

「はやぶさ」カプセルから回収した微粒子（0.1mm程度）の電子顕微鏡画像（左）と、別の微粒子を保管用石英スライドガラスへ移動している様子。

## 新年のごあいさつ

小野田淳次郎  
 宇宙科学研究所長

明けましておめでとうございます。

昨年は、「あかつき」と「イカロス」の打上げ、「はやぶさ」の帰還とカプセル内のイトカワ由来の微粒子の確認など、「人类的」ともいえるほどの高い成果も含めて、宇宙科学を取り巻く明るい話題に事欠きませんでした。現在軌道上で活躍中のそのほかの6機の衛星や、MAXI、SMILESを含む国際宇宙ステーション搭載装置の実験も、レベルの高い成果を挙げてくれました。年末の「あかつき」の金星周回軌道投入失敗は誠に残念でしたが、原因を究明し教訓を今後活かすとともに、6年後の金星周回軌道投入を含め、現状の「あかつき」からできるだけ多くの成果を得るべく、特別体制でJAXAを挙げて検討を行っているところです。

今年は科学衛星の打上げこそありませんが、小型科学衛星も含めて開発中の科学衛星計画を怠りなく進めるとともに、世界をリードする成果を挙げることでできる新たなプロジェクトの創出に向けて全力で臨みたいと考えています。

皆さまご存じの通り、2008年には宇宙開発戦略本部も設置され、我が国としての宇宙開発の在り方が見直されつつあります。今後、あるべき体

制も含めて議論が加速されるものと思います。この議論では、宇宙科学は人類の知の創出・蓄積を目指すものであるとともに、宇宙開発に新たな可能性をもたらす宇宙開発全体を下支えする学術分野であること、広く学術コミュニティの自由な発想を尊重しつつ行われることが質の高い成果創出の要であることなどを踏まえて、宇宙科学を行うに真にふさわしい体制が実現するよう、関係の皆さま方のご支援、ご理解を求めています。

昨年の年頭のごあいさつでも触れましたが、JAXAが宇宙科学分野において継続して世界をリードする成果を挙げていくために、宇宙科学研究所推進検討委員会がまとめた4つの提言（<http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2010/0401.shtml>）を具体化し、宇宙科学研究所をその名にふさわしい中核的研究所とすべく改革を順次進めています。昨年は研究所への名称変更を行ったほか、具体化を推進するために企画機能を強化するなどの組織変更も行いました。今年はさらに本格的な具体化に取り組む所存ですので、ご支援ご協力のほどお願いします。

（おのだ・じゅんじろう）

# IKAROS の ソーラーセイル航行技術

津田雄一

宇宙航行システム研究系  
月・惑星探査プログラムグループ 助教

2010年5月21日にH-II Aロケット17号機により打ち上がった小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSは、12月8日に計画通り金星近傍を通過しました。

IKAROSが目指すソーラー電力セイル技術は、4つの大きな柱からなります。それは、①宇宙空間での大面積セイルの自動展開(セイル展開技術)、②セイル上の薄膜電池での発電実証(電力セイル技術)、③太陽光圧による加速の確認、④ソーラーセイルによる航行技術であり、金星通過までの6ヶ月間で、これらの技術実証項目をすべて完遂することができました。

本稿では、特に上述の③と④、すなわちIKAROSが実現したソーラーセイルによる深宇宙航行技術について紹介しましょう。

## IKAROSの姿勢軌道制御システム

IKAROSはスピン安定方式の宇宙機です。大きな特徴はもちろん、「セイル(太陽帆)」。サイズ14m×14m、厚み7.5μmという巨大で超柔軟な構造物です(図1)。6月9日のセイル完全展開成功の前も後も、セイルそのものや展開システムばかり注目を集めていましたが、展開したセイルを使ってきちんと「ソーラーセイリング」するには、姿勢制御システムの役割はとても重要です。一方でIKAROSは、低コストであることを厳しく求められてもいました。そこでIKAROSでは、目立ちたくないがいぶし銀に光る新しい姿勢系システムに挑戦しているのです。4つほど具体例を挙げましょう(図2)。

第一に、推進系。IKAROSは

姿勢制御用に「気液平衡スラスタ」という新しいタイプの推進系を搭載しています。推進系としては代替フロンを使用しており、液相で貯蔵し気相で噴くために、低圧かつ貯蔵容積の小さい推進系を構成することができます。代替フロンは無毒であり、ピギーバックとして打ち上げられたIKAROSにとって、射場作業やロケットインターフェースの簡素化の観点でも、とても扱いやすい推進系でした。

第二に、姿勢検知方式。通常、スピン衛星では太陽センサとスタースキャナあるいは地球センサにより、宇宙空間でのスピン軸方向を一意に決めますが、IKAROSでは太陽センサと通信用のローゲインアンテナ(LGA)を用いて姿勢決定をしています。これは、宇宙機自体のコストを抑えるためです。LGAから発射された電波の周波数は地上で受けるときに、軌道運動だけでなくスピンのよってもドップラーシフトします。このドップラーシフトの仕方は、地球とIKAROSのスピン軸の相対関係で決まります。そこで、ドップラーシフト量を計測することで「地球角」を逆算することができるのです。この手法は、「はやぶさ」でも緊急時に使われていたものを進化させたものです。IKAROSはハイゲインアンテナを持たないため、とても細い回線での運用を余儀なくされています。この方法だと、テレメトリをデコードせずとも、搬送波だけで姿勢がある程度分かるので、その意味でも実際の運用では大変重宝しています。

第三に、可変反射率素子(液晶デバイス)。エグゼクティブなオフィスルームに時々見られる、電気曇りガラスの一種です。IKAROSではこれをセイルと同じポリイミド薄膜内に封入し、電源をON/OFFすると反射率が変化するものを開発しました。これをセイルの周辺部に並べ、スピンレートと同期してON/OFFを繰り返すと、太陽光圧のかかり方にアンバランスが生じ、宇宙機全体にスピン軸を傾けるトルクが発生します。これにより、燃料を使わずに、光圧で姿勢制御をすることができるのです。プレスリリースなどでも発表されている通り、これはとてもよく機能しています。

第四に、姿勢制御ロジック。何しろ、巨大で超柔軟な膜を常にくっつけて飛行しているため、帆の向きを変えることで軌道制御を行うソーラーセイルでは、巨大柔軟構造物の安定的な形状維持と迅速な姿勢制御という、相反する要求を満たす必要がありました。スピン宇宙機の姿勢制御では、一般的に「ラムライン制御」と呼ばれる

図1 分離カメラ(DCAM)から撮影した、深宇宙航行中のIKAROS

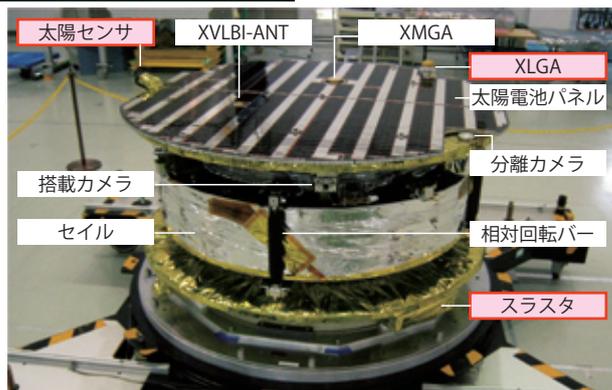
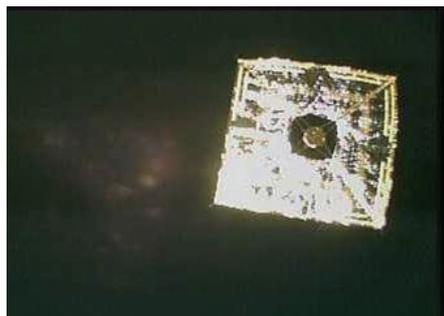


図2 種子島で最終整備中のIKAROS  
赤枠で強調した機器が姿勢軌道制御系関連機器

古典的な制御則が用いられるのですが、IKAROSではこれに柔軟構造物対策を施した「Flexラムライン制御」という制御則を用意しました。ところが、です。幸か不幸か、IKAROSのセイルは十分に構造減衰が強かったため、この新制御則が目に見えて役に立つことはありませんでした。制御屋としては残念ですが、宇宙開発に付き物の石橋をたたいた結果なので、ポジティブに考えなければ、です。

### 太陽光圧加速を確認!

2010年6月9日に、IKAROSはセイルの完全展開に成功しました。セイルの展開状況を即座に確認できたのは、ジャイロの情報、次いで、ドップラーでした。セイル展開中は能動的な姿勢制御はしないので、宇宙機のスピンの回転は、角運動量保存則に従います。つまり、ジャイロデータによりスピンの回転の下がり具合を見ていると、セイルがどれだけ展開したかが分かるのです。姿勢担当は、このデータをモニターしていました。

一方で、軌道担当は、ドップラーをモニターしていました。前述の通信電波にかかるドップラーのスピノモジュレーションをフィルタ処理して除去すると、地球からどれだけ離れているか、すなわち視線方向速度が分かります。このデータがまさに、セイル展開直後に「加速」を開始したことを示していました。加速量は、 $3.6 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 。太陽光圧加速として計画通りの値でした。これがまさに、世界初の深宇宙でのソーラーセイル航行の開始を確認した瞬間だったのです。

### IKAROSの姿勢運用ストラテジー

セイルにかかる太陽光の力は、光圧加速という並進力のほかに、姿勢を乱すトルクとしても作用します。光圧加速を稼ぐ必要のあるソーラーセイルでは、光圧の擾乱トルクは避けては通れない問題です。IKAROSは打上げ前の計画段階から、この光圧トルク擾乱を積極的に利用した姿勢制御を行うことを目指していました。

IKAROSはスピン安定化方式の宇宙機ですが、セイルが巨大な太陽光圧を受けるために、角運動量保存則に反して、スピン軸がふらつきます。このふらつきは、セイルの形状や光学特性が正しく分かれば、正確に予測することができます。しかし実際には、展開後にセイルにできるしわや光学特性の経時的な変化は、打上げ前の開発段階で正確に予知することができないので、フライトデータを利用してモデル同定をしてやる必要がありました。

そのようにしてモデル同定し、さらにそのふらつきの「クセ」を逆用して、できるだけ燃料を使うことなく望みの方向へ制御してやる、そんなことがIKAROSでは実現されています。実際、IKAROSの帆の表面が太陽を向き続けるために使った燃料は、ほとんどゼロです。慣性空間に対するスピン軸の変化量は6ヶ月間で180度、つま

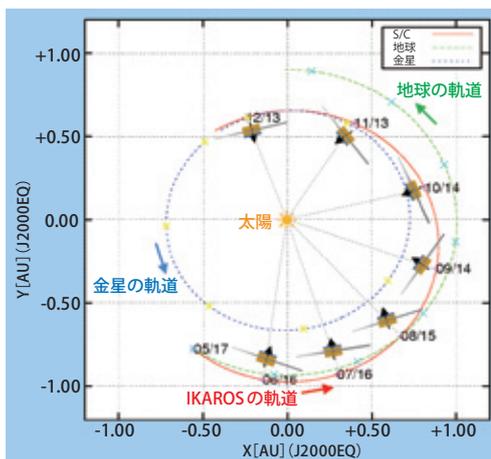


図3 IKAROSの飛行経路と姿勢  
太陽中心の慣性座標系で表示。黒矢印は各時点におけるスピン軸ベクトルの方向を表す。

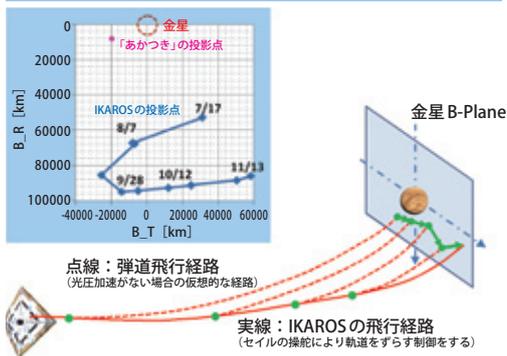


図4 金星相対誘導の結果  
右下は金星 B-Plane (金星を含む衝突断面) 相対誘導の概念図。左上は実績。弾道飛行では B-Plane 上の投影点は時間とともに動かず 1 点で表される。IKAROS がソーラーセイルにより非弾道飛行をするため、B-Plane 上で 1 点ではなく軌跡を描いている。

り無燃料で帆を真反対に向けることができたこととなります (図3)。IKAROSにおいては、燃料は、主として帆の向きを迅速に変えたい場合や、スピンの回転を維持する制御に使っています。

### IKAROSの軌道を操る

これらのお膳立てがそろって、やっとソーラーセイルにおける航法誘導が語れるようになります。IKAROSにおける航法誘導は、軌道決定と軌道制御の2つの作業に大別されます。

ソーラーセイルにおける軌道決定の難しさは、常に光圧による微小な摂動が作用した状態で行う必要があることです。「はやぶさ」でも難航した微小推力下での軌道決定が、IKAROSでは通常運用で要求されています。他方で、この摂動を正しく推定することができれば、軌道上でのセイルの状態、すなわち“ソーラーセイル性能”を評価することができます。この評価のためにIKAROSチーム内に研究会が立ち上がり、JAXAスタッフや専門メーカーのほかに多くのポスドクや学生も参加して、フライトデータを使った解析を進めてきました。毎日、臼田64mアンテナの細いビームがIKAROSを見逃すことなく捉え続けてこれたのは、この軌道決定技術のおかげです。現在は、通常の軌道決定よりも高次の光学パラメータを推定することで、より詳細なソーラーセイル性能に関する情報を引き出す努力を続けているところで

一方で、ソーラーセイルにおける軌道制御とは、すなわち前節で述べた姿勢制御です。与えられた目標軌道に

## むすびに

IKAROSは、金星を通過するまでの6ヶ月で、およそ100m/s分の加速を太陽光圧から得ました。これは一般的な弾道飛行の深宇宙探査ミッションの軌道修正用推薬量に匹敵するオーダーです。しかもこの御利益は、単純に飛行時間に比例します。私たちが次の技術目標として掲げているセイル面積はIKAROSの10倍、ミッション期間は5年以上です。これは加速能力としては数km/s。ロケットの加速能力を無燃料で手に入れるようなものです。しかも、大面積セイルを発電面としても使うことで、高比推力大電力の電気推進系を駆動し、ミッション計画の自由度を高めようとしています。いかにソーラー電力セイル技術が、将来の深宇宙探査を変え得るかが、お分かりいただけるのではないのでしょうか。(つだ・ゆういち)

沿って飛行させるために、太陽に対するセイルの向きを日々制御するのです。IKAROSは特定の目的地を持たないミッションです。軌道は一緒に打ち上げられた「あかつき」に最適化されていました。そこで私たちは、金星を含む衝突断面（専門用語でB-Planeと呼ぶ）上に仮想的な目標点を設定し、その目標点に向けて誘導することで誘導性能を評価していました（図4）。つまり金星距離に仮想的に的を設定して、その点を目標に飛行したわけです。このようにして、H-II Aロケットにより「あかつき」とほぼ同じ軌道に投入されたIKAROSを、「あかつき」とは金星を挟んで太陽と反対側（つまり金星の夜側）を通過させることができました。詳細な誘導航法性能の評価はまだ継続中の段階ですが、IKAROSチームは、ソーラーセーリングの技術を獲得した手応えを感じています。

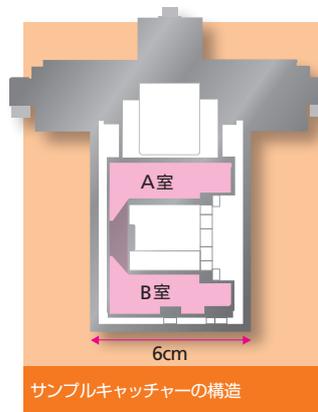
# ISAS 事情

## 「はやぶさ」カプセル内微粒子ピックアップ作業続報

『ISASニュース』2010年11月号でカプセル内微粒子が小惑星イトカワ由来と判明したことを報告しました。その後の状況についてお伝えします。

サンプルキャッチャー A室内部の一部をテフロン製ヘラでかき取り、ヘラの先を直接走査型電子顕微鏡観察したことによって、イトカワ由来と思われる微粒子を1500粒ほど発見しました。この粒子のほとんどは十数 $\mu\text{m}$ 以下とごく微小であるため、一つずつより分けることがすぐにはできません。貴重なサンプルなので、初期分析やその後の分析および長期保管用に分ける必要があります、そのため走査型電子顕微鏡と組み合わせて操作するマニピュレータを新たに開発中です。

新マニピュレータの開発と並行して、キャッチャー内の粒子回収作業を進めています。キャッチャー内にもう一つあるB室内部を見るために、初めて反転操作を行うことになります。これまで観察や粒子の回収をするため開けていたA室開口部に蓋をする必要があり、反転動作で移動した粒子が蓋に付着することが予想されました。そこで、A室開口部に合わせた石英板を新たに作製し、十分な洗浄を施した後に、開口部に石英板で蓋をしてから反転させました。反転動作によってA室開口部に取り付けられた石英板に付着する粒子がどの程度かを把握するため、もう一度A室を上にした状態に戻し、石英板を観察しました。すると、そこには目で見て確認できる（といっ



ても大きくて100 $\mu\text{m}$ 程度という小ささですが）粒子が多数（光学顕微鏡画像で認識できる粒子で数百個）付着していることが分かりました。

現在、この石英板を取り外し、付着した微粒子の観察・回収を実施しています。初期分析にはここから回収した微粒子の一部が配布され、詳細分析が実施される予定です。今月号表紙の写真は、回収した少し大きめ（0.1mm程度）の微粒子の電子顕微鏡画像と、これとは別のものですが、ほぼ同じ大きさの微粒子をA室のサンプルを受けた石英板上からピックアップして保管

用石英スライドガラスへの移動操作をしている様子です。保管用石英スライドガラスは、1.5mm間隔の10×10マス格子をレーザ刻印機で付け、それぞれのマス中央に小さなくぼみをつくっており、最大100個の微粒子を一度に保管できるようにしています。これまで、ヘラからピックアップした粒子やA室内部から直接ピックアップできた粒子と合わせて、スライドガラス1枚分をほぼ埋め尽くしており、2枚目以降の使用を始めています。

A室のサンプルを受けた石英板の上から回収された微粒子の一部も、走査型電子顕微鏡観察を開始しています。ヘラ先に付着した粒子のように一度に観察することができず、1粒1粒マニピュレータを用いてピックアップし、専用のホルダーに移動させてから観察するため、かなりの時間と根気を要します。少しでも効率を上げるために、ホルダーも複数の粒子が一度に観測できるものを用いてい

ます。クリーンチャンバーから電子顕微鏡に微粒子を移動させるには、一度容器をクリーンチャンバーから出す必要がありますが、大気遮断の密閉構造になっており、電子顕微鏡室内に移動させてから容器を開封するため、顕微鏡観察によって微粒子が大気で汚染される心配はありません。

A室の石英板付着微粒子の観察回収作業と並行して、B室の観察も開始しました。B室の蓋を開ける際に手順を誤ると、A室とB室を仕切っている板も外れてしまうため、慎重に作業が行われました。B室の蓋を開けたときの印象は、A室を開けたときと同じで肉眼では何も見えないという感じでした。まだ詳細な観察には至っていませんが、A室同様、B室内部にも同程度の微粒子が付着している

と予想しています。

B室開口部も石英板を設置して上下反転させ、石英板に付着した粒子の観察を開始しており、100個程度の粒子が付着していることが分かっています。B室の方により多くの微粒子があるのではという期待がありましたが、その点についてはまだ分かっていません。

現在は、初期分析に分配する可能性のある粒子の回収と分別作業を優先して実施しています。初期分析に粒子を分配した後も、NASAへの粒子分配や、その後実施予定の国際公募分析へ分配する粒子の回収と分別作業が予定されています。現在、粒子の記載には光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を中心に使用していますが、今後は記載情報を増やしていくことも検討しています。(安部正真)

## 「おおすみ」40周年記念式典と特別公開

日本初の人工衛星「おおすみ」の誕生から2010年で40周年になることを記念して、打上げの地である内之浦で12月4日に記念式典を開催しました。内之浦の銀河アリーナの大ホールをメイン会場にして、小野田所長、鹿児島県知事、肝付町長のあいさつで式典は始まり、地元選出の国会議員お二方と文部科学省からいらっしやった来賓から祝辞を賜りました。あいさつから祝辞を通じて語られたことは、「おおすみ」に始まった宇宙開発の発展に内之浦をはじめとする鹿児島県の方々の支えが必要不可欠であったことと、それに対する感謝でした。その後、「おおすみ」打上げのころの思い出を地元の方々に語っていただきました。当時を知る人は、鮮明にそのころを思い起こされたことと思います。そして、宇宙科学研究所所長であった秋葉先生と鹿児島宇宙空間観測所の所長であった的川先生の基調講演で会場の雰囲気は最高潮となり、ある種の一体感に包まれました。その夜には肝付町主催でレセプションが開催され、会場のあちこちで当時のことから現在、そして宇宙開発の未来について尽きることのないお話の輪ができていました。

この式典と並行して、12月4日から6日まで「はやぶさ」のカプセルの特別公開も行いました。「はやぶさの里帰り」と銘打って、7年前にMUSES-Cと呼ばれていた「はやぶさ」の最終調整を行ったM組立て室のクリーンルームに、60億kmの旅を終えたカプセル



会場である銀河アリーナ玄関前に飾られている、お手製感いっぱいの「はやぶさ」モニュメント。

ルを展示しました。観測所の外の4ヶ所に臨時駐車場を設けて、来場された方々を観測所までシャトルバスで運んだのですが、多くの方々に来ていただいた結果、バス待ちが最大1時間半程度になったそうです。5日は施設特別公開も行い、ネットではオールスターズと評された的川、山田、森田、川口の各先生方の講演や、「はやぶさ」を打ち上げたランチャの勇姿、宇宙服の着ぐるみ

コーナー、銀河連邦の物産展など、多くのイベントで盛り上がりました。カプセルへの関心は非常に高く、世界で唯一の実物を皆食い入るように見つめ、涙を流す方や拝む方もいらっしゃいました。6日には、児童・生徒向けのカプセル公開を行い、多くの子もたちが山田先生の説明を熱心に聴きながら、メモや写生をしていました。肝付町の招待で、昨年秋の大雨で被災した奄美大島の子もたちも見学に訪れ、たいへん喜んで帰られたと伺いました。

3日間を通じて、およそ9000人の方々がいらっしゃいました。これらのイベントはJAXA内の協力はいうまでもなく、肝付町や鹿児島県、警察などの方々からの多くの支援や温かい理解に支えられて、無事終了することができました。所長として、地元の方々が内之浦宇宙空間観測所を非常に大切にしてくださっていることに強く感じ入り、ただただ感謝した3日間でした。

さて、来年はいよいよ観測所が誕生して50周年になります。

(峯杉賢治)

## 「はやぶさ2」10年後に向けて発進！

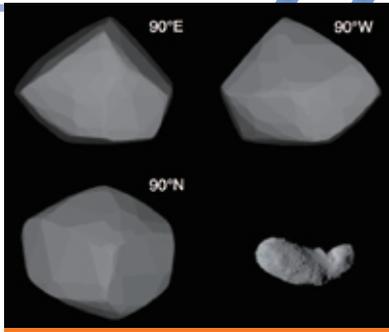
2010年12月末、2011年度予算の内示があり、「はやぶさ2」開発予算が認められました。これも、多くの皆さまに理解していただき、

ご協力いただけた結果です。「はやぶさ2」の準備チームにとって非常にうれしいことですが、同時に気を引き締めて取り組んでいこうと

思っています。

探査対象小惑星である1999 JU3のサンプルリターンを行うためには、次の打上げのウインドーは2014年（バックアップが2015年）になります。打上げまでの日程が非常にタイトです。「はやぶさ2」は「はやぶさ」がやったことを踏襲するといっても、「はやぶさ」はもはや10年も前の技術です。

すでに部品がないものもありますし、そもそも「はやぶさ」の経験から改良すべき点もたくさんあります。開発・製作にかかる期間は、まったくの新規の探査機よりは短くて済みますが、それでも時間がかかります。ということで、「はやぶさ2」準備チームは、よりスピードアップして作業を進めていく必要があります。ただし、急いだことで問題や不具合が起こっては意味がありませんから、最大限、いろいろなところに注意を払いながら慎重に進めていきたいと思っています。



推定されている小惑星1999 JU3の形状。大きさの比較のためにイトカワ（右下）も描かれている。形状推定は川上恭子ら（2009年）による。

それにしても、1999 JU3という小惑星は、いったいどのような姿をしているのでしょうか？ 望遠鏡による観測では、大きさは900mくらいで、どちらかという球形に近い形をしていると推定されています。自転周期は7.6時間ほどで、C型の小惑星です。このC型ということが重要で、C型の小惑星をつくる物質には水や有機物が多

く含まれていると考えられています。小惑星はあまり進化していない天体ですから、つまり、太陽系ができる前に存在していた鉱物、水、有機物について調べることができるわけです。その表面の反射率（アルベド）は0.06と小さく、黒っぽい小惑星なのだと思いますが、いったいどのような素顔をしているのでしょうか？ そして、どのような物質がそこにあるのでしょうか？ 2018年の小惑星到着と2020年の地球帰還が、今から楽しみです。（吉川 真）

## 「はやぶさ」カプセル全国巡回中

昨夏、7月30～31日の特別公開に併せて相模原市立博物館で世界初公開された「はやぶさ」再突入カプセルは、日本各地を転々としています。夏休み期間中に筑波宇宙センター、丸の内オアゾ、日本科学未来館を回り、その後、角田宇宙センター、近鉄百貨店阿倍野店、調布航空宇宙センター、名古屋市科学館、国立科学博物館、内之浦宇宙空間観測所などを巡りました。今後は公募で選ばれた場所を、2010年度末までに16ヶ所（公募外も含めると26ヶ所）、そして来年度も40ヶ所を巡回する予定です。

巡回先の選考・調整作業は困難を極めました。ある程度予想はされたことですが、年52週しかないところに119件もの応募があったからです。公募の際の募集要項にあった「地域や都道府県のバランス、展示施設の立地・種類・規模、交通の便など、もろもろの要素を総合的に考慮」という基準で選定していくわけですが、会場側にも受け入れ可能な日程には制約がありますし、輸送に伴うカプセルへのダメージや費用を最小にとどめるためには巡回路のデザインも重要です。もちろん研究や保守点検のための日程もある程度は確保しなければなりません。外部有識者を含む選考委員会で議論を重ねて最終的にリストアップされた候補地が、上記の56ヶ所なのです。この中には、すでに確定したところもありますし、まだ調整を要するところもあります。詳細が確定し次第、ご案内したいと思います。

全県をカバーできたわけではありませんが、限られた時間で全国のかなりの地域を回ることはできるのではないかと思います。私たちの手元には、すでに公開を終えた団体からの報告書や見学者から寄せられた意見なども届き始めています。全国巡回の先陣を切り、4日間で2万6280人の来場があった呉市海事歴史科学館（大和ミュージアム）からは以下のコメントをいただきました。——開

催決定から日数がない中、準備も急ピッチで行われ、11月20日（土）から23日（火・祝）の4日間的一般公開を無事終了しました。公募としては全国初、また中四国・九州地区でも初お目見えということもあってか、いずれの日もオープン前から長蛇の列ができ、しかも夕方まで絶え間なく続く盛況ぶりでした。今回注目されたのは、「はやぶさ」の数々の偉業（科学技術）ですが、何よりも幾度となく訪れた困難やトラブルに果敢に挑んでいくチャレンジ精神こそ、次につなげ伝えていかなければならないものだったのではないのでしょうか。このたびの展示にあたり、好奇心・冒険心・匠の心を与えてくれた「はやぶさ」に「おかえり」、そして「ありがとう」と伝え、またいつの日か呉の地で会えることを楽しみに待っています。——

また、佐賀で展示を見た小学生の女の子がきっかけくれた詩も届きました。とても素敵な作品ですので、この場を借りてご紹介します。カプセル展示をまだご覧になっていない方は、近くを巡回する折にホンモノをぜひご覧いただき、この少女のように何かを感じ取っていただければ幸いです。（阪本成一）

### おかえりカプセル

見たいなと思っていた、  
本物のはやぶさのカプセルを見た。  
UFOみたいな形で、  
ピカピカ光る所もあったけど、  
きずだらけで、  
しょうげきのすごさが、  
よく分かった。

直径約四十センチメートル、  
重さ十七キログラム、  
妹の体重と同じくらいだ。

七年前、私が三才の時、  
うちゅうに飛び出してやっと帰ってきた。  
こしょうしたり、  
まい子になったりしたけれど、  
よく帰ってきたなあ。  
「おかえりなさい。おみやげありがとう。」  
と、そっと声をかけた。

カプセルから見た地球は、  
どんなすがたをしていたのかなあ。  
いつか私も、  
うちゅうから地球を見てみたいな。

田中 結（佐賀県・小学4年生）

金星探査機「あかつき」は地球から金星へ200日の航行を終え、2010年12月7日9時(日本標準時)、金星周回軌道への投入オペレーションが行われました。結果としては金星を回る軌道へ「あかつき」を送り込むことができませんでした。多くの皆さんの期待に応えられぬ残念な報告となってしまいました。

図1に今回の金星軌道投入の計画と実際の結果を示します。図は金星を北から見下ろしたものです。「あかつき」は右下から金星に近づきました。12月5日には軌道投入に必要な命令をすべて「あかつき」に送って、タイマーで動くようにしました。12月6日にはこの命令に従って軌道制御エンジン噴射姿勢に遷移しています。12月7日8時49分にエンジンの噴射が開始されましたが103秒後、「あかつき」は地球から見て金星の裏側に入ったために通信が途絶えます。計画では9時1分0秒まで噴射が継続するはずでしたが、「あかつき」に記録されたデータを再生してみると、8時51分38秒に「あかつき」自身の判断で噴射を停止したことが分かりました。図には示してありませんが、その数秒前に何らかの大きな力が「あかつき」の姿勢を乱したことが噴射停止の引き金となっています。「あかつき」が金星の陰から出てきた9時12分すぎ(地球では3分強の電波伝播遅延がある)には通信を再開できる予定でしたが、実際に「あかつき」からの電波を地球で捉えることができたのは10時26分ごろのことでした。

このオペレーションで、計画の約2割の減速しか達成できなかったため金星を周回する軌道に入ることができず、金星の重力圏を脱出し、太陽を周回する軌道に入りました。現在の「あかつき」の軌道は、近日点距離約9000万km、遠日点距離約1億1000万km、公転周期約203日です。金星の公転周期は約225日であるため、「あかつき」は約6年後に再び金星と会合する可能性があります。その日に備えて、各搭載機器について、長期にわたる運用で問題になると考えられる課題の整理をし始めることとしました。

宇宙航空研究開発機構では、12月8日朝に宇宙科学研究所長を長とする「あかつき」金星周回軌道投入失敗調査・対策チームを設置し、原因究明および対外対応などを進めています。また宇宙開発委員会は、12月8日の定例会で調査部会(河内山部会長)への付託を決定し、すでに会合が始まっています。

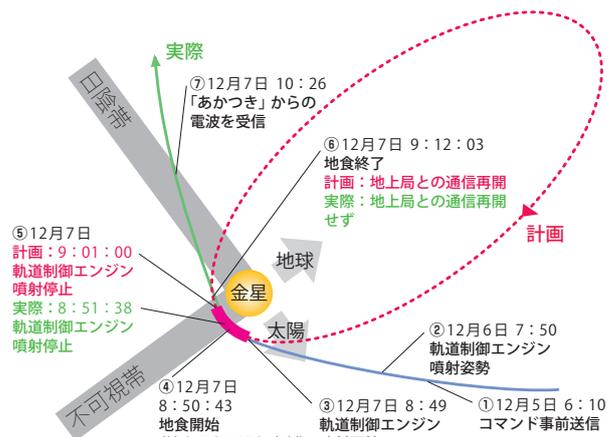


図1 「あかつき」の金星軌道投入の計画と実際

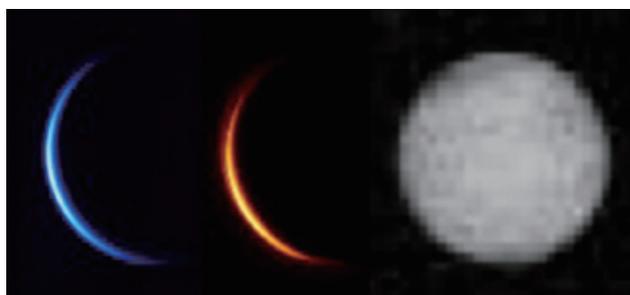


図2 「あかつき」が撮影した金星

「あかつき」から送られてくるテレメトリデータをもとに現在の状態について調べた結果、すべてのサブシステムは正常値を示しています。また姿勢系の制御モードも正常値に戻って姿勢も安定し、高利得アンテナを地球に向けて正常な運用を続けています。また、地上局との通信も正常です。さらに観測機器の健全性を確かめるために、12月9日(金星周回軌道投入制御を実施した日の翌々日)には約60万kmの距離から金星の撮像を行いました(図2)。画像は人工的に着色しています(青色:UVI 365nm, だいたい色:IR1 0.9  $\mu$ m, 白黒:LIR 10  $\mu$ m)。幸いなことに、私たちはまだ「あかつき」をコントロールしています。ミッションは失われたわけではありません。まずは原因究明に全力を尽くし、続くミッションで同じ過ちを繰り返さないこと。そして、今の「あかつき」を無事に飛行させ可能な限り多くの科学的・工学的成果を挙げる。そして「あかつき」の弟、妹たちを宇宙に旅立たせ、人類の知識の獲得に向けて邁進すること。それが我々宇宙科学に携わる者の使命だと、プロジェクト一同考えています。金星探査の意義は今も決して失われてはいません。金星の謎を解く日まで我々とともに歩んでいただけますようお願い申し上げます。

(なかむら・まさと)

熱技術者の現場国際協働

ESTEC LSS による MMO 試験

BepiColombo MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) プロジェクトは、オランダにある ESTEC (European Space Research and Technology Centre) の LSS (Large Space Simulator) 設備を使用して、熱モデル試験を2010年9月から12月にかけて行いました。9～10月はMMO単体 (JAXA 担当分の水星探査機) の熱モデル試験、11～12月はMMOとヨーロッパのモジュール MOSIF (Magnetospheric Orbiter Sunshade and Interface) を組み合わせた熱モデル試験です。これらの試験に先立ち、ESTEC LSSは、BepiColombo プロジェクトのために水星環境が模擬できるように、最大10ソーラー (1ソーラー=地球近傍の太陽光強度) の模擬太陽光が照射できる

よう改修されました。MMOの試験はLSSで水星を模擬した最初の試験です。

MMO単体の試験は、JAXAがESTECの設備を借用する形で実施されました。ESTECの試験設備の保守や運用はETSという民間企業に任されており、通常の業務はETSの担当のDeutsch氏

(ドイツ人)とやりとりしながら進められました。言葉の壁は厚いものの、遠慮しては現場が動きません。英語の文法の正しさや単語の適切さは二の次で、まずは伝えること。必死でなんとか伝えようとしました。Deutsch氏をはじめ現地の方々は、私が言いたいことをくみ取ってくれました。特にBepiColombo試験担当のGaido氏 (イタリア人) はいつも「ミスター小川。OK。私の理解が正しければ……ということだな? 間違っていたら修正してくれ」といったふうに私の言いたいことを理解し、しかも理路整然と説明してくださり、だいぶ助かりました。Gaido氏はMMO単体試験の最初からMOSIFの試験の終わりまで、ずっと献身的に支援してくださいました。ESTECにはヨーロッパのいろいろな国の人がいて、英国人以外は母国語

でない英語を話すことになるので、こちらも気持ちには楽でした。

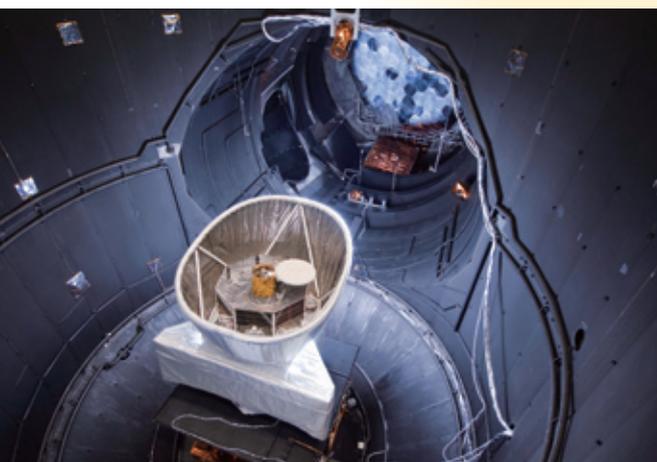
LSSの設備は素晴らしいものでしたが、その中でも赤外線カメラとデータ処理表示装置には感心させられました。LSSには内部に赤外線カメラが設置され、試験中MMOの表面温度分布を測定することができます。データ処理表示ソフトウェアは熱技術者にとって非常に使いやすい、とてもよくできたものでした。

ESAの衛星は、試験前後に衛星そのものの熱光学特性を可搬型の装置で測定することが普通のように、試験前確認会で「えっ、測ってないの? なんで?」。日本には衛星そのものを測定する装置がないのです。「測るべきだよねえ」。MMOはESTECの装置で試験後に測定していただきました。衛星そのものの熱光学特性の測定は信頼性向上のために強く望まれることであり、日本においてもぜひ導入すべきです。予算要求を心に誓いました。そのほかにもESTECには、いくつかの分析装置とそれを実施する専門の人員がそろっており、プロジェクトからの要望に応じてすぐに対応してくれる体制になっていて、とても素晴らしいと思いました。

さて、MOSIFと組み合わせた試験は、Thales Alenia Space社 (TAS-I) の仕切りで、Astrium社 (BepiColomboの主契約企業)、ESA、JAXAの熱技術者が協働する形で実施されました。ヨーロッパの熱試験の考え方ややり方、進め方はよく洗練されており、とても勉強になりました。参加した熱技術者は学会でお会いしている人が多く、その方々と一つの試験で協働したことはとても勉強になりました。熱グループの若い人たちもよくやりました。言葉通り「寝る間も惜しんで」勉強させてもらいました。BepiColomboのほかのモジュールの熱試験はまだこれからですが、それらにもぜひ参加して、MMOへの反映はもちろん、日本の衛星熱技術の向上に貢献したいと思います。

外国の設備を使用するのも、外国の方と現場で協働するのも初めてのことでしたが、後のMOSIFの試験も含めて、現地の方々の献身的なご協力と忍耐、日本側ではJAXA内外の方々、特に製造メーカーの方々のご協力のおかげで、無事試験を終えることができました。ありがとうございました。

今回現場レベルの国際協働が成功し、BepiColomboプロジェクトは大切な一歩を進めることができました。 (おがわ・ひろゆき)



MOSIFとMMOを組み合わせた熱モデルと試験前の動作確認の様子 ©ESA/JAXA/A. Le Floch'h

小川博之

宇宙航行システム研究系准教授



## 22年間の緊張と感謝

### 山川 宏

内閣官房宇宙開発戦略本部 事務局長  
京都大学生存圏研究所 教授

1988年に松尾研に入ってから、修士時代の「ひてん」、博士時代の「GEOTAIL」に始まり、助手・助教授時代の「のぞみ」「はやぶさ」などの軌道設計を通して、打上げの10年以上前から始まるミッション立案の真髄、打上げ後の運用に必要な柔軟性について、上杉先生、中谷先生、川口先生などから、絶えず緊張感と創造性にあふれた議論をもって教えられた。

緊張といえば、大学院生として最初の海外学会での発表のときを思い出す。米国で開催された学会会場に行くと、出席者の半分程度が軍服を着ていた。会場には日本人はおそらく1人だけだった。衝撃的だったのは、若い研究者が発表をしていたところ、突然、軍人に両腕を持たれて部屋の外に連れていかれてしまったことだ。今、考えると、問題のある内容を発表してしまったのだろう。

次の緊張の場面は、「EXPRESS」の打上げ運用のため1995年に、ドイツの衛星運用センターに行ったときに訪れた。このとき運悪く、ISASからは1名だけの参加であった。打上げロケットに不具合があった次の日、ドイツ、ロシアなどのメンバーで構成される運用チームの前で、ISASとしての説明をする必要があったが、極めて限られた情報をもとに、大汗をかきながら話したことを覚えている。その後、日本の稲谷先生に電話すると、予定通り欧州に滞在せよと言われたことも覚えている。

同じ1995年には、月ペネトレータの性能確認のため、ヘリコプターで高度500mから固体ロケット付きペネトレータを分離投下する実験に参加した。秒速300mで着地時に砂浜に描いた半径50mの円から逸脱しないことを確信し、確信させること。これが私の仕事であり、いかに事前に計算などで確認してあっても、実際のヘリ分離時の緊張感は極めて印象深いものであった。稲谷先生、石井

先生に、ご心配をおかけしてしまった。

2000年以降、BepiColombo水星探査計画の日本側のスタディマネージャー、プロジェクトマネージャーになってからは、朝から晩まで何日も続く、長期戦としての会議という場での緊張感に鍛えられるようになった。プロマネの発する言葉には責任が伴い、基本的に穏やかに会議を進めつつも、あるときは意図的に感情を表に出すことの重要性を知った。当時、向井先生、早川先生の冷静な対応を見習いたいとずっと考えていた。

2001年のロシアのミール宇宙ステーションの制御落下の際には、リエントリ途中に日本上空を通過することから、危機管理の対象となった。軌道工学の専門家ということで、当時のISASから私と、NASDAから4名の合計5名のチームがロシア・ツープ管制センターに派遣され、ミールの運用状況、軌道情報などを日本に正確に伝える仕事に従事した。各国の政府、宇宙機関、メディア関係者がごった返す中で、正確に情報を収集、分析、伝達するという仕事に緊張感を持って望んだ。広報担当も兼務することになった私にとって、慣れない報道対応や政府対応は、その後に非常に役立ったことは確かだ。日本の川先生の存在が非常に大きかったことを付け加えたい。

1997～2006年の一連のM-Vロケットの打上げでは、軌道・姿勢プログラムの設計をしていた。フライト直前に第三者によるチェックを受けるのだが、自分の計算が合っ

ていたのだろうかと何回も再確認しているときは、本当に緊張感のある時間である。それは、たいてい夜中か早朝であった。打上げ前の小野田先生、森田先生らとの議論はいつも緊張に満ちたものだった。

1999～2003年の垂直離着陸の再利用型ロケットのフライト試験では、航法誘導制御の担当であった。すべてが初めてという状況の中、わずかな高度ながら上昇して静かに着陸したときの緊張と感動は忘れられない。稲谷先生、成尾先生から熱意の継続と瞬時の判断の重要性を学んだ。

2006年にJAXAから京都大学に異動して以降、大学らしいアカデミックな緊張感を持ちつつ研究・教育に従事する一方で、政府系の委員会に参加して日本の宇宙活動が元気になることを祈念していた。ただ、2010年7月の宇宙開発戦略本部事務局長就任の件は、まさに青天の霹靂であった。前原元・宇宙開発担当大臣から松本京大総長を通して打診があってから数ヶ月しかたっていないが、日々、決意を新たに取り組んでいる。7月から9月までは前原大臣、9月以降は海江田大臣、今年1月からは玄葉大臣のもと、関係各府省との宇宙政策に関する総合調整の事務に携わっている。その過程で、多くの国内外の閣僚、議員、官僚、機関、企業の方々とお会いし、緊張に満ちた日々が続いている。毎週、新幹線で京都と東京の間を平均3往復しているので、どう少なく見積もっても1年で100回以上は新幹線に乗っていることになるが、この新幹線が気持ちを切り替える場所でもある。日本の宇宙開発利用が戦略性に富み、その結果として元気になること。それが目標である。

感謝すべき方々の名前は書き切れなかったが、最後に、これらの一連の緊張感のある仕事に導いてくださった恩師の松尾先生に感謝申し上げます。（やまかわ・ひろし）

# 太陽を通して宇宙や自然を理解したい

宇宙科学共通基礎研究系 准教授

清水敏文

## —— 子どものころから天文に興味があったのですか。

清水：信州の自然豊かな環境で育ち、理科が好きでした。天文に強く興味を抱いたのは、小学校5年生のころ。理科の先生が、星や太陽の像を望遠鏡で見せてくれたのがきっかけです。そして自分でも、ガラス板を切り出して煤<sup>すす</sup>を付け、日食を観察したりしました。

中学校の夏休みの自由研究では、短期間に変化が分かる天体の観察を考え、太陽黒点の変化をスケッチ観察しました。その自由研究作品は長野県学生科学賞作品展覧会などに出品され表彰されました。

## —— 宇宙から太陽観測をする道に進んだきっかけは？

清水：大学では遠い宇宙からの電波を観測する研究室で受信機の製作をしていました。あるとき、隣の研究室で先輩に「本当は太陽に興味がある」と相談したら、その話が東京大学で太陽を研究していた常田佐久さんに伝わり、「今、太陽観測衛星を開発している。興味があれば東京に来なさい」と言われました。

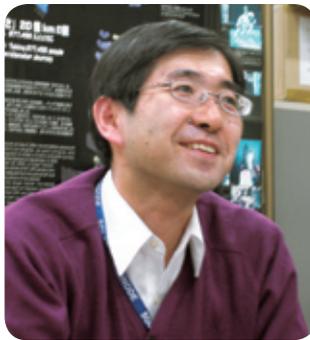
## —— 1991年に打ち上げられた「ようこう」ですね。

清水：そうです。私が東京大学大学院へ進学した1990年当時、宇宙研で「ようこう」の総合試験が始まったところでした。私も参加して、朝から深夜までチェックアウト室でソフトウェアの作成をしながら試験データのチェックに没頭しました。

## —— 現在、太陽の何を解明しようとしているのですか。

清水：太陽コロナを加熱し活動性を引き起こす仕組みを理解しようとしています。太陽はありふれた恒星の一つにすぎません。しかし私たちがその表面を詳しく観測できる唯一の恒星です。宇宙はさまざまな高温プラズマで満ちていますが、その加熱の仕組みは大きな謎です。太陽コロナも高温プラズマの一種です。太陽の熱源は中心部で起きている核融合反応。太陽表面の温度は約6000度で、熱法則だと外側に行くほど温度は低くなるはず。しかし上空にあるコロナは数百万度もあるのです。太陽表面の対流が持つエネルギーの一部が、磁場を介して非熱的に彩層やコロナに注入されると考えられています。しかし、まだ非熱的な輸送・注入の仕組みが分かっていません。

磁場を介した仕組みなので、磁場を直接的に測定すること



しみず・としふみ。1966年大みそか、長野県生まれ。博士(理学)。名古屋大学理学部物理学科卒業、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、国立天文台助手・主任研究員を経て、2005年より現職。専門は太陽物理学。

が本質的に重要です。太陽表面の磁場は、可視光域の吸収線の光の性質を分析することで、測ることができます。その目的で、私たちは口径50cmの可視光望遠鏡を開発することに挑戦しました。実は、似たよ

うな望遠鏡の開発を1980年代にNASAが検討したのですが、技術的に難しく断念しました。可視光望遠鏡の開発には、何人もの人たちが研究生生活のすべてをささげました。私もその一人です。そして2006年9月、可視光望遠鏡を搭載した太陽観測衛星「ひので」が打ち上げられました。

## —— 観測成果は？

清水：世界で初めて撮影された鮮明な太陽表面、そしてその上空の彩層は、思いもよらなかったダイナミックな活動に満ちていました。今まで、そちらに目が奪われ研究をしていましたが、X線観測も併せてコロナ加熱と磁場の関係を探る研究にも取り掛かり始めました。さらに、「ひので」の次の衛星の検討も進めています。

## —— 次は何を目指すのですか。

清水：二つの案があります。一つは、黄道面から脱出し、地球からは見えにくい太陽の極地方を観測する案。もう一つは、地球周回軌道から高解像度で偏光や分光観測をする案。「ひので」で見えてきたダイナミックな太陽大気を物理的に理解するのに強力な手段です。私たちが検討を進めている次期太陽観測衛星には、海外からも大きな期待が寄せられています。日本は宇宙からの太陽研究で、世界の第一線を走っているのです。

## —— 次期太陽観測衛星の打上げ予定は？

清水：約10年以内です。望遠鏡や衛星の開発は本当に大変で、体力勝負。昨年から週3回ジムに通い、体力を増強中です(笑)。宇宙科学は、知的好奇心の最大の原動力です。衛星計画により、新しい観測技術が開発され、それが思いもよらない物理現象の発見をもたらします。また近年、太陽活動の遅延や低調さが観測データに見られ、太陽をより深く理解するチャンスです。太陽研究の発展がなければ、宇宙や自然の理解も進みません。

ISAS ニュース No.358 2011.1 ISSN 0285-2861

発行/独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
〒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/>) でもご覧になれます。

デザイン/株式会社デザインコンピリア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

### 編集後記

明けましておめでとうございます。今月も、いろいろなミッションの最新の状況などを、現場のスタッフ、研究者の方々からの迫力ある生の声をお届けすることができたと思います。本年もよろしく願い致します。(田中 智)

\*本誌は再生紙(古紙100%)、大豆インキを使用しています。

R100  
古紙配合率100%再生紙を使用しています

PRINTED WITH SOYINK  
Trademark of American Soybean Association