



第2管制室での運用風景

【第2管制室北東側半分の様子。写真は、「ひさき」と「はやぶさ2」が運用中のところ。他には、「あらせ」、「ひので」、「GEOTAIL」、「あかつき」の運用も行われている。現在工事が進行中の3階の管制室の刷新が完了すれば、小惑星 Ryugu への接近・タッチダウン運用に向けて、「はやぶさ2」の運用は3階管制室へ移行する予定（P.5 記事参照）。

## 宇宙科学最前線

### 観測データを同化し 金星の大気の謎に迫る

慶應義塾大学 法学部物理学教室 准教授

杉本 憲彦（すぎもと のりひこ）

#### 金星大気の謎

金星は地球の双子星と称される。どちらも約46億年前に誕生した、地面と大気をもつ地球型惑星である。金星は太陽系内で大きさと平均密度が最も地球に似ている。しかし、金星は二酸化炭素の厚い大気に覆われ、その運動や気温分布も地球の大気とは大きく異なっている。現在の金星には海はない。けれども、初期の金星には地球と同じように海があった可能性が指摘されている。金星は地球より太陽に近く高温である。このため水が蒸発しやすく、上空では太陽からの紫外線で水素と酸素に分解されてしまう。このため、軽い水素は宇宙空間に逃げ出してしまったのではないだろうか。また、海を失った金星では、地球のように二酸化炭素を海に溶かし、石灰岩として固定することができない。こうして、現在のように大量の二酸化炭素が大気中に残ったと考えられている。

また、金星は自転周期が極めて長く243日もある。赤道上の自転速度は1.8m/sしかなく、これは地球の自転速度460m/sと比べて非常に遅い。にもかかわらず、金星大気の上層には、「スーパーローテーション」

と呼ばれる自転を追い越す高速の風（高度70kmで約100m/s、自転の約60倍の速度）が、赤道から高緯度まで大気全体で吹いていて、気象学における大きな謎となっている。地球にも自転を追い越す風（偏西風、最大で100m/s程度）の存在が知られている。その成因は、スケート選手が回転時に腕を短くする例で知られる、角運動量の保存則から説明できる。赤道で加熱された大気は上昇し、ハドレー循環（水平対流）となって中緯度に到達する。赤道の地表面で静止していた大気であっても、宇宙から見れば高速に回転している。このため、中緯度に運ばれ自転軸からの距離が短くなると、速度が増して自転を追い越す風となる。しかしながら、地球の偏西風が存在するのは中緯度の限られた緯度帯だけである。また、自転の遅い金星上では、このような簡単なメカニズムでスーパーローテーションの成因を説明できない。

金星は全体が硫酸の厚い雲によって覆われ、大気内部の運動の観測が困難である。このため、地球や火星に比べると金星大気の運動に関する理解は遅れている。金星と地球の違いをもたらした理由についても、確かな情報は多くない。もし、金星の大気の成り立ちが分かれば、

地球が金星のようにならずに、適度な気候条件をもつ生命に溢れる星となったヒントが得られるはずである。また、金星大気の流れを説明できれば、地球を含めた普遍的な惑星大気の理解が進むと期待される。広い視野で地球の気象を考えることは、地球の大気がなぜ今のような姿をしているのか、また将来どうなっていくのかということの、より深い理解に結びつく。金星大気の謎の解明、それは我々が住む地球をより深く理解することに他ならない。

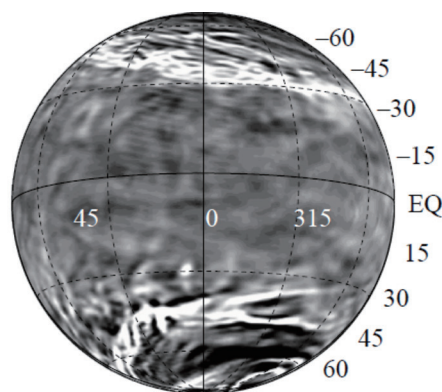
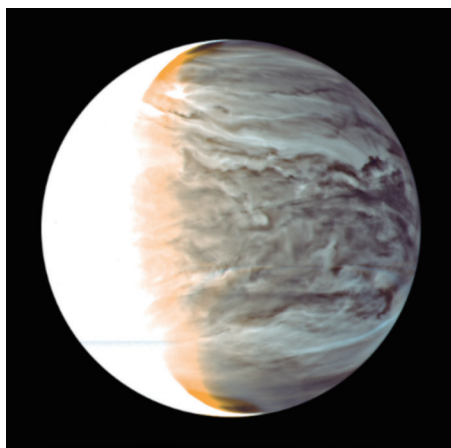


図2 「あかつき」IR2カメラにより撮影された金星夜面合成疑似カラー画像（左 ©ISAS/JAXA）とAFES-Venusの高解像度計算で得られた鉛直流速分布の結果（右）。右図において、白は下降流、黒は上昇流の領域を表している。また、金星AFESは自転の向きが金星と逆のため、図を回転させて表示している。

## AFES-Venusの開発

我々の研究グループでは、このような金星大気の流れの謎に挑むため、金星大気全体の運動をシミュレーションする、金星大気大循環モデル「AFES-Venus」の開発を進めてきた。これは、地球の気象予報や気候予測などの研究に使われる大気大循環モデル（GCM; General Circulation Model）の中でも、特に地球シミュレータに最適化されたAFES（Atmospheric GCM For the Earth Simulator）を金星用に変更したものである。AFES-Venusの大規模計算によって、現実的な東西風分布の再現や、金星大気における傾圧不安定波の存在とその重要性の指摘など、世界初となるさまざまな研究成果が得られている（Sugimoto et al., 2014a, b; Ando et al., 2016; Kashimura et al., in prep.）。

図1は、AFES-Venusによって世界で初めて再現された、極域の上層大気（高度約65 km）に存在する周極低温域（cold collar）である（Ando et al., 2016）。1970年代の金星探査ミッション以降、金星の極域上空では、

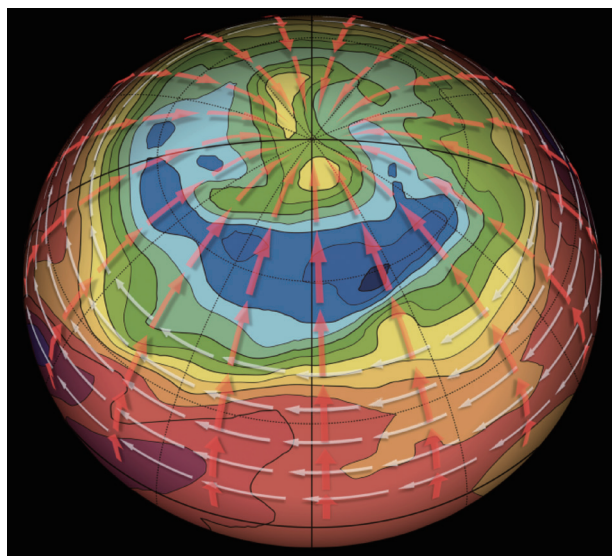


図1 金星大気の極域に存在する周極低温域（cold collar）のAFES-Venusによる再現例。カラーは温度場で、暖色は高温、寒色は低温の領域を表している。極向きの矢印は波によって駆動された北向きの流れ、白の矢印はスーパーローテーションのイメージを示している。

温かい極域を冷たい領域が取り囲んでいるという不思議な気温分布が明らかになっていた（Taylor et al., 1980）。しかし、どのようにしてこの気温分布が生じ、維持されているのか、そのメカニズムは現在まで未解明であった。

AFES-Venusでは、大気全体を数値計算するため、観測では得られない大気内部の運動を知ることが可能である。その結果によると、周極低温域の形成には、太陽の動きに合わせた大気運動（熱潮汐波）によって極近傍に駆動される下降流が重要であることが分かった。太陽光は金星の雲層を暖め、南北方向の大気の流れを生む。この流れが極域上空で集まって下降流になると、ポンプで空気を圧縮したときと同じように、大気は圧縮され、温度が高くなる。このため、下降流が起こっている低温の極域の極近傍では温度が高くなる。これが極域の一部で温度が継続的に高くなる原因であり、その周辺領域が極に比べて低温になる理由であった。波が駆動する下降流と、それによって生じる昇温現象は、地球大気でも成層圏の突然昇温として知られている。本研究は、地球と類似のメカニズムが金星で働いていることを示唆している。

## 「あかつき」観測との比較

金星探査機「あかつき」は、2015年12月に金星周回軌道への投入を再び試み、成功した。「あかつき」に搭載された複数のカメラによる観測結果から、金星の水平方向の大気の流れや気温分布を明らかにする試みがなされており、すでに様々な初期成果を挙げている。これらの観測研究の成果が、AFES-Venusの研究で得られた理論モデルの実証につながっていくことを期待している。また、AFES-Venusと相補的に観測結果を解釈することで、金星の大気・気象へのさらなる理解を深めたいと考えている。ここでは、初期の観測と比較したAFES-Venusの結果を示したい。

図2（左）は「あかつき」のIR2カメラにより撮影された金星夜面合成疑似カラー画像である。IR2カメラの1.735  $\mu\text{m}$ 画像と2.26  $\mu\text{m}$ 画像から、1.735  $\mu\text{m}$ を赤、2.26  $\mu\text{m}$ を青、両者の平均を緑として、着色し合成したものである。IR2カメラの夜面画像が捉えるのは地表付近の高温の大気から放射される赤外線である。赤外線は雲によって遮られるため、画像の明るい領域は雲の薄い

領域を表すことになる。また、微妙な色調の差は、雲粒子の大きさの違いなどを表すと考えられる。昼夜境界付近がオレンジ色になっているのは、昼側から夜側に回り込んだ 1.735  $\mu\text{m}$  光のためである。南北両半球の中高緯度にある惑星規模の巨大な筋状構造と低緯度の乱流的構造は、これまでにない「あかつき」の高解像度観測によって初めて得られた描像である。

AFES-Venus では、地球シミュレータを最大限に用いることで、金星大気研究では例のない高解像度の計算が可能である。図 2 (右) は、AFES-Venus で計算された高度 60km (低安定度層の上空) での鉛直流速分布の結果である。南北方向の位置は若干異なるものの、IR2 カメラの夜面観測で示された惑星規模の筋状構造と類似した構造が現れている。強い下降流が巨大な筋状に分布しており、これは観測と整合的である。なぜなら、下降流によって雲量が減少し、観測された雲の薄い領域を生み出しうるからである。現在、AFES-Venus で再現された巨大な筋状構造の成因の解明に向けて、3次元構造の解析や太陽加熱や大気安定度の設定を変化させた感度実験に着手しているところである (Kashimura et al., in prep.)。

### 金星初のデータ同化に向けて

こうした AFES-Venus による諸成果は、我々の金星大気大循環モデルが現実の金星大気の運動をよく表現しており、これまでモデルの整備不足によって不可能であった、観測データの同化に耐えうる段階にあることを示している。データ同化とは、数値シミュレーションモデルに観測データを融合させることで、時空間的に偏りのない、より現実的なデータ (再解析プロダクト) を生み出す手法のことである。金星探査機「あかつき」の貴重な観測データを同化することができれば、観測を反映した大気内部の運動に関する情報が得られ、金星の謎の解明が革新的に進むと期待される。そこで我々の研究グループでは現在、地球や火星の大気で用いられている観測データをモデルに反映させる手法としてアンサンブルデータ同化を金星大気大循環モデルに世界で初めて導入し、その有効性を検証している (Sugimoto et al., 2017)。

データ同化システムの検証には、数値シミュレーション

ンで得られた疑似観測データと過去の金星探査機「Venus Express」の観測データ (Kouyama et al., 2013, 2015) を用いた。その結果、時空間的に限られた観測データを同化したにもかかわらず、観測データに含まれる惑星規模の大気波動 (熱潮汐波) が金星大気大循環モデルの中で正しく再現されることが示された。このことは、開発したデータ同化システムが期待通りに動作していることだけでなく、金星探査機の観測データを利用したデータ同化が金星大気の流れを調べるのに有用であることを示している。

観測は時空間的に限られ、数値シミュレーションモデルは不完全である。このため、どちらか一方だけを利用して金星大気の運動を完全に解明することは困難である。今回の研究成果によって、観測データとシミュレーションモデルの両方を最大限に活用するデータ同化の手法は、金星大気の運動を解明する新たな糸口となることが実証された。今後、金星探査機「あかつき」によって得られた、高解像度かつ高頻度の観測データを本システムで同化することにより、金星大気最大の謎であるスーパーローテーションの成因の解明など、金星大気内部の運動の理解が革新的に進むことが期待される。

### 謝辞

金星探査機「あかつき」及び AFES-Venus に関わる全ての方に感謝申し上げます。本研究は、地球シミュレータ利用課題「AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション」及び「AFES を用いた火星・金星大気の高解像度大循環シミュレーション」のもとで実施した。また、JSPS 科研費 15K17767、16H02225、16H02231 の助成をうけて実施された。図 1 は安藤 紘基博士 (京都産業大学)、図 2 (左) は佐藤 毅彦教授 (ISAS/JAXA)、(右) は榎村 博基博士 (神戸大学) の作成である。図 3 の「あかつき」の CG は ISAS/JAXA のものを使用した。AFES-Venus は上記の地球シミュレータ利用課題 (代表、林 祥介教授 (神戸大学) のもと、高木 征弘准教授 (京都産業大学) と共に開発している。データ同化に関して、山崎 哲博士 (JAMSTEC) と榎本 剛准教授 (京都大学) の協力、「Venus Express」の観測データに関して、神山 徹博士 (AIST) の協力を得た。

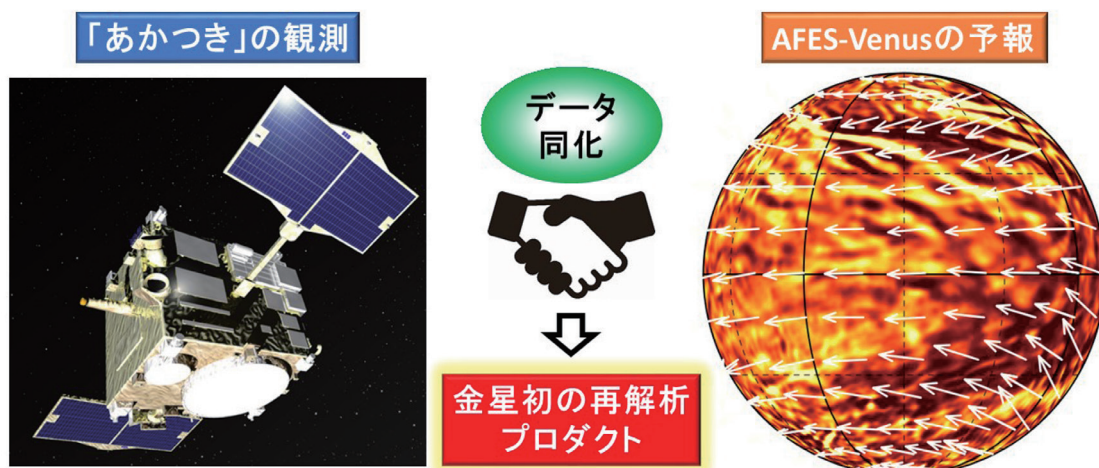
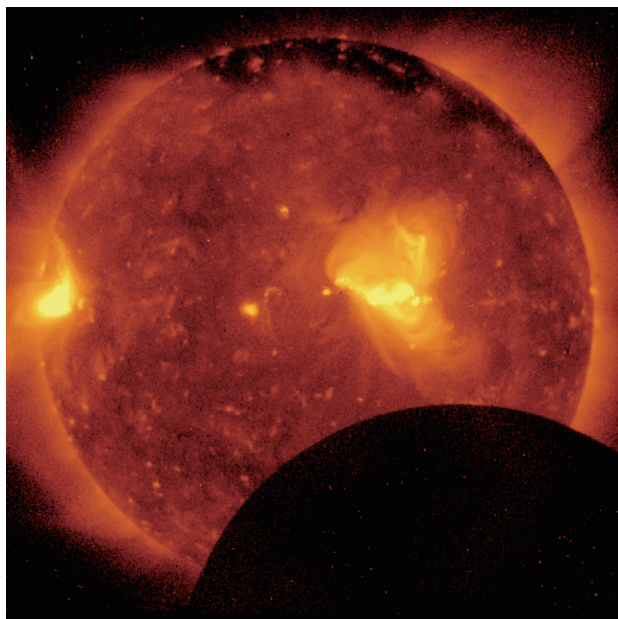


図3 「あかつき」の観測データと AFES-Venus の数値シミュレーションの予報データを同化することにより、金星大気のみ「確かしい」状態を時空間的に再現したデータ (再解析プロダクト) が世界で初めて得られることになる。

## 「ひので」が撮影したアメリカ横断皆既日食の画像・動画を即時公開



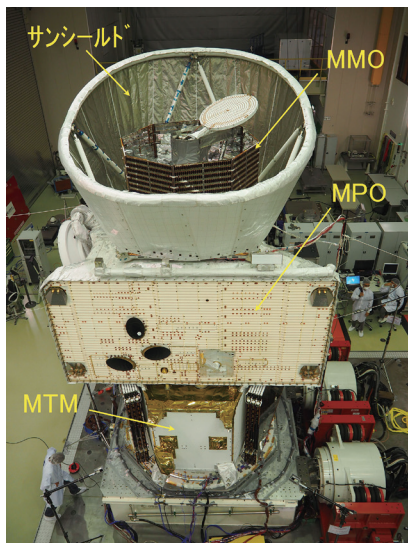
「ひので」X線望遠鏡が開始2分後に撮影した部分日食。

2017年8月22日早朝（日本時間）、アメリカで天文ショー「皆既日食」が観測されました。皆既日食は、幻想的な太陽コロナを地上で一般市民が見ることが出来る稀な機会です。コロナは、それを目撃した人々を魅了させるだけではなく、研究者にとっては、コロナ加熱、フレア発生、太陽風の源といった太陽大気の謎に満ちた現場として重要な観測対象です。太陽観測衛星「ひので」は、そのコロナを軟X線や極端紫外線で常時観測しています。

皆既日食は、軟X線や極端紫外線のみでは難しいコロナ物質の様子を知ることができる貴重な機会です。「ひので」は地上の観測チームと連携して観測を行いました。その一つは、極域のコロナ構造やそこで頻発するジェットメカニズムの解明を目的としたコロナ観測です。また、皆既日食帯がアメリカを横断する約1時間30分の間、多数の市民の参加を得て白色光（可視光）コロナの動画を作成するプロジェクト（Eclipse Megamovie 2017）と連携して、X線コロナ画像の連続撮影を行いました。皆既日食でしか観測できない白色光コロナと、「ひので」が観測するX線コロナを組み合わせることで、ジェット発生メカニズムや約1時間30分にわたるコロナ構造のダイナミクスについて理解が進むことが期待されます。

太平洋（アメリカ西海岸沖）の上空を飛翔している際、「ひので」からは部分日食が見られました。X線で輝く太陽コロナを背景に、新月状態の黒い月が太陽の南西（画像の右下側）から現れ、北東（画像の左上側）に向けて太陽面を横切っていく様子がとらえられました。搭載データレコーダの特別な使用管理を行うことで最速で地上にデータを伝送し、同日午後には画像の一般公開を行いました。最大食分0.714の部分日食でしたが、想像を超える反響がありました。特に、SNSによる情報拡散によって、約700万人に「ひので」画像・動画が届けられ、SNSの威力を感じました。この凄さを、取っ付きにくい研究成果の普及にも活用できないものかと考えさせられました。（清水 敏文）

## 水星探査機MMO 全ての振動試験完了



振動試験の様子。

2017年6月のほぼ1カ月をかけて、欧州宇宙機関（ESA）の技術センター（ESTEC）にて、水星探査計画BepiColomboの機体の正弦波振動試験を行いました。この機体は、ESAが担当する電気推進モジュールMTM、探査機MPO、そして、JAXAが

断熱材や塗料で覆われています。そのため、クリーンルームへの扉を開けて見上げると、白無垢に包まれた黒髪の花嫁が恥ずかしそうに顔を隠しているように見えます。MMOは天辺に載せられているため、試験では最も上下・前後・左右に揺さぶられます。つまり、花嫁がヘッドバンキングしている状態になるのです。宇宙に行くためには仕方が無い試験だとしても、「うちの娘になんてことをするんだ！」という気分になります。

これほど大きな探査機の振動試験は滅多にないため、多くの方が詰めかけ、2階の通路からガラス越しに見つめていました。試験後に、その2階の通路において横目で探査機を見ながら、無事終了を関係者で美酒と共に祝ったことにたいへん感動しました。是非、相模原でも行いたいものです。また、日欧両方とも初期のメンバーが数少なくなったことに、プロジェクトの立ち上げから約17年もの年月が流れたのだなと改めて気づかされました。これでMMOは構造関連の試験を全て完了したことになります。（峯杉 賢治）

担当する探査機MMOの順に下から積み上がった形態になっています。MMOは水星に到着するまでの間に直接太陽光であぶられるのを防ぐために白いサンシールドに取り囲まれています。さらに、MTMやMPOも白色の

## 新管制室

宇宙科学研究所の研究センター棟（B棟）3階には科学衛星や探査機にコマンドや運用計画を送信したり、テレメトリ監視、データ記録など運用作業を行う管制室が在ります。「さきがけ」「すいせい」以来、多くの宇宙機の管制運用がここで行われてきました。しかしこの管制室ももう30年選手、昔ながらの風情を愛する人たちも多いのですが、宇宙科学の最先端を担う宇宙機の管制室であると誰もが納得するような、現代的でカッコいい管制室に刷新する計画が進行中です。

新しい管制室には、より広い運用スペース確保、見学者スペースの設置、会議室の併設等、様々な要求がありました。新たにそれだけの広さを確保することは困難でしたし、運用しながら改装することも出来ませんので、まずB棟2階に第2管制室を整備し、運用中の宇宙機の管制運用を移動、その後、古い管制室と周りの部屋を合体させて拡張し、新しい管制室を整備することにしました。

計画が具体的にスタートしたのは2016年春頃ですが、その頃ERG（「あらせ」）が打上げ後のクリティカル運用、初期運用期間（2016年12月～翌年3月）中に3階の管制室を占有することになり、突貫の整備作業が始まりました。いろいろと苦労もありましたが、何とか間に合わせることができました。

「あらせ」の初期運用と並行して3階の新管制室のデザインやレイアウトの検討を進めました。プロジェクトの意見を聞いたところ、新管制室を更に広げるといふ新規要求が出て来ました。この対応も大変で、急遽第2管制室に運用を移行することになった「あかつき」には多大な苦勞をかけてしまいました。一方、ずっと3階管制室で運用していた「あらせ」も7月末には第2管制室に引越しを完了しました（表紙参照）。

現在、新管制室の工事が進行中です。消防法の関係で拡張する部屋との壁を無くして一体に出来なかったことは残念でしたが、知恵を絞って一体感が持てるような設計にしています。工事は10月末まで、その後什器搬入、マシン搬入、セットアップ、試験等を行い、12月末には総面積が倍増した新管制室が完成する予定です。運用は、「はやぶさ2」の小惑星 Ryugu 接近・タッチダウン運用のリハーサルからを想定していて、実運用ではマスコミにも公開される予定です。

管制室の整備においては、管制運用の安全・確実性が最重要項目ではありますが、新管制室は同時に、見学者のみならず運用者をも魅了することを目指しています。「魅せる管制室」に乞うご期待。（竹島 敏明）

## 2017年度小規模計画6件が始動

小規模計画とは外部資金などJAXA外予算とのマッチングファンド方式で実施する小規模な宇宙科学プロジェクトで、JAXAが負担する経費が2億円以下、プロジェクトの実施期間が運用・観測期間を含めて1年から5年以下であることを要件としています。実施するプロジェクトとしては、日本で単独で実施するものだけでなく、海外プロジェクトへの機器などの提供、海外の観測ロケット・大気球、国際宇宙ステーション（ISS）などの飛翔機会を利用した計画も想定しています。これは平成28年（2016年）4月1日に制定された宇宙基本計画が定義する「多様な小規模プロジェクト」の中に位置付けられます。2016年11月7日に公募を発出し、2017年

1月13日に応募を締め切りました。審査は、4名のコア委員・6名の分野担当者委員・25名の専門評価者からなる審査委員会が、ISAS所長の諮問を受け、書類による評価、提案者との電子メールによる質問と回答のやりとり、そして必要に応じてヒアリングを約4カ月かけて行いました。提案を正しく理解することに気をつけて、多くの時間を割いていただいた委員および専門評価者の努力により、その様な審査が行われたと考えています。

最終的に16件の応募の中から表の6件を選定しました。選定された6つの課題は始動しつつあります。大きなインパクトのある科学的成果が期待されます。

（満田 和久）

### 採択された小規模計画

名称	研究代表者	内容
DUSTの核生成	木村 勇氣（北海道大学）	星間環境に欠かせないダスト（宇宙固体微粒子）の供給過程と物理状態の正しい理解に至ることを目標として、日欧および日米協力によるロケットによる無重力ダスト形成実験を実施します。
BEAK	鈴木 宏二郎（東京大学）	エアロキャプチャ実験機・小型衛星 BEAK により、火星表面への着陸機投入も意識した地球上層の希薄な大気での reentry 動作を実証します。
GAPS	福家 英之（JAXA 宇宙科学研究所）	GeV 質量の dark matter の崩壊により生じると考えられる Sub GeV のエネルギー範囲の反重陽子検出をめざす南極周回長時間気球実験国際協力計画に、シリコン検出器アレイを中心とする機器を提供します。
小規模太陽観測プログラム	石川 遼子（国立天文台）、勝川 行雄（国立天文台）	恒星の大気加熱と恒星風を太陽で基礎的な物理から理解することを目的として観測ロケットと大気球の2つの国際協力実験を実施し、2つの異なる高さの彩層を探索します。
OHMAN-JP	三原 建弘（理化学研究所）	Time domain 天文学の推進を目的に ISS に搭載された2つの装置、日本の MAXI と米国の NICER を ISS 上で結ぶ装置を実装します。
Fermi への協力	深沢 泰司（広島大学）	米国 NASA の Fermi 衛星計画に日本の研究者が継続的に参加します。

## プロジェクトに関する業務改革

ASTRO-H 衛星喪失を受け、全 JAXA 共通のプロジェクト業務の改革を推進するために、2016 年 7 月に業務改革推進委員会が設置され、2017 年 4 月に機構プロジェクト実施に係る文書類の制定及び改定が行われました。

本改革では、「機構プロジェクト実施に関わる基本方針」が最上位文書として制定されました。企業等が果たす役割と JAXA との責任関係等を明確にする調達マネジメント計画や、プロジェクトを確実に推進するために概念検討フェーズを充実させるべくミッション探求フェーズとミッション定義段階の導入等を行います。

本改革で新たに制定・改定された文書に基づき、宇宙科学ミッションの達成確率を高めるように、具体的な実施方法を定める必要があります。6 月 23 日に宇宙研全職員にて業務改革について議論しました。8 月 22 日には宇宙科学コミュニティと意見交換し、特に「宇宙科学プロジェクトの初期フェーズの進め方」を議論しました。チャレンジングなミッションは用意周到な準備があって可能になります。新たなプロセス導入が新たなミッション創出と着実な遂行につながるようにしたいと思います。(久保田 孝)

## 相模原キャンパス特別公開2017



毎年人気の催しから初公開の屋内実験場（左上）まで、今年も活気溢れる特別公開になりました。

今年の相模原キャンパス特別公開は、例年より 1 カ月遅く 8 月 25 日（金）・26 日（土）に開催しました。近隣の共和小学校、相模原市立博物館、国立近代美術館フィルムセンター相模原分館にも例年通りご協力をいただきました。

8 月とは思えぬぐずつした天候が続いていましたが、当日はその分を取り戻そうとでもしているかのような酷暑にもかかわらず、両日合わせて 11,200 名もの来場者がありました。

キャンパス内では 8 会場、49 ブースが出演。研究者と直接語らい真剣に一問一答をする光景があちらこちらで見られました。今年は会場として初公開の場所もありました。完成したばかりの宇宙探査実験棟では、大量の砂で作られた屋内実験場を見た来場者から歓声があがり、そこで動く遠隔操作の探査ローバーにも注目が集まっています。また隣の宇宙科学探査交流棟も建屋が完成したばかり。来年の正式オープンへの期待の声も相次ぎました。各会場に立ち並ぶブースでは、少しでも新しい成果をわかりやすくご覧いただくこと、間際まで準備に余念がなく、研究成果や将来計画も含め最新情報が満載でした。工作等の参加型の催しは整理券配布後すぐに定員に達する盛況ぶりでした。中庭では JAXA の施設を縁に交流している 5 市 2 町がテントを並べて物産展を催し、来場者も各地のおいしい名産を堪能しながら、今年建国 30 周年を迎え

たこの「銀河連邦共和国」についても理解を深めました。

昨年に引き続き、水ロケット教室も共和小学校のご協力のもと、開催することができました。ペットボトルを使った工作と、打上げを体験するこの企画は毎年好評で、今年は 240 機が打ち上げられ、元気な子どもたちの声が校庭に響きました。水ロケット教室の運営にあたっては、インターンシップ制度で派遣された県内高校生、近隣の大学に通う学生の皆さんにもご協力いただきました。

キャンパス向かいの国立近代美術館フィルムセンター相模原分館では今年も宇宙科学セミナーを 6 コマ開催し、所長を含む講師陣が理学・工学それぞれの立場から最新の話題を熱く語りました。各講演の終わりにはフィルムセンター所蔵で、約 80 年前の北海道での皆既日食の様子を撮影した『黒い太陽』（1936 年製作）を上映していただきました。

その隣、相模原市立博物館は、講演会や大西 卓哉宇宙飛行士も参加してのトークイベント、子ども向けのワークショップの会場にもなり、2 日間で 7,230 名と例年を大きく上回る来館がありました。

今年も広報の代表電話には、開催前から特別公開を楽しむにしてくださいませの方々からのお問合せを多数いただきました。また、スタッフが会場を歩いていても、「今年も来て良かった!!」、「パパは大学生の頃、こんな研究したかったなあ〜」という声をここかしこで聞くことができました。皆様からいただく励みで、スタッフの疲れもいっぺんに吹き飛びます。

時節柄、心配された熱中症や大きな怪我の報告もなく、無事 2 日間を乗り切ることができたのも、近隣の施設の多大なるご協力そして地域住民の皆様のご理解をいただいたからこそ、と実感しております。

今後も特別公開を、皆様と直に接することができ、ご意見をいただける大切な機会、そして宇宙研の活動を理解していただける、より充実したものにしていきたいと思っております。

来年には交流棟が開設しますので、次回もどうぞお楽しみに。

(相模原キャンパス特別公開 実行委員会 委員長 國中 均)

## 「低エネルギー電子計測への努力」

## ●LEPe担当 風間 洋一

私がERGプロジェクトに関わったのは、2008年冬からです。そのときにはすでにERG衛星計画が学会有志のメンバーで議論されていて、私はそれを外から眺めていましたが、そうしているうちに、台湾の大学がERG衛星の低エネルギー電子計測器（LEPe）を開発するため、開発者を募集しているのを知り、もともと粒子計測器の開発をしていたので早速応募しました。あれから9年ほどが経とうとしているとは、なんとも時の流れは速いですね。

私の担当したLEPeは、約20eVから20keVの電子を計測します。20eVというのはかなり低いエネルギーで、衛星構体が局所的に数Vから数十V帯電するだけで、電子の軌道が変わって正しい計測ができなくなる可能性があります。そのため、衛星全体がすべて同電位になるよう、柴野さんや浅村さんに大変な努力をしていただきました。衛星の至る所に絶縁材料があるなかで、外に暴露している部分すべてに導通を与えるのは、相当に大変だったと想像します。また、磁場も電子の軌道に影響を与えるため、他の機器の方にもステンレス部品などの残留磁場を規定値に抑えるようお願いしています。

現在LEPeは正常に動作し、内部磁気圏に存在する低エネルギー電子のデータを日々取得しています。すべての機器が初めて同時に動作した2月27日のデータでは、サブストーム現象に伴うエネルギー分散構造が綺麗に観測されて、これから始まるサイエンスへの興奮と、努力が報われたことへの安堵を覚えました。

帯電や帯磁などの影響を受けやすい低エネルギー電子の観測データについてはこれから詳しくデータを見ていくところですが、例えば67eVのデータには、帯電などによるチャンネル間の偏りや光電子などのスピン依存性は見られず、衛星本体や他の計測機器の方の低エネルギー電子計測への対策は功を奏したと思います。これについて、柴野さんや浅村さん始め他の担当者やメーカーの方々にご協力いただき、感謝に堪えません。みなさま本当にありがとうございました。

システム振動試験において加振の合間に、ほこりがLEPeに入らないようにカバーを装着する様子。



## （風間から松岡 彩子さんへ）

松岡さんが担当したMGF（磁場計測器）もLEPeと同じく、衛星自体の影響を受けやすいと思います。自然界に本来存在する磁場を、衛星がまるで存在しないかのように計測するためには、いろいろとご苦労があったと思いますが、どのような点が大変でしたか？ その結果はどうですか？

## 「高性能・伸展物・EMCの三位一体」

## ●MGF担当 松岡 彩子

ERGに限らず、宇宙空間の磁場を高精度で測定するために必要なものは、第一に性能の良い磁力計ですが、次に磁力計センサを衛星から離すための長い伸展物、三番目は人工的な磁場ノイズを出さない衛星本体です。この3つを達成して初めて、風間さんのお題「衛星が存在しないかのような計測」という理想が現実となります。

3つ目の磁場ノイズ抑制（EMC）については、先月の記事で三田さんが述べられた努力とプロジェクトの皆様のご尽力のおかげで、ERGはノイズを殆ど出さない衛星となりました。

2つ目の伸展物については、話はいきなり前世紀に遡ります。1998年に打ち上げた火星探査機「のぞみ」にも、高精度の磁場計測を目指して同じ名前磁場観測器MGFを搭載し、火星到着後に5mの長さのマストを伸ばしてセンサを衛星から離す計画でした。「のぞみ」は残念ながら火星周回軌道に入らず、マスト伸展も叶いませんでした。今回ERGに搭載したマストは、「のぞみ」のマストの設計をほぼそのまま使ったものです。20年近い年月を経て、ようやく宇宙空間での伸展成功に至りました。

ERGのMGFは、水星磁気圏探査機BepiColombo MMOに搭載したMGF-Iを元に設計しました。小さな問題はたびたび起こりましたが、MMOの経験を元に解決しながら製造と試験を進めました。そして、ERGの8種の観測機器の中で、衛星システムへ一番乗り！のはずが、何とフライト品引き渡し前日の最終確認で、MGFのセンサに大きな問題が見つかってしまいました。打上げは1年後に迫っています。その日から不休で原因調査、改修方針検討、方針の検証試験、改修、それまでの全試験やり直しを行い、衛星システムの熱真空試験に何とか間に合いました。検証試験で撮影した顕微鏡写真は1,200枚に及びました。この怒涛のリカバリ作業を支援くださったメーカーの皆様、ERGプロジェクトの皆様、ポストクの寺本さん、野村さんには改めて深く感謝を申し上げます。おかげさまで、現在MGFはあんな大問題など無かったかのように、順調にデータを取得しています。

## （松岡から笠原 禎也さんへ）

プラズマ波動・電場観測器（PWE）で、ERGのテーマである粒子と波動の相互作用を解き明かす作戦と、データを手にするまでに辿った道のりを教えてください。

《次号に続く》



# 太陽電池の放射線劣化がもたらしたものの

明治大学 特任教授・宇宙科学研究所 名誉教授

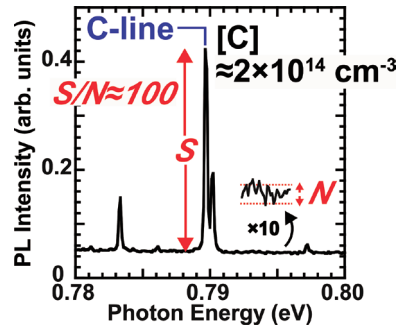
田島 道夫 (たじま みちお)

いま私は、第29回半導体中欠陥の国際会議 (29th International Conference on Defects in Semiconductors) で松江に来ています。半導体中の欠陥に関する会議の中でもとりわけ由緒あるこの会議は、ICDSの略称で知られ、2年毎に開催されています。私は、昨年古希を迎えましたが、1980年代から運営に携わってきたことから、今回は名誉議長として参加しました。会議には予想を超える300名の参加者がおり、この盛会ぶりに安堵しているところです。

この会議は、最初は“Radiation Effects and Defects in Semiconductors” という名称で、そこから想像されるように、放射線照射効果が会議の主要テーマでした。これは半導体中の欠陥に関する研究のルーツを物語っています。当初は、米国は人工衛星の打上げでソ連に後れを取っていましたが、1958年、世界で初めて太陽電池を搭載した衛星ヴァンガード1号の打上げに成功しました。その時、太陽電池は正常に動作したのですが、宇宙空間で放射線を浴びることにより次第に劣化することが分かり、その劣化機構の解明に総力を挙げて取り組むことになりました。そんな中で生まれたのがこの会議です。

放射線によって半導体結晶中の原子がはじき出されるとその一方で空隙ができます。これらはそれぞれ格子間原子、空格子と呼ばれ、現在でも欠陥の議論の中心テーマになっています。当時、George Watkins、Jim Corbettといった、今では神様のような存在のそうそうたるメンバーがその挙動を解明するために活躍し、この会議を設立されたわけです。その後、半導体中の欠陥は、太陽電池だけでなく、LSIなどの全ての半導体電子部品の性能・信頼性を左右する重要な因子として、大学などの研究機関はもとより、半導体材料メーカー、デバイスメーカーなどでも盛んに研究されるようになりました。その一方で、放射線照射効果は、宇宙関連部品に特化したマイナー分野と見なされるようになり、いつの間にか会議の名称から外されてしまいました。

そうした半導体欠陥研究の歴史を知る一老科学者として、私の研究を少し紹介させて頂きたいと思います。宇宙研に来る前は、半導体中の欠陥をフォトルミネッセンス (photoluminescence; PL) という手法で評価する研究を行っていました。その後、着任した宇宙研の電源班では、太陽電池の放射線劣化が最大関心事の一つでしたので、PL法で劣化原因を探る研究を行いました。シリコン太陽電池の劣化の主な原因は、結晶中に残留する炭素、酸素不



電子線を照射したシリコン結晶のPLスペクトル。2 × 10<sup>14</sup>cm<sup>-3</sup> という極低濃度の炭素不純物が信号対雑音比 ≈ 100 で捉えられている。

純物が放射線によってはじき出されて欠陥が生成され、太陽光で発生したキャリアの再結合センターとなって、ライフタイムを短くすることです。そこで、私のPL法で劣化した太陽電池を測ってみたところ、この再結合に固有のPL信号が現れることが分かったのです。そしてこのPL信号の解析から、欠陥の特性や生成原因を突き止めることができました。この際、シリコン結晶中にごく僅かしか酸素、炭素が残留していない場合でも、明瞭にPL信号が観測されることが強く記憶に残りました。

最近になって、エネルギー・環境問題への関心の高まりから、高効率太陽電池や低損失パワーデバイスの開発が急務となっています。これらに向けシリコン結晶の高品質化を図る際に、ライフタイムを長くする上で残留炭素を低減することが必須となるため、低濃度の炭素を定量する技術が渴望されるようになりました。ここで、先の放射線劣化のPL研究のことがピーンときたのです。結晶に宇宙空間と同じように放射線を照射してPLを測ってみると、従来法より2桁くらい低濃度の炭素も容易に検出でき、濃度も推定できることが分かりました。何より嬉しかったのは、純粋な物性研究と宇宙用太陽電池開発の経験が融合して生まれた成果だということです。これに関連する成果を『Jpn. J. Appl. Phys.』誌に投稿したところ、2017 Spotlights論文に選ばれました。図はJJAPのwebでアピール用に紹介されたものです。そして、この方法を誰でも使えるように標準化して欲しいとの要請に応えるため、PL法検討準備会を立ち上げました。また、この方法をさらに改良し、感度、精度、そして信頼性の向上を図るとともに、より簡便に測れるような工夫をしています。実はこれから、その最近の成果についてこの会場で発表するところです。

2017年8月 くにびきメッセICDS会場にて



ISASニュース No.438 2017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 生田 ちさと

編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 山村 一誠

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット (<http://www.isas.jaxa.jp/>) でもご覧いただけます。

デザイン制作協力/株式会社アドマス

## 編集後記

銀河連邦が30周年を迎えました。記念行事「こどもワールドサミット」では国内外の子どもたちが集まって100年後の宇宙や地球について話し合いました。私も一緒に未来を思い描いた楽しい夏のひとときでした。(大川 拓也)

\*本誌は再生紙(古70%)、植物油インキを使用しています。



古紙/パルプ配合率70%再生紙を使用

