# 日本惑星科学会誌　遊・星・人

## 第27巻　第2号

## 目　次


**巻頭言**　野口 高明……65

**地球物理学者によるハワイ島の火山見学案内**
はしもと じょーじ……66

**一番星へ行こう！日本の金星探査機の挑戦 その34 ～あかつき定常運用の終了～**
中村 正人，佐藤 毅彦，今村 剛……79

**系外惑星「遠い世界の物語」 その10 ～ハビタブル惑星の現状とこれから～**
小玉 貴則，門屋 辰太郎……83

**火の鳥「はやぶさ」未来編 その14**
**～サンプルリターンミッションからの試料受入れ～**　安部 正真，坏本 尚義……92

**遊星百景 その12 ～月の小さな構造地形～**　嵩 由芙子……96

**第10回月惑星探査データ解析実習会を終えて**
出村 裕英，平田 成，小川 佳子，仲内 悠祐，臼井 寛裕，その他9名 & 1チーム……99

**月極域探査に関するワークショップ開催報告**
長岡 央，橋爪 光，鹿山 雅裕，大竹 真紀子，星野 健……103

**新刊書評**　岡崎 隆司……107

**2018年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ**　関口 朋彦……108

**2018年度助成事業2件公募のご案内**　公益財団法人 宇宙科学振興会……111

**学位論文タイトル紹介**……112

**JSPS Information**……113


表紙デザイン：BROOKS

# Contents

**Preface** T. Noguchi **65**

**Field guide to the island of Hawaii, written by geophysicist**
G. L. Hashimoto **66**

**Road to the first star : Venus orbiter from Japan (34)**
**— End of the nominal mission of Venus explorer Akatsuki —**
M. Nakamura, T. Satoh, and T. Imamura **79**

**Tales of distant exoplanet worlds (10)**
**— Understanding of habitable planets —** T. Kodama and S. Kadoya **83**

**Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (14)**
**— Sample acceptance from sample return mission —**
M. Abe and H. Yurimoto **92**

**My favorite view in planetary sciences (12)**
**— Small tectonic structures on the Moon —** Y. Daket **96**

**Report of 10th exercise for data analysis in lunar and planetary data explorations**
H. Demura, N. Hirata, Y. Ogawa, Y. Nakauchi, T. Usui, and 9 authors, 1 team **99**

**Report of workshop for lunar polar exploration**
H. Nagaoka, K. Hashizume, M. Kayama, M. Ohtake, and T. Hoshino **103**

**Book review** R. Okazaki **107**

**Announcement for 2018 annual meeting** T. Sekiguchi **108**

**Announcement of public offering for 2018 grants**
Society for Promotion of Space Science **111**

**Recent theses in planetary sciences** **112**

**JSPS Information** **113**

# 巻頭言

4年前から新入生に将来の自分をイメージさせるという授業も担当している．その授業では，全学部の学生が一クラスに混ざるように組まれていて，サイエンスに興味がない学生達の気分をうかがい知ることができる．この授業では自分史を教員も話さねばならない．この授業を持ち始めた当初は，まだ，はやぶさミッションの話を覚えている学生もいたので，私の自分史をおもしろがってくれる学生がけっこういた．ところが，昨年あたりから，「なぜ太陽系という狭いことに興味を持ち続けられるのか？」という質問が出るようになった．狭いとはどういう意味か聞いてみた．すると，彼らの世代にとっては，太陽系のことは小学校の教科書も載っている日常の一部でしかない．そういうことを，今も研究し続けているのが信じがたいというのである．惑星科学の新しい発見はWebやTV等で紹介されているが，サイエンスに興味のない学生達の目を引くことにはならないようだ．ところが，こういう学生達に，サイエンスの中で興味のあることは何かないのかと聞くと，生命科学という返事が戻ってくる．別に学生達が具体的なことを答えられるわけもなく，「なにかすごそう，おもしろそう」といった雰囲気なのである．

興味を持ってくれもしない一般学生の話などもういいよと思う人もいるかも知れない．しかし，もし，全国的にもこういう学生達が増えているならば，長期的には，特に太陽系探査に影響が出てくる可能性を考えなければならない．彼ら彼女らは将来の納税者であり，今後も太陽系探査という短期的には役に立たないことに予算を割いてもよいかもと思ってくれることが重要だからだ．そうはいっても，将来の納税者対策(？)は，小中学生に行うのが重要だろう．未解決の興味深い魅力的な謎がたくさんあって「なにかすごそう，おもしろそう」と思ってくれる小中学生が増えて，さらに，「自分が解決してみたい」と思う人も出てくれば一石二鳥である．また，はやぶさ2ミッションを成功裏に終わらせることも一般の人々の興味を再度呼び起こすために鍵となるだろう．末筆ながら，私も微力ながらミッションの成功に貢献したいと考えている．

野口 高明(九州大学基幹教育院)

←目次へ



# 地球物理学者によるハワイ島の火山見学案内

はしもと じょーじ[1]

（**要旨**）地球物理学的な視点でまとめたハワイ島の火山見学案内である．本稿は無保証である[2]．本稿に関連していかなる損害が発生したとしても，筆者は一切責任をとらない．

## 1. 地球物理学者による火山見学案内

表題は早川由起夫先生の「ハワイ島の火山見学案内」[1]にちなんでつけさせていただいた．筆者はハワイに行くたび，早川先生のハワイ見学案内を読み直している．この文書は早川先生の見学案内を上書きするものではなく，地球物理学的な視点で早川先生の見学案内を補完するものと思っていただきたい[3]．なお，ハワイ訪問にかかわる基本事項はここでは述べない．各種の旅行ガイドブックを参考にしてください．

筆者はここ10年の間に6回ハワイ火山国立公園[2]を訪れた．うち2回（2009年6月，2012年7月）はマウナ・ケア（Mauna Kea）山頂で天文観測をおこなった後の天文学者を相手に火山の説明をおこない，4回（2013年3月，2014年3月，2015年3月，2018年3月）は巡検で岡山大学理学部（物理学科，化学科，生物学科，地球科学科）の1〜2年生を相手に火山の説明をおこなった[4]．筆者は火山については素人であるが，ハワイの火山はわかりやすく，地球物理学の練習問題として解いてみたくなるものがたくさん見つかる．以下，筆者がハワイで見たいくつかのものについて述べる．

## 2. キラウエア・カルデラとその周辺

キラウエア（Kilauea）の標高は1,247 m，山頂には5 km × 3 kmの大きさのカルデラがあり[5]，カルデラ内には直径1 km のハレマウマウ（Halemaumau）火口がある（図1）．2018年3月現在，ハレマウマウ火口の一部は溶岩湖になっていて，溶岩湖の表面でバブルがはじける際に空中へ跳ね飛ばされる溶岩は，ジャッガー博物館（Jaggar Museum）から見ることができる（溶岩湖の頭位が低いときは見えないこともある）．

以前には，キラウエア・カルデラ内に降りるトレイル（Halemaumau Trail）を使ってハレマウマウのすぐ横まで行くことができたが，現在は火口から立ち昇る噴煙のためキラウエア・カルデラ内は立入り禁止になっている．また，キラウエア・カルデラを一周するクレーター・リム・ドライブ（Crater Rim Drive）とクレーター・リム・トレイル（Crater Rim Trail）も，カルデラの南西側は立入り禁止になっていて，一周りすることはできない．これは火山ガスが北東貿易風[6]によって南西側に流されるためである．

1. 岡山大学理学部地球科学科
george@gfd-dennou.org

2. このような文章を掲載するという決定をした遊星人編集部の判断は英断なのか蛮勇なのか，その判定は読者に任されている．

3. 「はしもとを地球物理学者と認めることはできない」という意見は正しいかもしれないが，それに対しては「野暮なことは言わないで」とだけ答える．

4. 岡山大学理学部のハワイ実習は地球科学巡検と生物学実習を混ぜ合わせた内容で実施されている．過去4回の実施内容はウェブ（http://epa.desc.okayama-u.ac.jp/%7Efrontier/hawaii.htm）で見ることができる．

5. 大きさだけなら阿蘇カルデラの方がずっと大きい．

## 2.1　ビジター・センター

ハワイ火山国立公園の入口で入場料を払って中に入ったら，まずキラウエア・ビジター・センター(Kilauea Visitor Center)に行く．噴火に関する情報，立入禁止区域の設定，レンジャーによる解説の時間，などを確認し，地図や書籍を入手する．あと，ここにはまともなトイレがある[7]．

ビジター・センター前の屋根の下に，よくできたハワイ島の立体模型がある(図2)．海底地形も表現されていて，海面上と海面下で山体の傾斜が異なっていることがわかる．また，ハワイ島の火山は，ロイヒ(Loihi)[8]，マウナ・ロア(Mauna Loa)，フアラライ(Hualalai)，と続くロア・トレンド(Loa trend)[9]と，キラウエア，マウナ・ケア，コハラ(Kohala)，と続くケア・トレンド(Kea trend)[10]という，ほぼ平行な2つの曲線に沿って並んでいることも，立体模型から見てとれる．

時間があるなら，ビジター・センターから道を渡って反対側に行ってみる．森を抜けると，ボルケーノ・ハウス(Volcano House)の正面玄関前に出る．そのまま直進して建物を通り抜けると[11]，キラウエア・カルデラのへりに出る(図1)．正面にハレマウマウがあり，噴煙が立ち上っているのが見える．右の方にはハワイ火山観測所(HVO)も見える．

## 2.2　キラウエア・イキ

キラウエア・イキ(Kilauea Iki)はキラウエア・カルデラのすぐ隣にあるピット・クレーターである．ピット・クレーターは地下にできた空洞の天井が崩落することで形成される．キラウエア・イキ・クレーターは1959年11月にクレーター壁から溶岩が噴き出て溶岩湖になった．現在，溶岩湖は冷えて固まっており，溶岩湖の上を歩くことができる．溶岩湖の上に降りるには，キラウエア・イキ・トレイルと呼ばれる一周6.4 kmのトレイルを利用する．トレイルを歩き始める前に，ハワイ火山国立公園が発行しているトレイル・ガイド(Kilaue Iki Trail Guide)[3]をビジター・センターなどで入手しておくとよい．

### 2.2.1　キラウエア・イキ・トレイル

この節の記述は主にトレイル・ガイド[3]に基づいている．

キラウエア・イキ・トレイルの起点はクレーターの北東にあるキラウエア・イキ展望台で，ここからはクレーターの全景を見ることができる．1959年の噴火前，クレーターの底は森林で覆われていて，クレーターの深さは現在の約2倍の244 mであった．クレーター壁から流れ出た溶岩は，クレーターを半分の深さまで溶岩で満たし，噴出口は溶岩湖の下に埋もれた．溶岩の噴出時の温度は1490 K．噴出口から噴き上げられた溶岩は580 mの高さまであがり，これはハワイで観測された最も高い溶岩噴泉となった．現在のクレーターの底はとても平坦で，かつては液体で満たされていたことを実感することができる．また，上から見るとトレイルは白い筋として認識される[12]．

トレイルの起点から出発して反時計回りにクレーターのへりを進んでいくと，クレーターの向こう側(南側))にある丘(プウ・プアイ，Puu Puai)がよく見えるところに出る．この丘はスコリア丘で，1959年の噴火で噴き上げられたスコリアが堆積して形成したものである．クレーターの底には噴出口の跡が見え，噴出口に接するクレーター壁面は噴出口からの噴気にさらされたことで周囲とは異なる赤茶けた色になっている．

さらにトレイルを進んでクレーターの底への降り口に到着したら，階段になっているトレイルを降りる．

6. 貿易風(trade wind)はいつも変わらず同じ方向に吹く．風向きがくるくると変わるようなら南西側だけでなく火口のまわり360°を立ち入り禁止にしなければならなかったはずである．ちなみに，trade windにおいてtradeが示すのは「貿易」ではなく「いつも同じ」である．大航海時代には貿易風を利用して貿易がおこなわれたが，trade windは貿易に利用されたからtrade なのではなく，いつも同じ方向に吹くからtradeなのである．
7. 公園内にトイレがある場所は限られているので，行けるときに行っておく．
8. ハワイ島の南東沖にある海底火山．現在の山頂は海面下約1,000m.
9. ロア・トレンドは，マフコナ(Mahukona)，カホオラウェ(Kahoolawe)，ラナイ(Lanai)，ウェスト・モロカイ(West Molokai)，と続く．
10. ケア・トレンドは，ハレアカラ(Haleakala)，ウェスト・マウイ(West Maui)，イースト・モロカイ(East Molokai)，と続く．
11. ボルケーノ・ハウスは1877年開業の由緒正しいホテル．正面玄関から入ってただ通り抜けるだけというのは気後れしてしまうかもしれないが，筆者は今まで一度も止められたことがないので多分大丈夫なはず．うちの学生さんに言わせると，売店の土産物の品質はピカイチとのこと．
12. トレイルが周囲よりも白く見えるのは，ハイカーが踏みつけることでトレイル上の粒子が周囲にある粒子よりも細かくなっているためと思われる．

1959年の噴火では，溶岩の噴出が止まった後，溶岩湖に貯まった溶岩の一部が噴出口から排出されて溶岩湖の表面は約15 m下がった[13]．溶岩湖の表面を覆っていたクラストの一部は，かつて表面があった位置に取り残されて現在はテラスを作っている(lava subsidence terrace)．クレーターの底に降りるときにテラスの位置を同定できれば，そこがかつての溶岩湖の表面ということになる．

クレーターの底に降りて岩石を見ると，緑色をしたカンラン石の結晶を見つけることができる(図3)[14]．トレイルを少し進んで，1959年の噴火で溶岩を噴き出した噴出口に近づく．噴出口とその周辺は，崩落した岩石で覆われており足場が悪い．足下の岩石は崩れやすく危険であるが，柵などはないので，噴出口を覗き込むところまで移動することができる[15]．また，噴出口から振り返って反対側を見ると，クレーター壁に植生のない部分があるのを見つけることができる．これは噴出口から放出されたスコリアが積もった場所である．

噴出口を過ぎて少し進むと，トレイルの左右に高くなった場所が現れる．これらの高まりは，プウ・プアイから崩れ落ちたもので[16]，溶岩湖が固まる前に移動して現在の位置に落ち着いたとのこと．また，周囲には蒸気が噴き出している場所をいくつか確認することができる．地中に浸み込んだ雨水が，内部にあるまだ高温の岩石によって加熱されて蒸気になったもので，うっかり近づくとやけどする熱さである．蒸気が噴き出している場所の周囲は，噴気から析出した$CaSO_4$や$SiO_2$によって白く見える．

左右の高くなった場所の間を抜けると，広く平坦な表面が現れる．平坦なのはかつてクレーターが液体の溶岩で満たされていたためである．トレイル・ガイドの13番の標識の左側には，ドリル・コア採取[17]をおこなった場所をいくつか見つけることができる[18]．いくつかの穴には蓋が付けてあり，高温の蒸気が噴き出しているものもある[19]．ドリル・コアを最後に採取したのは1988年で，そのときは地下73–100 mにメルトがわずかに残っていただけであった．1990年代の半ばまでに溶岩湖は完全に固化したと考えられている．ドリル・コアの採取によって，もともとのクレーターの底が噴火前に比べて沈んでいることも明らかにされた．溶岩湖の深さは135 mと推定されている．

クレーターの底を横断し終えた後は，森の中のトレイルを登ってクレーターのへりまで上がる．クレーターの底から出る前に振り返ると，目の前には周囲を急な崖で囲まれたキラウエア・イキ・クレーターの平坦な地面が広がっている(図4)．そしてその先の遠くにはマウナ・ロアのなだらかな山体が見える．マウナ・ロアの山頂は海抜4,000 m以上，キラウエアからでも3,000 m 近い標高差があるのだが，なだらかすぎて山であるように見えない．それでも季節によっては山頂付近が雪で白くなるので，亜熱帯でも雪が積もるくらいに高い山なのである．

### 2.2.2 溶岩湖冷却にまつわる考察

キラウエア・イキでは，溶岩の噴出による溶岩湖の形成から冷却・固化に至る一連の過程が様々な方法で観測されている．ここでは，溶岩湖表面の沈降速度，溶岩湖内部の温度がキュリー温度になる深さ，溶岩湖表面の温度偏差(溶岩湖周辺の地表温度との差)，という3つの観測量について，Turcotte and Schubertの教科書[4]を参照しながらその整合性を確認する．

溶岩湖表面の現在の沈降速度は$dh/dt = -2$ cm/yearである[3]．溶岩湖の内部が現在も冷え続けており，冷えて体積が小さくなることを反映していると考えられている．溶岩湖の表面が下がるのは全て冷却による収縮によるものとして，沈降速度から溶岩湖の冷却速度$dT/dt$を見積もる．

$$\frac{1}{D}\frac{dh}{dt} = a\frac{dT}{dt} \qquad (1)$$

ここで$D$は溶岩湖の深さ，$a = (1/V)(dV/dT)$は岩石の体積熱膨張率である．表1にある値を用いると，溶

13. 火道は湧き出し口と排出口のどちらにもなる．
14. 目で見える大きさのカンラン石の結晶は，クレーターの西側では簡単に見つかるが，クレーターの東側に行くと見つからない(筆者調べ)．クレーターの西と東で差がある理由を筆者は知らない．
15. 踏み跡があるので近づく人はある程度の数いると思われるが，トレイルなのかどうかは不明．何があっても筆者は責任をとりません．
16. 降り積もったスコリア丘の重さによって，クレーター壁が崩れたのだろうか？
17. 穴は，溶岩湖の冷却過程を調べるために開けられた．
18. トレイルのすぐ近くから，かなり遠く(壁の近く)まで，探してみると穴はたくさん見つかる．
19. 穴から蒸気が噴き出しているということは，穴を開けたことで局所的に熱流量が変わったということである．場を乱さずに熱流量を計測するのはいかにも難しそうである．

**表1：溶岩湖のパラメタ.**

| | 値 | 文献 |
|---|---|---|
| 溶岩湖の深さ | $D$ = 135 m | [3] |
| 溶岩湖表面の沈降速度 | $dh/dt$ = −2 cm/year | [3] |
| 溶岩湖周囲の地表温度 | $T_0$ = 15 ℃ | [5] |
| 岩石の密度 | $\rho$ = 1500 kg/m$^3$ | [6] |
| 岩石の比熱 | $C_p$ = 1000 J/K/kg | [4] |
| 岩石の体積熱膨張率 | $a = 3 \times 10^{-5}$ | [4] |
| 岩石の熱伝導率 | $k$ = 2.5 W/m/K | [4] |
| キュリー温度 | $T_c$ = 580 ℃ | [7] |
| ステファン・ボルツマン定数 | $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m$^2$/K$^4$ | |

岩湖の冷却速度は5 K/yearになる.

冷却は溶岩湖の表面からおこなわれているとすると，冷却速度から熱流量$q$を求めることができる.

$$q = -\rho D C_p \frac{dT}{dt} \tag{2}$$

ここで$\rho$は岩石の密度，$C_p$は岩石の比熱である．表1にある値を用いると，熱流量は30W/m$^2$となる.

溶岩湖の表面は，溶岩湖の冷却による熱流量がない周囲の表面に対して，冷却による熱流量$q$だけ余計に表面から大気へ熱を輸送しなければならない．この余計な熱の輸送は地表面が射出する熱放射が増えることでおこなわれていると仮定して，溶岩湖表面の温度偏差$\Delta T_s$を求める．温度偏差は，溶岩湖表面の温度$T_s$の溶岩湖周辺の表面温度$T_0$に対するずれとして，以下のように定義する.

$$\Delta T_s = T_s - T_0 \tag{3}$$

地表面が射出する熱放射$F$は，地表温度を$T$とすると

$$F = \sigma T^4 \tag{4}$$

ここで$\sigma$はステファン・ボルツマン定数である．温度偏差$\Delta T$と溶岩湖の冷却による熱流量$q$の関係は

$$q = \left(\frac{dF}{dT}\right)_{T_0} \Delta T_s \tag{5}$$

表1にある値を用いると，$q$ = 30(W/m$^2$)のとき$\Delta T_s$ = 6 Kとなる．地球観測衛星TERRAに搭載されたASTERの観測によると，キラウエア・イキの表面温度は周辺地域に比べて3 K程度高温になっている[5]. 熱放射以外に潜熱や顕熱の形で輸送される熱もあることを考えると，先の温度偏差の見積りはASTERの観測と整合的である.

熱流量からは溶岩湖内部の温度勾配を見積もることもできる．溶岩湖内部で熱は熱伝導によって輸送されるなら，熱流量と温度勾配の関係は次のようになる.

$$q = -k \frac{dT}{dz} \tag{6}$$

ここで$k$は熱伝導率，$z$は地表を0とした高度/深度，熱流量$q$は地表から大気に向かう向きを正とした. 表1にある値を用いると，溶岩湖内部の温度勾配は−10 K/mとなる(地中に潜るほど高温になるので，温度勾配は負になる).

磁気測定によって溶岩湖内部の温度がキュリー温度になる深さの推定がなされており，その深さは50 mとされている[7]. 熱流量から見積もった温度勾配を用いると，溶岩湖内部の温度がキュリー温度$T_c$になる深さ$z_c$は

$$T_c = T_s + \frac{dT}{dz} z_c \tag{7}$$

表1にある値を用いると地下40 mと計算される．これは磁気測定によって推定された深さにほぼ一致している.

## 2.3　サーストン溶岩チューブ

キラウエア・イキのすぐ横には，中に入ることのできるサーストン溶岩チューブ(Thurston Lave Tube)がある．キラウエア・イキ・トレイルを歩いたら，ついでに溶岩チューブに寄り道して中を歩いてみるとよい．ちなみに，この溶岩チューブはキラウエア・イキの溶岩湖より高い位置にあり，1959年の噴火とは無関係である[20].

トレイルの順路に従ってピット・クレーターの中を

20. サーストン溶岩チューブの発見は1913年.

図1： ボルケーノ・ハウスから見たキラウエア・カルデラ．中央左にあるハレマウマウ火口から噴煙があがっている．右奥でなだらかに裾をひいているのはマウナ・ロア．

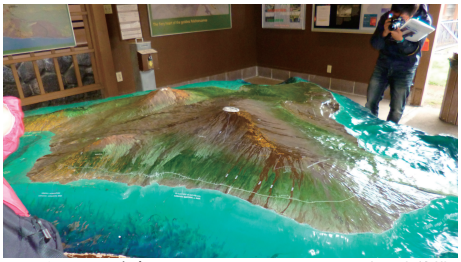


図2： キラウエア・ビジター・センターにあるハワイ島の立体模型．（撮影者：奥永明音）

図3： 緑色をしたオリビンの結晶を含む岩石．（撮影者：高木聖子）

図4： キラウエア・イキ・クレーター．いちばん手前は溶岩湖の沈降で生じた段丘（lava subsidence terrace）の上面で，右に写っている人々は段丘の崖を登っているところ．その奥は平坦なクレーターの底で植生がほとんど見られないのに対し，クレーターの壁は植生で覆われている．写真中央を奥に向かって伸びるぼんやりとした白い帯はトレイル．左の壁の上にはプウ・プアイ（スコリア丘）があり，さらにその奥にはマウナ・ロアが見える．この写真が撮影されたのは7月で，マウナ・ロア山頂に雪はない．

図5： サーストン溶岩チューブ．（撮影者：高木聖子）

図6： プウ・プアイとデバステーション・トレイル．

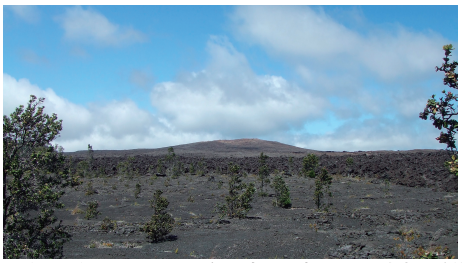


図7： マウナ・ウルと1969-1974年の噴火で噴き出した溶岩．手前はパホイホイだが，その奥にアアがあり，さらにその奥はまたパホイホイ．

図8： 溶岩ツアー．目の前で溶岩がひだを作りながらゆっくりと流れていく．

図9： 飛行機から撮影したマウナ・ケア．マウナ・ロア（図4）と違って見た目がギザギザしている．この写真を撮影したとき，下層には雲が広がっているが，山頂は雲の上に出ている．

図10： マウナ・ケア山頂で日の出の時間に西を向いて撮影した写真．手前の丸い2つのドームはケック天文台，その後ろにある銀色のドームはすばる望遠鏡．左に見える2つの黒いこぶはスコリア丘．その奥にある濃青と茜色の境界で区切られた上に凸の青黒い三角はマウナ・ケアの影．

降りていって，溶岩チューブの入口に到着したら，かつて赤熱した溶岩が流れていた溶岩チューブの中に入る．照明が設置されているので，懐中電灯を持たずとも溶岩チューブの通行に問題はないが，壁面や天井を観察するなら懐中電灯があるとよい(図5)．

壁を見ると，かつてここを流れた溶岩流の表面がどの高さにあったのかわかる．溶岩チューブの天井には，したたり落ちる途中の溶岩が固まってできるつらら石(溶岩鍾乳)が形成されるらしいが，現在のサーストン溶岩チューブの天井に溶岩鍾乳は見られない．もともとは天井一面に溶岩鍾乳がぶら下がっていたのだが，溶岩鍾乳は折り取られて持ち去られてしまったらしい[21]．

順路に従って進み，溶岩チューブの天井が崩落したところから地上に出る．溶岩チューブはここから先にも続いているが，立入禁止になっている[22]．

サーストン溶岩チューブ前の駐車場は駐車できる台数が少ないこともあり，いつも混雑していて駐車スペースを見つけるのが難しい．そのためか，この駐車場は駐車時間に30分の制限が付けられている[23]．それでも混雑しているので，サーストン溶岩チューブ前の駐車場に車を駐車したいなら，混雑する前の時間に行くのがよい．

## 2.4　プウ・プアイ（スコリア丘）

1959年の噴火で形成されたスコリア丘であるプウ・プアイには，デバステーション・トレイル(Devastation Trail)を利用してアプローチする．トレイルの起点となるデバステーション・トレイル駐車場では，ネネ(nene)をよく見かける．ネネはハワイ州の州鳥で，ハワイの固有種である[24]．駐車場ではネネを礫かないように気をつけなければならない[25]．また，ネネに餌をやってもいけない．

### 2.4.1　デバステーション・トレイル

背の高い木に囲まれたデバステーション・トレイル駐車場から森の中に続くトレイルを歩いていくと，あるところで周囲にある木の樹高が急に低くなり，さらに進むと植生はだんだんとまばらになっていく．終には植生はなくなって地面はスコリアで埋め尽くされ，目の前にプウ・プアイが現れる(図6)．降下したスコリアでもともとあった森が焼かれた後，スコリアの降下量が少なかった地域では植生が回復しつつあるのに対し，スコリアの降下量が多かった地域では未だ植生が回復していないのだと思われる．降下スコリアが火口から南西方向に向かって分布していることは，Google マップで航空写真を見るとよくわかる．スコリアが南西方向に分布しているのは，貿易風が北東から吹いているからである．

トレイルはプウ・プアイをまくように右に曲がる．ここでは舗装されたトレイルの外に出てはいけないことになっていて，プウ・プアイに登ることは禁止されている．トレイルに沿ってプウ・プアイを左に見ながら進む途中では，トレイルの左右に溶岩樹型(樹木が燃え尽きたあとの空洞)をいくつか見つけることができる．やがてトレイルはキラウエア・イキ・クレーターのへり，キラウエア・イキ展望台のほぼ対角に位置するところに突き当たる．ここからリムに沿って左に延びる道はスコリアに埋もれて通行止めになっている．リムに沿って右に伸びる道のすぐ先は，トレイルの終点プウ・プアイ駐車場である．キラウエア・イキを覗き込んだら，車に戻るため来た道を引き返す．

帰りは足下にあるスコリアの大きさに注意してみる．国立公園が発行しているトレイル・ガイドには「手に取って観察してみよう．観察し終わったら，元あったように戻すこと」と書いてあるので，遠慮なくスコリアを手にとって観察する(終わったら元に戻す)．トレイル脇のスコリアを見ていくと，噴出口からの距離に応じてスコリアの大きさが変わる[8] ことを確認することができる[26]．

### 2.4.2　降下スコリアにまつわる考察

噴出口から噴き上げられた粒子の運動を考える．粒

21. 言うまでもないことだが，国立公園内の物を破壊してはいけないし，持ち帰ってもいけない．
22. 以前は立入可能だった(「懐中電灯を持って，気をつけて入るように」と書かれた看板があった)が，現在(2018年3月)は閉鎖されている．
23. キラウエア・イキ・トレイルの一周を30分で走破することはできないので，サーストン溶岩チューブ前に駐車してキラウエア・イキ・トレイルを歩くことはできない．
24. 筆者はネネの鳴き声を聞いたことはないが，「ネーネー」と鳴くらしい(ネネという名前は鳴き声に由来するらしい)．
25. ネネを礫いたら100 USDの罰金を科せられる，という話を聞いた．
26. トレイルを外れてスコリア丘に近づくことができれば，もっとよく大きさの変化を確認することができるはずであるが，トレイルを外れることは禁止されている．

子に働く力として重力と抵抗力を考えると，粒子の鉛直方向の運動方程式は，

$$m\frac{dw}{dt} = -mg + \rho_a C A \frac{(W-w)^2}{2} \tag{8}$$

ここで$m$は粒子の質量，$w$は粒子の鉛直速度，$g$は重力加速度，$\rho_a$は大気の密度，$C$は抵抗係数，$A$は粒子の断面積，$W$は大気の鉛直速度，である．簡単のため粒子は球形であることにすると，粒子の質量と断面積は粒子のバルク密度$\rho_s$と半径$r$を用いて$m = 4\pi r^3 \rho_s/3$, $A = \pi r^2$と書くことができて，運動方程式は

$$\frac{dw}{dt} = -g + \frac{3\rho_a C}{8 r \rho_s}(W-w)^2 \tag{9}$$

となる．この式の中に，粒子の特性を表わすパラメタは$r\rho_s$の形で入っていることから，$r\rho_s$が同じ値となる粒子は同じ運動をすることがわかる[9].

大気の鉛直速度$W$は0として運動方程式を積分すると

$$w(t) = -w_\infty \tanh\left(\frac{t}{\tau}\right) \tag{10}$$

ここで$w_\infty = \sqrt{8gr\rho_s/3\rho_a C}$, $\tau = \sqrt{8r\rho_s/3g\rho_a C}$で，粒子の初速は$w(t=0)=0$とした．$w_\infty$は終端速度で，重力と空気抵抗がつり合う速度である．粒子の速度は$\tau$くらいの時間スケールで終端速度に落ち着く．表2にある数値を用いて計算すると，直径2 cmのスコリアの終端速度は19 m/s，時間スケールは1.9 sとなる．数100 mの高さから落下する直径2 cmのスコリアは速やかに終端速度に達すると考えてよい[27].

ガスが上向き速度を持たないとき($W = 0$)，上向きに打ち上げられた粒子が到達する高度$z_{\max}$は終端速度を使っておおよそ

$$z_{\max} \sim \frac{{w_\infty}^2}{2g} \tag{11}$$

と見積もられる．すなわち，直径2 cmのスコリア($w_\infty$ = 19 m/s)はせいぜい数10 m程度までしか上がらない[28]．小さく軽い粒子は空気抵抗の影響を強く受けるため，ガスが上向きの速度を持たないと高く上がることができない．

**表2：降下スコリアのパラメタ．**

| | 値 | 文献 |
|---|---|---|
| スコリアの半径 | $r$ = 1 cm | |
| スコリアのバルク密度 | $\rho_s$ = 650 kg/m$^3$ | [8] |
| スコリアの熱拡散係数 | $\kappa$ = 1× 10$^{-6}$ s/m$^{-6}$ | [4] |
| 溶岩噴泉の高さ | $H$= 580 m | [3] |
| 水平風速 | $U$ = 5 m/s | |
| 抵抗係数 | $C$ = 0.4 | |
| 大気の密度 | $\rho_a$ = 1.2 kg/m$^3$ | |
| 重力加速度 | $g$ = 9.8 m/s$^2$ | |

次にスコリアの滞空時間を考える．粒子は噴出口で上向きに噴き出すガスによって速やかに最高高度$H$まで持ち上がり，その後，終端速度で落下するとしたら，滞空時間$T$は

$$T \simeq \frac{H}{w_\infty} \tag{12}$$

となる．直径2 cmのスコリアが580 m の高さから落ちるのにかかる時間は約30 sである．この落下の間に，スコリアは冷却して表面にクラストが形成される．クラストの厚さ$l$を熱拡散係数$\kappa$から見積もると，

$$l \simeq \sqrt{\kappa T} = \left(\frac{3\kappa^2 \rho_a C H^2}{8gr\rho_s}\right)^{1/4} \tag{13}$$

直径2 cmのスコリアでは5 mmくらいの厚さのクラストが形成されるので，落下したスコリアは固体として振る舞うと考えてよいだろう．固体のスコリアは落下した後に転がって，スコリア丘をつくる．スコリア丘の形(傾斜)は安息角[29]で決まる．

もうひとつ，粒子が水平風で流される距離を見積もる．直径2 cm程度のスコリアは空気抵抗によって速やかに大気の速度に馴染むと考えられるので，水平方向の輸送距離$L$は水平風速$U$に滞空時間$T$をかけ算したものとして見積もると，

$$L \simeq UT = UH\sqrt{\frac{3\rho_a C}{8gr\rho_s}} \tag{14}$$

表2にある数値を用いると，水平方向の輸送距離は

27. 積分するのは楽しいのでつい積分してしまったが，積分しないでもだいたいのことはわかる．終端速度は運動方程式に$dw/dt = 0$を代入することで簡単に求まり，時間スケールは$\tau \sim w_\infty/g$として見積もればよい．

28. 速い速度で打ち上げればより高くまで上がるが，そんなに高くは上がらない．運動方程式を2回積分して初速度と到達高度の関係を解析的に導けば，ここに示した雑な見積りでも十分であることがわかる．

29. 安息角は30°くらいだが，プウ・プアイの傾斜は30°よりはきついように見える．

**表3：アアとパホイホイの比較*.**

| | アア | パホイホイ |
|---|---|---|
| 溶岩噴出率 | 大 | 小 |
| 溶岩流の前進速度 | 速(>10 m/hour) | 遅(1–10 m/hour) |
| 流路 | チャネルをつくる | チューブをつくる |
| フロー・ユニットの厚さ | 厚い(2–10 m) | 薄い(0.2–2 m) |
| 温度 | 低め | 高め |
| 粘性 | 高め | 低め |

* Volcano World (http://volcano.oregonstate.edu/lava-flows)[11]を一部改変.

150 mとなる[30]．これは噴出口からプウ・プアイのピークまでの距離とほぼ同じである．

## 3. チェイン・オブ・クレーターズ・ロード

チェイン・オブ・クレーターズ・ロード(Chain of Craters Road)は東リフト・ゾーン上に生じた多数のピット・クレーターのそばを通って海岸まで下る道路．1969年から1974年にかけての噴火で道路の一部が溶岩で覆われたため，現在の道路は新しくルートを変えて作り直されたものである．かつては海岸沿いにカラパナ(Kalapana)までつながっていたが，現在はプウ・オオ(Puu Oo)から噴き出した溶岩によって分断され通り抜けることはできなくなっている[31]．

### 3.1　ナパウ・トレイル

かつてのチェイン・オブ・クレーターズ・ロードが溶岩流で埋められて行き止まりになったところはマウナ・ウル(Mauna Ulu)駐車場として整備され，ナパウ・トレイル(Napau Trail)の起点となっている．トレイルをプウ・フルフル(Puu Huluhulu)まで歩くなら，トレイル・ガイド(Mauna Ulu Eruption Guide) [10]を入手しておくとよい．

まず最初は，トレイルヘッドから森の中を南に延びるトレイルに入って，1969年に噴火した割れ目を見に行く．森を抜けると，割れ目噴火でつくられたスパター・ランパート(spatter rampart)の裏に出る．スパター・ランパートはスパターがへばりつくことで形成される．割れ目の側からスパター・ランパートを見ると，へばりついた溶岩が重力で垂れる途中に冷えて固まったことがよくわかる．スパターは壁面に付着するくらいには軟らかかったが，流れ落ちるほどには軟らかくなかったことから，スパター・ランパートを形成した溶岩噴泉の高さが制約される(高い溶岩噴泉は落下中に冷えて固まるのでスコリアとなり，低い溶岩噴泉は落下時の溶岩が高温で軟らかいので流れてしまう)．

トレイルの目印となっているアフ(ahu，積み石)に従って，ランパートを左に見ながら少し移動してから，割れ目を飛び越える．かつて，ここら辺は現在よりも高い位置まで溶岩で埋め尽くされていたが，溶岩の噴出が止まった後，溶岩を噴き出した割れ目が排出口となって固化する前の溶岩を吸い込んで，地表は現在の高さまで下がった．マッシュルーム状になって残った溶岩樹型から，溶岩がどの高さまであったのかを知ることができる[32]．また，割れ目を見るといかにも吸い込まれる途中の溶岩が固まったような模様が見える．

トレイル・ガイド[10]には，トレイルの脇に堆積したスコリアをどかしてみるとペレの涙(Pele's tear)やペレの髪の毛(Pele's hair)を見つけることもできる，とある[33]．どちらも溶岩が空中で固まったもので，ペレの涙は滑らかな表面を持つ雫状の形，ペレの髪の毛は細長い糸状の形である．

割れ目を離れてトレイルをプウ・フルフルに向かって進む．周辺を覆っている溶岩はだいたいパホイホイ(pahoehoe)だが，一部にアア(aa)も見られる(図7)．表面をがさがさのクリンカー(clinker)で覆われているのがアア，表面が滑らかなのがパホイホイである(表

30. 解析的に積分して見積もっても結果はたいして変わらない．
31. 一般車両の通行は許可されていない緊急避難用の未舗装道路が建設されているが，貫通はしていない．
32. 樹木に接した溶岩は冷やされて固化するため，溶けた溶岩が排出された後も頭位が保存される．
33. ペレの涙はデバステーション・トレイルの方が見つけやすいと思う．

3)．トレイルはアアを避けて[34]キプカ(Kipuka，周囲を溶岩流で囲まれているが溶岩流に覆われることなく島状に植生が残った場所)の中を抜ける．アアとパホイホイに化学組成の違いはなく，溶岩噴出率や温度の違いによって同じ溶岩がアアになったりパホイホイになったりする．表面はがさがさのアア溶岩も，内部はみっちり詰まっている．クリンカーの厚さは通常1–2 mであるが，10 mになる厚いものもある．

パホイホイ上につけられたトレイルを移動してプウ・フルフルの登り口にたどり着く，ちょっときつい登りをがんばって上に上がると，マウナ・ウルから噴き出した溶岩で埋め尽くされた大地を一望することができる．すぐ南東に見える丘がマウナ・ウルである．

噴火前に存在したピット・クレーターのいくつかはマウナ・ウルの溶岩で周囲と同じ高さまで埋められたが，現在はわずかな凹みになっているとのこと．溶岩で一度は完全に埋められたクレーターがまた凹んでいるのは，クレーターを埋めた熱い溶岩が冷却して収縮したためである(周囲も冷却によって収縮するが，クレーターは厚みがある分だけ収縮による沈降量が大きい)．また，クレーター内部を埋めた熱い溶岩がまだ十分に冷えていないため，クレーターのあった場所からは噴気も見られるとのこと．冷却の時間スケールは，厚さ$D$と熱拡散係数$\kappa$を使って$D^2/\kappa$と見積もることができる．熱拡散係数はおおよそ$1\times10^{-6}$ m$^2$/sの大きさなので，10 mの厚さの溶岩流は約3年で冷えるが，深さ100 mのピット・クレーターを埋めた溶岩が冷えるには約300年かかる．

## 3.2 溶岩チャネル

チェイン・オブ・クレーターズ・ロードの起点から7.4 mileの地点で，道路は溶岩チャネル[12]を横切る．溶岩チャネルを観察する展望台が設置されているので，溶岩チャネルを上から見ることができる．この溶岩チャネルをつくった溶岩はマウナ・ウルから噴出したもので，チェイン・オブ・クレーターズ・ロードと交わるのは噴出口から4.4 km地点．溶岩流がこの地点に到着したのは噴火開始から8時間後ということなので，溶岩流先端の平均前進速度は9 m/minということになる．堤防をつくっている溶岩は80–150 mの幅で広がっていて，その中に深さ～2 mで幅～11 mのチャネルがある．溶岩噴出率の見積り35 m$^3$/sを使うと，このチャネルを流れた溶岩の流速はおおよそ100 m/minとなる．これはチャネルがないときの前進速度の約10倍の速度である．冷却速度(硬くなって流れなくなるまでの時間)は変わらないとしたら，溶岩はチャネルを流れることで10倍遠くまで流れることができるようになったことになる．

## 3.3 オーシャン・エントリー

崖をくだって海まで出ると道路は左に曲がってしばらく海沿いに進む．そしてプウ・オオから流れてきた溶岩流にぶつかったところでチェイン・オブ・クレーターズ・ロードは終点となる．駐車場はなく，道の片側に縦列駐車する．

現在，プウ・オオから噴き出した溶岩のほとんどは，溶岩トンネルを通って海まで運ばれる．溶岩トンネルの天井にはところどころ崩落して穴が開いているところがあり，暗くなると穴を赤い輝点として見ることができる．これはトンネルを流れる高温の溶岩が出す熱放射が穴から外に漏れだしたもので，点をつなげることで現在溶岩が流れている溶岩トンネルの経路を推測することができる．

溶岩が海に流れ込む流入口(ocean entry)の位置は定まっておらず時折場所を変えるが，溶岩で熱せられて蒸発した海水が大気中で凝結してできる白い雲がもくもくと立ち上がっているので，流入口があればそれがどこにあるのかすぐにわかる[35]．

立ち入り禁止にはなっていないので道路の終点に車を停めて歩いていけば流入口に近づくこともできるが，安易な気持ちで流入口を見に行くのはやめた方がよいと思う．筆者は昔，流入口の近くまで歩いていってパトロール中のレンジャーに捕まり，「こんな危険なところにいたらダメだ．すぐに立ち去れ」と叱られました．溶岩ベンチが崩落したりすると本当に死にます[36]．それでも流入口に近づきたい人は，危険であることを理解して，しっかり準備(飲料水，懐中電灯[37]，など)を整えた上で出発してください．

34. アア溶岩を踏むとガサガサしていて痛いので「アア」って言っちゃう，パホイホイ溶岩の上はホイホイ歩ける，と大学の先輩に教えられた．

35. 2018年3月は溶岩が海に流れ落ちておらず，陸と海の境界から立ち上がる白い雲はなかった．

36. 今も無知だが，当時はもっと無知だった．

37. 陽が落ちると真っ暗になる．

## 4. 溶岩ツアー

溶岩が地表を流れているところまで連れていってくれるツアーがある．連れていってくれるの意味は「道案内してくれる」[38]であり，移動は自分の足で歩く．溶岩が地表を流れる場所は日々変わるので，歩く距離[39]は出発直前までわからない．また，出発地が変更になることもある．筆者が参加した3回のツアーのうち2回はカラパナから溶岩の上を歩くルート，もう1回はプウ・オオの北側からジャングルを通り抜けるルートであった．溶岩の上を歩くルートは比較的に歩きやすいが，陽が出ると日差しの中を延々と歩くことになるのできつい[40]．もう一方のジャングルを通り抜けるルートは，強い日差しで痛めつけられることはないが，必ずしも楽であるとは限らない．筆者が参加したときは一部で腰まで泥水に浸かるような道を片道2時間近く行くことになり，めちゃくちゃきつかった[41]．

誰でも参加できるとは思わないし，考えようによっては危険なツアーであるようにも思うのだが，覚悟のある人[42]には強くお勧めする．目の前で溶岩が流れていくところを見るのは，ちょっと感動してしまう体験だった(図8)．筆者が見たのは3回ともパホイホイ溶岩で，トウ(toe)の一部が破れては新しいトウが形成されるという過程が目の前でくり返された．表面が固まりつつあるローブの内部が流れることで縄状模様がつくられていく．溶岩流の向こう側の景色は，溶岩から発せられる熱のために揺らいで見える．赤熱した溶岩に近づくと猛烈な熱さを感じる．熱いのを我慢して近づいて，木の棒で赤い溶岩を突いてみると木の棒の先端に火がつく．軽く押しただけだと棒は刺さらないが，もうちょっと力を加えるとそこからはズブズブと潜っていくので，表面にクラストができていることがわかる．溶岩に刺した棒を横方向に動かして，溶岩の粘り気を感じる[43]．「だから何？」と言われると返す言葉はないが，筆者は機会があればまた行きたいと思っている．

38. 溶岩が駐車場のすぐ近くを流れている場合を除いて，ガイドなしで溶岩が流れている場所にたどり着くのは難しいと思う．
39. 昨日は往復5マイルだったのが，今日は往復15マイルになる，ということもあるとのこと．
40. 出発前に1人につき2リットル以上の飲料水を持つように指示された．また，途中にトイレはなく，見渡す限り溶岩がただ広がっているだけなので隠れるところもない．
41. 還暦をすぎた生物学科の教授は往路で体力を使い果たしたように見えた．筆者は「彼は生きて帰れないのではないか」と思った（が，ガイドさんと学生さんに助けられて無事生還しました）．このツアー中，筆者はリタイアしたいと思い続けていたが，終わってみるとこれがいちばん楽しいツアーだった．生還した教授も「一生の思い出(冥土の土産？)になる素晴らしい体験でした」と言っている．
42. 参加は自己責任です．筆者は一切の責任をとりません．

## 5. マウナ・ロアとマウナ・ケア

マウナ・ロアとマウナ・ケアの鞍部を抜けてハワイ島を東西に横断するサドル・ロード(Saddle Road)[44]は，1998年の「ハワイ島の火山見学案内」以降に大幅な改修がおこなわれ，現在はレンタカーも通行できるようになっている[45]．サドル・ロードから分岐してマウナ・ケアの山頂までつながるマウナ・ケア・アクセス・ロード(Mauna Kea Access Road)も，MKVIS(Mauna Kea Visitor Information Station)までは普通の車で行ける．その先のマウナ・ケア山頂まで登るには，未舗装区間があるので四輪駆動車を必要とする[13][46]．

### 5.1　マウナ・ロア

マウナ・ロアは地球最大の火山と言われている．山頂の標高は海抜だと4 kmほどだが，ハワイ島周辺の海の深さは約5 kmなので，そこから測ると山頂の高さは約9 kmとなる．また，噴き出している玄武岩質の溶岩の粘性が小さいため山体の傾斜はとてもゆるやかで，富士山のような円錐形の成層火山に比べると高さのわりに山体の体積は圧倒的に大きい．頂上にはカルデラがあるが，のっぺりとした外形をしている．中腹には大気$CO_2$濃度を長期にわたって測定していることで有名な観測所(Mauna Loa Observatory)がある．1843年以降に33回の噴火，最後の噴火は1984年，またいつ噴火してもおかしくない．

43. ちょっと力を入れても動かないが，もうちょっと力を入れると動き出す．溶岩はニュートン流体よりはビンガム流体で近似するべきと実感される．
44. 改修後はダニエル・K・イノウエ・ハイウェイ(Daniel K. Inouye Highway)という名称に変更された．
45. レンタカー会社によって対応が異なることもあるので，借りる前に確認が必要．
46. レンタカーの保険が適用されるかどうかは要確認．MKVISより上でロード・サービスを使うとざっくり1万ドルの支払いになるという話を聞いた．また，保険が適用される場合でも，免責金額が5千ドルであったりするらしい．

## 5.2 マウナ・ケア

マウナ・ケアは山頂にある天文台群で有名な山である．たくさんのスコリア丘があり，マウナ・ロアに比べると見た目はギザギザしている(図9)．山頂にカルデラがないのは，スコリアで埋められたためであると考えられている．また，山頂付近には氷河堆積物が見られることから，気候が寒冷な時期には氷帽で覆われていたことがわかる(マウナ・ロアには氷河の痕跡は見られない)．マウナ・ケアの最後の噴火は6,000–4,500年前とされていて，ここしばらくは噴火していない[47]．

富士山より高いマウナ・ケアであるが，山頂まで車で登ることができる．ヒロ(Hilo)の町からだと1時間程度のドライブで，標高2,800 mにあるMKVISに到着する．山頂に上がる人は，高地に体を慣らすためMKVISで1時間以上休憩することになっている[13][48]．標高は既に十分に高いので，MKVISで高山病の症状が出ることは普通にある．あんまり油断しない方がよい．

MKVISの北には山頂で観測する人のための宿泊施設(Hale Pohaku Lodge)があるが，一般の人は立ち入ることはできない．南南東の方角にあるキラウエアの方を見ると，空模様によっては火口から立ち上る噴煙を見ることができる．夜間であれば，火口の溶岩湖が発する赤い光で照らされた噴煙が見える．それ以外には，絶滅が危惧されている固有種の銀剣草(silver sword)[49]が柵の中で育てられているのを見学したり，MKVISで土産物[50]を物色したりする．

山頂へあがる道路は積雪の状況や強風などによって閉鎖されることもあるが，問題がなければMKVISから約30分で山頂まで行くことができる[51]．MKVISからちょっとあがると植物の生育限界を超え，植物は見られなくなる．途中にある駐車場に車を停めて，氷河によって削られて運搬された堆積物を見る．氷河は大きさに関係なく物を運ぶので，堆積物は粒度が揃っておらず，また角張っている[52]．山頂付近には，アメリカ合衆国でもっとも高い位置にある湖と言われるワイアウ湖(Lake Waiau)がある[53]．水はけが良さそうな場所なのに，なぜここに水が溜まるのか不思議である[54]．

日本のすばる望遠鏡は，予約制で一般の人の見学を受け付けていて，ガイド付きで望遠鏡施設を見学することができる[14]．すばる望遠鏡の隣にあるケック天文台(Keck Observatory)には見学室が設けられていて，見学室が開いている時間であればガラス越しに望遠鏡を見ることができる．主鏡の大きさだけで比べるならケック望遠鏡の方がすばる望遠鏡よりも大きいが，すばる望遠鏡の主鏡は一枚鏡であるのに対し，ケック望遠鏡の主鏡は36枚の六角形の鏡を組み合わせてつくられている[55]．

47. これからしばらくも噴火しないかどうかはわからないと思う．
48. 山頂にあがって観測する人は，山頂にあがる前に24時間以上をここで過ごすことになっている．
49. 銀剣草が花を咲かせるときは，茎がにょろにょろと2 m近く伸びて，そこに無数の花が咲くらしい(筆者は，花が咲いた後の枯れた銀剣草を見たことはあるが，花を見たことはない)．
50. 筆者のお勧めはマウナ・ケアに設置された9つの望遠鏡の主鏡をプリントしたTシャツ．主鏡は蓄光塗料でプリントされており，暗いところでぼんやりと光る．それはそれとして，マウナ・ケア・天文台(Mauna Kea Observatories)の恰好いいロゴが描かれた土産物がたくさんあるが，このロゴには矛盾があると岩上直幹氏が指摘している．ロゴに描かれた山はマウナ・ケアで，その中腹に描かれている建物はハレ・ポハク・ロッジであると考えるのが自然である．そうであるとしたら山の南側から北を向いて山を見ていることになるが，空には南にあるはずの南十字星とおぼしき星が描かれている．
51. 筆者が参加したツアーでは，ガイドさんが「MKVISより上では眠らないようにしてください．眠ると呼吸が浅くなって高山病が悪化します」と言っていた．また，MKVISから上に上がる途中では，高山病予防のため5分毎に1口ずつ水を飲むように，と言われた．根拠があるのかないのか，筆者は知らない．
52. 未舗装道路が終わって舗装道路になってすぐ，道路の脇(登りなら道路の右側) に少し開けた場所がある．ここはアポロ計画で月に着陸する宇宙飛行士が訓練をおこなった場所とのこと．訓練終了後にきちんと原状復帰されたらしく，月着陸の訓練をした痕跡は残っていない．月着陸の訓練がおこなわれたのは，マウナ・ケアの氷河堆積物が月の表面のアナログになると考えられたからと思うが，そう考えられた根拠を筆者は知らない．また，筆者が天文観測でハレ・ポハク・ロッジに宿泊していたとき，火星探査車の試験をおこなっている人々がハレ・ポハク・ロッジに出入りしていた．試験の場所は「あの尾根の向こう側」と言っていたので，おそらくハレ・ポハクの近所なのだと思う．マウナ・ケアは火星のアナログでもあるらしい．世の中には，火星模擬砂(Martian soil simulant)というものがあって，その材料はマウナ・ケアとマウナ・ロアの間にあるスコリア丘で採取されたものである．筆者が千葉工業大学で見た火星模擬砂(JSC Mars-IA)には植物の根っこおぼしき物が入っていたが，細かいことを気にするものではないのかもしれない．一方で，火星模擬砂の細かい砂は吸い込むと体に良くないと言われているので，やっぱり細かいことを気にした方がよいのかもしれないとも思う．
53. へその緒を湖に投げ込んで子供の健康を祈るという風習があるらしい．筆者が「へそ」に過剰反応する理由を知りたい人は直接訊いてください．
54. ハレ・ポハク・ロッジで「湖の底は永久凍土になっているから水が溜まるのだ」と言う話を聞いたが，裏はとっていない．
55. 見学室のトイレの床には六角形のタイルが使われている．

ちなみに，一般の人が山頂エリアに入ってよい時間帯は日の出30分前から日没後30分までとなっている[13]．日の出と日没は山頂で見ることも可能(図10)だが，星を見たい人はMKVISで開かれている観望会(stargazing program)に参加させてもらうのがよいだろう．

山頂からの帰りはスピードの出し過ぎに気をつける．観測所の車を運転して山頂にあがるときは，「未舗装道路はローギアを使う」という規則があった[56]．

## 6. 白と黒と緑の砂浜

ハワイ島にはいろいろな色の砂浜がある．ハワイ島の北西にあるハプナ・ビーチ(Hapuna Beach)は白い砂浜．白い砂はサンゴ礁が砕けてできたものである[57]．ハワイ島の南東にあるプナルウ・ビーチ(Punaluu Beach)は黒い砂浜．黒い砂は海に流れ込んだ溶岩が急冷されて真っ黒なガラスになって砕けた水冷破砕岩である．サンゴ礁や水冷破砕岩はハワイ以外にもあるので，白い砂や黒い砂のビーチは，行くところに行けばハワイでなくても存在している．

もうひとつ，ハワイ島の南の端には緑色の砂のビーチ(Green Sand Beach)がある[58]．緑色はMgを多く含むカンラン石によるもので，カンラン石を含むハワイ岩(hawaiite)が風化して砂になった後，流水で砂が分別され密度の大きいカンラン石の割合が多くなることで緑色の砂浜がつくられたと言われている．

グリーン・サンド・ビーチに行くには，とにかく南に向かって車を走らせてアメリカ合衆国最南端のサウス・ポイント(South Point)を目指す．グリーン・サンド・ビーチ・トレイルヘッド(Green Sand Beach Trailhead)に車を停めたら，そこから先は海岸沿いに草原の中を片道1時間くらい歩く[59]．風は強いが，天気が良ければ草原の中の道を歩くのは気持ちよい[60]．2015 年3月に歩いたときは，海にクジラとおぼしきものが見えた．最後はかなり急な岩場を下って入り江まで降りる．入り江の中の砂はたしかに他とは違う色をしている[61]．

## 7. ハワイに行く前に

同じものを見ていても，知らない人には見えないものが，知っている人には見えることがある[62]．きちんと予習しておくことは重要である．

ハワイ火山国立公園の現況は，公園のウェブページ[2]で確認することができる．立入禁止区域，道路の閉鎖，噴火の状態，などの情報がある．火山の活動度が変わると立入禁止区域の設定が変更になったりすることもあるので，出発前にチェックしておくとよい．公園内のキラウエア・ビジター・センター他各所で販売されているトレイル・ガイド[3, 10]は，ウェブ上で閲覧することができる．Hazlett博士の2015年版の巡検ガイド[15]も，オンライン・ストアで購入可能[63]．

マウナ・ケアに出かけるなら，MKVIS[13]のページを参照する．観望会(stargazing program)の予定，MKVISに設置されたライブ・カメラの映像，マウナ・ケア山頂にアクセスする道路の状況，マウナ・ケアの天気予報のページへのリンク，などがある．上にあがる人は「高山病に対する注意事項」を前もって読んでおくべきである[64]．

日本語の情報源は寡聞にして知らないが[65]，とりあえず筆者の本棚でハワイの火山に関連した記述がある

56. ハレ・ポハク・ロッジの掲示板には天文学者が起こしたいくつかの事故の写真が貼ってあり，運転者に注意を促している．同じくロッジに貼られているマウナケア山頂の航空写真には，フランスの天文学者がスピードの出し過ぎで道からとびだした場所に“Frog's Leap”と書かれている．それを見た誰かが「日本の天文学者が事故をおこしたら“Kamikaze Jump”とか書かれちゃうのかな」と言っていた(ような気がする)．
57. 白い砂浜の生成にはパロット・フィッシュ(parrot fish)が関係しているらしい．パロット・フィッシュは，サンゴをガリガリと醤ってサンゴに住まう藻類をサンゴごと食べ，消化しなかったサンゴを排泄物として出す．1匹のパロット・フィッシュが1年間に排泄する砂は360 kgになる(https://www.wired.com/2014/08/absurd-creature-of-the-week-parrotfish/)．
58. 緑色の砂のビーチは世界に数カ所しかないらしい．
59. 使ったことはないが，四輪駆動車で入り江の近くまで運んでくれるサービスがあるらしい．
60. とにかく風は強い．樹木は風で変形して偏形樹になっている．足下は火山灰が風化したものが積もっていて，関東ローム層のような感じ．溶岩と違って歩きやすいと思ったが，雨が降ったらベタベタになるかもしれない．
61. 鮮やかな緑色を期待していると，少しがっかりするかもしれない．
62. 一生に一度しかできない簡単で面白い月観察実験 http://gate.main.jp/saiki_lab/moon/moon_obs.html
63. https://shop.hawaiipacificparks.org/collections/geology/products/explore-geology-of-kilauea
64. 16歳未満の人は高度による影響を受けやすいため，MKVISより上に上がるべきではないとされている．
65. 謙遜ではなく本当に知らない．いいものがあれば教えてください．

ものを探すと，中村(1978)[16]，町田・白尾(1998)[17]，などが見つかる．あと，池澤(2000)[18]は火山の本ではないが，ハワイイ[66]についてちょっと深く知りたいと思った人にお勧めな本である．

ハワイに行く行かないとは関係ないが，ハワイの火山について何か知りたいことが出てきたときに筆者が最初に見るのは，Characteristics of Hawaiian Volcanoes(US Geol. Surv. Prof. Paper 1801) [6]である．ハワイの火山についてのだいたいはここに書かれているのではないかと思う．あと，火山全般について調べるときはVolcano World [11]をよく利用している．

## 8. 楽しい遊び場

筆者を最初にハワイに連れていったのは栗田敬氏である．楽しい遊び場を教えてくれたことに心から感謝する．次にハワイに行ったのは，岩上直幹氏とマウナ・ケア山頂で金星の観測をするためであった[67]．マウナ・ケア山頂で素晴らしい景色を見ることができたのは観測に参加させてもらったおかげである．また，観測終了後の火山巡検で案内人を務めるために勉強したことは，後のハワイ実習の企画へとつながった．岡山大学理学部においては，筆者が思いつきで口に出したことを実習という形にして実現してくれた同僚の教員[68]に感謝するとともに，実習に参加した学生と教員，そして実習の後方支援をしてくれた事務室の皆様にも感謝するものである．

本稿で示した計算をおこなっているとき，筆者は自分が大学院生だった頃を思い出していた．夜な夜な，教員や先輩や後輩たちとホワイトボードの前に集まっては，その時々の気になる問題についてオーダーを見積もる計算をおこない，つじつまが合うとか合わないとか，そんな話をくり返していた．筆者にとってはとても幸せな時間であった．そして，今の自分が研究者としてやっていけているのはあの頃に鍛えてもらったおかげであることが，時間の経過とともにじわじわと実感されてくる．あの楽しい遊び場に参加していた全ての人に対して，お礼を言いたいと思う[69]．

66. Hawaiiは島本来の言葉では「ハワイイ」と発音するとのこと．池澤氏の作品には，火山学者が主人公の小説「真昼のプリニウス」(中公文庫)もある．
67. ハレ・ポハクと山頂の間の移動では運転手として十二分に活躍したと思う．
68. 実習の実施にかかる予算は，はしもとではない誰かが用立てている．
69. 筆者が一番お礼を言いたい人にお礼を言うことができなくなってしまったことは，とても残念なことである．

## 参考文献

[1] 早川由紀夫, 1998, 地学雑誌 107, 444.
[2] Hawaii Volcanoes National Park, https://www.nps.gov/havo/index.htm
[3] Kilauea Iki Trail Guide, https://www.nps.gov/havo/planyourvisit/upload/Kilauea-Iki-Trail-Guide-2013.pdf
[4] Turcotte, D. L. and Schubert, G., 2002, Geodynamics 2nd ed. (Cambridge Univ. Press)
[5] Patrick, M. R. and Witzke, C.-N., 2011, US Geol. Surv. Sci. Investig. Rep. 2011-5110, http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5110/
[6] Poland, M. P. et al. eds., 2014, US Geol. Surv. Prof. Paper 1801, http://dx.doi.org/10.3133/pp1801
[7] Gailler, L. and Kauahikaua, J., 2017, Bull. Volcanol 79, 40.
[8] Parfitt, E. A., 1998, J. Volcanol. Geotherm. Res. 84, 197.
[9] Wilson, L., 1976, Geophys. J. R. astr. Soc. 45, 543.
[10] Mauna Ulu Eruption Guide, https://www.nps.gov/havo/planyourvisit/upload/mauna_ulu_trail_guide.pdf
[11] Volcano World, http://volcano.oregonstate.edu
[12] Harris, A. J. et al., 2009, Bull. Volcanol. 71, 459.
[13] Mauna Kea Visitor Information Station, http://www.ifa.hawaii.edu/info/vis/
[14] すばる望遠鏡 一般見学案内, https://subarutelescope.org/Information/Tour/Summit/j_index.html
[15] Hazlett, R. W., 2015, Explore the Geology of Kilauea Volcano, Hawaii Pacific Parks.
[16] 中村一明, 1978, 火山の話, 岩波新書.
[17] 町田洋・白尾元理, 1998, 写真で見る火山の自然史, 東京大学出版会.
[18] 池澤夏樹, 2000, ハワイイ紀行 完全版, 新潮文庫.

←目次へ



# 一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その34 ～あかつき定常運用の終了～

中村 正人[1]，佐藤 毅彦[1]，今村 剛[2]

（**要旨**）「あかつき」は定常運用の終了審査を経て2018年4月に後期運用に入った．審査の経緯と今後の課題について紹介する．

## 1. 最初に

以下に最近のISASニュース事情欄に中村が載せた記事を引用する．

“金星探査機「あかつき」が宇宙科学シンポジウムで初めて計画発表されたのが2001年1月，打ち上げられたのが2010年5月．目的地である金星に到着するも，推進器の停止により，太陽の廻りを放浪した5年の日々．そして再度金星に近づき，全力で逆噴射をして金星の周回を始めたのが2015年12月．ここまでですでに15年の歳月がたち，当初計画を一緒に考えた仲間も，ある者はこの世を去り，あるものは引退している．他の部署で活躍している若い仲間のことも忘れることは出来ない．しかし，当初に地球と全く異なる異星の気象を解明しようとしたその志は消えること無く，その後の三年間の運用により多くの金星気象の観測が為された．そのうちのあるものは「あかつき」が最初に観測で捉えた現象であり，また，あるものは今まで知られてきた現象を定量的に記述することにより，その現象の起こるメカニズムに肉薄している．また，3年間という短い観測期間の中でさえ時間的，空間的に変動しているダイナミックな金星気象を明らかにして来た．いま，ここに我々は「あかつき」が定常観測のフェーズを終えた事を静かに宣言したい．「あかつき」は4月から後期運用フェーズに入る．探査機の推薬が枯渇し，その寿命を終えるまでの期間がどれほどあるかは判らないが，それまでの間，我々は探査機とともに生きる．これまで「あかつき」を支えて下さった皆様に感謝の言葉を申し上げたい．

「あかつき」は大変に幸運な探査機であった．これまでの太陽系探査の歴史の中で，一旦軌道投入に失敗して，なおかつ再挑戦でその星に辿り着き，さらには当初の目的である科学観測を成し遂げた例はあまり聞いたことが無い．ただ，この幸運は，着実な設計運用の思想に沿って「あかつき」を丁寧に育ててきた人々の努力の上に成立したことを忘れてはならない．そしてまた，日本は重力天体に正当な方法でアプローチすることに成功したわけでは無い事も．惑星探査は歯を食いしばりながら石段を一段ずつ上がるようなものである．一足飛びに次のステップを飛ばして上に行けるわけでは無い．「あかつき」の後に続く日本の太陽系探査ミッションの成功と幸運を祈る．”

言いたいことは，言い尽くしているのであるが，少し丁寧に2017年度の末に行われたプロジェクト終了審査の内容を記述して置こう．この終了審査はJAXAとしてのプロジェクトを終了し，ISASの所内プロジェクトに戻る節目として位置づけられる．元々活動を始めた頃にJAXAは存在せず，宇宙研としてのミッションであったのだから，元の鞘に戻ったと言っても良いだろう．終了審査に臨むプロジェクトの姿勢としてはなるべく無駄な労力を掛けず，必要最小限の人員で，必要最小限の資料を用意して通過するというもので，実際科学面はプロジェクトサイエンティストの佐

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
2. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科
nakamura.masato@jaxa.jp

藤毅彦，工学的側面はプロジェクトエンジニアの石井信明のみで対応し，審査会もこの三名で対応した．審査会に先立ち科学的側面を議論する分科会1と工学的側面を議論する分科会2が設置されたが，特に前者においては京都大学生存圏研究所の塩谷教授を座長に，倉本(北大)，海老澤(宇宙研)，清水(宇宙研)，並木(天文台)，関(東大)，阿部(東大)，佐藤(薫)（東大)，Atreya(ミシガン大)，Wilson(オックスフォード)，Smerkar(NASA)（敬称略)に委員となって頂き，大変貴重な意見を頂いたことをここに記す．

## 2. 今後の科学課題

特に分科会1ではミッション延長が終了するとき評価すべき科学成果を現時点で用意しておくことの重要性が指摘された．これに対してプロジェクトとして以下に述べるポイントを重視したい旨返答した．

- 雲頂レベルにおける子午面循環の強度が，「あかつき」以前に予測されていた値に比べ高精度(以前に比べ桁での向上)に求められること
- スーパーローテーションの生成・維持メカニズムについて，その主機構および副機構が分かり，さらにそれらの寄与の度合いが大局的に分かること
- スーパーローテーションの長期(年単位)変動をとらえ，それに寄与するプロセスを明らかにすること
- 定在重力波について，その金星日毎の変化または安定性を定量的に示すこと．また，それがスーパーローテーションに対してどう関与しているのかを理解すること
- 金星の雷を検出すること．検出されない場合には，従来の「雷発生頻度」上限値を有意に更新すること

これらのポイントは，現在稼働している三台のカメラ，すなわち中間赤外カメラLIR，紫外イメージャーUVI，雷大気光カメラLAC，電波科学RSを三年間運用して見込める成果をイメージした．UVIにおいてはこれまでに輝度画像を用いた雲追跡により，雲頂付近(スーパーローテーションが最大になる高度)における大気潮汐やその他の擾乱による運動量輸送の見積もりが行われた．その結果，雲頂におけるスーパーローテーション維持に関わる過程が定量化できることが明らかになった．そこからさらに，平均子午面循環が，かつて考えられたよりもはるかに弱いことも明らかになった．この成果にもとづき，UVIによる観測・雲追跡を今後も長期間続けてゆくことで，有効な物理量を得ることができると確信している．またRSでは熱潮汐を調べることができる．この高度で発生し下方へ伝わる熱潮汐は，大気と固体地面との間の運動量交換を担いスーパーローテーション生成に寄与している可能性がある．RSは日本の受信局だけでは無く，インド，ドイツの局の応援を得て今後三年間に，この下方伝播する波の構造を調べ，スーパーローテーションに対する寄与を明らかにすることを目指す．LACによる雷検出確率は時間とともに増大し，今後後期観測を行うことでそれを80%まで高められる予定である．それでも不検出であれば，従来の雷発光発生頻度の見積りを修正できる確度が高まる．LIRとUVIにより地表面由来の大気重力波現象についての知見が得られるだろう．金星の一日を周期に繰り返されるこの現象を後期運用の間に多数回観測することで，最下層大気の状態を論じることができる．LIRにより雲頂付近温度の変化として顕著に観測される現象は地形由来の山岳波が元になっている可能性が大きく，この観測は大気最下層の静的安定度および風速に関する情報をもたらし得る．最後に大気モデル研究との連携により進めるデータの解釈について述べておこう．現在のところ最も成功している金星大気大循環モデルは金星版AFESと呼ばれるものであるが，その研究グループは，モデル構築・解析に取り組んでいる．この金星版AFESにさらにデータ同化手法を組み込む事が検討されており，それにより「あかつき」の実観測データが最大限活かされるようになり，大気中のさまざまな現象の理解が格段に進む．こうしたモデル研究の発達により，これまで地球に限定されてきた気象学を，惑星気象学に発展させるというミッション立案時に掲げた目標へ近づいて行く．

## 3. プロジェクト終了審査

それでは，かいつまんで審査結果について述べよう．まずプロジェクトの達成状況(サイエンス)については，当初計画とは異なる観測軌道に投入したことにより，最高空間分解能，金星に近接しての観測頻度が減じたものの，その反面可能となった遠方からの金星全体観

測を実施し，金星大気構造の長期変動を見出した事も含めて充分に達成されていることが確認された．また，技術・マネジメントの観点からも，当初計画とは異なる投入軌道及び探査機の姿勢において，工学的影響の評価，課題識別，対処方針が適切になされたこと，また，この状況下において科学観測成果の最大化が図られたと評価されている．

実施体制としては比較的小規模の開発体制ではあったが，プロジェクトマネジャーの下，技術を担うプロジェクトエンジニア，サイエンスを担うプロジェクトサイエンティストの体制を当初から取って相互理解と監視の体制を構築したことが評価されている．また惑星科学コミュニティの多くの研究者が「あかつき」に関わることで，将来ミッションのリーダーとなりうる経験を積んだことから若手研究者の育成に貢献したと評価された．国際関係ではNASAからの外国人研究者の個別の参加のほか，NASA, ISROとの国際協定やESAチームとの研究協力を実施し，COSPARで金星探査のワーキンググループが結成されることに繋がったことから，今後は国際的な金星探査の機運を高める役割を果たしていくことが期待された．

「あかつき」の観測データがISASのDARTS, NASAのPDSに収められ，世界の研究者に公開されていることは審査員には良く知られておらず，審査会ではこの事情を佐藤が充分に説明したが，“さらに今後の研究活動を通じて，より容易に「あかつき」観測データにアクセスできる状態が作り出されることを期待する”，と述べられた．しかし，これを批判と捉えるのでは無く，プロジェクトとしては，さらに多くの研究者にデータが公開されていることを知らせる努力をし，ますます研究の輪が広がることに努めたい．

あかつきの成果は論文としては現時点で60本程度，直接的に観測データを解析した成果論文は20本程度出版されている．中でも，新発見的要素の大きい研究成果（表面地形による大規模な高層大気波動の励起）が専門分野に一石を投じ，アウトカムという意味では，惑星気象学の研究を，理論偏重の状態から観測に基づく実証的研究へと進化させる推進力であると評価された．また，科学的成果以外にも我が国が初めて惑星周回軌道に探査機を投入したことは注目を集め，多数のメディア取材を受けるとともに，第190回国会における総理大臣施政方針演説でも取り上げられるなど，大きな社会的・政策的インパクトがあったとされた．

これらの判断を元に「あかつき」が定常運用を終了し三年間の後期運用フェーズに移行することが認められた．後期運用フェーズの間に，探査機に何らかの不具合が生じ，あるいは観測に困難を覚えた場合は宇宙理学委員会にミッション継続の可否を問うことになる．

## 4. 今後の難局

終了審査の一連の顛末は以上であるが，プロジェクトはこれからも難しい局面を迎える．一つは2018年から2019年にかけて起こる長時間日陰である．遠金点が当初の目論見と異なり，36万キロという高高度になってしまったために，2時間を超える長い日陰が三回ある．この日陰中は地球から探査機の状態を確認しつつ，バッテリーに無理がかかるようならば即座にコマンドを送って探査機の電力消費を抑えなければならないのだが，不都合なことに日本からの可視時間帯と必ずしも一致しない．緊急の対策としてNASAに助力を求めて米国（あるいはNASAが外国においている）深宇宙局のサポートを受ける必要がある．

二つ目は「はやぶさ2」との運用コンフリクトである．「はやぶさ2」は本年度目的地に着き一年間ほどの活動予定であるが，まさに地球から金星が見える方向とリュウグウが見える方向はこの間一致してしまっているのである．従って，臼田のアンテナを“はやぶさ2”が専有するとなると，「あかつき」は運用する事が出来ない．幸い2018年の金星は地球に近づく内合側を通るので，その間は何とか回線が細いながらも内之浦のアンテナを使うことができる．さらに運用時間を増やすことにより凌ぐことで，2018年は二つの探査機で運用局の調整が付けられそうである．問題は2019年であって，NASAに支援を仰ぐとしても，得られるデータはこれまでの半分程度を覚悟している．我々二つのミッションは協力し，最大の努力をしてはいるが，惑星探査用の大型アンテナを一つしか持たずに複数の探査ミッションを並行して走らせる日本という国の先見性の無さがここに露呈したのである．

## 5. 2010年の失敗をこえて

「あかつき」は2010年の軌道投入の失敗を乗り越え

て2015年に金星を廻る軌道に投入され，その意味ではこのプロジェクトは成功したと多少の誇りを持って言うことが出来る．しかしながら，2010年の失敗という事実は厳然として残っている．そして2018年の現在でも日本は他の惑星に正当な方法で到達する事に成功していないのである．今回我々が経験した失敗から学ぶべき事があるとすれば，それは何だろうか？

日経ビジネスONLINE（2017年11月13日）に神戸大学の三品和広先生が“失敗の法則，プロジェクトが止まる5つの理由”に以下を含む記事を掲載された．“日本の企業は失敗する確率を小さくしようとする．そこで計算違いが起きる．自分が似たことをやったことがあると言うだけで失敗するする確率が小さくなると考える．しかし経験は大事だが，似たことをしたことがあるというだけでは駄目ということに気がついていない．”

さて2012年1月に宇宙開発委員会調査部会が出した“第24号科学衛星（PLANET-C）「あかつき」の 金星周回軌道への投入失敗に係る原因究明及び今後の対策について”のまとめにはこの様に述べられている．“また，新たなるトラブルを未然に防ぐためにも，基礎的データ・知見の蓄積と活用をより一層推し進めるとともに，「類似性」や「実績」という概念に捕らわれることなくミッションごとに使用環境や運用方法の相違等によって起きうる事象を想像する能力を有する人材を育成することが重要である．”この2つの文章は発表された日時に5年の差があるものの，内容はまさに同じである．ここにこそ，2010年の失敗から我々が学ぶべき事があるのではないだろうか．今後の日本の太陽系探査ミッションの前途に幸多き事を祈る．

←目次へ



# 系外惑星「遠い世界の物語」その10 ～ハビタブル惑星の現状とこれから～

小玉 貴則[1]，門屋 辰太郎[2]

（**要旨**）観測精度の向上により，惑星表面に液体の水を保持できる惑星(ハビタブル惑星)の検出が現実的になりつつあり，そのような惑星の理論的研究が盛んに行なわれている．最近の研究から，惑星表面に液体の水のある惑星の気候は，その水量や惑星の気候システムによって，ハビタブルゾーン内であっても大きく変わることがわかってきた．これは，水を保持する惑星が持つ多様性の側面を表している．本稿では，系外惑星科学におけるハビタブル惑星の考え方や気候形成についてレビューし，議論する．また，近年注目を集めている系外惑星のハビタビリティの検討も紹介する．

## 1. 生命を宿す星

“ハビタブル”という言葉を聞いたことがあるだろうか？観測精度の飛躍的な向上の結果，現在までに多くの系外惑星が検出され，その中には地球型惑星とおぼしき天体も存在する．そこで生まれる最も重要かつ興味をそそる疑問は，『地球のような生命を宿す惑星(ハビタブル惑星)はあるのか？』であるだろう．近年，生命の発見に向けて，地球に類似した惑星の探索が世界中で行われている．しかし，地球型惑星の発見それ自体が生命の発見に直接つながるわけでは当然なく，生命の存在に必要な条件を検討することが重要である．生命の存在に必要な条件を考える上で，まずは地球上に存在する生命を想定する．地球上に存在する生命と一言で言っても，その居住環境や生態には幅広い多様性が存在する．しかし，こうした多様性の中にも変わらない点がある．それは液体の水を必要とするということである．液体の水は生命活動において必要不可欠な物質であることから，ハビタブルな惑星とは，まず液体の水を惑星表面に維持できる惑星と考えられている．

1. 東京大学大気海洋研究所
2. ワシントン大学
koda@aori.u-tokyo.ac.jp

惑星表面における水の存在は，その惑星が持つ気候により決まる．このため，系外惑星の気候を検討することが，ハビタブル惑星(以下では，惑星表面に液体の水がある惑星)を議論するために，重要である．本稿では，近年のハビタブル惑星気候の研究のレビューを通して“ハビタブル惑星”の現状の理解を示し，曖昧にとられがちな系外惑星科学における“ ハビタブル”という言葉の定義を明確にすることを目的とする．

## 2. ハビタブルゾーン(生存可能領域)

ハビタブルな環境を維持する惑星について議論する際，最もよく用いられる概念が『ハビタブルゾーン』である[1, 2]．ハビタブルゾーンとは，惑星表面に液体の水を安定に維持することができる，中心星からの距離の範囲である．中心星からの距離が短い場合，惑星が受ける強い恒星放射により惑星表面の水は全て蒸発してしまう．その反対に，中心星からの距離が長い場合には，惑星が受ける恒星放射が弱く，惑星表面を十分に温めることができないため，惑星表面の水は全て凍ってしまう．惑星表面に液体の水を維持するためには，恒星放射がある範囲内にある必要があり，惑星がそのような恒星放射を受ける領域がハビタブルゾーンと呼ばれる(図1)．先行研究では，これらの条件の

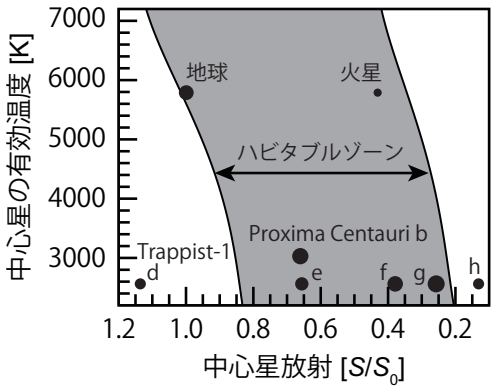



**図1：鉛直1次元放射対流平衡モデルで見積もられたハビタブルゾーン．Kopparapuらによる計算をもとに作成[2]．各点は惑星が受け取っている恒星放射と中心星の有効温度を示している．$S_0$は現在太陽定数を表している．**

境界値が定量的に議論されてきた．

## 2.1 ハビタブルゾーン内側限界

### (1) 暴走温室の発生

表面に十分な水を保持し，大気が湿潤である惑星では，射出できる惑星放射に上限値（射出限界）が存在することがわかっている．通常，表面温度が上昇するとそれに応じて惑星放射も増加する．しかし，湿潤な惑星の表面温度が高温になると，大気の鉛直構造が水蒸気の飽和蒸気圧曲線に漸近する．この時，光学的厚さが1付近（i.e., 実質的に惑星放射の大きさを決める領域）の温度が一定となるため，惑星放射も一定の値となり，惑星放射はこの値を超えることができない[3]．

仮に表面に液体の水を保持する惑星が射出限界を超える恒星放射を受け取った場合，惑星放射は射出限界を超えることができないため，余ったエネルギーは惑星表面の水の蒸発に使われる．水蒸気は強い温室効果気体であるため，表面温度はさらに上昇し，水の蒸発を促進する．この結果，水が全て蒸発するまで表面温度の上昇が続くことになる．このような状況を暴走温室状態と呼ぶ．このように，暴走温室効果が発生すると，惑星表面から液体の水が失われる（i.e., ハビタブルな環境から外れる）．したがって，惑星が射出限界に等しい恒星放射を受ける，中心星からの距離がハビタブルゾーンの内側境界となる．

### (2) 湿潤温室効果の発生

太陽型の恒星はその年齢とともに光度を増大させることが知られている．恒星からの放射は，惑星の気候を決める重要な外力であるから，恒星の進化を考慮した大気進化を考えることが必要となる．現在の地球の大気では，地表面付近の水蒸気は，対流圏界面に運ばれる間に凝結するため，大気上層への水蒸気の輸送が制限され，対流圏界面で水蒸気混合率は最も小さくなっている．この機構は，コールドトラップと呼ばれている．一方，恒星放射が大きいと，惑星表面温度が上昇し，対流圏界面が上昇する．その結果，飽和水蒸気分圧が大きくなるため，水蒸気が凝結せず，コールドトラップが消失する．これにより，上層大気への水蒸気輸送が起こる．大気上層の水蒸気は光解離し，その結果生じる水素が恒星からの極紫外線により加熱され，宇宙空間に散逸する．大気上層の水蒸気混合率が～3 $\times 10^{-3}$の場合，地球海洋水量を保持する惑星を想定すると，45億年間で惑星表面の全ての水を失う．この時の大気上層での水蒸気混合率が達成された状態を湿潤温室状態と呼ぶ[1]．

まとめると，ハビタブルゾーンの内側境界は2つの境界が考えられている．1つは，暴走温室状態により決まっている瞬間的な内側境界であり，もう1つは，湿潤温室状態により決まっている連続的な内側境界である．鉛直1次元放射対流平衡モデルでの見積もりでは，暴走温室状態の発生は1.06 $S_0$（$S_0$：現在地球が受け取る太陽放射）となり，湿潤温室状態の発生は1.015 $S_0$となる[2]．両者の状態を発生させる恒星光度を比べると，後者の方が小さい．よって，水を保持した惑星は，恒星の光度進化に伴い，湿潤温室状態になり，その後，暴走温室状態に陥ることになる．しかしながら，湿潤温室状態の定義は惑星の保持する水量により決まっている．ここには，多くの先行研究で置いている，地球のような惑星という大前提が存在している．よって，系外地球型ハビタブル惑星を考える上で，注意が必要であるため，第3章で水量とハビタブルな気候の関係は議論することにしよう．

## 2.2 ハビタブルゾーン外側境界

ハビタブルゾーンの外側境界は，惑星が全球凍結状態を免れ，温暖な環境（i.e., 惑星表面に液体の水が露出している状態）を維持できる最小の恒星放射を受ける中心星からの距離として定義される[1, 2]．しかし，先述した通り，大気中の水蒸気量は強い温度依存性を

持ち，この温度依存性によって水蒸気の温室効果には正のフィードバックが働くため，低い恒星放射条件で惑星を温暖に保つことは困難である（例えば現在の地球が受ける恒星放射でも，水蒸気以外の温室効果がなければ全球凍結状態になる）．そこで，先行研究では，主に二酸化炭素（$CO_2$）の温室効果を考慮して，ハビタブルゾーンの外側境界の議論がなされてきた[1, 2].

大気中の$CO_2$分圧（$pCO_2$）が増加すれば温室効果も強くなり，地表面温度が一定でも大気上端での惑星放射は低下する．しかし，$pCO_2$が大きく（～10 bar），飽和状態へ近づくと，惑星放射は一定値へ収束する．一方，$pCO_2$の増加は，可視領域のレイリー散乱を強化し，惑星アルベドの増加を伴う．こうした$CO_2$のもつ温室効果と冷却効果の競合により，$CO_2$の実効的な温室効果には上限が存在する．このような$CO_2$の温室効果が最大になる条件で，惑星を温暖に保つことができる恒星放射の値を最大温室効果限界と呼ぶ[1]．鉛直一次元放射対流平衡モデルを用いると，$pCO_2$が8 barの時に温室効果は最大となり，最大温室効果限界は0.343 $S_0$と推定されている[2].

ハビタブルゾーンの外側境界で仮定されているような，高$pCO_2$かつ低温な環境下では大気上層で$CO_2$が凝縮し，雲を形成することが予想される．$CO_2$雲は可視放射を散乱する一方で赤外放射をほとんど吸収しないため，強い冷却効果を持つ．このため，Kastingらは$CO_2$雲の形成がハビタブルゾーンの外側の候補の一つ（$CO_2$凝縮境界）であると考えた [1]．鉛直一次元放射対流平衡モデルによると，$CO_2$凝縮境界は0.53 $S_0$と推定されている[1]．一方，近年の研究によると$CO_2$雲は地表面からの放射を散乱し地表面へ戻すことで温室効果（散乱温室効果）を持ちうることが指摘されている[e.g., 4]．$CO_2$雲の冷却効果と散乱温室効果のどちらが卓越するかは雲の光学的厚さや粒径，分布によって決まる．仮に散乱温室効果を最大に見積もると，恒星放射が0.17 $S_0$まで下がっても惑星は温暖に保たれうると推定されている[4].

上記の通り，ハビタブルゾーンの外側境界については，主に$CO_2$雲の持つ温室効果の不確定性のために，大きな不定性（0.17～0.53 $S_0$）を持つ．こうした議論を進めるためには，従来のような鉛直一次元モデルによる議論ではなく，雲の形成やその温室・冷却効果を取り扱える高次元のモデルが必要である．$CO_2$雲を取り入れたGCMによる計算も数例なされてはいるが，これらは主に地球史を想定した，比較的高い恒星放射条件を想定したものである．このため，ハビタブルゾーンの外側境界に関する議論は十分なされているとはいえず，今後の課題となっている．

## 3. ハビタブル気候の形成

### 3.1 惑星の水量とハビタブル気候の関係

従来，水を惑星表面に保持するハビタブル気候の推定は，鉛直1次元気候モデルにより行われてきた．しかし，近年，計算能力のめざましい向上に後押しされ，3次元大気大循環モデルによるハビタブル気候の検討がされはじめている．これらのモデルの最も大きな違いは，1次元気候モデルは空間的に均一な表面や水蒸気分布を仮定しているのに対し，3次元気候モデルは空間的に不均一な表面や水蒸気分布を考慮できる点にある．こうした表面状態の不均一性は，特に惑星気候の季節変化を考慮する場合に，重要である．ここでは，表面の水分布の不均一性に注目し，ハビタブル惑星気候がどのように形成されているかを紹介する．

地球は全球的に繋がった海洋を持っており，惑星大気は湿潤に保たれている．前述の通り，このような全球的に湿潤な惑星が強い恒星放射を受ける場合，惑星放射は射出限界を超えることができないため，暴走温室状態に陥ってしまう．

一方，水量が少ない惑星を考えた場合，暴走温室の発生条件が異なることが3次元GCMを用いた数値計算により明らかになってきた．水が少ない惑星の場合，大気による水蒸気輸送によって，惑星表面温度が低い領域（極付近）に水が局在化する可能性がある．このような，大気輸送で水が局在化した気候状態を陸惑星気候と呼ぶ．陸惑星気候では，赤道域の大気は乾燥するため，結果的に赤道域では射出限界より強い惑星放射を放つことができる．このため，全球的に水で覆われた地球のような惑星より大きな恒星放射を受け取っても，惑星表面に水を安定に維持できる．つまり，水の少ない惑星の方が広いハビタブルゾーンをとることができる[5].

最近の結果から，陸惑星気候の内側限界には惑星表面の水分布が重要であることがわかってきた．これは，

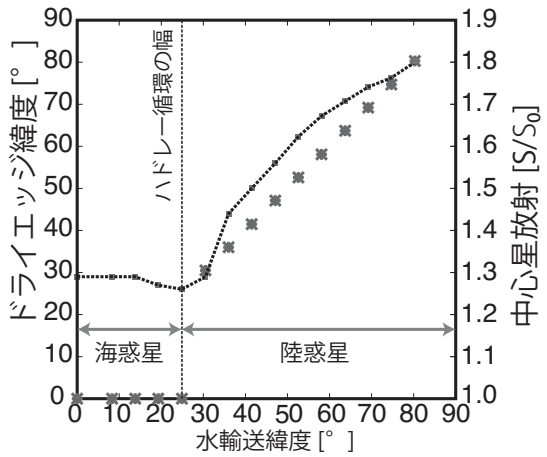



**図2：暴走温室限界と水分布の関係．惑星表面の水分布を水輸送緯度として与え，その後大気中の水蒸気輸送を計算し，降雨により地表が湿潤になった境界をドライエッジ緯度とした(図中の米印)．ドライエッジ緯度が0度の場合は，惑星表面が赤道まで湿潤になったことを意味している．破線は，各水分布における暴走温室限界における中心星放射を表している．**

大気を湿潤にするためには，降水フラックスより蒸発フラックスが大きな地域に液体の水が存在することが必要であるからである．経度方向に一様な水分布を仮定したGCM計算によると，水分布の下端緯度の増加(i.e., 水が極域に局在する)に従い，暴走温室限界は約1.3 $S_0$から1.8 $S_0$まで増大することがわかった(図2) [6]. これらの値は，先行研究により調べられてきた海惑星気候での暴走温室限界と陸惑星気候での暴走温室限界に，それぞれ対応する．1次元モデルで予想された暴走温室限界は1.06 $S_0$であるが，3次元大気循環モデルから見積もられた暴走温室限界は，大気中の水蒸気の不飽和領域のため，大きな値(約1.1 $S_0$)をとることがわかっている．図2では，海惑星の暴走温室限界は1.3 $S_0$と見積もられているが，これは，少ない水量での暴走温室限界を見積もるために，表面のアルベドと熱容量を砂漠の値を用いているから生まれた違いである．また，海惑星気候と陸惑星気候の境界はハドレー循環の幅により決まっていることがわかった．これは，水分布の最も低緯度の端で蒸発した水蒸気がハドレー循環により赤道域まで運ばれ，大気を湿潤にすることで，惑星放射を射出限界以下に制限していることによる．

惑星表面の水分布は，惑星の水量と惑星の地形に強く依存している．地球の地形を仮定し，表面に存在する水を増やす実験をした場合，ハドレー循環の幅まで水が張り出すためには，現在の地球の海洋水量の約1%(～$10^{16}$ $m^3$)が必要であることがわかった．金星の地形を仮定した場合には，地球地形と同じような水量で水分布がハドレー循環に達する．一方，火星地形を仮定すると，臨界の水量は約$10^{14}$ $m^3$となる[6].

このように，水分布は惑星の地形と水量に強く依存し，また水分布によってハビタブルゾーンの境界も大きく変化する．つまり，ハビタブルゾーンはシャープな境界を持つ領域ではなく，惑星の個性を色濃く反映したブロードな境界を持つ．

このように近年GCMを用いた気候推定がされ始めているが，3次元大気大循環モデルにも注意しなくてはならない点がある．それは，大規模な計算にとって宿命である，計算コストの問題である．そのため，現状では，短期間(～$10^2$年)の積分で解が得られるような計算が主に行われており，暴走温室状態の条件の見積もりはされてきているが，長期積分が必要な全球凍結状態の条件の見積もりはあまり報告されていないのが現状である．3次元大気大循環モデルを用いた検討によって，明らかになる惑星の非一様性は地球型惑星の持つ多様性を色濃く映し出すため，これから期待できる分野である．

## 3.2 炭素循環による温暖な環境の維持とその限界

先述の通り，従来考えられてきたハビタブルゾーンの外側境界は，大気中に十分量の$CO_2$が存在することを仮定して議論がなされてきた．一方で，たとえハビタブルゾーンの中に惑星があったとしても，$pCO_2$が低ければ，惑星は全球凍結状態となる．つまり，ハビタブルゾーン内の惑星の気候を考えるためには，大気中の温室効果気体(ここでは$CO_2$)の量の変動メカニズムを理解することが重要である．

地球を考えると，大気中CO2量は炭素循環を通じて変化してきたと考えられている [e.g., 7]. 炭素循環において，$CO_2$は火山活動を通じて大気に供給され，ケイ酸塩の風化(e.g., $CaSiO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + SiO_2$)によって大気から除去される．この反応で生じた重炭酸イオンは海洋底に沈殿し(e.g., $Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$)，海洋底プレートの沈み込みに伴ってマントルに取り込まれ，あるいは

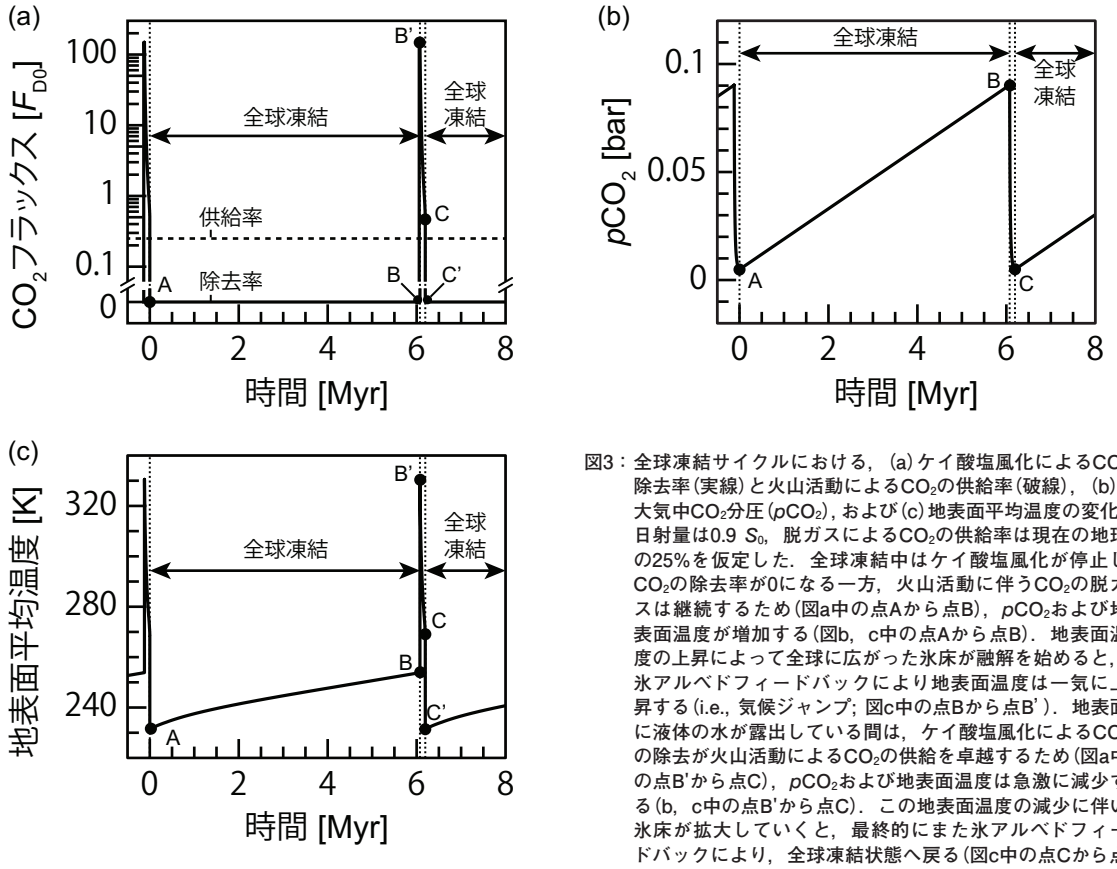



**図3：全球凍結サイクルにおける，(a) ケイ酸塩風化による$CO_2$除去率（実線）と火山活動による$CO_2$の供給率（破線），(b) 大気中$CO_2$分圧（$pCO_2$），および (c) 地表面平均温度の変化．日射量は0.9 $S_0$，脱ガスによる$CO_2$の供給率は現在の地球の25%を仮定した．全球凍結中はケイ酸塩風化が停止し$CO_2$の除去率が0になる一方，火山活動に伴う$CO_2$の脱ガスは継続するため（図a中の点Aから点B），$pCO_2$および地表面温度が増加する（図b，c中の点Aから点B）．地表面温度の上昇によって全球に広がった氷床が融解を始めると，氷アルベドフィードバックにより地表面温度は一気に上昇する（i.e., 気候ジャンプ; 図c中の点Bから点B'）．地表面に液体の水が露出している間は，ケイ酸塩風化による$CO_2$の除去が火山活動による$CO_2$の供給を卓越するため（図a中の点B'から点C），$pCO_2$および地表面温度は急激に減少する（b，c中の点B'から点C）．この地表面温度の減少に伴い氷床が拡大していくと，最終的にまた氷アルベドフィードバックにより，全球凍結状態へ戻る（図c中の点Cから点C'）．**

島弧火山の噴火を通じて大気中へと再放出される．こうした一連のプロセスのうち，火山活動は地表面温度に対して不変である一方，化学反応であるケイ酸塩の風化は強い地表面温度依存性を持つ．このように大気中$CO_2$の供給・除去プロセスの地表面温度依存性の違いがあるため，炭素循環はウォーカーフィードバックと呼ばれる負のフィードバックを持つ[7]．たとえば，平衡状態から地表面温度が低下した場合，ケイ酸塩風化に伴う大気からの$CO_2$の除去速度は低下する．一方，火山活動による大気への$CO_2$の供給速度は一定である．$CO_2$の供給が除去に卓越することで，$pCO_2$は増加し，温室効果が強化され，地表面温度は平衡状態へと収束する．また，ケイ酸塩風化には液体の水が関与することから，全球凍結状態ではケイ酸塩風化が停止すると考えられる．一方，火山活動は全球凍結状態でも続くため，結果的に大気中に$CO_2$が蓄積し，全球凍結状態から脱出することができる[e.g., 8]．地球史を通じて，温暖な環境が維持されてきたことや，また少なくとも3度あった全球凍結イベントにおいて全球凍結状態から脱出できたことには，炭素循環のウォーカーフィードバックが重要であったと考えられている．

従来の研究では，炭素循環とその負のフィードバックを仮定することで，ハビタブルゾーン内の惑星は温暖に保たれると考えられていた[e.g., 1]．しかし，近年の研究により，炭素循環が持つ，惑星を温暖に保つメカニズムにも限界があることが指摘されるようになった[e.g., 9]．炭素循環を仮定した場合，$pCO_2$は$CO_2$の供給率に応じて変化する．つまり$CO_2$の供給率が小さければ，$pCO_2$も小さく，相対的に惑星も寒冷化する．ここで$CO_2$の供給率が小さく（i.e., $pCO_2$が小さい），惑星を覆う氷床が低緯度まで発達し，氷アルベドフィードバックによって惑星が全球凍結状態へ遷移する（気候ジャンプする）状況を仮定する．全球凍結状態に遷移する時間スケール（100～1000年）はウォーカーフィ

ードバックによる$pCO_2$調節の時間スケール(～10万年)に比べ短いため，ウォーカーフィードバックではこの気候ジャンプを止めることができない．全球凍結状態中はケイ酸塩風化が停止するため大気中に$CO_2$が蓄積し(図3中の点Aから点B)，いずれ全球凍結状態から脱出する(図3中の点Bから点B')．しかし，温暖な環境下では低い$CO_2$の供給率に対し，$CO_2$の除去率が卓越しているため，惑星は再度寒冷化し(図3中の点B'から点C)，全球凍結状態へと気候ジャンプする(図3中の点Cから点C')．このように，$CO_2$の供給率が小さい場合には，惑星は温暖な気候を維持することができず，全球凍結状態と温暖な気候状態の間を振動するリミットサイクル(全球凍結サイクル状態)に陥る．温暖な気候を維持できる$CO_2$の供給率の閾値は，恒星放射や大陸分布，海陸比などの条件によって変化するが，例えば現在の地球を想定すると，現在の地球の$CO_2$の供給率の1/10程度であると考えられている[e.g., 9].

このように，炭素循環が機能していても惑星が温暖であるとは限らない．しかし，そもそも“全球凍結状態にある惑星がハビタブルでないか”に関しては議論が残る．全球凍結状態にある惑星も，惑星内部からの熱により数十億年にわたって，氷床下部に内部海を維持していると予想される[10]．地球史の全球凍結イベントでも生き物が生きながらえていることを考えると，このような内部海に生き物が存在することは否定できない．また，このような全球凍結中の内部海で生存していた生き物は，全球凍結サイクル中の温暖な気候である期間には惑星表面に露出しているかもしれない．ただし，全球凍結サイクルにおいて，温暖な気候状態にある期間は全球凍結状態にある期間に比べ，典型的には1/10～1/100程度と短い．したがって，仮に全球凍結サイクル状態にある惑星を観測したとしても，実際に観測できるのは全球凍結状態にある惑星であろう．

## 3.3 二酸化炭素以外の温室効果

ここまで，$CO_2$の温室効果に基づいてハビタブルゾーンの外側境界の議論を行ってきた．これは，地球をはじめとする地球型惑星において$CO_2$が大気中の主要成分であることに基づく．しかし，例えば初期地球で想定されるような還元的な大気環境下では，現在のタイタンのようにメタンも大気の主成分の一つであり，メタンの温室効果で惑星表面が温暖に保たれることも想定される．こうした$CO_2$以外の気体の温室効果は，地球史における暗い太陽のパラドックスの観点から議論がなされてきている．しかし，ハビタブルゾーンの境界に対する影響はまだ明らかでない．

地球(型惑星)と異なる大気という観点からは，高い大気圧がハビタブルゾーンの外側境界に与える影響が議論されている．例えば，窒素が大気中に現在の10倍ある場合，その高い大気圧によって$H_2O$や$CO_2$の吸収線が広がり，これらの気体が持つ温室効果が強くなるため，ハビタブルゾーンの外側境界は0.01 $S_0$小さくなると予測されている[1]．また，より顕著な例として水素大気の持つ温室効果に基づく議論がある[11]．水素は，二原子分子であり吸収は弱いが，高圧環境下では衝突誘起吸収を起こす．仮に水素が10 barあるとすると，恒星放射が0.01 $S_0$でも惑星表面は温暖に保たれる[11].

## 3.4 二酸化炭素大気の崩壊とその影響

ハビタブルゾーンの外側境界に関し，$CO_2$雲が大きな不確定性の要因となっていることは既に述べた[e.g., 1, 4]．こうした大気上層における$CO_2$の凝縮に加え，地表面における$CO_2$の凝固(i.e., $CO_2$氷床の形成)も，ハビタブルゾーンの外側境界に影響を与える可能性がある[e.g., 12]．何故ならば，特に$CO_2$が昇華するような低$CO_2$分圧環境下($pCO_2 < 5.2$ bar)において，地表面温度が$CO_2$の凝固点を下回ると，$CO_2$氷床の形成によって$pCO_2$(i.e., 大気中の$CO_2$分圧)が低下する(大気崩壊が起こる)からである．このような環境では，例えば火山活動によって$CO_2$が大気に供給されたとしても，その$CO_2$は速やかに凝固してしまうため，$pCO_2$が増加することが困難になる[e.g., 12]．(ただし，$pCO_2$増加による温室効果の強化によって，$CO_2$氷床が暴走的に融解する可能性もあることに注意.)

$CO_2$の凝固点は低く($pCO_2 = 2$ barで～200 K)，また$pCO_2$が高ければ大気による顕熱輸送の効率もよくなる(i.e., 赤道－極間の温度差が小さくなる)ため，温暖な環境下における$CO_2$氷床の形成は考えにくい．一方，全球凍結状態にある惑星では$CO_2$氷床の形成が予想されている[e.g., 12]．水の氷床と$CO_2$の氷床が共存している状態では，両者の密度の差によって$CO_2$氷床は速やかに($< 10^4$年)水の氷床の下部に潜り込み，大

気と$CO_2$氷床が遮断されてしまう[e.g., 12]．このため，$CO_2$の暴走的な融解も起こりづらくなる．このような点を考慮すると，惑星が全球凍結状態を脱出するためには，0.67 $S_0$以上の恒星放射が必要であると予想されている[e.g., 12]．先述の通り，ハビタブルゾーン内の惑星が$CO_2$脱ガス率の低下によって全球凍結状態に陥る可能性は十分考えられる．また，中心星進化に伴うハビタブルゾーンの移動により，進化過程でハビタブルゾーンに入った惑星は，初期状態が全球凍結状態である．こうした惑星が温暖な状態に遷移するためには，従来のハビタブルゾーンの外側境界(0.34 $S_0$)よりも高い恒星放射が必要である．つまり，ハビタブルゾーンの実効的な外側境界は，従来考えられていたよりも厳しい条件なのかもしれない．ただし，$CO_2$氷床が形成されるかどうかは南北方向の熱輸送効率や自転軸傾斜に強く依存している．例えば，この熱輸送効率が高い(e.g., 背景大気圧が大きく顕熱輸送効率が良い)場合には，同じ恒星放射・$pCO_2$条件でも極域の温度が高くなるため，$CO_2$氷床が形成されにくくなる．このため，上記のような条件によって，この境界(0.67 $S_0$)も変化することに注意しなくてはならない．

### 3.5 ハビタブルゾーンの移動と進化

恒星は主系列の間，年齢に伴いその光度を増大させる．その光度増大に伴いハビタブルゾーンの内側境界は外側に移動すると考えられている[e.g., 1]．つまり，ハビタブルゾーン内に位置している液体の水を表面に持つ惑星は，前述したように湿潤温室状態になり，その後暴走温室状態に陥ってしまう．しかしながら，気候の進化を考慮した場合，惑星の水量によってはハビタブルな環境を維持する可能性がある．

中心星の進化(光度進化・極紫外線進化)と水の損失を考慮し，鉛直一次元放射対流平衡モデルを用いて大気中と表面の水量を見積り，惑星の気候の進化を検討した結果，比較的少ない水量(地球海洋水量の約10%)を保持している惑星は水の散逸により海惑星気候から陸惑星気候へ進化することでハビタブルな期間を延ばす可能性があることがわかっている(図4)．一方で，それより多くの水を保持している惑星は大規模な水の散逸を経験したとしても，暴走温室状態に陥ってしまう．大規模な水の散逸は，惑星のハビタビリティを壊すものであると考えられてきたが，気候の進化を駆動し，ハビタブルな期間を延ばすものである可能性があることが示されている[13]．

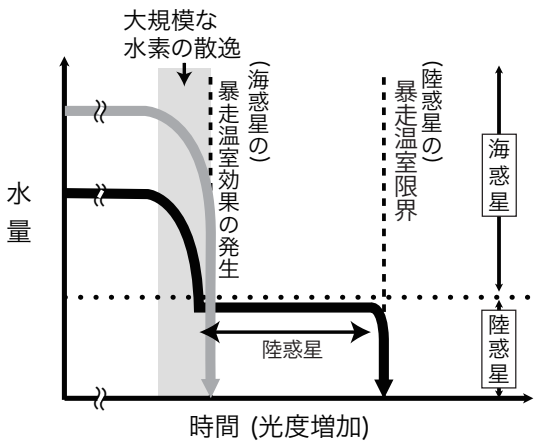



**図4：海惑星から陸惑星への進化の概念図．初期水量が大きい場合，暴走温室効果の発生までに十分な水量を減らすことができないため，海惑星は陸惑星に進化することができない．一方，初期水量が少ない場合は，十分に水量を減らすことができるため，海惑星から陸惑星へ進化することができる．**

ハビタブルゾーンの外側境界も，内側境界と同様に，中心星の光度増大によって外側に移動しすると考えられてきた[e.g., 1]．しかし，全球凍結惑星がハビタブルゾーン外側境界に相当する恒星放射を受けたとしても，ハビタブルな状態に遷移できるわけではないことを考慮すると，中心星光度増大がそのまま外側境界の移動につながるわけではないかもしれない．このような場合の極端な例として，全球凍結から温暖な気候への気候ジャンプがおきないと仮定し，外側境界は形成直後の位置から移動しない(i.e., 内側境界の進化に伴いハビタブルゾーンが時間と共に狭くなる)という進化パターンも提案されている[e.g., 1]．より現実的には，炭素循環の負のフィードバックや$CO_2$氷床の形成など，気候ジャンプを起こす・妨げる要因を考慮した検討が必要である

## 4. 系外ハビタブル惑星の現状の理解

ここまでは，惑星のハビタブルな気候の境界についてレビューしてきた．本章では，現在検出されている惑星がハビタブル気候を持つ可能性について議論する．

### 4.1 TRAPPIST-1系の惑星

TRAPPIST-1系は，ハビタブル惑星を保持していると考えられる，最も注目されている系である．TRAPPIST-1は，有効温度が2550 Kで質量が太陽質量の0.09倍の恒星であり，7つの惑星を持つことがわかっている．これら惑星の半径は地球半径の約0.72倍から約1.13倍である．

このような低質量の恒星の進化は太陽型星と大きく異なり，前主系列段階における強烈な光度と紫外線強度という特徴を持つ．こうした強烈な光度と紫外線強度のため，この惑星系の7つの惑星は初期に暴走温室状態にあり，形成後の数百万年間の間で数地球海洋水量を失ったと考えられる．こうした水の散逸により，残留酸素が大気中に蓄積していると予想される．

TTVs(Transit-timing variations)観測による惑星のバルク密度の推定から，これらの惑星は地球型惑星か揮発性物質に富んだ組成であることが示唆されている．一方，TRAPPIST-1系の惑星の軌道が軌道共鳴に近いという事実を考えると，親星から遠い場所で形成され，その後，現在の位置に移動してきたのだろう．

つまり，惑星はスノーラインを越えた場所で形成され，初期の大規模な大気散逸を経験してもなお，揮発性物質に富んだ惑星の組成を我々に示しているということになる．

以下では，それぞれの惑星に対し，ハビタブルな環境を維持する条件について検討した結果を紹介する[14]．まず，TRAPPIST-1bとcは，惑星が受け取る恒星放射が大きいため，全球的に繋がった海洋を維持することはないと考えられる．

一方，TRAPPIST-1 f，g，hは，これらの惑星が受ける恒星放射が弱いため，ハビタブルな環境を維持するためには，温室効果気体の存在が海洋の保持に欠かせない．TRAPPIST-1 fとgは火星よりわずかに大きいため，数気圧の二酸化炭素大気を保持することが可能である．これらの惑星が仮にハビタブルな環境を維持しているとすれば，初期火星のような気候であると想像される．

TRAPPIST-1 hの夜面では，$CO_2$の凝結が起こる可能性がある．この惑星は質量も小さく低温なことから，ハビタブルな環境を作るのは難しそうである．しかし，実際に凝結が起きるかどうかについては，昼面で受け取ったエネルギーの再分配が関係しており，今後の詳細な検討が待たれる．

TRAPPIST-1系でハビタブルな環境を保つことに適している惑星(ハビタブルな環境を形成するために条件が少ない惑星)は，TRAPPIST-1 dとeである．TRAPPIST-1 dは同期回転惑星のハビタブルゾーンの内側境界付近に位置している．このため，アルベドが高く，厚い雲を恒星直下点に持っているような場合や，水の分布によっては，惑星表面に海洋を持つ可能性がある．TRAPPIST-1 eは，水蒸気以外の温室効果気体を必要とせずに液体の水を惑星表面に維持することができると推定されている．このため，成層圏メタンの吸収や光化学により作られるヘイズによる高い惑星アルベドのような反温室効果がなければ，表面に液体の水を維持することができると考えられている．

### 4.2 Proxima Centauri b

Proxima Centauriは，太陽に最も近い恒星であり，ハビタブルゾーン内に惑星(Proxima Centauri b)を保持していることが知られている．

Proxima Centauri bの軌道が円軌道だと仮定した場合，惑星は潮汐固定されている可能性がある．しかし，Proxima Centauri 系は若く，公転軌道が円になるには不十分であることを考えると，3：2のspin-orbit resonanceになっている可能性もある．今後の観測では，Proxima Centauri bの場合は大気組成と水量に加え自転周期も重要になる．

Proxima Centauri bが同期回転していた場合，背景大気に1気圧の$N_2$を仮定すると，表面に存在する水量が地球の海洋水量の60 %よりも多ければ，液体の水が恒星直下点に存在することが示されている[15]．また，1気圧の二酸化炭素が大気中に存在している場合は，夜面であっても液体の水を保持することができると考えられる．一方，水量がそれよりも少ない場合，夜面への水輸送により夜面で氷として蓄積することが予想される．この場合には，惑星表面での液体の水の存在は，昼-夜面境界付近での氷床の流動により決まる．しかし，この点に関し，詳細な検討はされていない．

一方，同期回転していない場合は，約10 m barの二酸化炭素かつ1 barの$N_2$があれば，全球凍結状態に陥ることはないと推定される．

## 5. まとめと将来課題

系外惑星科学の1つのゴールは，系外惑星におけるハビタブル惑星や生命の検出である．慣例的に，ハビタブル惑星は，ハビタブルゾーンという概念を用いて検討されてきた．ハビタブルゾーンは，惑星表面に液体の水が安定に維持することのできる中心星からの距離の範囲である．ハビタブルゾーンの内側境界は，暴走温室効果と湿潤温室効果の発生で決まっている．一方，外側境界は，二酸化炭素の温室効果の限界で決まっている．しかしながら，この検討には，暗に『常に表面が湿潤な惑星』という仮定がある．地球に比べ少ない水量を保持する惑星の場合，乾燥領域から強い惑星を射出できるため，海惑星に比べ大きな暴走温室限界をとることができる．また，炭素循環とその負のフィードバックは惑星の気候を温暖に保つ機能を果たしていると考えられていたが，そのメカニズムにも限界があることがわかってきた．よって，単にハビタブルゾーンに位置している惑星であってもハビタブルな環境かどうかはわからなくなってきている．加えて，大気組成の不確定性も考慮すると，まだ我々のハビタブル惑星の理解は水を保持する惑星の多様性を十分包括するほど，進んでいないことがわかる．系外惑星の検出数の増大に伴い，潜在的にハビタブル惑星と考えられる天体の検出が増大してきている．このため，”地球のような惑星”を検出する日は，刻々と近づいていることは確かである．しかしながら，地球と似て非なる物理プロセスにより気候が決まっているその”地球のような惑星”を十分に理解するには，まだまだ検討すべき課題が多く残っている．具体的には，大気組成の進化を考慮する場合に挙げられるような，惑星内部の進化(熱史)や大気散逸を伴う大気進化である．また，数値計算の問題から系統的な検討がされていないため，気候レジームがどう決まっているかは明らかでない．ハビタブル惑星の気候の形成を明らかにすることが，ハビタブル惑星の検出に重要なステップになるだろう．

## 謝 辞

本稿の執筆機会をいただき，また本稿に対し有益なコメントをいただいたことを，成田憲保博士に感謝いたします．ハビタブル惑星とは，地球型惑星が持つ特徴の1つであるため，これまで私たちは多くの人と議論を交わし，アドバイスをいただきてきました．我々にハビタブル惑星とは何か？地球とは何か？という疑問を常に投げかけてくれた阿部豊先生に感謝いたします．まだ我々はその十分な答えを持っていませんが，これからも近づけるように研究していこうと思います．

## 参考文献

[1] Kasting, J. F. et al., 1993, Icarus 101, 108.
[2] Kopparapu, R. K. et al., 2013, ApJ 765, 131.
[3] Nakajima, S. et al., J. Atmos. Sci. 49, 2256.
[4] Mischna, M. A. et al., 2000, Icarus 145, 546.
[5] Abe, Y. et al., 2011, Astrobiology 11, 443.
[6] Kodama, T. et al., 2018, JGR:planets 123, 559.
[7] Walker, J. C. G. et al., 1981, JGR 86, 9776.
[8] Kirschvink, J. L., 1992, in The Proterozoic Biosphere, 57.
[9] Kadoya, S. and Tajika, E., 2014, ApJ 790, 107.
[10] Tajika, E., 2008, ApJL 680, L53.
[11] Pierrehumbert, R. and Gaidos, E., 2011, ApJL 734, L12.
[12] Turbet, M. et al., 2017, EPSL 476, 11.
[13] Kodama, T. et al., 2015, ApJ 812, 165.
[14] Turbet, M. et al., 2018, A&A, accepted, DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731620
[15] Turbet, M. et al., 2016, A&A 596, A112.

←目次へ



# 火の鳥「はやぶさ」未来編 その14 ～サンプルリターンミッションからの試料受入れ～

安部 正真[1,2,3]，坏本 尚義[1,2,4]

（**要旨**）サンプルリターンミッションは惑星探査の最終形態のひとつであり，今後も新たなサンプルリターンミッションが世界中の惑星探査計画において実施されることが予想される．JAXAでも，はやぶさ，はやぶさ２の帰還試料受入れを通して，設備や受け入れ態勢が強化されつつある．本稿では，これまでの経緯を含めJAXAにおけるサンプルリターンミッションからの試料受入れの現在，過去，未来について紹介する．

## 1. はじめに

本稿のサブタイトルにも含まれている「サンプルリターンミッション」の意義については，[1]で述べられていますが，サンプルリターンは惑星探査の最終形態のひとつで，リモートセンシング観測や着陸機を用いたその場観測では行えない，詳細な試料分析が行えることや，観測（分析）機器を探査機に搭載する必要がないため，試料帰還後の最新の分析装置で分析できること，また重量やサイズの制約が無いため大型の装置が使えることが特徴です．そのため，たとえ持ち帰る量が少量でも，多くの科学成果や知見が得られることが期待できます．

はやぶさ帰還試料の試料受入れ作業については，[2], [3]で詳細が述べられています．これら帰還試料の受入れ作業を始め，初期記載，分配，保管，管理を含んだ作業の総称を「キュレーション」と呼んでいます．はやぶさ帰還試料の初期分析成果については，2012年のScience特集号で，その後の詳細分析については，2014年のMAPS（Meteoritics and Planetary Science）特集号でまとめられています．日本語では，ISASニュース2016年9月号や，日経サイエンス2016年10月号などにまとめられています．

JAXAキュレーション施設では，これまではやぶさ帰還試料として約700粒子が回収され，カタログ化されています．その成果は毎年JAXA-SPにおいてHayabusa Sample Catalogとして出版されるとともに，毎月粒子カタログのデータベースを更新して，地球外物質研究グループのHPより公開しています[4]．

現在も，はやぶさ帰還試料の国際公募分析が行なわれており，提案書をレビュー評価し採択された研究課題に対して試料提供を行っています．最近では粒子表面に刻まれた微小クレータの統計的研究の成果[5]や個別粒子の$^{40}$Ar/$^{39}$Ar年代測定からイトカワ母天体の衝突破壊年代研究の成果がでています[6]．

## 2. はやぶさ・はやぶさ2帰還試料の特徴

はやぶさ，はやぶさ2の帰還試料は，既知の天体から産状が分かった状態で持ち帰られるということ以外に，サンプル収納容器に封入される形で帰還することにより，試料がその天体にあった状態が保存され，地球大気などに触れることなく，地球物質による汚染が少ない（コントロールされている）ことが特徴として挙げられます．これはNASAが進めているサンプルリターンミッションによる帰還試料とは異なる特徴です．

そのため，JAXAキュレーション施設では，そうした特徴を損なわずに帰還試料を取り扱うことを原則と

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 地球外物質研究グループ
2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系
3. 総合研究大学院大学
4. 北海道大学
abe.masanao@jaxa.jp

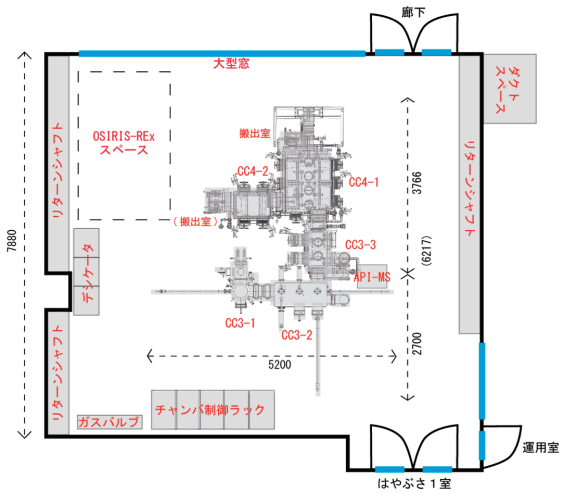



**図1：はやぶさ2用クリーンルームおよびクリーンチャンバー設置案.**

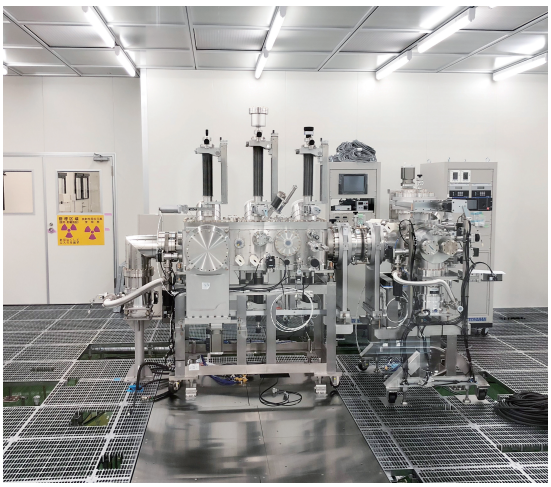


**図2：はやぶさ2用新クリーンルームと設置されたクリーンチャンバーの一部.**

しており，はやぶさにおける試料容器の開封作業では，クリーンチャンバーを用いて真空環境で行われ，その後の試料ハンドリングも高純度でドライな窒素環境下で行われました．はやぶさ2では，探査対象が揮発性物質を多く含むと考えられているC型小惑星であるため，サンプル容器の密封性を高めるためメタルシールが採用されており，サンプル容器内のガス採取を帰還カプセルの回収地点で実施します．またサンプル容器内の一部の試料を真空環境下で回収する計画で，その機能を持つ専用チャンバーを準備中です．

## 3. はやぶさ2試料受入れ設備の検討

はやぶさ2試料受入設備の検討は，2015年6月に開かれた第1回仕様検討委員会から本格的にスタートしています．当時，はやぶさ2の初期分析チームはまだPIしか決まっていなかったため，JAXAキュレーションチームのほかに，はやぶさ2サンプラチーム，JAXAと試料受入れ準備に関する協定や共同研究契約を結んだ機関，JAXAキュレーション施設で行う初期記載フローの検討に協力いただいたメンバーに加えて，NASA/JSCや，はやぶさ初号機の初期分析チームからも参加いただき，これまで2016年12月までに計9回の会議を行い，クリーンルームの仕様やクリーンチャンバーの仕様を決めました．図1にはやぶさ2用クリーンルームおよびクリーンチャンバーの設置レイアウト1次案を示します．

試料受入れ設備の製作担当メーカーは，仕様検討委員会の検討と平行して，入札方式で決定されています．はやぶさ初号機では，受注担当メーカーは1社で，その下に各担当メーカーが入る方式をとりましたが，予想されるコストが高いことから，はやぶさ2では，JAXA側が各担当をとりまとめるインテグレーション方式をとっています．担当メーカーは2016年8月から2017年2月にかけて決定され，2018年夏までにクリーンルームおよびクリーンチャンバーを完成させる予定で進められています．図2は2018年2月時点でのはやぶさ2試料受入れ設備の状況の写真です．

はやぶさ2の試料受入れ設備やキュレーション作業フローの詳細については，別途機会を設けて述べるとして，今回は，JAXAにおけるサンプルリターンミッションからの試料受入れの体制や経緯について紹介したいと思います．

## 4. はやぶさ以前

はやぶさ以前は，JAXAとしては組織だってサンプルリターンミッションの試料受入れを行ってはおらず，研究者が個人レベルでアポロサンプルやスターダストサンプルを借り受け，研究するという方式でした．

はやぶさプロジェクトがスタートした後も，プロジェクト予算は試料受入れ設備の製作に充てるだけで，

人材の確保は2006年に開発員1名を基盤技術分野で採用できただけで，残りは，太陽系科学研究系（当時は固体惑星科学研究系）の教育職が併任で開発を進める形でした．2010年6月に開始した，はやぶさ帰還試料の受け入れ作業についても，任期付招聘職員2名の増員はありましたが，JAXA内の人員では不足のため，初期分析チームの協力により，JAXA外から宇宙研に数名が長期滞在する形でキュレーション作業に参加してもらい，その後に続く初期分析への試料分配までが遂行されています．

2013年のはやぶさプロジェクトの終了後も受入れ試料の国際公募研究への配分や将来への保管管理が必要であるため，任期付職員やプロジェクト研究員，派遣職員などの協力でキュレーション活動を維持してきましたが，限られたマンパワーでキュレーション業務の遂行しなければならない状況が続いていたため，はやぶさ帰還試料分析の研究成果創出や成果公表に十分な時間がさけられない状況でした．

## 5. はやぶさ以降

2011年5月にはやぶさ2プロジェクトが発足し，その後2012年10月にかけてプロジェクトの体制強化が行われているころ，JAXAのキュレーション活動についても新展開がありました．

2011年8月に初期分析の成果がScience誌に掲載され，12月にはNASAへの試料提供を，NASAとJAXAの覚書（MOU）の取り決めに従って開始しています．続いて2012年1月に国際公募研究を開始し，2012年2月には最初のサンプルカタログが発行されています．また，JAXAのキュレーション活動は，はやぶさプロジェクトが終了にともない，2013年3月からはJSPEC（月・惑星探査プログラムグループ）から宇宙研のC-SODA（科学衛星運用・データ利用センター，現在は科学衛星運用・データ利用ユニット）管轄下に置かれることになりました．

2013年11月には第1回宇宙物質科学シンポジウム（HAYABUSA2013シンポジウム）を開催し，2014年2月には初期分析成果の第2弾がMAPSに特集号として掲載されています．

2015年7月にはキュレーション活動をC-SODAから切り離し，地球外物質研究グループという独立した組織として，プログラムディレクタの下に，他のプロジェクトと並列する形で発足することとなりました．はやぶさ2の試料受入れ設備の検討が本格化したのもこの頃です．その後，キュレーション活動はプロジェクトのような時限ではなく，基盤技術的な位置づけで，永続的に進めることができるよう，研究基盤・技術統括の下に再配置されています．2016年3月からグループ体制が整い始め，業務改革と研究成果創出を推進し，現在は，キュレーション分野だけでなく，搭載科学機器開発分野や宇宙物質合成分野の活動も開始して，産官学を巻き込んだ，物質科学研究コミュニティーとの連携を進めています．

## 6. JAXAキュレーションの特徴

JAXAキュレーション施設で扱っている，サンプルリターンミッションの帰還試料は，現時点でははやぶさのみで，2020年からはやぶさ2の試料を受け入れる予定となっています．

はやぶさ帰還試料については，先に述べたように，現在もその受入れ設備は稼働中で，はやぶさ2についても，新クリーンルームが完成し，今年の夏には試料受入れ用専用クリーンチャンバーが据付完了となる予定です．

はやぶさ，はやぶさ2帰還試料採取機構（サンプラー）の特徴は，それらの試料容器が密封されていることで，帰還カプセルを地上で回収した時点でも雰囲気遮断環境を保持できる設計となっています．JAXAキュレーション設備では，その帰還試料の持つ特徴を損なわないよう，帰還カプセル回収後のキュレーション活動においても，極力雰囲気遮断環境を維持することを原則として作業を行っています．具体的には，試料容器の開封は真空環境で行い，試料の取り出しや観察も高純度な窒素環境下で行っています．試料分配に関しても，専用の窒素封入密閉容器に試料を封入して配分できるようにしています．

また，はやぶさでは，帰還試料サイズが最大でも100 $\mu$m程度と小さかったため，専用のピックアップツールである静電マニピュレータを開発しています[7]．この技術は，宇宙塵の研究などで行われてきた試料ハンドリング方法を，ドライな窒素環境下でも行え，かつ極力試料を汚染しない手法として改良したもので

す．NASA/JSCからも職員が視察に来るほどで，JAXA独自の技術ともいえます．

さらにJAXAキュレーションでは，小さな試料を汚染することなく扱えるだけでなく，そのハンドリング装置やツールの洗浄を独自でも行っていること，また試料を取り扱う環境をモニターしていることも特徴のひとつです．

洗浄については，NASA/JSCを初めとして，他分野の研究機関も含めて参考にしながら，独自に開発を進めています[8]．

はやぶさ2では有機汚染についても有機物質研究者などから情報収集して，専用のメタルクリーンベンチを導入するなど，施設の整備に注力しています．

## 7. 将来のサンプルリターンミッションの試料受入れに備えて

サンプルリターンミッションは惑星探査の最終形態であるとともに，今後の惑星探査で主流の形態となりえるものです．実際，はやぶさ2に続いて，米国ではOSIRIS-RExという小惑星サンプルリターンミッションが進行中です．また日本でもMMX（火星衛星探査）がフォボスまたはダイモスからのサンプルリターンを目指して進行中です．その他，月からのサンプルリターン，火星からのサンプルリターン，彗星核からのサンプルリターンミッションの具体的な検討が進んでいます．これらいずれにもJAXAキュレーションは関係しており，継続して帰還試料の受入れおよびキュレーション作業が行える態勢を維持しつつ，惑星物質科学コミュニティーの中核となりえるよう，また他分野，他機関，産官学との連携を進めるべく，体制強化，スキルの強化を継続します．

## 参考文献

[1] 矢田達ほか, 2007, 日本惑星科学会誌 16, 170.
[2] 安部正真, 藤村彰夫, 2011, 日本惑星科学会誌 20, 185.
[3] 矢田達ほか, 2013, 日本惑星科学会誌 22, 68.
[4] https://hayabusaao.isas.jaxa.jp/curation/hayabusa/index.html
[5] Matsumoto, T. et al., 2018, Icarus 303, 22.
[6] Jourdan, F. et al., 2017, Geology 45, 819.
[7] 藤村彰夫, 2011, 静電気学会誌 35, 255.
[8] 唐牛ほか, 2014, 地球化学 48, 211.

←目次へ



# 遊星百景 その12 ～月の小さな構造地形～

嵩 由芙子[1,2]

月の地形を思い浮かべた時，どんな景色が広がっていますか．高地，海，クレーター，リッジ，リル，ドーム，中央丘…？今回紹介するのは，雨の海北東部のMons Chajorra地域(図1)です．ここでは，リッジはもちろんのこと，Lobate scarpやfissureといった，さらに小さな構造地形(断層活動の結果できた地形)を観察することができます．Mons Chajorraは，雨の海内部にリング状に点在する高地物質でできた島々の一つで，雨の盆地のsecond inner ringの一部であるといわれています[1]．この一つの島に，IAUが認めた正式名称はありませんが，ここでは[2]に倣ってMons Chajorraと呼ぶことにします．

Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Narrow Angle Camera(LROC NAC)は，高解像度で，限られた地域を様々な太陽高度で撮像しました．一方かぐやのTerrain Camera(TC)画像は，解像度でNACに及びませんが，同一太陽高度条件下で全球を撮像しました．同じ太陽高度で撮像された画像は，影の落ちかたに地域差がないので，地形を観察し，広域的な比較を行う上で有利です．加えて，スペクトルデータや地形データを併せると，小さな地形たちがどうやって形成されたのかが見えてきます．

ぜひ，立体図を想像しながらTC画像(図1)を眺めて下さい．平坦な玄武岩溶岩の海に，一際明るい丘が二つあります．このうち，北側に位置する大きな丘がMons Chajorraです．二つの丘の間には，北東―南西走向のリッジがあり，Mons Chajorraの西側斜面に注目すると，斜面にライン状の構造があることがわかる

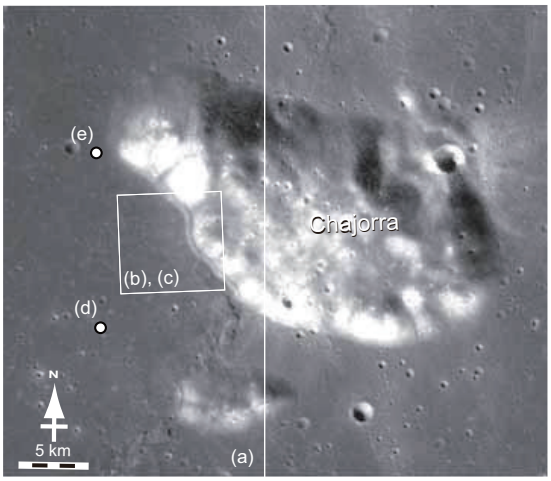
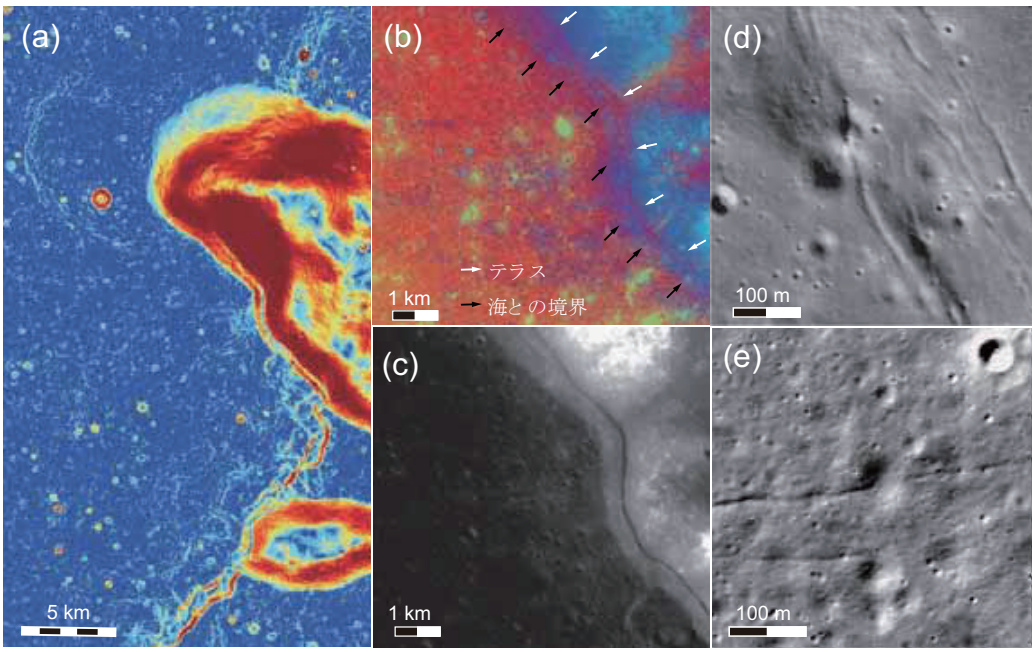



**図1：Mons Chajorra周辺(N49° W15°)のかぐやTC画像．リッジやLobate scarpが観察できる．白枠は，図2の画像の位置を示す．**

でしょうか．この小さな盛り上がりがLobate scarpです．その先端(テラス部分)がひどく蛇行することからLobate(舌状) Scarp(崖)と呼ばれます．高地または海―高地境界で散見され，分布に地域差がない(ように思われる)ことから，月の全球収縮が原因で形成されたのではないかと考えられ，Lobate scarpの形成年代や地殻の短縮量を見積もることで，月の熱史へ制約を与えられると期待されています[3,4]．

可視画像だけだとLobate scarpが，どのような地形になっているのかわかりにくいですね．そこで地形の傾斜度マップ(図2a)を見て下さい．約30°傾斜しているMons Chajorraの斜面が，一部平らなテラス状になっていることがわかります．このテラスがLobate scarpの先端です．テラス部分をクローズアップしてみてみましょう．図2bに，かぐやのスペクトルデー

1. 京都大学理学研究科
2. 宇宙科学研究所 月惑星探査データ解析グループ
dake. yuuko@jaxa. jp




a)b)のカラー版は電子版を参照下さい.

**図2：a)かぐやの地形データを使って作成した地形の傾斜度マップ．b)かぐやMIデータを使って作成した疑似カラーマップ(R：749 nm/414 nm，G：749 nm/950 nm，B：414 nm/749 nm)．高地の斜長岩は青く，海の玄武岩は赤くなるような色付けをしている．矢印の先端は，斜面と平地の境界線(黒)とテラスの位置(白)を示す．c)Lobate scarp近影(LROC NAC image M1098943917LC)．d)e)小さなクレーターを変形しているFissure(LROC NAC image M1136640204RC，M10983917LC)．**

タを使って作成した，疑似カラーマップを示します．海(赤：玄武岩)と高地(青：斜長岩)の違いがわかる色付けしています．図2cには，同じ領域のNAC画像を示します．海と丘の境界だけでなく，テラスの位置にも組成の境界があるのが見えてきます．

さらに，NAC画像でこの地域を観察すると，fissure[5]と呼ばれる(small scale grabenとも呼ばれる)，幅数百mに満たない小さな谷が見えてきます(図2e, f)．これらの谷地形は，クレーターを変形していることから，その成因は火山性ではなく，断層活動で形成されたと解釈されており，Lobate scarp形成に伴ってできたと考えられています[4,5]．

これらの構造はどうやってできたのでしょうか．一般にLobate scarpは，走向方向と垂直に地形プロファイルをとると，非対称なこと，逆断層(または褶曲)構造であるリッジへ遷移するものがあること，断層線が蛇行することなどから，衝上断層活動で形成されたと考えられています[e.g., 3]．この地域のLobate scarpが，Mare ridgeに遷移することも，衝上断層であるという解釈と調和的です．MI疑似カラーマップ(図2b)から，テラスよりも下側の斜面は，海の物質に高地の物質がパウダー状にかかっていることから，一度は水平に堆積した玄武岩溶岩が，断層活動で以って，この斜面を覆ったと解釈することができます．いつ断層活動が始まったのかはわかりませんが，Lobate scarpのテラスが非常にはっきりとした地形を保っていることから，コペルニクス紀(現在～8億年前)にも断層活動は続いていたと考えられています[3]．これは，Lobate scarpに付随して形成されたfissureが，直径50 mにも満たない，小さく若いクレーターを変形させていることとも調和的です．

ところで，月の断層活動は30億年前までに終わったといわれてきました[e.g., 6]．しかし，こうした若い構造地形が全球的に見つかっている事実は，この通説を覆すのに十分と言えるでしょう．その成因は，月の内部冷却に伴う収縮である[e.g., 3]という説が現在のところ有力ですが，まだまだ議論の余地があります．月に断層活動の結果形成される，地形は，月地殻がどのような変形史を歩んできたのかを知る大切な手掛かりです．ところが，これらの地形の地下構造は理論計

算や数値シミュレーションを行って推測はされているものの，実際に観測されたことはなく，議論が続いています．近い将来，着陸機がどんどん月面に降りる時代になり，地下構造が明らかになることを，私はひそかに楽しみにしているのです．複数の観察事実から，広域のテクトニクス史を組み上げる．そんな面白さを教えてくれた，私のお気に入りの場所でした．

## 参考文献


［1］Spudis, P. D., 1993, The Geology of Multi-Ringed Impact Basins (Cambridge Univ. Press, Cambridge).
［2］Lee, J., 1864, Rep. BAAS 1863 Meeting, 7.
［3］Watters, T. R. et al., 2010, Science 329, 936.
［4］Daket, Y. et al., 2016, Earth, Planets and Space 68, 157.
［5］French, R. A. et al., 2015, Icarus 252, 95.
［6］Solomon, S. C. and Head, J. W., 1980, Rev. Geophys. 18, 107.

←目次へ



# 第10回月惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英[1]，平田 成[1]，小川 佳子[1]，仲内 悠祐[1]，臼井 寛裕[2]，
中村 智樹[3]，菊地 紘[4]，梶谷 伊織[5]，高木 直史[6]，長足 友哉[7]，
杉本 知穂[8]，庄崎 弘基[9]，金丸 仁明[10]，野口 里奈[11]，
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毎年度1回の頻度で実施され，2018年3月に節目となる10回目を迎えました．必要な知識とソフトウエアの導入を初日に行なったうえで，受講生が会期中実際に手を動かし，最後に成果発表する，という一連のスタイルが特徴です．

今回のテーマは『火星衛星・小惑星等の不規則形状小天体のデータの可視化と解析』でした．「火星衛星サンプルリターン計画MMX」の実現と，まもなく小惑星Ryuguに到着予定の「はやぶさ2」を意識して設定されました．おそらく過去最多となる講師5名が初日に講義し，Skypeによる遠隔講義スタイル（中村智樹講師は東北大から接続）も初めて取り入れられました．受講生については，研究と言っても過言ではない非常に質の高い発表が多かったこと，学部生が過半数を占めて最年少が学部2年生という若い年齢構成であったことが特筆されます．受講生10名の内訳は7大学1研究所（神戸大，慶応大，東京大，大阪大，東工大，高知大，会津大，東工大火山流体研究センター）でした．講師と併せた参加機関数は11，参加者数は17名となりました．

1. 会津大学先端情報科学研究センター宇宙情報科学クラスター
2. 東京工業大学地球生命研究所
3. 東北大学大学院理学研究科
4. 東京大学大学院工学系研究科
5. 東京工業大学理学部
6. 東京大学理学部地球惑星物理学科
7. 神戸大学大学院理学研究科
8. 慶應義塾大学理工学部物理学科
9. 高知大学理学部理学科
10. 大阪大学大学院理学研究科
11. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
demura@u-aizu.ac.jp

**図1：実習会集合写真．**

講義内容は，臼井氏よりMMXの概要と狙いについて，中村氏より火星衛星分光データ解析の意義とその紹介，菊地氏より火星衛星画像データ解析の意義と紹介，小川氏より文科省宇宙航空科学技術推進委託費に基づき会津大学正課で行われた火星衛星データキュレーションの報告，平田氏より三次元地理情報システムAiGISならびにSBMTの紹介と導入がなされました．当初予定されていた観測機視野ならびに探査機位置可視化ツールHARMONICSの紹介は，時間の都合等から見送られました．

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**：2018年3月5日 12:10～3月7日 13:00
**開催場所**：会津大学研究棟3階　M11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-10

**講　　師**：臼井寛裕（東工大ELSI），中村智樹（東北大），菊地紘（東京大），小川佳子・平田成（会津大）

**世 話 人**：出村裕英・仲内悠祐・小川佳子・平田成（会津大），臼井寛裕（東工大ELSI），中村智樹（東北大），菊地紘（東京大），

**参 加 者**：17名（講師・世話人7名，受講生10名．受講生の内訳は講師1，PD1，博士1，修士1，学部6）

**成果発表した受講生（発表順，当時の所属）**

- **梶谷伊織**（東工大）『フォボスのどこに行くべきか』
- **高木直史**（東京大）『ロゼッタが撮影したChuryumov-Gerasimenkoの画像の復元』
- **長足友哉**（神戸大）『Phobosの極域のクレーターカウンティング』
- **杉本知穂**（慶應大）『グループの長さ－幅分布と角度分布』
- **庄崎弘基**（高知大）『形状モデルを用いた日照変化の再現～小惑星イトカワの例～』
- **金丸仁明**（大阪大）『火星衛星Phobos表面の重力場と地形緩和過程』
- **熊谷柾志**（会津大）『AiGIS ／ SBMTの使い方』
- **野口里奈**（東工大）『PLR（Phobos Laser Ranging）の検討』

---

**受講生から寄せられた感想等**

**梶谷伊織さん**：私は以前から惑星探査に非常に強い興味を持っており，将来は探査機が得た画像の解析等を通して惑星探査の研究に携わりたいと漠然と考えていました．ですがこれまで，論文を読んだり学会の発表を聞くだけでは，研究者の方々がどのような手段を用いて画像を解析しているのか，よく分からないままでした．この実習を通して今までより少し具体的な理解を得ることができたと思います．今回の実習で私は主にAiGISとImageJ，Excelの3つのソフトを使用して，MMXミッションでフォボスのどこにタッチダウンすればより新鮮なサンプルを得られる可能性が高いのかということを考察しました．最初のうちは自分が得たい情報を得るためにどのデータをどのソフトで解析すれば良いのか分からず，手探りの状態でした．ですが進めていくうちに，世話人・講師の皆様の手厚い指導のおかげで，徐々に道筋が見えてきました．2日目の終わりには，画像解析の研究の楽しさと大変さの両方の側面を垣間見ることができ，今回の実習は私にとって非常に貴重な機会となりました．短い実習期間の中でしたが，大変興味深い講義をしていただいた講師の方々，親身に指導していただいた世話人の皆様，様々な刺激を与えてくださった実習生の皆様に厚く御礼申し上げます．

**高木直史さん**：今回の実習会では，火星衛星についての講義に始まり，MMX計画の概要，AiGISとsbmtの使い方を学び，各自でテーマを決めて作業に取り組みました．私自身はAiGISとsbmtについては知っていたのですが，画像を解析することとはどういうことなのか分かっておらず，今回の実習では大きなものを得ることができました．私の解析は画像の復元でしたが，少し調べただけでもかなり奥が深そうな分野だと感じ，専門ではないものの今後も画像処理について勉強を続けようと思いました．他の参加者の皆様の発表では，解析内容や質問を聞くことで私の持ち得なかった知識・視点・考え方を学ぶことができ，画像解析の多様性の一端を知りました．このような貴重な経験のできる場を準備していただいた世話人・講師の皆様，研究に対して刺激をいただいた参加者の皆様に厚く御礼申し上げます．

**長足友哉さん**：私はこれまで探査データを扱うツールに触れる機会があまりなく，火星衛星について興味を持っていたため，解析実習会に参加しました．まず，Phobos/DeimosデータやMMXの講義から始まり，データの可視化および解析ツールの使用法を教わりました．その後，各自形状モデルを利用した解析等の課題に取り組みました．PCにソフトウェアを入れて動作させるところからみなさまにはご迷惑をおかけしましたが，非常に丁寧なご指導に助けられ，課題に取り組むことができました．今後もこれら解析ツールを利用したいと思います．また，参加されていた方々も意識の高い方ばかりで，とてもよい刺激になりました．常に充実した3日間で，様々な研究があることを知り，自分の視野の狭さに気付かされ，最初から最後まで非常に勉強になりました．最後になりましたが，講師の

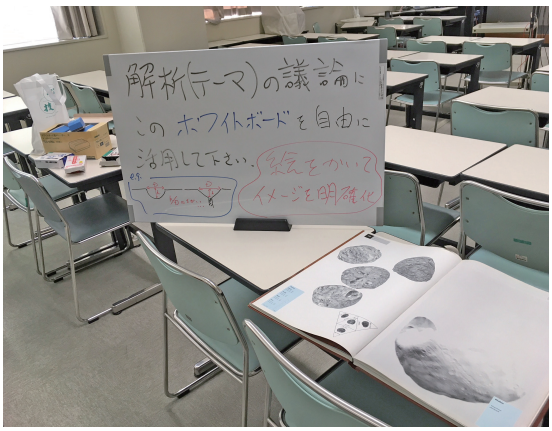


**図2：議論に使用する小白板セット．**

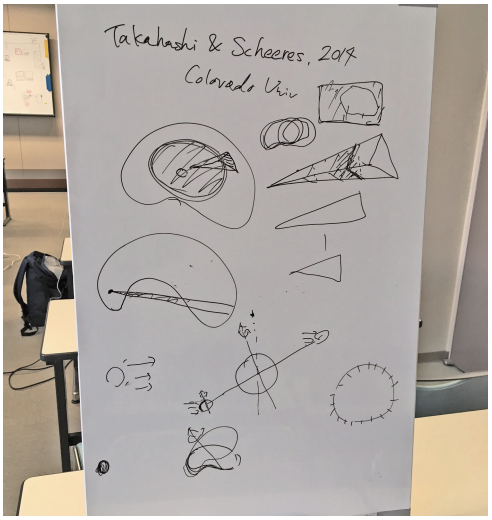


**図3：同，1枚．**

みなさま，世話人のみなさま，参加されたみなさまには大変お世話になりました．この実習会を通してお世話になった全ての方に厚く御礼申し上げます．

**杉本知穂さん**：本実習会では初めに火星衛星に関する講義と解析ツールの講習を受けました．予習では研究の最前線を把握することが難しかったので，講義でいくつか未解決問題について解説して頂けて大変有難かったです．講習後，各々自由なテーマで解析実習を行いました．私はSBMTを用いてフォボスのグルーブ幅について解析しました．短時間で多数のグルーブを調査するのは大変でしたが，より正確なグルーブの発見方法を考え，SBMTの出力データを利用して計算を行うスクリプトを作成した経験は，今後の研究活

**図4：実習会風景．**

動に直接役立つと確信しております．また稚拙ながらグルーブのでき方や火星系の昔の姿を考察するのはとても楽しかったです．自分でテーマを考えて解析するという目標と会場の意欲的な雰囲気があったことで集中して有意義な3日間を過ごすことができました．この実習は今春地球惑星科学科に転科する自分にとって新しい研究生活のとても良い第一歩になりました．このような素晴らしい機会を与えて下さった世話人・講師・参加者の皆様に心より感謝申し上げます．

**庄崎弘基さん**：本実習会では，火星衛星の探査データや今後の展望の紹介から始まり，AiGISやSBMTなどの三次元地理情報システムツールの紹介，また，それらを用いて各々でテーマを設定し実習を行いました．私は，こういったツールを利用するということは初めての経験でしたので，ソフトウェアの扱い方はもちろん，解析自体の理解には苦労していましたが，講師の皆様にご助言をいただき，なんとか解析結果を出し実習を行うことができました．講師の皆様には大変お世話になりました．また，自分の学科では惑星に興味を持つ学生は少ないため，参加者の皆様が惑星科学を専攻する方々でかつそういった話をして盛り上がることができたのは非常に楽しく，この分野で邁進したいとモチベーションが上がりました．本実習会では，惑星科学で未経験だったテクニカルな解析手法を学ぶことができ，また，惑星科学に関して皆様と一緒に議論したことで，大変有意義な時間を過ごさせていただきました．世話人の方々をはじめ，講師，参加者の皆様に御礼申し上げます．

**金丸仁明さん**：今回のデータ解析実習会では，小天体用の3次元地理情報システムをはじめとして，解析ソフトの使い方や実際の解析例を学ぶことができました．解析方法や火星衛星の講義を受けた後，形状モデルを利用したPhobosの地形解析など，各自で興味のある課題に取り組みました．講師陣の親切な指導のもと，解析ソフトの練習に留まらず，多くの参加者が興味深い解析結果を得ることができました．最終発表では活発な議論が行われ，火星衛星の魅力を大いに感じました．参加者には，学部生など若い学生が多く研究に対するエネルギーとインスピレーションをもらえました．有意義な実習会のためにご尽力いただいた世話人，参加者の皆様に厚く御礼申し上げます．

**野口里奈さん**：今回の実習会では，前半に小型天体をターゲットとした最新の研究およびデータ解析ツール（AiGIS，SBMT）が紹介され，後半は各自がテーマを見つけて作業・発表を行いました．参加者は大半が学部生でしたが，意欲的に課題に取り組む姿勢が印象的でした．そもそもの意識が高いのに合わせ，最先端の研究者を講師に招いた講義が参加者の潜在的データ探索欲求を刺激したからでしょう．私自身はこれまで小型天体データの解析経験がなかったので，ツールの導入・実際の操作・簡易的な解析の一連の流れを経験できる場を設けていただいたのはありがたかったです．一方で，データ解析の裾野が広がる中，自身がデータにどう向き合っていくべきか考えさせられる場でもありました．このような実習会はぜひ今後も続けてもらいたいと思います．世話人・講師ならびに参加者の皆様に御礼申し上げます．

←目次へ



# 月極域探査に関するワークショップ開催報告

長岡 央[1]，橋爪 光[2]，鹿山 雅裕[3]，大竹 真紀子[1]，星野 健[1]

月極域探査の可能性と実現性を資源利用，特に水氷の探索という観点で議論することを目的に，“月極域探査に関するワークショップ”が2017年12月から2018年2月にかけて2回にわたりに開催されました．JAXAは，平成27年度から国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の支援(イノベーションハブ構築支援事業)のもと，宇宙探査イノベーションハブを設立し，産業界や大学と連携し，革新的な宇宙探査技術の研究開発を進めています．さらに，日本は月極域に分布する可能性が指摘されている，水氷などの揮発性成分をターゲットとした資源探査に注目しており，その実現性と観測技術，採掘技術の検討を始めました．これにはISECG(国際宇宙探査協動グループ)での活動を通じて，各国で月極域探査の本格的な検討が進められようとしていることが背景にあります．

このような国際協動・競争の背景の中，日本が担うべき月極域探査の意義や水氷を観測する技術の提案と議論を行う場として，このワークショップが開催されました．ワークショップでは，月極域探査における観測項目や観測技術について，惑星科学のコミュニティーだけに留まらず，産業界と連携し，様々な分野で活躍する多くの参加者と共に，同探査の可能性・有用性について意見交換や議論を行いました．

第一回目のワークショップは2017年の12月8日，9日の二日間にわたり，東京駅の傍にある東京コンベンションホールの会議室にて開催されました．初日の午前中は主に，JAXAの同探査検討メンバーから本ワークショップの開催趣旨並びに，月極域探査構想の背景や現在の検討状況について説明が行われました．午後のセッション前半では，月の揮発性物質，特に水の存在量やその存在形態について，既存データに基づいたレビューがなされ，その信頼性や将来の月極域探査に向けて必要となるデータの取得状況などに関する議論がなされました．午後のセッション後半では，月極域における水氷の分布やその存在量，存在形態をいかにして計測するか，その観測技術の紹介や現在の開発検討状況等が報告されました．二日目の午前は前日から引き続き，観測技術の紹介や月極域探査の意義，月極域で行うべき観測の提案に関する発表が行われ，その詳細について議論がなされ，午後は民間企業から，産業開発・宇宙資源利用の観点で月極域探査に向けた要望や提案がなされました．さらに，JAXA側からは月極域探査の実現に向けた観測方法やその技術に関する情報提供要請(RFI)を行う旨が告知されました．二日間のワークショップへの参加者はのべ199名と，非常にたくさんの方々が参加されました．

第二回目のワークショップは2018年2月19日に，こちらも東京駅の傍にあるベルサール八重洲内の会議室にて実施されました．午前中には，前回のワークショップの総括，前回のワークショップからの月極域探査ミッションの検討における進捗や課題，国際協働の枠組みでの活動状況，募集したRFIの結果報告，さらには民間企業からの新規・追加情報に関する発表がなされました．午後は，宇宙科学研究所・理工学委員会の元に設置された国際宇宙探査専門委員会からの提言，月の水に関する研究成果のレビューや，月極域探査の推進に不可欠な研究計画の提案，提案機器の検討・開発の進捗状況など報告が行われ，ワークショップの最後に今回の発表の総括と，それを踏まえた上での将来

1. 宇宙航空研究開発機構
2. 茨城大学
3. 東北大学
hiroshi-nagaoka@planeta.sci.isas.jaxa.jp

図1：第1回ワークショップ中の会場風景.

図2：第2回ワークショップ中の会場風景.

計画や，今後の国際宇宙探査検討を効率的に進めるための枠組みの構築についても，議論を行いました．第二回目のワークショップも，参加者は150名と引き続き多くの方々が参加され，盛況のうちに終わりました．特に，多数のマスメディア関係の方々が聴講され，今後の月探査の方向性についての関心の高さを感じました．

**第一回**
**月極域探査に関するワークショップその1**
**■日時**：2017年12月8日(金)，9日(土)
**■場所**：東京コンベンションホール　中会議室II
**■ワークショッププログラム**
第一日目(12月8日)

| 時間 | 発表タイトル | 発表者 | 所属 |
|---|---|---|---|
| 座長 | 橋爪　光(茨城大学) | | |
| 10:00－10:10 | 本ワークショップの開催趣旨 | 伊東康之 | JAXA |
| 10:10－10:40 | 国際宇宙探査の調整状況とJAXAの月探査シナリオ(案) | 佐藤直樹 | JAXA |
| 10:40－11:10 | 月極域探査機検討状況 | 星野健ほか | JAXA |
| 11:10－11:40 | 月極域探査プラットフォーム | 若林幸子ほか | JAXA |
| 11:40－11:50 | 惑星科学等関連コニュニティーへの協力のお願い | 大竹真紀子 | JAXA |
| 11:50－12:10 | 惑星科学コニュニティーの活動:荒川政彦 | 荒川政彦 | 神戸大学 |
| 座長 | 大竹真紀子(JAXA)/鹿山雅裕(東北大学) | | |
| 13:30－14:00 | 既存データによる成果と課題<br>(濃集機構の観点から) | 橋爪　光 | 茨城大学 |
| 14:00－14:30 | 既存データによる成果と課題<br>(中性子観測データ) | 長岡　央 | 早稲田大学 |
| 14:30－15:00 | 既存データによる成果と課題<br>(反射スペクトル観測と試料分析の観点から) | 鹿山雅裕 | 東北大学 |
| 15:00－15:30 | 既存データによる成果と課題<br>(探査データの観点から) | 春山純一<br>代読　長岡央 | JAXA |
| 15:45－16:05 | 観測機器提案(レーダー観測) | 宮本英昭,<br>熊本篤志 | 東京大学<br>東北大学 |
| 16:05－16:25 | 観測機器提案(分光観測) | 佐伯和人ほか | 大阪大学 |
| 16:25－16:45 | 観測機器提案(中性子観測) | 草野広樹ほか | JAXA |
| 16:45－17:30 | 総合討論 | | |

第二日目(12月9日)

| 時間 | 発表タイトル | 発表者 | 所属 |
|---|---|---|---|
| 座長 | 長岡　央(早稲田大学) | | |
| 9:30－10:00 | 月極域探査に係るインド宇宙研究機関(ISRO)との共同検討について | 星野　健 | JAXA |
| 10:00－10:20 | 観測機器提案(質量分析計) | 斎藤義文,<br>横田勝一郎 | JAXA<br>大阪大学 |
| 10:20－10:40 | 観測機器提案　(微量水分析) | 山中千博,<br>橋爪　光 | 大阪大学<br>茨城大学 |
| 10:40－11:00 | 観測機器提案　(アクティブ月震観測) | 川村太一ほか | 天文台 |
| 11:00－11:10 | 観測機器提案　(熱重量分析) | 渡辺隆行 | 九州大学 |
| 11:10－11:30 | 水素原子の月面における挙動 | 西野真木ほか | 名古屋大学 |
| 11:30－11:50 | 月の大構造推定の現状と課題 | 松本晃治 | 天文台 |
| 座長 | 増田宏一(JAXA)／星野健(JAXA) | | |
| 13:10－13:30 | 情報提供要請(RFI)について | 降簱弘城 | JAXA |
| 13:30－14:00 | 宇宙源利用の研究開発動向 | 金森洋史 | JAXA |
| 14:00－14:20 | 民間企業からの提案 | 中村貴裕 | ispace |
| 14:20－14:40 | 民間企業からの提案 | 鵜山尚大 | 清水建設 |
| 14:40－15:00 | 民間企業からの提案 | 小笠原宏 | 三菱重工 |
| 15:00－15:20 | 日本発の宇宙資源ビジネスを目指して | 羽生哲也 | 三菱総合研究所 |
| 15:30－15:50 | 商業宇宙資源探査に関する法的課題の検討動向 | 岩城陽大 | JAXA |
| 15:50－16:10 | 水氷含有レゴリスの採取・移送技術 | 川本広行 | 早稲田大学 |
| 16:10－16:30 | 月レゴリス粒度の改質・農業用土壌への改良 | 小松 隆一 | 山口大学 |
| 16:30－17:15 | 総合討論 | | |

**第二回**

**月極域探査に関するワークショップその2**

**■日時**：2018年2月19日(月)　10:00～17:30

**■場所**：ベルサール八重洲(会議室1～3)

**■ワークショッププログラム**

| 時間 | 発表タイトル | 発表者 | 所属 |
|---|---|---|---|
| 座長 | 橋爪光(茨城大学)/大竹真紀子(JAXA) | | |
| 10:00－10:20 | ワークショップ開催趣旨と国際動向 | 星野　健 | JAXA |
| 10:20－10:50 | 前回のワークショップのサマリー | 星野　健,<br>大竹真紀子 | JAXA |
| 10:50－11:10 | 月極域探査機の検討状況と進め方に関する課題 | 星野　健 | JAXA |
| 11:10－11:25 | 国際協働による月極域探査の検討状況 | 大竹真紀子 | JAXA |
| 11:25－11:45 | ispaceからみた月面資源開発 | 中村貴裕 | ispace |
| 11:45－12:05 | スカパー JSATの目指す宇宙探査における価値創出 | 内山　浩 | スカパー JSAT |
| 12:05－12:15 | 月極域探査技術に関する情報提供要請(RFI)への回答結果について | 降簱弘城 | JAXA |
| 座長 | 小川和津(神戸大学) | | |
| 13:25－13:40 | 国際宇宙探査専門委員会の月極域科学探査タスクフォースの活動について | 荒川政彦 | 神戸大学 |
| 13:40－14:00 | 月極域探査への提案(工学分野) | 久保田孝 | JAXA |
| 14:00－14:20 | 月極域の水氷に関する理論と観測．レビューをふまえて | 春山純一 | JAXA |

| 時間 | 発表タイトル | 発表者 | 所属 |
|---|---|---|---|
| 14:20－14:40 | 月面水の起源解読に向けた同位体比分析：レビュー | 橋爪　光 | 茨城大学 |
| 14:40－15:00 | 月極域の水氷探査に向けた物質科学データの取得と装置への活用 | 鹿山雅裕 | 東北大学 |
| 座長 | 長岡　央(早稲田大学) | | |
| 15:10－15:30 | マイクロ波による地下探査：誘電率モデルと探査深度の検討 | 宮本英昭,<br>熊本篤志 | 東京大学<br>東北大学 |
| 15:30－15:50 | 月極域でのアクティブ地震探査：月土壌を模擬した環境における実験 | 辻　健,<br>川村太一 | 九州大学<br>国立天文台 |
| 15:50－16:10 | 月レゴリスによる資源・エネルギーその場利用(ISRU)研究 | 福中康博 | 早稲田大学 |
| 16:10－16:30 | 月の電磁場探査 | 野村麗子 | JAXA |
| 16:30－16:50 | 月レゴリスおよび水氷層の機械的・力学的特性を調査・計測するための技術 | 小林泰三 | 立命館大学 |
| 16:50－17:30 | 総合討論 | | |

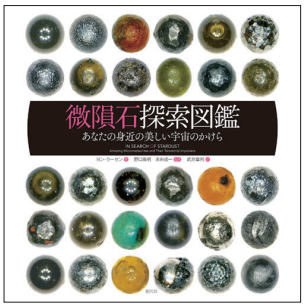
←目次へ



書評

# 微隕石探索図鑑：あなたの身近の美しい宇宙のかけら

ヨン・ラーセン(著)，野口高明(監修)，米田成一(監修)，武井摩利(翻訳)
創元社
2018年2月刊行　全152頁
ISBN：978-4-422-45003-2




岡崎 隆司[1]

本書評の依頼をいただきタイトルを伺ったときは，「これまた随分マニア向けのニッチな...」との印象を持った．私を含む地球外物質研究者は惑星科学において少数派であり微隕石研究はさらに少数派．そんな稀有な人々のためだけのものか，と．ところが本書表紙を飾るのはきれいな微粒子写真の数々．マニア以外を引き込めそうな雰囲気が．中を見ると，人工物にあふれた街中で微隕石を見つけるための情報が無数の写真で記されている．まず，“本物”の微隕石の起源とその特徴を記述し，その調査方法を研究者以外にもわかる平易な表現で解説している．次に，“偽物”の微隕石(地球起源微粒子)の特徴が系統的に詳細かつ簡便にまとめ上げられている．それらの情報は写真を中心にしており，実にわかりやすく気軽に楽しんで読み続けられる．我々微隕石研究者がどんなに熱弁を振るって微隕石の重要性などを説明してもほとんどの方は興味も関心も持たれないだろうが，本書を眺めるだけで不思議と好奇心が湧いてくる(気がする)．“偽物”である地球起源微粒子の情報もそれらの起源と特徴がまとめられており，我々研究者にとっても興味深い．しかし，本書本来の目的は著者自身の執筆動機であるように，研究者でない一般の人々が地球外物質に興味・関心を持ち，実際に手を動かして砂塵を様々な場所で採取し，自分たちの目で見て微隕石鑑定を行うきっかけとなることであろう．私も小・中学生に物質科学の面白さを伝えるきっかけに本書を使おうと思った．惜しむらくは，大学・研究機関以外では実体顕微鏡や電子顕微鏡を使用できる環境は極限られており，一般の方が本書を使って微隕石を発見するのは実際には不可能であると予想する．これらの装置を使わずしてハンドルーペ程度の器具やかんたんに自作できる器具で“微隕石探索“ができる方法を見出すことが次のステップか．そのためにも多くの方が本書を手にし，微隕石探索のための画期的アイディアを創出することを期待したい．

1. 九州大学大学院理学研究院
okazaki.ryuji.703@m.kyushu-u.ac.jp

←目次へ



# 2018年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ

2018年日本惑星科学会秋季講演会 実行委員長(旭川LOC) 関口 朋彦[1]

2018年日本惑星科学会秋季講演会は旭川市科学館サイパルにおいて開催します．本講演会は日本惑星科学会が主催し，旭川市科学館共催の下に開催されます．今年の秋季講演会では，口頭発表の講演時間確保を目的として，新たに「口頭発表付きポスター発表」という発表形式を試験的に導入します．詳しくは発表要項をご覧ください．まだ検討中の事項もございますが，以下は，2018年4月末時点での開催案内です．最新情報は随時，講演会ホームページ https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2018/ に掲載します．

## 1. 日程と会場

**●日　程**

2018年10月17日(水) – 10月19日(金)

10月18日(木)に総会と懇親会，および今年の最優秀研究者賞受賞講演会を予定しています．また，10月20日(土)に一般向け講演会を，旭川市科学館と共同で開催予定です．

**●会　場**

旭川市科学館サイパル

〒078-8329　北海道旭川市宮前1条3丁目3番32

(受付・講演会場は「学習・研修室」，ポスターセッションは「特別展示室」，いずれも1階)

http://www.city.asahikawa.hokkaido.jp/science/index.html

**●懇親会**

旭川市市民活動交流センター CoCoDe ホール棟にて，10月18日(木)18：30頃から行う予定です．北海道の地酒，生ビールサーバー，北海道スペシャルディナーを用意してお待ちしております。内容はオープンメーリングリスト oml にてお知らせする予定です．

http://www.city.asahikawa.hokkaido.jp/facility00/facility08/p006145.html

## 2. 発表要項

**●発表資格**

著者に本会の会員を含むこと．

**●発表形式とプログラム編成**

口頭発表，口頭発表付きポスター発表，またはポスター発表．申し込みは，「① ポスター発表希望」，「② 口頭発表付きポスター発表希望」，「③ 口頭発表またはポスター発表希望」，「④ 口頭発表または口頭発表付きポスター発表希望」，または「⑤ いずれでもよい」を選択して申し込んでいただく予定です．なお，第一著者としては①，②，⑤から1件まで，③，④，⑤から1件まで(合計2件まで)の申請とします．スペースが限られておりますので，同じテーマについて2件出すことはご遠慮ください(最優秀発表賞応募者は除く)．発表の採否，発表形式の決定，およびプログラム編成については，実行委員会が決定いたします．予めご了承ください．

**●口頭発表**

1講演につき12分前後(質疑応答も含む)を予定しています．スクリーンを1面，VGA液晶プロジェクタを一台利用可能です(アナログ RGB D-Sub15ピン)．

**●口頭発表つきポスター発表**

1講演につき3分間の口頭発表(機材は上記の口頭発表と同じ)とポスター発表(スペースと会場は下記のポスター発表と同じ)の両方の講演を行って頂きます．

1. 北海道教育大学旭川校
sekiguchi.tomohiko@a.hokkyodai.ac.jp

**●ポスター発表**

一人当たりのポスタースペースはA0用紙(841 mm × 1189 mm)を縦張りできるサイズを予定しています. ポスター会場は講演会場とエントランスホールを挟んだ特別展示室です.

**●最優秀発表賞セッション**

本講演において第一著者として発表する博士の学位を有していない学生会員は, 最優秀発表賞に応募できます. 最優秀発表賞セッションに採択された発表者には口頭発表(15分前後)とポスター発表の両方を行って頂きます. 別途定める今年の要領に従ってください. 詳細は本会メーリングリスト(oml)および本会ホームページ「2018年秋季講演会のお知らせ」でお知らせ致します.

**●予稿原稿**

本会ホームページに記載された指示に従ってください.

## 3. 参加および発表の申込み方法

本会ホームページの[参加/発表/予稿登録]よりお申込み下さい. 事前参加申し込み, 発表申し込みは, すべて本会ホームページ上で行います. これらの登録には, (1) 本会の会員番号もしくは非会員登録番号, (2) 本会ホームページに会員または非会員としてログインするためのパスワード, の両方が必要になります. 本会への新規入会登録および非会員登録も本会ホームページから行ってください. なお, 非会員登録には1日以上, 新規入会登録には2週間以上かかりますので, 発表申込みを予定されている非会員の方はできる限り早目に登録手続きを開始してください.

**郵便振替口座　振込先**

口座記号：19030
口座番号：45246921
(郵便局の払込請求書では受取人口座番号の記号と番号の間の欄は空白にする)
口座名称(漢字)：JSPS旭川LOC
口座名称(カナ)：ジェイエスピーエスアサヒカワエルオーシー

他銀行等からのお振込みの場合は以下をご利用下さい.
銀行名[金融機関コード]：ゆうちょ銀行[9900]
店名[店番]：九〇八(キユウゼロハチ)[908]
預金種目：普通預金
口座番号：4524692
申込みの詳細は, 本会メーリングリスト(oml)と本会ホームページでお知らせします.

## 4. 本秋季講演会までの主なスケジュール(予定)

2018年6月25日(月)
事前参加申込・発表申込・事前支払・予稿原稿の受付開始
2018年8月3日(金) 正午
発表申込(最優秀発表賞申込を含む)の受付締切, 最優秀発表賞申込者の予稿原稿の受付締切
2018年8月31日(金)
プログラム発表
2018年9月14日(金) 正午
予稿原稿(最優秀発表賞申込者を除く)の提出締切, 事前参加申込の受付締切, 事前支払の受付締切

## 5. 予稿集について

予稿集の冊子体での販売を行いません. 講演会に先立って本会ホームページにPDFを用意し, ダウンロードできるようにする予定です.

## 6. 参加費用

| 費用項目 | | 事前支払 | 当日支払 |
|---|---|---|---|
| 参加費 | 一般会員 | 3,000円 | 4,000円 |
| | 学生会員※1 | 2,000円 | 3,000円 |
| | 非会員※1 | 5,000円 | 6,000円 |
| 懇親会費 | 一般会員 | 5,000円 | 6,000円 |
| | 学生会員 | 3,500円 | 4,500円 |
| | 非会員 | 5,000円 | 6,000円 |

※1 非発表の学部生・M1に限り, 参加費を無料とします.

## 7. 交通手段・食事など

旭川市科学館サイパルはJR旭川駅から徒歩約25分の場所にあります. JR旭川駅からはタクシーの他, 旭川電気軌道バス(82番, 84番, 33番で「科学館前」下車)がご利用になれます. 旭川空港よりお越しの場合, 直通の空港連絡バス(「宮前通東」下車)がご利用になれます. 飲食店は会場周辺および南6条通りに複数ご

ざいます．旭川市科学館に隣接する旭川合同庁舎の食堂は平日にのみ利用可能です．宿泊施設はJR旭川駅周辺に多数あります．

## 8. 一般向け講演会の開催について

日　時：2018年10月20日(土)
場　所：旭川市科学館・サイパル
講　演：(1) 圦本尚義(北海道大学理学研究院・教授，宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所地球外物質研究グループ長)
題目：小惑星リュウグウに到着！ただいま観測中のはやぶさ2より
(2) 大野宗祐(千葉工業大学惑星探査研究センター・上席研究員)
題目：北海道大樹町で気球実験を行い地球生命圏の上端を探す：Biopauseプロジェクト
主　催：日本惑星科学会
共　催：旭川市科学館

## 9. その他

(1) 乳幼児を同伴され保育サービスのご利用を検討されている方は，下記までお早めにご相談ください．最寄りの保育施設などを紹介いたします．なお，保育費用の一部を学会が補助します．また，受付締切後も可能な範囲で対応いたしますので，お気軽にご連絡ください．なお，科学館には講演会場に隣接してベビーベッド等が設置された「ベビーコーナー」があり，ご自由にご利用いただけます．
受付締切：8月31日(金)
担当 e-mail : aloc@wakusei.jp
(2) 会場にWi-Fi設備はございません．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．
(3) このお知らせの内容は変更される可能性があります．本会ホームページで最新の情報をご確認下さい．

**会場：旭川市科学館サイパルの1階平面図**

←目次へ



# 2018年度助成事業2件公募のご案内

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は宇宙科学分野における学術振興を目指し，2018年度も引き続き下記の助成事業を行います．それぞれの応募要項の詳細は当財団のホームページ：http://www.spss.or.jp　に掲載しています．それぞれの公募に対する応募申請に際してはホームページご参照の上，申請書をダウンロード・作成いただき必要な書類を添付の上，財団宛に電子メール(admin@spss.or.jp)で申請下さい．奮ってご応募いただくようご案内申し上げます．

## (1) 国際学会出席旅費の支援

**●支援対象**

宇宙理学(地上観測を除く)および宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する独創的・先端的な研究活動を行っている若手研究者(当該年度4月2日で35歳以下)，またはシニアの研究者(当該年度4月2日で63歳以上かつ定年退職した者)で，国際研究集会で論文発表または主要な役割などが原則として確定している者．

**●助成金額・件数**：一件あたり10～30万円程度，年間10件程度

**●申し込み受付時期**

**応募締切り2018年8月31日**：
2018年10月1日～2019年3月31日の間に開催初日が予定される学会対象

**応募締切り2019年2月28日**：
2019年4月1日～2019年9月30日の間に開催初日が予定される学会対象

## (2) 国際学会開催の支援

**●支援対象**

宇宙科学研究を推進している国内の学術団体(研究所，大学等)で，宇宙理学(地上観測を除く)及び宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する国際学会，国際研究集会の国内開催を主催しようとする団体．

**●助成金額・件数**：一件あたり30～50万円程度，年間3～5件程度

**●申し込み受付時期**

**応募締切り2018年8月31日**：
2018年10月1日～2019年3月31日の間に開催初日が予定される学会対象

**応募締切り2019年2月28日**：
2019年4月1日～2019年9月30日の間に開催初日が予定される学会対象

**●照会先**

公益財団法人宇宙科学振興会事務局
http://www.spss.or.jp
〒252-5210　神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1
Email : admin@spss.or.jp
Tel : 042-751-1126

1. 公益財団法人宇宙科学振興会 事務局
admin@spss.or.jp

←目次へ



# 学位論文タイトル紹介

惑星科学関連分野にて博士号または修士号を近年取得された会員の研究内容を学会員に広く知ってもらう目的で，論文タイトルを掲載いたします．項目は，(1)氏名，(2)論文タイトル(現題名)，(3)論文タイトル(和訳名)，(4)論文提出時の所属，(5)学位取得年・月，(6)次の所属，の順です．希望者は，論文の結果を最もよく表す図を1枚掲載できます．

この記事に関するお問い合わせは編集長(chiefeditor@wakusei.jp)までお願いいたします．

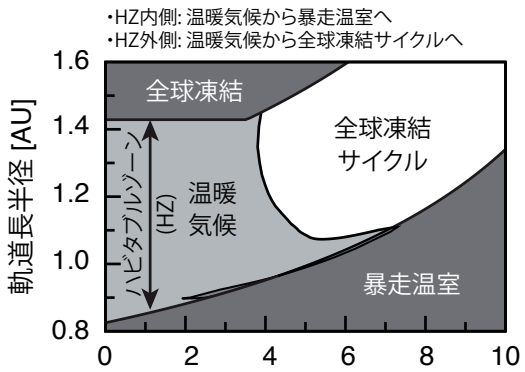
※毎年6月号に，過去3年まで遡って掲載可能．投稿方法等はomlにて案内いたします(2月頃)．

## 博士論文

(1) **桑原 秀治**(くわはら ひではる)
(2) An experimental study on chlorine partitioning in the Earth during core formation
(3) 核形成期の地球における塩素分配に関する実験的研究
(4) 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻
(5) 2016年6月
(6) 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

---

(1) **門屋 辰太郎**(かどや しんたろう)
(2) Theoretical study on diversity and evolution of climate of Earth-like planets in habitable zone
(3) ハビタブルゾーンにおける地球類似惑星の気候の多様性及び進化に関する理論的研究
(4) 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
(5) 2017年3月
(6) University of Washington




## 修士論文

(1) **辰馬 未沙子**(たつうま みさこ)
(2) Gravitational Instability of a Dust Layer Composed of Porous Silicate Dust Aggregates in a Protoplanetary Disk
(3) 原始惑星系円盤中の多孔質ケイ酸塩ダスト集合体で構成されるダスト層の重力不安定性
(4) 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
(5) 2018年3月
(6) 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程

←目次へ



# JSPS Information

◇日本惑星科学会第125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125回運営委員会議事録

日　　時：4/16(月)　17：00－19：00
運営委員会委員：
出 席 者　15名
荒川 政彦，倉本 圭，中本 泰史，中村 昭子，渡邊 誠一郎，千秋 博紀，和田 浩二，田近 英一，
諸田 智克，平田 成，はしもと じょーじ，寺田 直樹，佐伯 和人，上野 宗孝，藪田 ひかる
欠席 8名
生駒 大洋，林 祥介，竹広 真一，中島 健介，田中 智，中村 智樹，小久保 英一郎，橘 省吾
(委任状：議長7通)

**議題・報告事項：**

**1．シニア会員制度について**
・中村将来計画専門委員長より，サービスなし管理コストなしのシニア会員制度の検討について報告があった．
・選挙権，被選挙権の権利をどうするか，更新方法をどうするか，などの問題が提起された．
・実際には名簿管理などもあり管理コストがゼロにならないのではないか．イーサイドとの交渉が必要ではないか，との意見がでた．
・財務専門委員会からイーサイドとの契約形態を確認する．
・選挙権，被選挙権の有無について，検討が必要である．選挙権，被選挙権がなくても会則上，会長選出で運営委員になることは可能．
・情報化専門委員会でシステム上，選挙権，被選挙権がない会員をつくることが可能かを検討する．
・5月の総会で意見を徴収するために，次回運営委員会で再度議論する．

**2．会員種別について**
・非会員登録の自動化について，システム上改修が必要であることが確認された．
・非会員登録は現状の認証方法で継続する．
・入退会ページを更新する．準会員の記載の削除，PDの記載の修正を行う．非会員申請の「運営委員会での承認」は残す．

**3．運営委員の改選について**

・役員選挙規定案に関して，前回の運営委員会以降，意見はなかった．
・第16条の「リスト」→「名簿」に変更する．
・役員選挙規定を総会で承認をえることとする．

**4．夢ロードマップへの対応について**

・田近委員より説明があった．
・地球惑星科学連合の宇宙惑星科学セクションで今年の年末くらいを目処にまとめる予定である．
・大型研究計画は夢ロードマップ上に位置付けられるものである．

**5． 地球惑星科学分野大型研究計画について**

・倉本委員より説明があった．
・惑星科学会からコンソーシアム構想を提案し，学術会議のマスタープランとなっている．
・3月にヒアリングが行われた．

**6．作業部会の設置と部会長の選出について**

・会長より夢ロードマップ作成のための作業部会，将来構想検討作業部会の設置が提案され，承認された．
・会長より部会長は中本委員が選出され，承認された．
・5月の運営委員会までに委員の選出を行う．

**7．国際宇宙探査専門委員会について**

・月極域科学探査タスクフォースの活動について説明があった．
・国際宇宙探査専門委員会の中間報告について説明があった．

**8．その他**

・EPS，PEPSの今年度の科研費は不採択であった．
・学会ホームページのトップページの記載が古いものがある．倉本委員が文案を作成する．
・賛助会員のロゴなどをホームページで掲載できないか情報化専門委員会で検討する．
・RFI回答文書改訂作業部会は3月末で解散した．

## ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2018年6月25日までに，賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです．社名等を掲載し，敬意と感謝の意を表します．（五十音順）

有限会社テラパブ
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．

## 2018/10

**10/17-10/19　日本惑星科学会 秋季講演会**
(a)旭川市科学館，北海道旭川市
(b)日本惑星科学会

## 2019/06

**6/15-6/21　第32回宇宙技術および科学の国際シンポジウム**
(a)愛媛県松山市
(b)31st ISTS Organizing Committee
(c)http://www.ists.or.jp

# 編集後記

私の所属する高専では，来年度開講予定の「地学」を誰が教えるか問題が生じています．高専機構が地学（半期，1コマ）の必修化を決めたためで，ほぼ全ての高専で似たような問題が発生しているのではないかと思います．この問題に巻き込まれる中で，改めて，小中学校と大学との間での地学教育の空白を感じました．高校相当では地学を教えられる教員が居ないですし，意外とその事実が知られていないですね．島根大学の教育学部の教授に教えて貰ったところ，島根県の高校では教員で地学採用はゼロで，松江市の高校を約20年前に退職された教員が地学としての最後だったそうです．高校でどうしても地学を教えねばならない場合は，物理や化学の教員が担当しているそうです．私の所属する高専の教務担当は，「高校教員（退職教員）を非常勤教員として確保できるでしょ」とお気楽にのんびり構えていたのですが，状況をやっと理解して青くなっています．現在は高専を退職された一般科（物理）の教員にお願いする方向で話が進んでいますが，なかなか収束しなさそうです．

さて，話しを変えまして，今号に掲載されている「学位論文紹介ページ」ですが，紹介タイトルが3件とちょっと寂しい感じでした．このページは毎年6月号において，惑星科学関連分野にて博士号もしくは修士号を取得された会員の博士・修士論文タイトルを紹介するものです．他の学会誌には無い特徴として画像を1枚掲載できます．今年度に博士論文・修士論文を提出される方は，来年度の6月号におけるタイトル掲載を是非ご検討ください．また，過去3年まで遡って掲載できますので，今回載せ忘れてしまったという方も是非ともよろしくお願いいたします．

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]
生駒 大洋，上椙 真之，岡崎 隆司，奥地 拓生，木村 勇気，黒澤 耕介，小久保 英一郎，白石 浩章，関口 朋彦，瀧川 晶，田中 秀和，谷川 享行，成田 憲保，はしもと じょーじ，本田 親寿，三浦 均，諸田 智克，山本 聡，渡部 潤一

2018年6月25日発行

日本惑星科学会誌　遊・星・人　第27巻　第2号

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています．
複写される方へ
本誌に掲載された著作物を個人的な使用の目的以外で複写したい方は，著作権者から複写等の行使の依託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい．
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会
TEL : 03-3475-5618／FAX : 03-3475-5619
e-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp
著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は，直接日本惑星科学会へご連絡下さい．