 博紀, 中本 泰史, 並木 則行, 平田 成,  
林 祥介, 井田 茂, 和田 浩二, 春山 純一, 竹広 真一, 諸田 智克, 永原 裕子, 橘 省吾, はしもと じょーじ,  
小久保 英一郎, 荒井 朋子, 佐々木 晶, 生駒 大洋, 小林 直樹

成立条件：期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす

議決方法：上記期間内にe-mailにより投票

**議題：学会賞選考委員の新任の承認**

\*谷川享行(産業医科大)

★議決は可否による。[可・否]

なお、これに伴って現職学会賞選考委員の竹内拓(東工大)は退任とする。

議題は全会一致で承認された(可23, 否0)。

### ◇日本惑星科学会第44回総会議事録

日 時：2015年10月15日(木)16:20-17:20

場 所：東京工業大学大岡山キャンパス地球生命研究所ELSI-1 1階東側ホール  
〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

正 会 員：630

定 足 数：63

参加人数：84名(開会時) (これに加えて非会員の傍聴者3名)

> 109名(議事3.1採択時) > 109名(議事3.2採択時)

委 任 状：58通(ただし、内1通分は提出者が総会に参加したため無効)

議 長：56通

倉本 圭会員：1通

はしもと じょーじ会員：1通

## 1. 開会宣言

諸田総務専門委員長が開会を宣言。

## 2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に藪田ひかる会員、書記に坂谷尚哉会員が選出された。

## 3. 議 事

### 3.1. 第13期下期(2015年度)中間報告

#### ・会計報告(竹広財務専門委員長)

収入・支出ともにほぼ予算通りに進んでいる。支出が若干多めであり(消費税8%の影響)、今後注意が必要。

#### ・各種専門委員会報告

なし

#### ・質疑応答及び討論

なし

#### ・採択

第13期下期活動報告の採択が行われ、賛成：167(うち出席者109)、反対：0、保留：0により採択された。  
注) 総会時には出席者を111名としたが、非会員が含まれていたため後日109名に訂正。

### 3.2. 第14期上期(2016年度)予算案

#### ・説明(竹広財務専門委員長)

以下の資料修正箇所が報告された。

#### ・収入の部 2016年予算額

前期繰越収支差額 → 7,599,063

#### ・支出の部 2016年予算額

原稿起こし、カラーページ費用 → 100,000

当期収支差額 → -663,600

次期繰越収支差額 → 6,935,463

2015度から、以下の変更があった。

収入：賛助会員が減少し、前年度から－20万円

会費滞納分を70万円に増額

支出：EPS分担金が10万から20万に値上がり。

サーバー基礎開発費30万円。

カラーページ費用を0円とする(自己負担)。

倉本会長より、

今後の消費税増税もあるため、改善が求められる。

原稿費や学会賞、研究会補助の支出を考え直さなくてはならない。

会員数を増やす努力も必要。

が伝えられた。

#### ・質疑応答及び討論

なし

#### ・採択

第14期上期予算案の採択が行われ、賛成：167(うち出席者109)、反対：0、保留：0により採択された。

注) 総会時には出席者を111名としたが、非会員が含まれていたため後日109名に訂正。

#### 4. 報告事項

##### 4.1. 自然災害に伴う会費免除措置について(竹広財務専門委員長)

現時点での申請者無し。2016年1月中旬締め切り予定なので、早めに申請を。

##### 4.2. 学会賞授賞式：2014年度最優秀研究者賞および2015年度最優秀発表賞(中村学会賞選考委員長)

2014年度最優秀研究者賞の授賞式は記念講演会の前に行われる予定。

2015年度最優秀発表賞(中村学会賞選考委員長)

11名の応募があったが、資格審査・予備審査を経て、6名を本審査対象者として選出した。

以下の2人が受賞し、倉本会長から表彰状・副賞が送られた。

- ・ 田中 佑希 会員「磁気流体波動がガス惑星の大気散逸と大気構造に与える影響」
- ・ 田崎 亮 会員「原始惑星系円盤における高空隙率出すとの光学特性とその応用」

中村学会賞選考委員長より、選考の経緯と講評の説明があった。

受賞者からの挨拶があった。

##### 4.3. 2015年秋季講演会の報告(井田2015年秋季講演会組織委員長)

(玄田会員より)

当初の予定を大幅に超えて、参加者170名以上であったことが報告された。

##### 4.4. 2016年秋季講演会の案内(はしもと2016年秋季講演会組織委員長)

(浦川会員より)

開催日：2016年9月12日－14日

場 所：ノートルダム清心女子大学・カリタスホール(岡山駅より徒歩10分)

##### 4.5. その他

JpGUに関して(倉本会長より)

来年参加料が値上げ予定であること、代議員選挙の投票受付中であること、学術会議関連の報告が行われた。

2014年に提出した大型研究計画の概要が述べられた。

コンソーシアムの構築として、ISAS大学連携拠点形成プログラムに採択された。

火星衛星SR計画に関して(倉本会長より)

コンセプト、選定の経緯、目標等が報告された。

8/25 予備MDR実施

11/02 国際MDR

11/4, 5 MDR

年内にSRR

来春にJAXAプロジェクト準備審査

多方面からのサポート、建設的な批判などが必要である。

-CPSでワークショップを企画中

-JpGU小天体セッションで特集を予定

SLIMに続く、公募型小型計画2号機、3号機(イプシロン)が近々に募集予定であるため、提案予定の方は早めにご連絡いただきたい。

質疑応答

(小林会員) 火星衛星SRに関してのplanetary protectionは考えているか。

(倉本会長) 現状では十分に検討できておらず、今後の課題とする。

(渡邊会員) 現在参加していない方々にもサイエンス面での積極的な議論をお願いしたい。

探査ミッション立案スクールについて(上野会員)

CPSが合宿形式の探査ミッション立案スクールを開催する。資料が配布された。

日 時：2016/01/08 - 2016/01/12

場 所：神戸大学統合研究拠点3F：惑星科学研究センター内

対 象：大学院生(+ポスドク, 若手)

## 5. 議長団解任

## 6. 閉会宣言

# ◇日本惑星科学会第113回運営委員会議事録

日 時：2015年10月14日(水)17:40 - 21:00

場 所：東京工業大学 大岡山キャンパス 石川台2号館318号室

運営委員：

倉本 圭, 渡邊 誠一郎, 荒川 政彦, 田近 英一, 中村 昭子, 中本 泰史, 平田 成, 井田 茂, 和田 浩二,  
春山 純一, 竹広 真一, 諸田 智克, 橘 省吾, はしもと じょーじ, 小久保 英一郎, 荒井 朋子, 佐々木 晶,  
生駒 大洋, 小林 直樹

オブザーバー：

城野 信一(行事部会長)

欠 席：

千秋 博紀, 並木 則行, 林 祥介, 永原 裕子

委 任 状：

議長：2, 小林 直樹：1

## 議題・報告事項：

### 1. 入退会について

諸田総務専門委員長より, 入退会状況が報告された。

### 2. その他総務からの案件(議長・書記等)

諸田総務専門委員長より, 第44回総会の議長に数田 ひかる 会員, 書記に坂谷 尚哉 会員が推薦された。

### 3. 遊星人の発行状況報告(和田編集専門委員長)

和田編集専門委員長から発行状況について報告があった。

つつがなく発行している。

前号ページ数が最大級であった。

印刷費は問題ないか? (渡邊)

財務に確認する。(和田)

### 4. 遊星人出版倫理規定について

和田編集専門委員長からオーサーシップと二重投稿禁止に関する規定の提案があった。

二重投稿についてどこまで厳密に対応するか? 英語論文を日本語で書き直した場合などは? (渡邊)

英語論文を引用する形で解説を付与した場合はよいと判断する。直訳ではだめ。(和田)

このようなガイドラインを示すことで投稿数が減るのが気がかり(渡邊)

編集部内で内規を設け運用する(和田)

規定はオリジナル論文とそれ以外の記事で適用範囲を分けている。(和田)

できるだけ早く公示・施行する。

#### 5. 2015年秋季講演会報告

井田2015年秋季講演会組織委員長より報告があった。

事前登録：166

当日参加：30弱

190名程度の参加にはなる見込み。

席数は140 - 150でおおよそ埋まっている

試みとしてマイクをなしにしてみた。現状では問題なさそうである。

#### 6. 2016年秋季講演会実施案

はしもと2016年度秋季講演会組織委員長より2016年度秋季講演会の報告があった。

9/12(月) - 14(水)

ノートルダム清心女子大学

懇親会会場も同じ

日程についてはsteering-mlで議論した上で決定した(参考:[steering:28097])

LOCは、はしもと、水野(ノートルダム清心女子大)、浦川、道上(近畿大)の体制。

#### 7. 今後の秋季講演会について

城野行事部会長より今後の秋季講演会の予定について報告があった。

2017年：大阪大学

2018年：今後打診

#### 8. 予稿集公開について

城野行事部会長より今後の予稿集公開について報告があった。

遊星人、秋季講演会予稿集のNiiでの公開サービスが終わる。

NIIへの登録・公開が終わる

jstageへ移行を行う場合はxmlでメタデータを作る必要がある

jstageへ移行申請はするが、xmlを作る労力を考えると移行すべきかどうかは問題

xmlファイルさえ用意できれば無料で公開できる。(倉本)

無料である(城野)

業者にxmlファイル作成を依頼する場合の予算は？(小林)

確認する(城野)

一度、関係者が講習会に参加して対応可能か検討することになった。

#### 9. LOCの口座について

城野行事部会長より引き継ぎ口座の開設について相談があった。

引き続き検討する。

#### 10. 惑星サーバの移転について

平田情報化専門委員長より惑星サーバの移転について報告があった。

2016年4月ごろに新サーバに移転する予定。

#### 11. シニア会員制について

橘将来計画専門委員会より終身会員制度について提案があった。

海外では例がある。

引き続き検討する。

#### 12. 運営委員の連続再任制限について

運営委員の連続再任制限はないか？

新陳代謝はあったほうがよい  
検討を続ける。

### 13. 会計第13期下期中間報告

竹広財務専門委員長より第13期下期会計中間報告があった。

予算通りにおおよそ進んでいるが、遊星人印刷費高もあり支出が多くなっている。  
資料中の前期繰越収支差額は7,427,321ではなく7,599,063の誤り。

### 14. 自然災害に伴う会費免除措置等について

竹広財務専門委員長より現時点で申請者がいないことが報告された。

### 15. 会計第13期上期予算案

竹広財務専門委員長より第13期上期予算案があった。

EPS分担金をこれまでの10万から20万計上することとした。

賛助会員の減少など20万減、EPS分担金を10万から20万計上、遊星人印刷費を多くしたことで~86万の赤字予算になる。遊星人のカラーページサービスを休止とする。

総会で会長から学会賞賞金の是非を確認する。

### 16. 最優秀発表賞受賞者の決定

中村学会賞選考委員長より選考委員会での選考の結果が報告された。これにより

田中 佑希 会員(名古屋大学)

田崎 亮 会員(京都大学)

が受賞候補として推薦され、異議なく承認された。

### 17. 日本地球惑星科学連合の報告

倉本会長、田近委員より学協会長会議の報告があった。

法人運営規定の小改正

学術会議活動報告

マスタープラン改訂(2017年)のための活動開始

アンケートを実施した(学会では会長と将来計画委員会で対応)

次回の大改訂(マスタープラン2019)に向けた検討も必要

学協会長会議議長は海洋学会会長となる

AGUとのジョイントセッションを設ける

2017年度はAGUと共催にする

2018年以降もEGUやAOGSとの共催の可能性も検討するなど、国際化を進める

参加費を上げ、外税方式にする

ポスター比率を上げたい(国際展示場も使って面積は増やす)

代議員選挙投票、フェロー推薦の依頼があった

連合大会の学生発表賞について審査員の負担が大きすぎる。やり方を改善できないか。(中村)

検討する。(佐々木)

### 18. 大型研究計画について

倉本会長から大型研究計画について報告があった。

コンソーシアム構想の改定をする予定である。その他に提案予定があれば早めに連絡すること。

今回の改定で火星衛星も位置付けるべき。(渡邊)

その予定である。(倉本)

その次の改定はいつになるのか?(春山)

2019年である。(倉本)

**19. 将来惑星探査について**

倉本会長から火星衛星サンプルリターン計画について報告があった。

11/2に国際MDR, 11/4, 5に国内MDR.

12月中にSRR, 1月に準備審査の予定である.

宇宙探査小委員会で概算要求は通った.

イプシロンを使ったミッションの公募がある.

今後, RFIの小改定の見込み.

**20. その他**

特になし

## ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2015年12月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

株式会社五藤光学研究所

有限会社テラパブ

株式会社ニュートンプレス

## ◇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。

---

### 2016/06

#### 6/26-7/1 Goldschmidt Conference 2016

(a)横浜国際平和会議場(パシフィコ横浜), 神奈川県横浜市

(b)European Association of Geochemistry, Geochemical Society

(c)<http://goldschmidt.info/2016/index>

---

### 2016/08

#### 8/7-8/12 第18回結晶成長国際会議 (ICCGE-18)

(a)名古屋国際会議場, 愛知県名古屋市熱田区

(b)The Japanese Association for Crystal Growth, The Japan Society of Applied Physics

(c)<http://www.iccge18.jp/index.html>

## 編集後記

『遊星人』には専門的な記事が多い、とよく言われます。前号(vol.24, no.3)の特集「日本における衝突研究の軌跡」では、13報の特集論文を含む14報の査読付き記事が掲載されました。お手元に届いた『遊星人』の厚さに驚かれた方も多かったのではないのでしょうか。運営委員会でも話題にあがったようです。詳細はJSPS Informationをご覧ください。

厚いと言えば、東京のコンビニで見かけた某結婚情報誌の厚さにも驚愕しました。まるで辞書か百科事典です。「情報が溢れる現社会」を具現化するとあんなのでしょうか。あれだけ結婚に関する情報が溢れているのに少子化とは、世の中一体どうなっているのでしょうか。以前、私の妻が「あまりの重さにめげて、購読を諦めた」と言っていたのがひとつの答えなのかも

知れません。

小惑星探査機「はやぶさ」の活躍もあり、惑星科学の魅力が世の中に広まっているのを感じます。一般の方が『遊星人』を手にとられる機会も増えるかも知れません。そのときに、「あまりの難しさにめげて、購読を諦めた」と言われてしまうと、ちょっと寂しいなあと思いました。もう少し気楽に読めるようなコーナーがあってもいいのかも知れません。良い企画をお持ちの方は、ぜひ編集委員にお声掛けを。ちなみに、前号から始まった連載企画『遊星百景「私のお気に入りの地形」』では、地球では見られない珍しい地形を、著者の想いも込めて解説してくれています。本号にはその第2弾が掲載されていますので、ぜひご覧ください。(三浦)

編集委員

和田 浩二 [編集長]

三浦 均 [編集幹事]

生駒 大洋, 上相 真之, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇氣, 小久保 英一郎, 白石 浩章, 杉山 耕一朗,  
関口 朋彦, 田中 秀和, 谷川 享行, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡,  
渡部 潤一

2015年12月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第24巻 第4号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社

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

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail: staff@wakusei.jp

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

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を個人的な使用の目的以外で複写したい方は、著作権者から複写等の行使の依頼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。