

FOXSI-4 世界初の太陽フレア観測に成功!

日米共同の観測ロケット実験FOXSI-4を、米国アラスカ州・ポーカーフラットリサーチレンジの射場から、現地時間2024年4月17日午後2時13分(日本時間、同18日午前7時13分)に打上げ、太陽フレアが放つX線の集光撮像分光観測に世界で初めて成功しました(左)。観測装置の回収もできており、打上げは大成功を収めました(右)。今回取得したデータを解析することで、太陽フレアが解放した膨大なエネルギーについて詳細に調べることができます。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

電波とコンピュータで探る金星大気

京都産業大学 理学部 宇宙物理・気象学科 准教授
神山宇宙科学研究所 超小型衛星技術開発部門 部門長 安藤 紘基(あんどうひろき)

電波掩蔽観測と数値モデルによる金星大気の研究

惑星の大気構造を知る上で最も大事な要素の1つが気温です。気温は大気の熱構造を反映し、また放射輸送過程や雲物理・光化学過程にも影響を与えます。そして、気温分布を決める要因の1つが大気波動です。大気波動は熱や運動量を輸送するため、大気の熱構造や循環構造を決める根幹的要素になります。地球の場合は、気球による直接観測や人工衛星によるリモート観測を通じて豊富な観測データが取得され、大気の熱構造や循環構造、そして大気波動についての観測的な理解が進んでいます。また、精巧な数値モデルを利用して、それらの特徴や成因を理論的に解釈することができます。しかし、地球以外の惑星では直接観測は大変困難であり、また金星には高度50-70kmにかけて硫酸の雲が全球的にあるため探査機による観測が難しく、とりわけ鉛直構造について知見を得ることがなかなかできません。この問題を克服する1つの手段が、探査機から射出される電波を用いた電波掩蔽法です。

電波が高度方向に密度の勾配を持つ惑星大気の中を通過すると、その密度勾配により屈折が起こります。電波掩蔽法はこの性質を活用した観測手法です。地上局から見て探査機が惑星の背後に隠れる時、または背後から現れる時に電波を射出し、探査機の軌道運動と惑星大気を通過する際の屈折に伴う受信周波数の時間変化(ドップラーシフト)から、気温の高度分布が高精度(温度測定誤差 $\sim 0.1\text{K}$)・高分解能(鉛直分解

能 $\sim 1\text{km}$)で導出されます(図1)。筆者はこの手法を利用して、金星大気の平均的な熱構造や大気波動の鉛直構造を観測的に明らかにすることを主な研究テーマとしています。ただ、地球に比べると観測領域や観測数が限定されてしまうため、観測のみでそれらの成因を理解することは困難です。そこで筆者は、自身も開発に携わっている金星大気大循環モデルAFES-Venus[1,2]を用いて、電波掩蔽観測により捉えた大気構造や現象の成因を理論的に説明するという、電波と数値モデルの二刀流で金星大気の研究を進めてきました。

金星大気の平均的な熱構造

図2は、日本の金星探査機「あかつき」と欧州宇宙機関(ESA)により打ち上げられたVenus Expressの電波掩蔽観測で得られた、平均的な気温と静的安定度¹の緯度-高度分布です。図2aを見ますと、高度60kmより下では気温が緯度と共に減少する一方で、高度70kmより上では緯度と共に上昇しています。また、高度65kmかつ緯度65度周辺では局所的な低温域(cold collar)があることも分かります。図2bを見ると、緯度75度より低緯度側では、高度50-55kmに低安定度層があり、その上下には高安定な領域と弱安定な領域がそれぞれ存在しています。これらの特徴は、過去の直接観測[4]と良く整合します。一方、緯度75度より極側になると、低安定度層が高度42km辺りまで伸びていることが分かります。極域に見ら

¹物理学的に安定し静止した大気の中で、空気塊を上下方向に移動させた時に空気塊が元の位置に戻ろうとする強さの度合いを表す物理量のこと。安定度が高い場合は空気塊が上下に運動しにくく大気が高度方向に安定していることを示し、安定度がゼロに近づくほど大気は不安定となって対流が生じることを意味する。

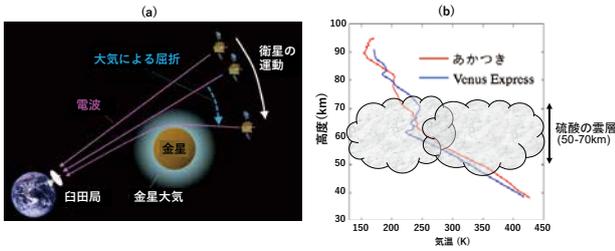


図1: (a) 電波掩蔽観測のイメージ図と(b) 金星大気の電波掩蔽観測によって実際に得られた気温の高度分布の例。

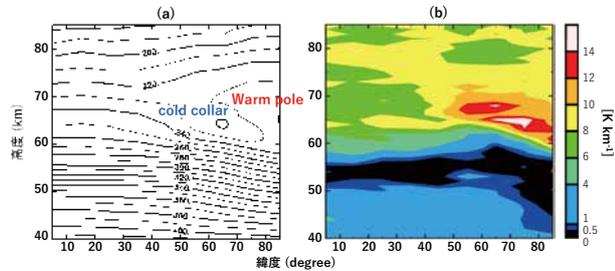


図2: 「あかつき」とVenus Expressの電波掩蔽観測によって得られた、金星の平均的な(a) 気温 (単位はK) と(b) 静的安定度 (単位は $K km^{-1}$) の緯度-高度分布 ([3]より抜粋)。緯度65度かつ高度65km周辺に局所的な低温域 (cold collar) があり、それより極側では相対的に気温が高い領域 (warm pole) があることが分かる。

れるこの独特な安定度分布は過去の観測では見つからず、本研究により初めて見出されました。地球では、太陽光は低緯度の地面で良く吸収されるので、基本的に低緯度ほど大気が高度方向に不安定になりやすく低安定度層が分厚くなりますが、金星では高緯度ほど低安定度層が分厚いという地球とは逆の熱構造をしています。このような地球以外の惑星の熱環境を知ることが、惑星の多様性を論じる上で重要な手がかりになります。

このような気温や静的安定度の分布は、雲物理や光化学を考える上で必要不可欠な情報です。加えて、静的安定度は気温を高度方向に微分して得られる物理量であるため大気の鉛直構造をより詳細に映し出すものであり、モデルで得られた結果の妥当性を検証するための良い判断材料にもなります。実際、AFES-Venusは電波掩蔽観測と良く整合する気温・安定度分布が再現できており、AFES-Venusの中で見えている熱構造や循環構造が現実の金星大気のそれを良く反映していることを意味します。AFES-Venusの計算結果を詳しく解析したところ、金星大気の熱構造の成因には、放射や大気循環に加えて、熱潮汐波やロスビー波(南北方向のコリオリ力の変化を復元力とする波)といった地球でも良く見られる惑星規模の大気波動に伴う熱輸送や運動量輸送が関与していることが分かりました。この点に関する詳しい議論は、[5,6,7]をご参照ください。

金星極域に見られる大規模擾乱の鉛直構造と成因

図2aで示したように、金星には局所的な低温域 (cold collar) があり、それが極周辺の温暖な大気 (warm pole) を取り囲むという、地球では見られない独特な熱構造があることが知られています(この熱構造の成因は、参考文献[5]により理論的に説明されていますので、そちらをご参照ください)。そして、この極周辺の大気中には、最も規模の大きいクラス(東西波数1)の擾乱やその次に規模の大きいクラス(東西波数2)の擾乱

が存在し、極を3地球日程度で周回していることが知られています。この擾乱の水平構造は過去の赤外観測によって良く理解されていますが、その鉛直構造については全く知見がありませんでした。極域の大気現象は極域の中だけで閉じているのではなく惑星全体の大気運動の一側面であるため、このような極域の大気現象を知ることは大気の全球的な運動や構造を理解するための重要な手がかりになります。

筆者らは、Venus Expressの電波掩蔽観測データを解析して周期3地球日程度の気温擾乱の抽出に成功し(図3a)、周期解析を行ったところ過去の赤外観測と整合的な周期3.1地球日の成分が卓越していることが分かりました。この擾乱成分について追究したところ、安定度が急激に上昇する所(図3b-3dの赤矢印で示された所で高度58km辺り)で振幅が極小となり、且つそこで位相が反転することやその高度の上下で位相が高度方向に殆ど変化しないことを見出しました。これは、この擾乱が順圧不安定(南北方向に東西風の速度差が大きい場合に生じる不安定現象)に伴う現象であることを示唆しています。ただ、電波掩蔽観測の結果だけでは擾乱の成因や正体について知ることは出来ません。そこで、AFES-Venusを用いてこの擾乱の水平・鉛直構造を再現し、赤外観測や電波掩蔽観測と整合することを確認した上で、AFES-Venusの計算結果を詳しく解析したところ、この擾乱が順圧不安定に伴う中立的(熱も運動量も輸送しない)なロスビー波であることが分かりました。地球でもロスビー波が極域の大気構造や運動に大きな影響を与えることが知られており、本研究により異なる惑星であっても同じ要素が極域大気の物理に寄与していることを観測と理論の両面から指摘しました。そして、電波掩蔽観測とAFES-Venusの結果を組み合わせ、擾乱の3次元構造を世界で初めて提唱しました(この点については、詳しくは[8]をご参照ください)。

金星の平均的な雲量分布の成因

金星には分厚い硫酸の雲が全球的に存在します。雲は大気の運動や熱構造を司る根幹部分であり、雲量分布の決定要因を知ることはそれらの根本的理解と等価です。昨今の赤外観測によれば、低緯度は雲量の時間変化が顕著で約5.5地球日周期の雲量変動が見られ、中緯度では雲量が最小、高緯度または極域で雲量が最大になることが知られています[10,11]。しかし、観測結果だけで雲量分布の決定要因を理解することは大変困難です。筆者らは、この雲量分布には大気の運動に伴う物質輸送が重要であると考えました。第2節や第3節で述べたように、AFES-Venusは実際の観測と整合的な風速分布や気温分布、大気波動構造の再現に成功しています。運動場や熱構造は大気中の物質輸送や雲物理過程(雲材料物質の凝結に伴う雲粒の生成や蒸発に伴う雲粒の消滅、雲粒の重力沈降など)を考察するための基礎であるため、AFES-Venusに雲物理過程を導入すれば、現実的な金星の雲量分布を再現できると期待できます。そこで筆者らは、雲材料物質として水蒸気と硫酸蒸気のみを考えた簡易的な雲物理過程をAFES-Venusに組み込んで、3次元の金星雲モデルを構築しました。

図4aは、東西・時間平均したMass loading ($1 m^3$ の大気に含まれる雲の質量)の緯度-高度分布です。これを見ると、青から赤で示されたMass loadingが大きい部分が、極域の雲底付近(高度48km辺り)に蓄積されていることが分かります。図4b

はMass loadingを鉛直積算したもので、雲量が中緯度で少なく極域で最大となっていることが分かり、過去の赤外観測と定性的に整合します。数値モデルの結果を詳しく解析したところ、中緯度と極域の雲量の違いは以下のように説明されます：図4aに示された大気循環の構造を見ると、高度55km以下では中緯度から低緯度または極域への流れがあるため、雲材料物質や中緯度で作られた雲粒が低緯度または極域に運ばれてしまい、中緯度では雲が蓄積しにくい状況にあります。一方、図2bに示したように極域では大気の静的安定度が低いため上下方向の大気運動が活発であり、下層から水蒸気が効率良く上方輸送される共に、低緯度上空で作られた硫酸蒸気が大気循環で極域下方に運ばれて、ちょうど極域の雲底付近で雲材料物質が集積して、そこで雲が大量に生成されると考えられます。

これとは別に、過去の赤外観測で観測された、金星低緯度における約5.5地球日周期の雲量変動もモデルの中で再現できていることも分かりました。数値モデルの結果を詳しく解析したところ、この変動は高度方向に伝播せず雲底付近に留まっている、周期が約5.5地球日程度の大気波動(ケルビン波)に伴う気温偏差に起因している可能性が指摘されました。つまり、気温偏差が正(負)の時は周りに比べて気温が高く(低)くなるため飽和蒸気圧も高く(低)、雲粒が蒸発しやすく(生成しやすく)なって雲量が減る(増える)という状況がこの大気波動により周期的に作り出されて、観測で見られるような雲量変動が誘発されると考えられます(詳しくは[12]をご参照ください)。従来の研究では、金星の雲量分布には雲物理過程や大気循環による雲材料物質の輸送が寄与していると考えられてきましたが、実際の観測と整合的な雲量の水平分布や低緯度における周期的な雲量変動は再現できていませんでした。本研

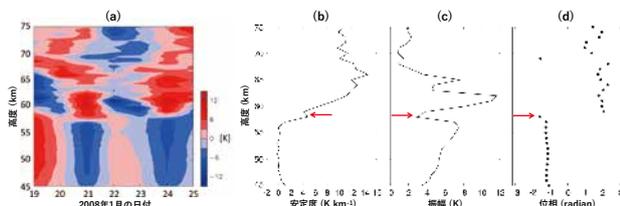


図3: Venus Expressの電波掩蔽観測(2008年1月13日から1月25日)で得られた、(a)平均気温からの偏差の時間-高度分布と(b)平均的な安定度分布。(c)と(d)は、それぞれ周期3.1地球日の気温擾乱成分が持つ振幅と位相の高度分布。(a)の気温偏差については、説明の都合で1月19日から25日のデータのみを掲示した[全て[8]より抜粋]。図(b) - (d)にある赤矢印は、静的安定度が上昇しており、擾乱の振幅が極小となり、かつ位相が反転している場所(高度58km辺り)を示す。

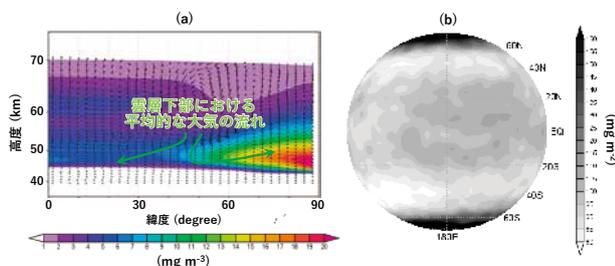


図4: AFES-Venusにより得られた、(a)東西・時間平均したMass loadingの緯度-高度分布と(b)鉛直積算したMass loadingの水平分布のスナップショット([9]を改変)。(a)にあるベクトルは東西・時間平均した南北流と鉛直流を表し、大気循環の構造を見やすくするために鉛直流の大きさを1000倍していることに注意。高度55km以下では、大まかに中緯度から低緯度や極域に向かう流れがあり、中緯度にある雲材料物質や雲粒がそれらの領域に移流されることが、中緯度で雲が蓄積しにくい理由の1つであると考えられる。

究の結果は、金星の雲量分布が雲物理過程や大気循環だけでなく、大気の静的安定度や大気波動と密接に関係することを示唆しています。

今後の展望とまとめ

以上の内容を考慮しますと、金星大気の熱構造や雲量分布には大気波動が密接に関わっていることが分かります。また、金星では超高速の東風「スーパーローテーション」が生じており、これにも大気波動による運動量輸送が寄与している可能性が理論的に指摘されています[2,13,14,15]。しかし、大気波動の3次元構造や伝播特性についての観測的理解が不十分であり、従来の理論研究の検証が十分に為されておりません。スーパーローテーションや雲量分布をはじめ、金星大気科学の更なる理解には、様々な時間・空間スケールの大気波動の特徴を観測的に明らかにすることが必要不可欠です。そして、これを可能にする手段の1つが、短期間に様々な経度・緯度・地方時における気温の高度分布を取得できる、衛星間での電波掩蔽観測です。まだ概念設計の段階ではあるものの、筆者らは複数の小型衛星を利用した金星大気の衛星間電波掩蔽観測[16]を立案中であり、もし実現すれば理学と工学の両面で革新的なミッションになると期待します。

また、本稿で言及した研究成果は第16回宇宙科学奨励賞の受賞対象にもなりました。審査員の先生方には感謝の念に堪えず、このような名誉ある賞を戴くことができ感慨無量の思いです。しかし、筆者がこれまでに行ってきた研究は、今回の受賞対象となった成果も含め、決して自分一人で成し遂げられたものではありません。大学院時代の指導教員である中村 正人先生と今村 剛先生、AFES-Venusを用いた共同研究を快諾して下さいました松田 佳久先生、高木 征弘先生、杉本 憲彦先生など、人間関係に大変恵まれたと思います。また、学生時代から現在に至るまで、筆者の馬鹿話に付き合ってくれている山崎 敦さん、野口 克行さん、佐川 英夫さん、櫻村 博基さん、今井 正亮さん、そして「あかつき」を支えてくださっている全ての方に御礼を申し上げます。

2030年代にはNASAとESAが合わせて3つの新しい金星探査(VERITAS・DAVINCI・EnVision)を実施することが決まっており、中国やインドも金星探査の実施を公式に表明するなど、金星探査バブルがこれから起きようとしています。そして、「あかつき」も2029年まで運用が延長されることが決まりました。今回の受賞を励みにして、今後も国内外における金星科学の発展の為に一層尽力する所存です。引き続き皆様のご指導ご鞭撻のほど、何卒よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- [1] Sugimoto et al. (2014), J. Geophys. Res., 119(8), 1950–1968.
- [2] Takagi et al. (2018), J. Geophys. Res., 123(2), 335–352.
- [3] Ando et al. (2020), Scientific Reports, 10, 3448.
- [4] Seiff et al. (1985), Adv. Space Res., 5(11), 3–58.
- [5] Ando et al. (2016), Nature Communications, 7, 10398.
- [6] Ando et al. (2022), J. Geophys. Res., 127(3), e2021JE006957.
- [7] Ando et al. (2023), J. Geophys. Res., 128, e2022JE007689.
- [8] Ando et al. (2017), J. Geophys. Res., 122(8), 1687–1703.
- [9] Ando et al. (2020), J. Geophys. Res., 125(7), e2019JE006208.
- [10] Cardesin-Moinelo et al. (2020), Icarus, 343, 113683.
- [11] Crisp et al. (1991), Science, 253, 1538–1541.
- [12] Ando et al. (2021), J. Geophys. Res., 126, e2020JE006781.
- [13] Takagi & Matsuda (2006), Geophys. Res. Lett., 33, L134102.
- [14] Takagi & Matsuda (2007), J. Geophys. Res., 112, D09112.
- [15] Takagi et al. (2022), J. Geophys. Res., 127, e2021JE007164.
- [16] Yamamoto et al. (2021), 日本航空宇宙学会論文集, 69, 179–186.

SLS搭載超小型探査機プロジェクトの終了

2機の超小型探査機OMOTENASHIとEQUULEUSを開発し運用してきたSLS搭載超小型探査機プロジェクトは、2024年3月にプロジェクト終了審査を受け、正式に終了することになりました。OMOTENASHIは既に2023年9月に運用終了しておりましたが^{*1}、EQUULEUSも2024年4月9日に最後の運用を行いました。(写真1)

OMOTENASHIは世界最小の月面着陸機の実現を目指し、“セミハードランディング”技術を開発しました。超小型の固体ロケット^{*2}により減速し、時速200km近くまでの速度誤差が残った状態で着陸するので、衝撃吸収材^{*3}で搭載機器を守る設計でした。軌道上で起こった不具合^{*4}により月着陸実験はできませんでしたが、地上での試験結果などをまとめて、今後の超小型探査機の開発に役立てたいと考えています。もう1つのミッションであった、50g程度の超小型センサを用いた地球磁気圏外での放射線環境の計測^{*5}には成功しました。放射線は地球磁場により遮蔽されるため、地球周回軌道上にある国際宇宙ステーションでは緩和されていますが、月や惑星の探査を行う場合には、より過酷な環境になることが予想されています。今回の計測結果は、今後の有人宇宙探査に役立てられます。

EQUULEUSは地球・月系の第2ラグランジュ点(EML2)を目指し、超小型探査機による地球・月近傍での軌道制御技術の実証^{*6}と、月・地球周辺の磁気圏プラズマ、微小隕石・ダスト環境の観測を行う計画でした。精密な軌道決定と綿密な軌道設計に基づく軌道制御を多数回実施し、EML2に向かう軌道に投入することに成功しました。その後2023年5月に通信途絶してしまいましたが^{*7}、月の重力も利用した軌道制御技術を習得でき、月近傍への輸送機会を活用した将来の超小型衛星の深宇宙進出につながる成果が得られたと考えています。特に、東京大学で新規に開発した水を使った推進装置(AQUARIUS)^{*8}は設計通りに動作し、精密な軌道制御に貢献しました。水を使用しているので、有人宇宙船との相乗りも安心であり、将来的には月面の水が利用できれば、月面で給油ならぬ給水して、外惑星へ旅立つようなことも可能になるかも知れません。

EQUULEUS搭載の観測機器は全て正常に動作し、超小型探査機でも一流の科学を実施できることを証明しました。プラズマ撮像装置(PHOENIX)^{*9}は、地球のプラズマ圏を赤道面から見た全体像を撮影することに成功しました(写真2)。閃光撮像カメラ

(DELPHINUS)^{*10}は、EML2へ到達できなかったため本来の目的である月裏側への隕石衝突による発光現象の観測はできませんでしたが、偶然地球近傍に接近した長周期彗星の撮影に成功しました(写真3)。微粒子衝突センサ(CLOTH)^{*11}は、探査機の外周を覆う断熱材(MLI)の中に仕込んだ薄膜のセンサで、宇宙塵が探査機に衝突すると信号を出します。探査機由来のノイズもあるので、多数の信号の中から本物の衝突を見つけるのは難しいのですが、確実に宇宙塵の衝突と思われる信号も抽出されています。今後の詳細解析が期待されています。

OMOTENASHIはJAXAの若手エンジニアが中心となって、EQUULEUSはJAXAの若手と東京大学等の職員、大学院生が共同でインハウスによる開発をしたので、これまでのJAXAの衛星・探査機とは異なる多くの知見・経験が得られました。超小型探査機は、信頼性の保証された宇宙用機器、宇宙用部品のみで製作することは困難であり、また機器を冗長構成とするスペースもありません。調達した機器を、自ら試験、検証して、その健全性を確認する必要があるのですが、事前の地上試験では見つからない不具合もありました。どのような点に注意して試験すべきか、どの部分はリスクが大きいので対応策を考えておくべきか、など経験者の知見が重要であることもわかりました。超小型探査機は、若手の活力、斬新な発想力で開発することが重要である一方で、メンバーの中に経験豊富なシニアの人材も入っていると良いことが知見として挙げられます。

そのほか、技術面、あるいはマネジメント面での知見が多く得られました。これまでも学会等で紹介してきましたが、今後も大学等の超小型衛星コミュニティとも連携しながら、報告書等にまとめていきたいと考えています。これまでの応援、大変ありがとうございました。(橋本 樹明、船瀬 龍)

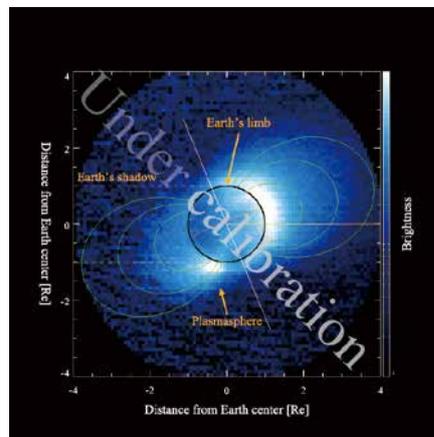


写真2：PHOENIXによる地球プラズマ圏撮像



写真3：DELPHINUSによるComet C/2022 E3の撮像



写真1：EQUULEUS運用最終日の様子

ISASニュースの関連記事は
https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/all.html
 よりお読みいただけます

- *1 2023年11月号p.4
- *2 2021年5月号p.7
- *3 2021年9月号p.7
- *4 2022年12月号p.4
- *5 2021年11月号p.7
- *6 2020年12月号p.5
- *7 2023年7月号p.4
- *8 2021年8月号p.7
- *9 2021年2月号p.7
- *10 2021年4月号p.7
- *11 2021年6月号p.5

MMXの打上げ年度の変更、ミッション機器ローバの引渡完了

火星衛星探査計画MMXの打上げ年度が2024年度から2026年度に変更された。昨年12月に、日本政府が宇宙基本計画工程表を改訂したことによる。現在、私たちMMXチームは、2年延期に伴う開発体制や運用設計の変更、ミッション成功の確度を高めるための検討を行っている。この2年を有効に活用して、さらなるミッション成功へと導きたい。そんな中、MMXの搭載機器が次々と開発を完了し、JAXAへの引渡が進んでいる。その1つ、ローバの引渡がこの3月に行われた。以下、その様子について紹介しよう。

「Bonjour !」「Guten Tag !」湘南モノレールの大船駅でいつもの開発メンバーと顔を合わせる。加えて今日はCNESとDLR



ローバ(IDEFIX)引渡の様子、左からMarkus Grebenstein (DLR)、吉川健人(JAXA)、Stephane Mary (CNES)

の両プロジェクトマネージャも一緒だ。日本での再会に固く握手をする。2024年3月7日。今日はMMXに搭載されるローバ、通称“IDEFIX”のシステム引渡日だ。皆でMELCO鎌倉製作所に向かう。

IDEFIXはローバ本体が重さ約23kg、大きさ約50cm立法で、探査機に先立ち、フォボス表面に着陸展開される。探査機に先立ち、フォボス表面を探査することで、より確実な探査機着陸を実現するのが目的だ。ローバ本体から独立に制御される4本のアームとそれらの先に取り付けられたホイールにより姿勢制御と移動を行い、フォボスの厳しい環境に耐えながら100日間の探査を予定している。科学観測機器として、光学カメラ、ラマン分光計、熱放射計も搭載され、フォボス表面科学に資するデータも取得予定である。探査機本体には、加えて、分離機構、ローバ通信アンテナ、データ処理装置も搭載される。

これだけ野心的なミッションを盛り込んでいるIDEFIXの開発は苦労の連続であった。それは、IDEFIXが軌道上でローバ本体と探査機本体を同時に動作させ、地上ではフランス、ドイツ、日本の3か国にまたがる管制センターを使用し、運用するという非常に複雑なシステムであるうえ、言語も文化も設計開発方式もお互い異なるバックグラウンドを持っているチームで開発してきたためだ。そんな中、多くの議論と設計解析、試験を1つ1つ重ねることでようやく開発完了までこぎつけた。開発に関わってくださった全ての方に感謝申し上げます。

引渡は無事完了し、探査機にローバが搭載された。ただ、ここは終わりではない。我々の冒険は始まったばかりだ。

(吉川 健人、矢治 健太郎)

※ローバ引渡しについては、関連記事をMMXのホームページでも公開しています。 <https://mmx-news.isas.jaxa.jp/?p=2145&lang=ja> 合わせてお読みください。

Comet Interceptor探査機開発が本格始動！

Comet Interceptorは、彗星の中でも特に始原的とされる長周期彗星をフライバイ観測により人類として初めて直接探査することを狙った、欧州宇宙機関 (ESA) 主導の計画です。太陽-地球系の第2ラグランジュ点 (L2点) に3機の探査機をあらかじめ待機させておき、地上観測によって長周期彗星の地球公転軌道近傍への接近を観測し次第L2点を出発して探査しに行くという、従来の探査ミッションにはない即応型のミッションが最大の特徴です。3機の探査機のうち大型の母船 (探査機A) とそれに搭載され彗星まで運搬される超小型の子機1つ (探査機B2) をESAが開発し、JAXAはもうひとつの子機 (探査機B1) を開発する形で協力します。

この計画の構想は6年前にさかのぼります。ESAのFast-class^{*} ミッションの公募が2018年に発出され、欧州と日本の研究者からなるチームからミッションを提案。その後、ESA側では探査機システムの検討を進めて、2022年にFast-classミッションの1号機として正式採択され、開発のプライムメーカーとしてイタリアのOHB-I社が選定されました。日本側では、WGを経て2020年に戦略的海外共同計画の候補として選定され、宇宙研に所内検討チームが設置されました。その後、システム検討を進め、MDR、SRR等を経て、2022年にRFPによりB1探査機システム開発メーカーとしてアークエッジ・スペース社 (以下AE社) が選定されました。日欧それぞれで開発に関わる役者が揃ったところで、2023年からは4者のテレコンを隔週で実施して、様々なインターフェース調整を一層綿密に進めてきました。途中、B1の



IRD署名後のESA/OHB-I/JAXA/AE関係者の記念撮影。イタリア・ミラノのOHB-I社にて。

熱・構造の成立性に黄色信号が点灯する事態もあったのですが、日欧双方の創意工夫とお互いに歩み寄るマインドのおかげで無事解決しました。そして、2024年3月に日本側の担当者 (JAXA・大学・AE) がESAとともにOHB-Iを訪問し、ESA・JAXA間のインターフェース文書 (IRD、Interface Requirements Document) の最終調整をし、晴れてIRDへの正式署名が行われました。

日本側では今年度からESA側との電氣的・機械的インターフェースを検証するためのモデルの開発・試験が始まります。構想から6年経ってついにハードウェア開発が目に見える形で本格化するというところで、開発チーム一同ワクワクするとともに、気を引き締めて進めていきたいと思えます。(船瀬 龍)

^{*} ESAではミッションの規模別にS/M/Lクラスがある中で、ミッション選定から打上げまで短期間で実現させるFastクラスが2018年に新設された。

連載 第9回 SLIM the MOON SNIPER

降りられるところから、降りたいところへ

仲よし！

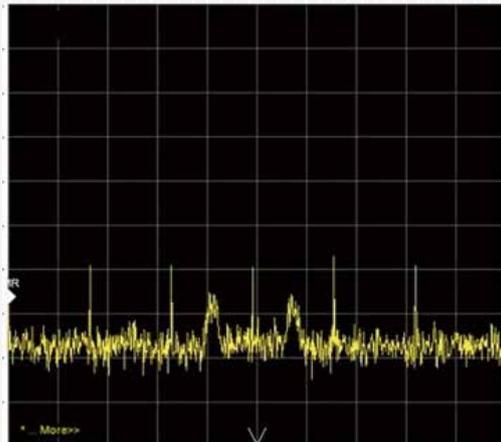
超小型月面探査ローバLEV-1&2

日本時間2024年1月20日0時20分20.20秒、内之浦局と臼田局にてLEV-1からの電波を受信しました(図1)。その約1.3秒前に、月面でLEV-1の背中に付いたパッチアンテナから発信された電波が地上に届いたのです。第9回では、SLIMから分離され月面で勝手に動いてSLIMをバシャバシャ、その活動結果と共にLEV-1とLEV-2を紹介します。

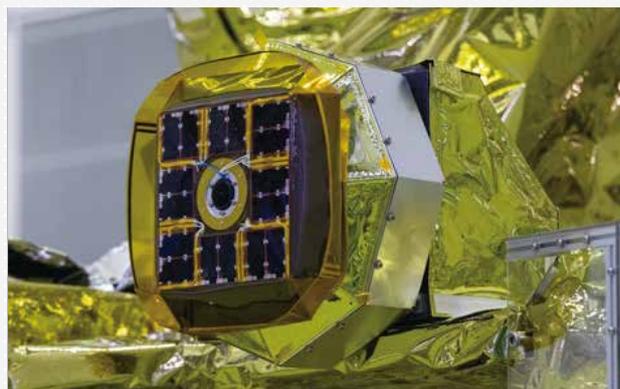
LEVシステムは、日本初の月着陸機SLIMに搭載され、月の表層へ運ばれました。2023年9月の打上げから4か月の間、SLIM探査機本体がマルチバンド分光カメラエレキを通じて、電圧が低下したLEV-1の電池を30回にわたって充電してくれました。LEVシステムはLEV-M、LEV-1(図2)、LEV-2(図3)で構成されます。LEV-Mは2つのローバを月面へ展開する装置で、SLIM探査機本体の着陸直前自由落下開始時(同日0時19分50秒頃)にLEV-1とLEV-2をそれぞれを独立した状態で月面へ展開しました。

LEV-1&2は、低重力下での新しい移動方法や自律機能の工学実証を主ミッションとして、SLIM探査機本体の状況記録や着陸地点付近の岩石や地盤の産状記録(ISASニュース2024年2月号表紙画像参照)を行いました。LEV-1はSLIM探査機本体からの分離展開成功の後、単一の車輪による姿勢制御から方位指向そして跳躍移動を連続して行い、その一連の動きを繰り返しました。その間、太陽電池で発電しながら画像記録や温度計測等環境状態の観測を試みています。LEV-2は展開後、SLIM探査機本体を探し出し、その姿を撮影、LEV-1へ2回分の画像データを送りつつSLIM探査機本体周りを走査し続けたと推測されます。LEV-1は、LEV-2の状態や撮像画像含めた記録データをSLIM探査機本体を経由せずに直接地球へ送信し、臼田と内之浦の地上局でその電波を受信することができました。

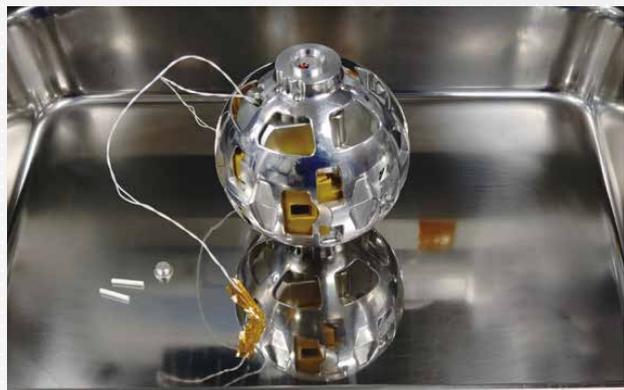
これらの活動により、LEV-1&2は同時に日本初の月面探査ローバとなり、LEV-1は世界初の跳躍移動型探査ローバ、LEV-2は世界最小・最軽量の月惑星探査ローバになりました。また、LEV-1&2の一連の行動が地球から人間が介在することなく自律で行われたこと、月面におけるLEV-1&2のローバ間通信を成功したことも世界で初めて実証されました。さらに、アウトリーチ活動としてLEV-1が発信したUHF帯の電波が地上に届き、世界初の月面アマチュア無線局となりました。跳躍移動を7回繰り返した後、同日2時10分に海外のアマチュア無線家がLEV-1からの電波を受信して以降、理解できるデータが地上に届くことはありませんでした。



(図1) LEV-1からの5帯受信電波の振幅スペクトル



(図2) SLIM打上げ前、SLIM探査機本体搭載状態にあるLEV-1



(図3) フライトモデル引渡し前、最終組立の計量時に収納状態にあるLEV-2

今回LEV-1&2が行った月面での活動により、小さなロボットでも「自立した月探査ができる」ということが証明され、将来の月惑星表面でのロボット活動の高頻度化につながる貢献ができました。最後に、世界の皆様からの熱いご声援、世界から届いた電波受信の報告は、次の探査ローバ開発への励みとなりました。心よりお礼申し上げます。

大槻 真嗣(おおつき まさつぐ)



THE ORCHESTRA JAPAN ヴァイオリン団員
上の宇宙(うわのそら)クインテットメンバー

熊谷 真紀(くまがい まき)

Classic Concert in JAXA ～SLIM月面着陸成功を祝して～

「直感は正解への最短距離である」と言った人がいたが、本当にその通りかもしれない。

JAXAとの出会いは2023年の夏に遡る。相模原市で「はやぶさ2」プロマネの津田 雄一さんの講演会があり、津田さんが「はやぶさ2」のプロジェクトを進めていた時に、毎朝自分を鼓舞するために宇宙研に向かう車中で聴いていたという、ドヴォルザーク作曲の「新世界より」を弾いてくれないかと依頼を頂いたので。

そのイベント後のパーティーでの津田さんの姿が印象的だった。その日の主役であり、言ってしまうとちょっと偉そうにしているけれども良い位なのに、津田さんは周りに全く圧を感じさせることなく、とても自然にそこにスクッと立っていたのだ。その時に「ああ、この方は偉くなりたくないじゃなくて、本当に宇宙が好きなんだな」と感動にも似た直感を感じ、その瞬間、隣にいた「JAXA宇宙科学研究所と夢を創る会」副会長の笹野 章央さんに「私、JAXAでコンサートをしてみたいんですけど、津田さんにお伝えしてもいいですかね?」と話しかけていた。普通なら笑って終わりそうだが、笹野さんは「それは素敵ですね!」とすぐに津田さんの所に私を連れてってくれた。間近で見た津田さんは好奇心と遊び心に満ちた目が印象的で、その表情に力付けられるように「純粋に宇宙が好きなお子様と大人達に、宇宙が好きという気持ちだけで作った純度の高いコンサートを、宇宙に1番近いJAXAでやってみたいです!」と話していた。

そして2024年3月12日。私はたくさんの宇宙探査機の模型に囲まれて、大勢のJAXA職員の皆様を前に演奏をしていた。夢が叶ったのである。

コンサートは「宇宙科学研究所応援コンサート～弦楽五重奏で宇宙をたのしむーん～」と称し、「夢を創る会」会長の茅 明夫さんや会員の皆さん、そして津田さんの温かいご理解の元、相模原キャンパスの宇宙科学探査交流棟にて、JAXA職員80名を対象にSLIM成功の祝賀会として開催された。

演奏者は青木 高志さん(国立音楽大学教授)、熊谷 真紀(THE ORCHESTRA JAPAN団員)、生野 正樹さん(石田組・葉加瀬 太郎ツアーメンバー)、田中 里奈さん(毎日学生音楽コンクール第2位受賞)、石川 浩之さん(読売交響楽団団員)という素晴らしい方達(しかも皆さん宇宙好き!)が集まって下さり、「上の宇宙(うわのそら)クインテット」が結成された。



終演後に。上の宇宙クインテット(左より生野さん、田中さん、青木さん、熊谷、石川さん)、SLIMプロジェクトメンバー、JAXA職員、「JAXA宇宙科学研究所と夢を創る会」の皆さまと。青木さんはストラディバリウスで演奏してくださった。ロケットの横で調弦をしながら出番を待つのは初めての経験だった。



ヴァイオリン経験者の(左より)津田さん、白杵さん、楠本さんによるスペシャルトリオ「打上げ三銃士」。
本番3時間前からスタンバイして練習、練習!

このちょっと変わったクインテット名は「JAXAの人は基本他人の話を見聞かず、みーんな上の空(褒め言葉)」「心ここにあらずくらいのリラックスした気持ちで聴いて欲しい」「体は地上にあっても心は宇宙の上の方にある演奏家の集まり」という由来により、津田さんが命名して下さいました。「うわのそら」は英語でspace-outと言ひ、宇宙っぽくもあり気に入っている。

コンサートでは「月の光(ドビュッシー)」「木星(ホルスト)」など宇宙に関連した曲や、SLIMメンバー伊藤 琢博さん作曲の、SLIMがまさに月面着陸する瞬間のメンバー達の気持ちを表現したという「SLIMのテーマソング」も演奏した。ドラマチックな曲で、SLIM成功のお祝いの気持ちと共に会場からは大きな拍手が送られた。

また津田さん、津田研で学ぶ白杵 智章さんと楠本 哲也さんによるトリオ「打上げ三銃士」や、SLIMプロマネの坂井 真一郎さん、JAXA研究者の久保 勇貴さん、相模原副市長の大川 亜沙奈さんもヴァイオリン演奏で、「上の宇宙」と共演下さり、コンサートは大変な盛り上がりを見せた。

しかし話はここで終わらない。演奏を終えて笑顔溢れる客席を見渡した瞬間、また直感が湧いたのである。『これからこのコンサートは自分だけの夢じゃなく、皆の夢になっていくんだ。』・・・流星に恐れ多い話だと思ったが、後日、広報の利岡 加奈子さんから「JAXA内でも大好評で『また公演をやってほしい!』『僕が作ったプロジェクトと「上の宇宙」のコラボやれないかな』という声が届いてますよ。」とご報告頂き、「上の宇宙」メンバーからも「JAXAの皆さん本当に魅力的!また一緒にやりたい!」とメールが届いた。「上の宇宙」がどんな科学者達や宇宙の世界と出会い、音楽を生んでいくのか好奇心が止まらないのである。

》日本に、そしてJAXAに来たかった

衛星からのデータを保管し、時計を合わせる

——2023年4月にJAXAに入り、今はどのような仕事をされているのですか？

科学衛星運用・データ利用ユニットに所属し、SIRIUSシステムと時刻校正システムを担当しています。SIRIUSでは、衛星や探査機から送られてくるデータを登録して保管します。衛星の打上げ前には登録項目の追加などシステムの改修が必要かどうかプロジェクトと打ち合わせをして、改修作業を行うメーカーとの契約書類をつくったりもしています。

衛星はそれぞれ固有の時計を持っています。時刻校正システムは、地球周回以外の衛星・探査機に搭載されている時計の時刻を、協定世界時に変換するものです。

時刻校正は、衛星の運用にも欠かせません。例えば2024年1月に月面に着陸したSLIMでは、ピンポイント着陸を実現するために高精度の時刻校正が必要でした。私は時刻校正に要求される精度が厳しいことを知っているので、着陸のライブ配信を緊張しながら見ていました。

高校卒業後、ワーキング・ホリデーで日本へ

——出身は？子どものころは、どういうことに興味がありましたか？

ドイツ出身です。学校の勉強では、数学、そして物理学が好きでした。物理学を使うとさまざまな現象を説明できると知り、興味を持ったのです。将来どんな仕事をしたいかを書く宿題が出たことがありました。物理学に関連する仕事を調べていたら、「宇宙物理学」という言葉を見つけて、これだ!と思ったのを覚えています。宇宙は、さまざまな現象の中でも説明が難しそうですね。だからこそ面白いと思い、宇宙物理学を学んで、それに関連する仕事をしたいと考えるようになりました。

——目指したとおり宇宙物理学を学べる大学に進んだのですか？

いくつかの大学のオープンデイに参加し、宇宙物理学を学べ、行きたいと思える大学を見つけました。無事に高校卒業証明書も得て、ドイツで大学に進学できたのですが、すぐ入学しないで、ワーキング・ホリデーで日本に行くことにしました。

14歳のとき、偶然YouTubeで見た日本のバンドを大好きになったのです。ONE OK ROCKです。ロックが好きでいろいろなバンドの曲を聞いていましたが、そのバンドはそれまで聞いていた音楽とまったく違いました。その曲の言葉を理解したくて、日本語を勉強しました。ひらがなやカタカナは少し読めるようになったのですが、話

科学衛星運用・データ利用ユニット

Miriam Sawczuck

(サヴツック ミリアム)

ドイツ生まれ。高校卒業後、ワーキング・ホリデーで日本に1年間滞在。2019年、ハイデルベルグ大学物理学・天文学部卒業。同大学大学院に進学し、2019年から1年間北海道大学にて天文研究プロジェクトに参加。2022年、修士号を取得。2023年より現職。



せるようにはなれなくて、もう日本に行くしかない!と思ったのです。沖縄のビーチホテルのレストランで4カ月、白馬のスキー場で3カ月働いた後、旅行しました。日本語は日常生活には困らないくらい話せるようになり、念願のライブにも行き、とっても充実した1年間でした。

——ワーキング・ホリデーを終えた後は？

志望していたハイデルベルグ大学に入学し、物理学・天文学を学び、その後、修士課程で星の生成過程について研究しました。また日本に行きたかったのですが、忙しすぎて無理でした。でも調べてみると、修士課程で日本の大学に留学できることが分かったのです。そして、ハイデルベルグ大学と関係が深い北海道大学の観測天文学研究室に2019年10月から1年間所属して、研究を行いました。

日本で宇宙の仕事といえばJAXA!

——修士課程を修了後、JAXAに就職したのですね。

博士課程に進まなかったのは、新型コロナウイルス感染症の影響が大きかったと思います。日本留学が終わるころには、感染症の流行がピークを迎えており、ドイツに帰ると、授業はすべてオンラインになっていました。修士論文は、家で書き上げました。教授の指導もオンラインでした。いつも1人。その状況がいつ終わるか分からなかったので、1人というのはつらい、やりたくない、博士課程へ進むことを諦めました。そして、日本で就職できないかと考えたのです。

私は地上の望遠鏡を使って研究していました。星がつくられるときのガスの流れを観測するのですが、望遠鏡では詳しくは分かりません。そのため宇宙から直接観測する天文衛星に興味を持ち始めました。そして、日本で宇宙の仕事といえばJAXAだ、と考えたのです。まず、JAXAのウェブサイトの英語ページで採用情報を見ました。しかし研究職の募集がなく、博士号を持たない私には応募資格がありません。そこで日本語ページの採用情報を見て、新卒採用の技術系職員に応募したのです。

——今後、どのようなことをやっていきたいと考えていますか？

採用面接では、衛星や探査機に関わる仕事をしたい、という希望を出しました。今の仕事に慣れたら、少しずつでも衛星や探査機が観測したデータの解析に関わっていきたくと思っています。専門ではありませんが、ハードウェアにも関心があります。これからJAXAでいろいろなものを見て、知って、いろいろなことをやっていきたいと思っています。

編集後記

最前線の電波掩蔽による金星大気の研究は少し難しいですが、できるだけわかりやすくなるよう尽力いただきましたのでぜひじっくり読んでください。JAXAでのコンサートは長期出張で聴けなかったのが残念でしたが、文章で楽しい雰囲気を「聴かせて」いただきました。(田中 智)



ISASニュース No.518 2024年5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/>