

### 宇宙理工学の期待を乗せて

X線分光撮像衛星 (XRISM) 及び小型月着陸実証機 (SLIM) は、H-IIA ロケット47号機により、種子島宇宙センターから2023年9月7日8時42分11秒(日本標準時)に打ち上げられました。ロケットは計画通り飛行し、XRISMとSLIMはロケットから正常に分離された事を確認しました。XRISM、SLIMの現状は10月号で詳しくお伝えいたします。



The Forefront of Space Science

宇宙  
科学  
最前線

## 迫れ、あかつきの星! (4)

～金星探査機「あかつき」の電波掩蔽<sup>えんぺい</sup>は何をしてきたのか?～

東京大学 新領域創成科学研究科教授 今村 剛(いまむら たけし)

### はじめに～不安の中のスタート

2015年12月、「あかつき」は金星の衛星となりました。もともと2010年に到着するはずでしたが、金星軌道投入の最中に軌道制御スラスタが破損し、その後5年間にわたって太陽を周回したあと、姿勢変更スラスタを使って改めて軌道投入したのでした。5年越しの夢の達成にチームは大いに沸き、待ちに待った金星観測を開始しました。ただ、このとき私は電波掩蔽(えんぺい)チームの取りまとめ役として不安も抱えていました。「あかつき」の金星を巡る軌道周期が10.5日と、当初予定の30時間から長くなってしまったのです。

電波掩蔽というのは、探査機が惑星の反対側に隠れるときと出てくるとき、探査機から送信される電波が惑星の大気を通過して地上局に達する際に受信電波の周波数が変化することを利用して惑星大気の構造を調べるという観測手法です(図1)。大気中で電波が屈折すると、軌道運動に伴って地上局で観測されるドップラーシフトが、屈折がないときの大きさからずれます。この時間変化を記録して、計算により屈折率の高度変化を求めることができるのです。それを基にさらに大気密度、気圧、気温、電子密度を知ることができます。電波掩蔽は1978～1992年に運用された米国の金星周回機Pioneer Venus Orbiterや2006～2014年に運用された欧州の金星周回

機Venus Expressなど過去の金星探査でも実施されましたが、「あかつき」の電波掩蔽は、高速大気循環「スーパーローテーション」の駆動に関わるかもしれない、周期が数日の大気波動のカメラ群による観測と連携して実施する点にユニークな狙いがありました。ただ、軌道周期が長くなると電波掩蔽の発生頻度も大きく下がってしまうことになるので、予定していた研究の実施は難しい状況です。「本当にこれまででない成果を出せるのか?」と自問しながらの観測スタートでした。電波掩蔽での地上での受信に協力してくれるインドとドイツの研究グループに対する気遣いもありました。ただ、実際には以下に述べるような「あかつき」電波掩蔽ならではの長と新たな挑戦によって、ユニークな成果を生み続けることができている。

### 赤道周回軌道からの観測

「あかつき」が投入された軌道は雲の連続撮像に最適化した赤道軌道で、これは過去の金星ミッションが極軌道を採用していたのとは異なります。例えば、Venus Expressは極軌道だったため良質な電波掩蔽データは金星の高緯度の領域に偏っていました。これに対して「あかつき」は赤道軌道にいて低緯度領域の観測に有利です。この違いを活かして、「あかつき」電波掩蔽は「熱潮汐波」という低緯度でとくに大きな振幅を持つ惑星規模の波動をうまく検出することができました。この波は金

①「迫れ、あかつきの星! (1)」は2020年9月号 [https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews474.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews474.pdf)

②は2021年10月号 [https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews487.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews487.pdf)

③は2022年8月号 [https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews497.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews497.pdf)に掲載しています。

星の雲が太陽光によって暖められることによって励起され、上下方向と高緯度方向へ伝播することにより、あのスーパーローテーションを維持している可能性が分かってきました。熱潮汐波は金星の地表から見たときの周期が1太陽日(117日)と確定しているために、様々な大気変動を含むデータからこの波だけを抽出することが比較的容易で、電波掩蔽の観測頻度が低下することが障害とならないことも、観測してみて実際にわかりました。現在、熱潮汐波の構造とスーパーローテーションへの寄与についての観測結果を公表する準備を進めています。

低緯度帯をカバーする「あかつき」にVenus Expressの相補的な高緯度帯の電波掩蔽観測データを組み合わせると、気温の平均的な緯度-高度分布(子午面分布)をこれまででない精度で求めることができ、緯度によって温度構造が大きく異なることも明らかにできました(Ando et al. 2020)。低緯度に比べて高緯度で対流不安定層が厚いなど、まだ理論的に説明できない特徴が見られています。「あかつき」の観測データを加えることで初めて得られた温度分布は、参照データとして金星大気循環のシミュレーションで再現する目標となっています。

太陽直下点付近の電波掩蔽データが初めて得られたことも「あかつき」による低緯度観測の結果として注目に値します。電離圏の構造を理解する上で、太陽紫外線による大気電離のためにプラズマ(電離ガス)生成が最大となる太陽直下点付近は重要な領域ですが、「あかつき」以前の衛星による電波掩蔽ではこの領域の観測ができませんでした。「あかつき」の観測はこの欠けていたデータを埋め、電離圏研究にも貴重な情報をもたらしています。

## 超高安定発振器と新たな解析手法

電波掩蔽では周波数の安定した電波を送信する必要があります。このために、「あかつき」では超高安定発振器(Ultra-Stable Oscillator: USO)を搭載しました。電波掩蔽の方法としては、USOを使わずに地上局から周波数の安定した電波を送信し、探査機でそれを折り返して送信電波に使用するという手もあります。しかし、この場合、探査機が惑星の背後から出てくるときには、探査機から信号が折り返されてくるのに手間がかかってしまい遅れる分、データが欠損します。往復で電波が金星大気の別の場所を通過するため解析が困難になるという問題も起きます。このようにUSOは有利ですが、これまでにUSOを搭載した金星探査機はVenus Expressと「あかつき」だけです。また、「あかつき」ではそれに加えて、USOだからこそ可能になる新たな解析手法を採用しました。

これは打上げ前には想定していなかったことです。これまでの電波掩蔽では、各瞬間の受信周波数から電波の経路を逆算して決定するために、各瞬間に探査機と地上局を結ぶ電波の経路はただ1つとみなします(幾何光学解法)。この仮定から2つの問題が生じます。1つめは「マルチパス」と呼ばれる、実際には1つでなく異なる経路を通過してきた複数の電波が同時に受信される問題です。これは大気中に局所的に大きな屈折率変化が存在すると起こりがちで、起きてしまうと解析の精度を著しく損ないます。2つめは高度分解能の問題です。電波の経路はフレネル直径と呼ばれる太さを持ち、惑星大気の電波掩蔽の場合にその大きさは500m~1kmほどで、これより細かい構造は検出できないはずでした。これに対して私たちは、マルチパスの問題へ対処しながら、高度分解能を改善

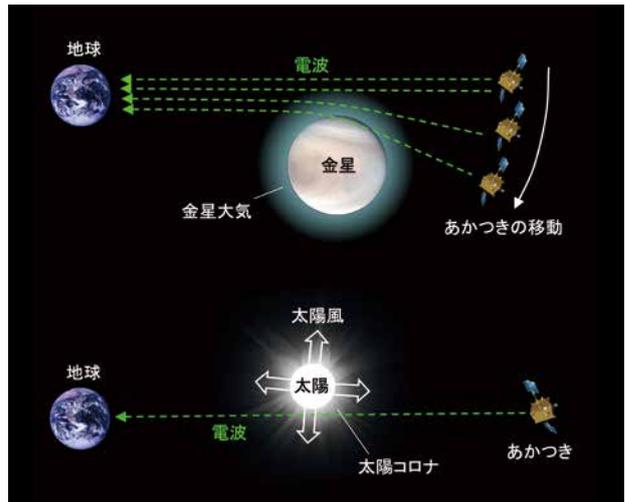


図1:「あかつき」電波掩蔽の概念図。上は金星大気観測、下は太陽コロナ観測の様子を描く。

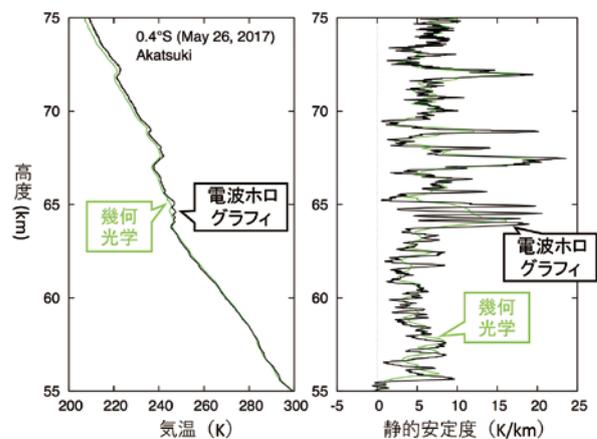


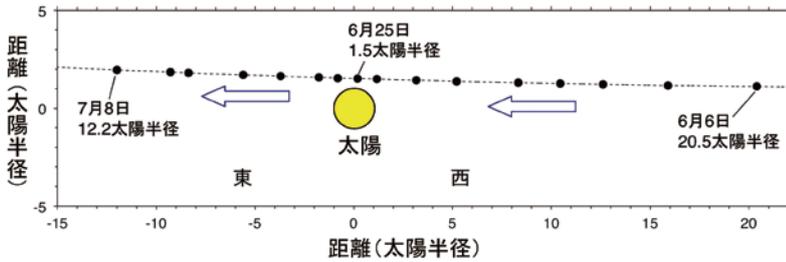
図2:「あかつき」電波掩蔽による金星成層圏の温度分布(左)と静的安定度(右)の幾何光学解法と電波ホログラフィ法の違い。温度分布はどちらの方法によっても同じような結果が得られている。しかし、静的安定度のグラフに見られる大気重力波によると考えられる細かな振動構造の結果には違いが明らかである。静的安定度が正の値を示すと大気は上下方向に安定で、ゼロに近づくほど不安定となり対流が生じる。電波ホログラフィ法による解析結果(黒線)では静的安定度がゼロに近い、大気重力波の砕波で作られた対流層と考えられる狭い高度幅の領域が多く見られるのに対し、高度の分解能が粗い幾何光学解法では不明瞭にしかそのような構造が分からない。(Imamura et al. 2018 を改変)

できる新手法「電波ホログラフィ」を導入しました。これはマルチパスも含めて時系列に観測される信号全体の位相を同時に解析するもので、「あかつき」のようにUSOを使って初めて可能となる手法です。記録装置として臼田宇宙空間観測所のVLBI用設備を用いていることも、高品質な位相データを得るために重要でした。こうして私たちは、およそ100mという前例のない分解能を達成することができ、金星大気には鉛直波長が1km以下の小規模な大気重力波(浮力を復元力とする大気波動)が満ちていること、そしてそれらがそら中で不安定を起こして砕波していることの発見へ繋がりました(図2)。激しく乱れた金星大気の描像が得られつつあります。

## もう一つの柱:太陽コロナ観測

金星到着が遅れることになったとき、私たちは金星周回軌道に入らなくても実施可能な観測である太陽コロナの電波掩蔽にも本格的に取り組むことにしました。太陽コロナとは太陽周辺に広がる100万℃を超える高温プラズマで、コロナが惑星

2011年の外合における地球から見た「あかつき」の動き

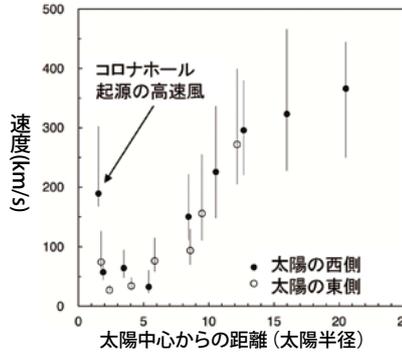


「ひので」によるX線画像



図3:2011年に実施した太陽コロナの電波掩蔽における、地球から見た太陽に対する「あかつき」の観測実施日ごとの方向(上)、期間中に取得した「ひので」XRT画像の一例(中)、観測で得られた太陽風速度の距離についての分布から分かる「遅い太陽風」と「速い太陽風」(下)。(Imamura et al. 2014を改変)

太陽風の加速の様子



間空間に吹き出して太陽風となります。コロナがどのように加熱され、太陽風がどのように加速されるのかはよく分かっておらず、太陽系科学の大きな謎とされています。探査機が地球から見て太陽のほぼ反対側を通過する「外合」の際、探査機から地上局に送られる電波は太陽コロナを通過し、電波経路上のプラズマの変動が受信電波の周波数や強度を変化させます(図1)。これを分析することでコロナの様々な情報が得られます。「あかつき」では、金星到着後も含め、継続して電波掩蔽を用いた太陽コロナ観測を行ってきました。このような電波掩蔽を利用した長期の太陽コロナ観測は前例がありません。

2011年の外合前後に1ヶ月間にわたって断続的に実施した最初の観測では、太陽近傍から約20太陽半径(1太陽半径=約70万km)までの領域をカバーして、太陽風がほぼ静止状態から350km/sまで加速される様子をとらえました(図3)。太陽観測衛星「ひので」と連携して、電波掩蔽でとらえた太陽風とその流れの源の対応関係を調べ、おおむね「静穏領域」を起源とする「遅い太陽風」を観測したことで、その中に間欠的にコロナホール起源の「速い太陽風」もとらえたことがわかりました(Imamura et al. 2014)。磁気音波と思われる密度振動を広い範囲で観測し、これらがコロナ加熱に関わっているらしいことも示しました(Miyamoto et al. 2014)。コロナ質量放出という突発事象もとらえ、その内部構造を調べることができました(Ando et al. 2015)。当初予定しなかったこのような観測が多くの成果を生み出し、内部太陽圏コミュニティでの「あかつき」の知名度が上がってその後の様々な国際共同研究につながりました。

その後、金星到着までの4年間は、金星周回軌道への再投入を目指して探査機の劣化や燃料消費を抑えるために観測を休み、軌道投入後の2016年の外合から太陽コロナ観測を再開しました。2016年の観測では「速い太陽風」と「遅い太陽風」の違いを詳しく調べ、磁気音波のエネルギー流束が前者においてより大きいことを示しました(Chiba et al. 2022)。これは太陽風のメカニズムの手がかりとなる成果です。

金星到着後は約一年半ごとの外合のたびに太陽コロナ観測を

実施しています。太陽コロナの電波掩蔽をこれほど繰り返し実施したミッションは他になく、太陽活動の11年サイクルをほぼカバーするデータセットとして貴重なものとなっています。2016年からは、コロナ磁場の影響で電波の偏波面が変化する「ファラデー回転」の検出のために、地上局で右円偏波と左円偏波を同時に記録しています。「あかつき」はその通信のために右円偏波を送信していますが、設計上、わずかに左円偏波も混入します。このことを利用して両円偏波の観測を行い、磁場情報を得ることによって、光球からコロナへエネルギーを供給することが予想されるアルヴェン波やコロナ質量放出の磁場構造を調べています。2021年の外合では、偶然にも水星への往路にあるBepiColomboが「あかつき」とほぼ同時に外合を迎えました。BepiColomboには、太陽重力場が電波伝播に与える影響を調べることで相対論の検証を目指す電波科学チームがいます。そこで、この貴重な機会を活用すべく両プロジェクト間で調整して、2機による

同時掩蔽観測を実施しました。データ解析が複数のグループで進められており、一部の成果はすでに発表されています。

これからの電波掩蔽観測

電波掩蔽は歴史ある観測手法ですが、上に紹介したように「あかつき」では、新たな工夫によって様々な成果が生まれています。このことは、将来のミッションに向けてまだまだ新たな展開が可能であることを示唆するように思えます。たとえば、地上局で受信するという制約を外し、惑星を周回する複数の小型衛星の間で電波掩蔽を行えば、観測機会が劇的に増加して「あかつき」とは質的に異なる大気研究が可能となるでしょう。これまで用いてきた周波数とは大きく異なる周波数を使うことによって大気組成の情報を得ることも考えられます。基礎開発が進んでいる、USOを遙かに超える安定度の発振器を搭載すれば、より高い高度の希薄な大気まで観測できるでしょう。「あかつき」の成果を受けて、小型衛星群による多点コロナ掩蔽観測といった構想もありえます。太陽系科学の推進力の1つとして、電波掩蔽には大いに発展の余地があると考えています。

参考文献:

[1] Imamura, T. et al. (2018) Fine vertical structures at the cloud heights of Venus revealed by radio holographic analysis of Venus Express and Akatsuki radio occultation data. *J. Geophys. Res.*, 123, 2151-2161.  
 [2] Ando, H. et al. (2020) Thermal structure of the Venusian atmosphere from the sub-cloud region to the mesosphere as observed by radio occultation. *Sci. Rep.* 10: 3448.  
 [3] Imamura, T. et al. (2014) Outflow structure of the quiet Sun corona probed by spacecraft radio scintillations in strong scattering. *Astrophys. J.*, 788, 117 (10 pp).  
 [4] Miyamoto, M. et al. (2014) Radial distribution of compressive waves in the solar corona revealed by Akatsuki radio occultation observations. *Astrophys. J.*, 797, 51 (7 pp).  
 [5] Ando, H. et al. (2015) Internal structure of a coronal mass ejection revealed by Akatsuki radio occultation observations. *J. Geophys. Res.*, 120, 5318-5328.  
 [6] Chiba, S. et al. (2022). Observation of the Solar Corona Using Radio Scintillation with the Akatsuki Spacecraft: Difference Between Fast and Slow Wind. *Solar Physics*. 297.

## JASMINE Consortium Meeting 2023開催

8月1日と8月2日に国立天文台で2023年のJASMINE Consortium Meetingが開催されました。このミーティングは、世界初の赤外線による位置天文観測衛星「JASMINE」をより魅力的な計画にするため、幅広いサイエンスコミュニティと議論を深める場として2020年より毎年開催してきました。ハイブリッド開催となった今回は、現地には40人近く、リモートも含めると約90人が参加する盛況な会議となりました。JASMINE計画の進捗状況を報告し、広範なコミュニティからの研究テーマの提案や議論の場として重要な役割を果たしています。

JASMINEは、JAXA宇宙科学研究所の公募型小型3号機として選定された衛星計画です。銀河系中心の星々の精密な位置・速度測定を通じて棒状構造（バー）のなりたちを明らかにする銀河系中心考古学（ISASニュース2019年11月号参照<sup>\*1</sup>）の探求、生命居住可能領域にあって地球に似た系外惑星の探査（ISASニュース2021年12月号参照<sup>\*2</sup>）など、多岐にわたる科学的目標を追求します。打上げを目指して検討を精力的に進めています。

初日にはJASMINEのミッション概要に加えて、望遠鏡や検出器の開発状況、データ解析の検討状況などが紹介されました。続いて銀河系中心領域のサイエンスや関連の深い計画（JEDI<sup>\*3</sup>、Roman<sup>\*4</sup>、PRIME<sup>\*5</sup>）との相互連携についての議論が行われました。2日目には褐色矮星・系外惑星をテーマとした講演がおこなわれました。JASMINEの位置天文測定や高精度測光を活かした新しい



1日目の現地参加者たちによる集合写真。多くの参加者が集まり会議を盛り上げました。

サイエンスに加えて、同時期に打上げを目指しているLAPYUTA<sup>\*6</sup>やAriel<sup>\*7</sup>も紹介され、これらのミッションとの協力もサイエンスの幅を広げる可能性として議論されました。また、両日とも最後のセッションにディスカッションの時間を設け、PRIMEへの期待やRomanの行う位置天文観測との関係性、より高精度の測光を実現することで可能になるサイエンスへの期待などが話題になりました。

JASMINE Consortium Meeting 2023は、これまで以上に幅広い専門分野からの参加者を得て、JASMINEの新たな展望を開拓する場となりました。今後も JASMINE の価値がコミュニティにとって最大限高まるよう、継続的な活動を展開していく意向です。

（国立天文台 JASMINE プロジェクト助教 大澤 亮）

\*1 [https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews464.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews464.pdf) \*2 [https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews489.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews489.pdf)  
\*3 JEDI: 検出中の広帯域 X 線天文ミッション \*4 Nancy Grace Roman Space Telescope \*5 PRIME-focus Infrared Microlensing Experiment  
\*6 Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly \*7 Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey

## あきる野実験施設近況:理学、工学の様々な実験が行われています

あきる野実験施設では、耐爆実験室を活用して1ヶ月に1回程度各種実験を実施しています。皆さんのあきる野実験施設の利用検討の参考として最近の実験を紹介します。まず、2023年7月から8月にかけて実施されていた実験は、「模擬太陽系外惑星大気の生成と高分散分光による特性測定実験」でした。この実験は、高温の可燃性ガスを扱う実験であるため、耐爆設備を有するあきる野実験施設で実施されました。実験ではガラスチューブ内に封入された水素、ヘリウム、メタンの混合ガスを1000K（727℃）まで電気炉で加熱し、高温になった封入ガスの分光スペクトルを測定します。この分光スペクトルと観測された惑星の分



LTP-135 固体ロケットモータ地上燃焼試験。

光スペクトルを比較することで、惑星質量の高精度な推定が可能になるそうです。実験データは宇宙研で検討されているAriel、Roman、Lapyutaの衛星計画でも活用することを目指しているとのこと。

4月から5月にかけては、「LTP-135固体ロケットモータ地上燃焼試験」が実施されました。これまで熱硬化性樹脂を使用していた固体ロケット燃料の結合材を低融点の熱可塑性樹脂に置き代える実験です（新しい固体ロケット燃料についてはISASニュース2020年10月号<sup>\*</sup>の森田 泰弘教授の記事も参照ください）。今回は、熱可塑性樹脂を用いた7.5kgの新しい固体ロケット燃料を充填したロケットモーターの燃焼試験を2回実施しました。耐爆実験室は、30kg以下の固体ロケット燃料の燃焼試験に対応した耐爆設計になっており、小規模な燃焼実験に適しています。

また、昨年は火星衛星探査計画（MMX）のサンプルリターンカプセルの背面ヒートシールド放出試験が実施されました。本試験は、相模原キャンパスの構造機能試験棟での試験期間が十分に確保できないことも1つの理由となり、あきる野実験施設で実施されました。耐爆実験室は天井の高さが12m、床面積は260m<sup>2</sup>あり、燃焼試験だけではなく、他の様々な試験も実施可能です。あきる野実験施設の利用については、あきる野実験施設（所長：後藤 健、施設保安主任：田口 鉄也）までお気軽にご相談ください。（あきる野実験施設：後藤 健）

\* [https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews475.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews475.pdf)

## のしろ銀河フェスティバルが開催されました

ISASニュース2023年8月号でお伝えしたとおり、7月14日に能代ロケット実験場（NTC）の真空燃焼試験棟においてロケット燃焼試験中の異常による火災事故が発生しました。その後、NTCでは予定されていた実験やイベントをいったん中止し、まず二次災害の防止を目的として緊急安全化工事を実施しました。このような状況の中、例年8月開催の、のしろ銀河フェスティバルでの実験場特別公開のイベントの実施も懸念されましたが、予定通り8月19日と20日の2日間に無事開催し、500名を超える大勢の方々に来場いただき、NTC職員一同大変感謝しております。今年は、NTCと能代市の連携をアピールすべく例年以上に力を入れて、NTCキャラクター「えきすいちゃん」の初公開やイベントに関連するNFT(Non-Fungible Token)の発行、能代市VTuber「そらいろ宙彩しろん」さんとのコラボイベントなど、新たにデジタルコンテンツも企画準備してPRしました。また、昨年に引き続き燃焼実験デモや月面ローバー実物を使ったデモも行い、幅広い年



能代ロケット実験場の特別公開の様子（左：真空燃焼試験棟の公開、右：宇宙学校スペシャル）。



代の方々に楽しんでいただくことができました。事故後初公開した損壊した真空燃焼試験棟では、ロケットの勉強をしている大学生が職員の解説に熱心に耳を傾けていました。大勢の方々から真空燃焼試験棟の早期復旧に向けて応援のお言葉をいただきました。火災事故は残念でしたが、引き続きご支援にしていきたいと考えています。（小林 弘明）

### 解説

## 打上げ時刻は秒単位？ 軌道力学の観点から

ロケットの打上げ時刻はなぜ秒単位で決まるのか？という質問を時々受けることがあります。歴戦の宇宙科学ミッションの研究者の方でも、専門外だと、こういった疑問を抱く方は多いようで、“ちゃんと考えればわかるけれどプロなら考えさせなくてもわかる説明をしてみる！”てな調子で軌道屋さんに挑んでくることもあったりなかったり。

そこでこの短いコラムで、この辺りの事情の説明を試みようと思います。基本原理は

[a]地球は自転している

[b]宇宙機の軌道は中心天体を含み慣性空間に固定した平面内の運動である

[c]軌道面変更は（燃料的に）高くつくので基本的に行わない

の3つだけです。原理[c]を外すとんでもありになるので、以下の議論で[c]は疑わずに守ることにしましょう。宇宙機のある地球周りの軌道面に乗せることを考えます。その軌道面は原理[b]により慣性空間に固定されています。他方で、地球は原理[a]により回転していますから、地表に固定された発射場は目標軌道面を1日に2回よぎることになります。よぎったタイミングが打上げ時刻になります。通常、2つのタイミングのうち1つは方位が適さない（北や陸方向への打上げになる）ため、一意に、つまり秒単位で時刻が決まることになるのです。ひとたび所望の軌道面に乗せられれば、その周回軌道（面内運動）の位相調整は小さな噴射で実現可能です。

あれ？ではどんなミッションでも打上げは秒単位で決まるの？それは歴史に反するぞ、と思われた方、ご明察です。上述の説明の穴はどこにあるかという「軌道面が一意に決まれば」という前提がついている点です。では軌道面はどんなミッションでも一意でしょうか？

軌道面の向きは「軌道傾斜角( $i$ )」と「昇交点赤経( $\Omega$ )」という2つの角度で定義されます。先ほどの議論から、この2つの量をどちらも縛るミッションの打上げ時刻は一意に決まる、と言えます。具体的には、太陽同期軌道ミッションや、既に軌道面上に存在する物体へ会合するようなミッションの場合がそうです（たとえばISSへのドッキング等）。逆にしか縛らなくてよいミッションならば打上げ時刻は自由です（例えばLEO周回の望遠鏡ミッション、LEO周回そのものを目的とするスペースシャトル等）。ミッションが複雑化している昨今、日照条件や局アサインなどの非軌道力学的な制約から、軌道面に自由度が残らないミッションが実際には殆どですが、歴史的には発射秒時に幅があるミッションは海外にも日本にもたくさんありましたね。

次に、月惑星ミッションの場合は、また別の事情があります。地球からの打出し方向（＝「脱出漸近線」と言う）が重要なのですが、脱出漸近線を包含する軌道面は無数に作れます（線を包含する面は $360^\circ$ の任意性がありますね）。じゃあ打上げ時刻は自由ではないか？となる訳ですが、実際には月惑星ミッションの場合、地球の自転を軌道速度に転嫁するために打上げ方位を真東にするのが定石です。そうすると上述のを固定することになるので、結果として $\Omega$ も一意に決まり、打上げ時刻は秒単位で決まるのです。

アポロ（サターンV）は月へ行くのに打上げ時刻に幅があったよね？と歴史を覚えている方はご記憶の通りです。アポロの場合は、打上げ方位を真東ではなく幅を持たせることで、1日当たり4時間のランチウィンドウを確保していました。有人ミッションならではですね（こうするとロケットの打上げシーケンスをたくさん作る必要があるの、打上げ能力的にもお値段的にもとても高くつきます。低コストを標榜する無人ミッションには全く向かないのでご注意ください。（津田 雄一）

# 連載 第3回 SLIM the Moon Sniper

降りられるところから、降りたいところへ

## SLIMの構造系

今回はSLIMの構造系についてです。早速ですが、SLIMがどういった構造をしているのか、実機ではMLI (Multilayer Insulation、多層膜断熱材)と呼ばれる金色の断熱材に隠れて見えなくなっている部分も含めて概要を紹介します。図1に示すのが、打上げ形態でのSLIM構造の外観です。MLIを省いて構造を見やすくしています。若干ややこしいですが、本来SLIMの上下はメインエンジンが下であり、図1のSLIMはひっくり返った状態です。ですが、構造系は主にロケット搭載状態である図1の向きで考えることが多く、ここでもその視点から説明させていただきます。

図1で機体の下端にあるロケット結合リングがロケットとの結合部です。そこからPAF (Payload Attach Fitting) リングと呼ばれる円錐状の部材により中央にある大きな推進タンクへとつながります。なお、PAFとは積載物取り付け金具という意味で、よくロケットの部品について使われる略称です。その由来からして積載物側のSLIMの部品にPAFと表記するのは少し変なのですが、見た目がロケットのPAFに似ているということでこの部品を「PAFリング」と呼んでいます。タンクの上側にはデッキパネルと呼ばれる大きな板が接続されています。このデッキパネルはスラスターからの熱的な影響を避けつつ降下中に地面を直視できる位置にあることから、各種センサー類が多数搭載されています。また、デッキパネルからタンクの両脇に向けてはパネルで構成された箱状の構造体が配置されています。この構造体は「機器ボックス」と呼ばれており、この中には航法誘導制御、電源、通信、着陸後の科学観測用のカメラなどの各種電気機器が収められています。この機器ボックスは横揺れを防ぐためにPAFリングと軽く接続されているものの、基本的に重量はデッキパネルによって支えられており、打上げ時はいわばデッキパネルにぶら下がっている状態となります。デッキパネルの更には上には軌道制御や姿勢制御用のスラスター類をまとめて保持するRCS (Reaction Control System, 推進系) パネルがあります。また、RCSパネルには月面への着陸時にいち早く接地する主脚と呼ばれる大きな衝撃吸収材も取り付けられています。この主脚が月面に接地した際の大きな荷重を受け止めるため、RCSパネルは複数の支柱によりタンクやデッキと強固に接続されています。主脚を含むSLIMの脚についてはISASニュース2019年12月号\*でもご紹介していますので参照ください。その他、図1では見えにくい機体の背面には太陽電池シートを敷き詰めたパネルが取り付けられています。

図1に見るSLIMの構造の大きな特長の1つはタンクを構造材として使用していることです。一般的な衛星の構造では、中央

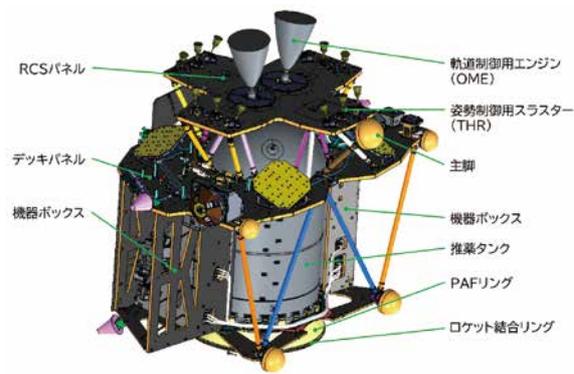


図1：SLIM構造外観。



図2：模型落下試験。

に全体を支える十字のパネルや円柱状の構造部材を立てて、タンクはそれに取り付くような形が多いですが、SLIMの場合はタンクそのものにデッキを支えさせることで構造材の質量を大幅に削減することに成功しました。SLIMのような着陸機は、降下の際に必要な燃料を確保する必要があり、質量削減は重要な要素でした。一方で、タンクは組立後に加圧充填に伴って大きく膨張します。この膨張による変形を適切に逃がしつつ、強度を保ってタンクを主構造に組み込むというのは、実は容易なことではありません。この構造の実現のために随所にメーカーさんの非常に高度な設計技術や組み立て技術が反映されています。また、一般的な人工衛星の構造にとって主要な検討対象はロケットでの打上げ時に生じる荷重ですが、月着陸実証機であるSLIMは着陸時の荷重についても考える必要がありました。そのため開発の最終段階では探査実験棟において実際に構造モデルを着陸姿勢で落下させて機体の強度を確認する試験(図2)を実施しています。SLIMは2段階着陸という特殊な着陸方式をとることもあって、この試験も落下姿勢などが非常に特徴的な試験となりました。

以上、大まかではありますがSLIMの構造を紹介しました。今後とも応援のほど、どうかよろしくをお願いします。

SLIM構造系担当：河野 太郎 (かわの たろう)

\*[https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas\\_news/files/ISASnews465.pdf](https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews465.pdf)



宇宙飛行工学研究系 専任教授

堀 恵一 (ほりけいいち)

## Ars Longa Vita Brevis?\*

手元に“KEY TECHNOLOGIES FOR THE 1990s A Detailed Technology Roadmap for ROCKET PROPULSION”という資料がある。自身の引退を前に本稿を依頼され、何かの参考になればと引っ張り出したものである。書棚の片隅で埃をかぶっていた。

1989年に米国で発行されたもので、資料をまとめた委員会には当時の米国のロケット推進分野の官民トップ30名の錚々たるメンバーが並ぶ。私が文部科学省宇宙科学研究所宇宙推進研究系宇宙推進燃料工学部門の助手に採用されたのが1990年、当時の私はこれからの自分自身の研究の方向性の指標となる重要な資料と見ていた。

資料は73ページに渡り私の専門とする固体推進は、うち27ページを占める。さすがに30年以上も前の文書なので今読み起こすと時代錯誤的な部分はあるが、いまだに通用する部分も多い。委員達の卓越した洞察力とも言えるが、実際には投入資金が識者たちの要求額にまったく追い付かなかったという側面が強い。

資料中2箇所で我が国が言及されている。まずは“The Foreign Competitive Threat”。ロケット技術で日本などかと思いきや、ミサイルから大型ロケット、衛星推進まで総合的に判断して当時の米国にとっての最大の脅威としてフランス、日本が挙げられている。少々面映ゆいところであるが、2023年も同じことを言ってくれるかどうか。もう1箇所が“Reliability”。ロバスト設計で一世を風靡した田口玄一先生の“Taguchi Method”が挙げられている。1980年代に米国の自動車産業界で大活躍した品質工学理論であるが、識者たちはロケットの分野では依然として十分に浸透していないと嘆じている。日本人としては大いに誇らしいところである。

当時の米国固体ロケット業界は1986年にスペースシャトルチャレンジャー、タイタン34Dと大きな事故が続き、そのため資料中“Reliability”, “Safety”への力点が強い。また課題として、ノズルの材料・製造工程・性能の相関、そしてインシュレーション(固体燃料/モーターケース間の断熱材)の設計理論が確立されていないと指摘している。その後の我々のM-V型ロケット4号機、先日の能代でのE21地燃といった失敗を思い起こすと耳が痛いところであるが、ここでは触れない。

固体燃料に話を移す。多くの項目に対し1990年代のマイルストーンが定義されており固体燃料も数項目で取り上げられている。私の目を引いたのが“Low Cost”の1990年



1990年当時のロケット関係のスタッフと@鹿屋  
左から石井 信明、筆者、森田 泰弘、吉田 裕二、安田 誠一。

度の目標：“TPE propellant”である(TPEは“Thermoplastic Elastomer”：熱可塑性樹脂の略)。初年度の目標なので如何にも容易に達成できると考えたらしい。詳細はともかく熱可塑性樹脂を燃料素材に適用すると燃料製造コストが大幅に下がるというシナリオだが、現実には易々と開発できる素材ではなかった。手前味噌であるが近年、宇宙研元所長 秋葉 鎌二郎名誉教授&森田 泰弘専任教授を主幹とする次世代ロケット研究会を中心とした日本人グループで実用的なTPEの開発に成功した。融点の低さを特長としているためLT(Low melting temperature Thermoplastic)と呼称している。そして、この技術を中心にJAXAベンチャー；(株)ロケットリンクテクノロジーを立ち上げたばかりである。森田専任教授を代表として私も名を連ねている。たまたま引っ張り出した資料と我々の未来が「リンク」していたとは出来すぎた話のように感じる。

1990年当時の日本はバブル経済の真っただ中であり、日本人全員が経済というものには常に成長するものだと思っていた。私も自分のキャリアの中で日の丸有人ロケットが実現すると考えていた。しかしその後の「失われた20年」で予算は停滞、物価上昇を加味すると宇宙予算は実質半減に近い。日本だけではない。世界中でロケットは低価格化が至上命題であり、よく外国人研究者と「正直やることがない」と愚痴をこぼしながら酒を呑んだ。

今、ロケット業界は再び活況を呈しつつある。イーロン・マスクのスペースX社が全体を牽引し、衛星需要の高まりが世界中の宇宙輸送業界の鼻息に繋がっている。また、先日インドが月探査で偉業を達成した。さすがに我が国政府の尻に火を着けてくれると思う。輸送系が肩身の狭い思いをする必要がない時代が到来しようとしている。若い人たちには時代の波を享受していただきたい。

上述したように、ロケットリンク社の活動で引き続き輸送系分野に身を置き続けることができる。庭いじりなど時間つぶしに苦勞する生活には入らなくて良さそうである。本稿表題\*はヒポクラテスの言である。今や人生100年と言われるようになった。2,400年を経て、この言はようやく死語となるのだろうか。

\* 日本語訳：芸術(技術)は長し、人生は短し(少年老い易く学成り難し)

# 宇宙・夢・人

Space Human Dream

熱を制御し、挑戦的なミッションを  
駆動したい

## 高効率に無電力で熱を運ぶループヒートパイプ

— どのような研究開発をされているのですか。

宇宙機の熱制御が専門です。例えば地球周回軌道上では、太陽光が当たるところはプラス100℃以上、太陽が当たらず深宇宙を向いているところはマイナス100℃以下になります。一方、宇宙機は精密機器の塊であり、基本的には私たちが住んでいる世界の温度で動作します。その温度範囲からはみ出ると機能しません。過酷な熱環境の中で、搭載機器の温度を適切に維持管理することが必要であり、それをを行うのが熱制御です。熱制御にはいろいろな方法があり、私は特にヒートパイプによる熱輸送技術の研究開発を行っています。

ヒートパイプの中には流体が入っていて、蒸発と凝縮という現象を利用して熱を効率よく運びます。しかも電力を必要としません。ヒートパイプは1960年代に実用化され、これまでさまざまな宇宙機で使われてきました。私は今、次世代型にあたるループヒートパイプの研究開発に力を入れています。流体の流れが一方方向になっているので、ヒートパイプの10~100倍と非常に効率よく熱を輸送できます。

— ループヒートパイプについて、どういうテーマに取り組んでいるのですか。

幅広い発熱密度に対応した熱輸送を可能にすることと、極低温で使えるようにすることを目指しています。天文衛星では、検出器を極低温まで冷やさないといけないので、極低温で動作できるループヒートパイプの需要があるのです。宇宙機が暑いと感じたら自分で放熱し、寒いと感じたら自分で断熱する。自律的に熱制御ができるシステムの研究開発も進めています。

プロジェクトの実現のためのトップダウンの研究開発も重要です。一方で、ボトムアップで基礎研究から発展させていくことで、誰も見たことがないものを生み出せるとも思うのです。

— 現在参加しているプロジェクトについて教えてください。

宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星LiteBIRD（ライトバード）に参加し、望遠鏡と検出器を冷やすための極低温構造の熱解析全般を担当しています。LiteBIRDは、宇宙誕生の瞬間の謎に世界で初めて迫ろうとする、チャレンジングなミッションです。検出器は0.1ケルビンまで冷やさないとはいけません。しかも、高精度な観測のために温度の時間変化をとても小さくしないといけないのです。熱制御がミッションの成否に関わっているので、1つ1つを慎重に丁寧に進めています。

### 編集後記

気象条件の回復を待って打上げが延びていたXRISMとSLIMは、表紙でその速報をお届けすることができました。空を突き抜けた2機と共に暑気は和らいだ気がしつつも、残暑は手を抜いてくれません。両ミッションの管制室の熱もクリティカル運用期間の間は冷めやらないでしょう。ISASニュースも編集に自然と力が入り、厚みのある記事が揃ったと思います。（戸田知朗）

宇宙飛行工学研究系 特任助教

## 小田切 公秀 (おだぎり きみひで)

1992年、秋田県生まれ。名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2019年より日本学術振興会特別研究員PD (JAXA宇宙科学研究所)、NASAジェット推進研究所 客員研究員を経て、2021年より現職。



— 今後どのようなことに取り組んでいきたいとお考えですか。

LiteBIRDもそうですが、宇宙研では皆さん、ものすごく挑戦的なミッションをやりますよね。ミッションの難易度が上がり、また搭載する機器が高性能化し、それをコンパクトに収めなければいけないため、体積当たりの発熱量がどんどん大きくなっています。そのため、熱を効率よく運んで捨てる技術が、ますます重要になってきています。挑戦的なミッションを実現できるかどうか、その鍵の1つが熱制御なのです。熱の問題が理由でミッションを実現できない、ということもなく。「どんな熱の問題も、どんとこい!」と言えるようになりたいですね。

## 剣道で学んだ「守破離」のプロセスを研究でも

— 子供のころ、どういうことに興味がありましたか。

小学生のころは、読書と工作が好きな剣道少年でした。剣道は、すぐ上の姉に憧れて始めました。剣道は楽しく、特に中学のときの先生の言葉が印象に残っています。その先生は、「練習」ではなく必ず「稽古」と言うのです。そして、稽古とは「古(いにしえ)を稽(か)える(かんが)えること」だから、考えなさいと。しかも、ただ考えるのではなく、先人の教えである基本的な動作を学んで身に付け、それを自分の中に落とし込んで応用し、相手に勝つために発展させなければいけない、と教えてくれました。それは千利休が言う「守破離」であり、そのプロセスがとても好きでした。そして今の私の研究のスタンスは、剣道をやっていたときそのままであり、「守破離」のプロセスを意識し大切にしています。

— ご自身の強みは？

強みと言っているのかわかりませんが、笑顔はいろいろな人に褒めてもらえます。「笑顔、いいよね」と。うれしいですね。

— 宇宙研はいかがですか？

私は学生時代、イギリスの大学やNASAのジョンソン宇宙センターなどでも研究する機会をいただきました。その経験も踏まえ、研究環境に対する理想を持っていました。ある先生に、学会終わりに連れていってもらった居酒屋で「こんな環境を探している」と話したら、「小田切くん、それは違うよ」と言われてしまったのです。「思い描く理想の環境があるなら自分でつくりなさい」と。ハッとさせられ、その時から考え方を変えました。私は、自分が今いる宇宙研、JAXAをより面白く魅力的な場所にしたい。これから面白いことをどんどん生み出していこうと思っています。



ISASニュース No.510 2023年9月号

ISSN 0285-2861

発行/国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
発行責任者/宇宙科学広報・普及主幹 藤本 正樹  
編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 山村 一誠  
デザイン制作協力/株式会社 トリッド

〒 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 isasnews@isas.jaxa.jp

ISASニュースはインターネットでもご覧いただけます。▶ <https://www.isas.jaxa.jp/>