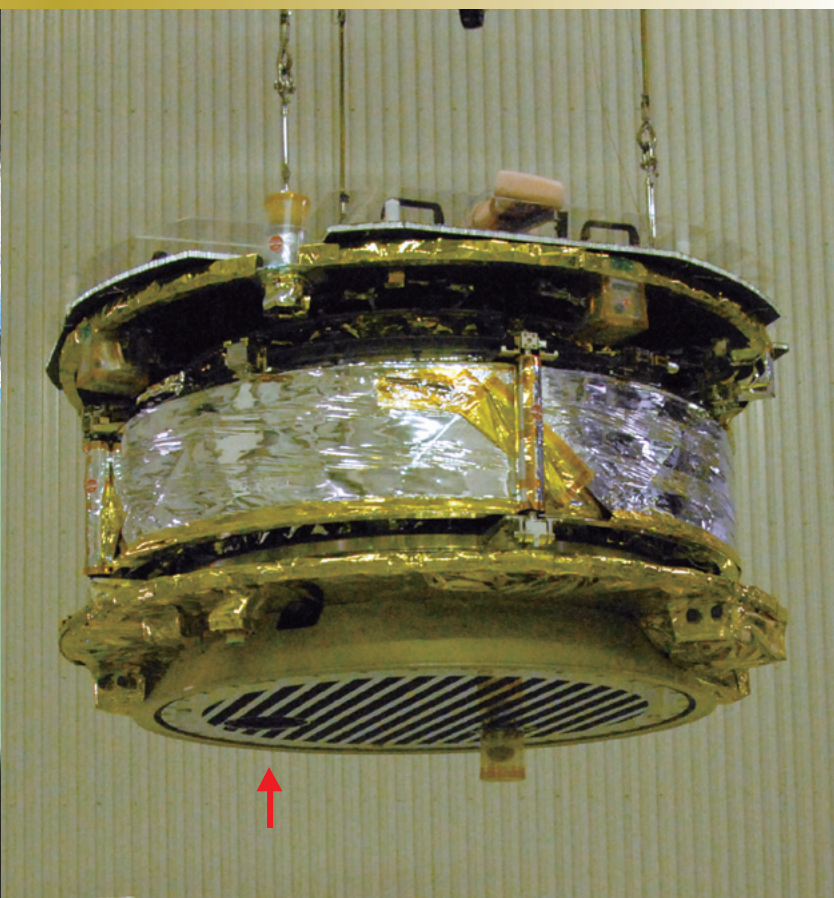
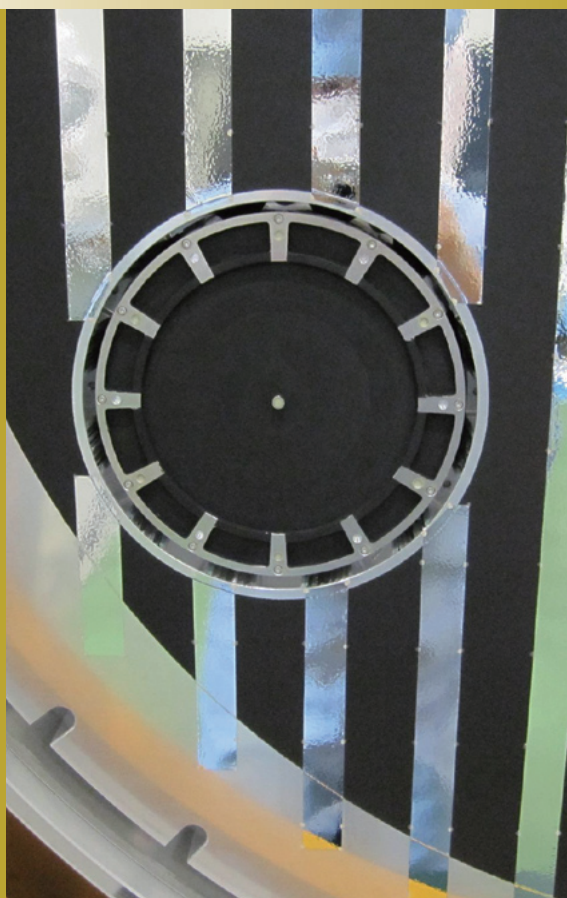




宇宙科学最前線

左：IKAROS に搭載されたガンマ線バースト偏光観測装置 (GAP) を正面から見たところ。
右：IKAROS 試験風景 (ソーラーセイル展開前)。矢印部分に GAP が搭載されている。

ガンマ線偏光観測の実現と ガンマ線バースト放射メカニズムの研究

金沢大学理工研究域 准教授
米徳大輔

2010年5月に打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS (イカロス)」は、世界初となる太陽光圧による加速実証を成し遂げ、次世代のソーラー電力セイル技術開発の第一歩を踏み出しました。その大成功を受け、木星およびトロヤ群小惑星帯への航行技術として利用することが検討されています (『ISAS ニュース』No.358・No.388 [津田雄一氏], No.391 [森治氏] の記事など参照)。

IKAROS には2種類の理学観測装置が搭載されています。一つは宇宙空間のダストを検出するための大面積ダストカウンター (ALDN) で、もう一つは我々のグループで開発したガンマ線バースト偏光観測装置 (GAP) です (No.359 [村上敏夫氏ほか] の記事参照)。本稿では GAP で得られた科学成果について紹介させていただきます。

宇宙最大の爆発「ガンマ線バースト」

ガンマ線バースト (GRB) とは、100 億光年以上も離れた宇宙から数十秒間という短時間だけ大量のガンマ線が飛来する現象です。ガンマ線の総エネルギーは、超新星爆発をはるかにしのぐような宇宙最大の爆発現象と認識されています。GRB は一瞬ではありますが非常に明るく輝くので、はるか遠方の宇宙 (初期宇宙) を見渡せる光源として利用されています。宇宙科学における重要性がますます増している現象といえます。

しかし、そのような膨大なエネルギーをガンマ線放射として解放するメカニズムについては、観測的に突き止められていません。さまざまな観測から、細く絞られたジェット状に光速の99.99%にも達す

る速度を持った粒子や光子が噴き出していることが分かってきました。しかし、その中でどのようにガンマ線をつくり出しているのかというプロセスについては不明な点が多いのです。理論的な予想では、相対論的ジェットの内側に強い磁場が存在し、そこに電子が絡み付いてガンマ線をつくり出す、いわゆる「シンクロトロン放射」だと考えられています。電子はローレンツ力を受けて磁場と垂直な面内で運動しますから、このとき発せられるガンマ線は、磁場と垂直な方向に強く偏光します。ガンマ線偏光を直接的に検出することがGRBの放射機構に迫る最良の手段と考えられます。

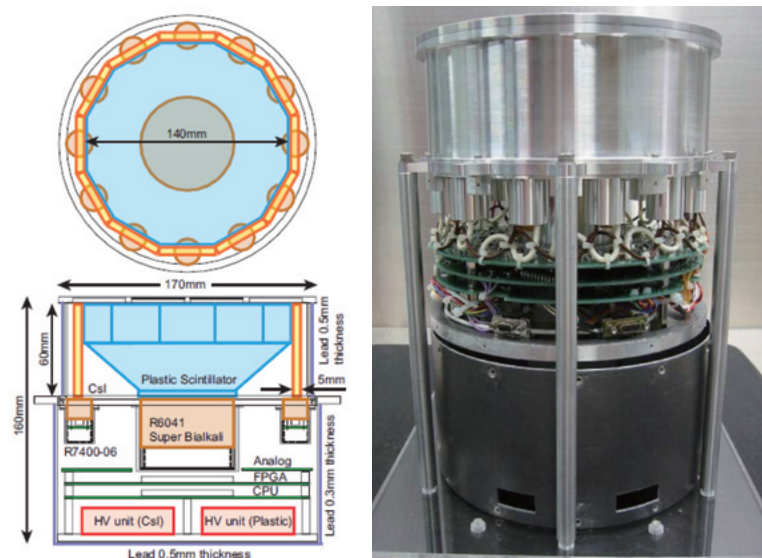
偏光観測の重要性

電磁波は、振動する電場と磁場が波として伝播するものです。電場の振動方向を偏光方向として定義しますが、この向きが完全にランダムな場合を無偏光といい、完全に方向がそろっている場合を完全偏光（100%偏光）といいます（ここでは直線偏光のみを扱います）。身近なところでは、釣りやスキーのときに掛ける偏光サングラスなどで使われています。水面やゲレンデの斜面で反射した光は強く偏光しているため、その偏光光線をカットするような偏光フィルムを使うと、まぶしさを軽減できるわけです。宇宙観測でも、ガスやプラズマで散乱した光や、よくそろった磁場に絡み付いた電子からの放射（前述のシンクロトロン放射）などから、強く偏光した光が観測されます。

これまでのGRB観測では、ガンマ線の到来方向、時間変化、エネルギーという3種類の物理量を観測していましたが、ここに「偏光」の情報が加われば、磁場の存在やプラズマの形状を知ることができ、まったく新しい切り口で放射メカニズムに迫れるわけです。特に、理論的に考えられているような磁場の存在を立証できることが大きな特徴です。

図1 GAPの内部構造の模式図（左）とフライトモデルのカバーを開けた様子（右）

GAPの内部には3段構造の電子基板と、2台の高圧電源が納められている。



ガンマ線バースト偏光観測装置 (GAP)

ガンマ線の偏光観測は過去にほとんど例がありません。太陽観測衛星RHESSIやガンマ線観測衛星INTEGRALのデータを使って偏光を議論した例はありますが、独立したグループが完全に異なる結果を出すなど、いくつかの疑義が出ていました。そこで金沢大学・山形大学・理化学研究所のグループでは、小さくても構わないのでガンマ線偏光観測を主目的とした設計を行い、検出器をきちんと校正した上で世界初の観測に乗り出そうと考えました。IKAROSに搭載していただけたことで、GAPは宇宙空間でガンマ線偏光観測を実施した最初の検出器となりました。

図1にGAPの構造とフライトモデルの写真を示します。大きさは直径17cm、高さ16cm、重量3.7kg、消費電力5Wという、ガンマ線検出用としては非常に小さな観測装置です。内部のセンサーは12角形のプラスチックシンチレータと、その周囲を囲むように12枚のCsIシンチレータを配置した構造になっています。ガンマ線は偏光方向と垂直に散乱しやすい性質があるため、その散乱角度分布を測定できるようになっています。例えば、横向きに偏光したガンマ線が入射した場合、上下方向への散乱強度が強くなるため、360度で二山を示すM字形(W字形)の散乱角度分布を描くことになります。

我々はGAPの大部分を、実験室のとても狭いクリーンベンチの中で開発しました。IKAROS本体とつながる電源リレーや通信用LVDS素子、GAPの中でも根幹となるFPGA、CPU（FPGAの内部に8051coreを焼き込んだ）、一部のメモリは放射線耐性の高いものを利用しましたが、それ以外のほとんどの回路部品は、独自に放射線試験を行って選定したものを使っています。石川県工業試験場での振動試験や宇宙研での落下衝撃試験では何度も枕をぬらし、その都度、振り出しに戻って試行錯誤を繰り返しました。フライトモデルを分解して作り直したこともありました。チームリーダーの村上敏夫教授（金沢大）は、「理解できない部分をなくす」「不安な要素は対処する」の2点ができなければ搭載しないという基本に忠実な方針を徹底していましたし、私自身もその精神をもって開発することができました。これまでに宇宙空間で正味1.5年の運用を行いました。その間、一度もトラブルがなかったことに、当事者ながら感動しています。

初めての偏光観測

2010年8月26日に、GAPは非常に明るいバーストGRB 100826Aを観測しました。過去に検出された例と比較しても楽々とトップ1%に入る明るさ

のGRBを、GAPの正面から20度しか離れていない好条件で観測できました。このGRBは継続時間が100秒程度と長く、複数のパルスを示していました。前半と後半に時間分割して偏光データを解析したところ、偏光角の位相が大きく変化していることを 3.5σ の有意度で検出しました(図2左)。前後半の平均的な偏光度としては、 $27 \pm 11\%$ (有意度 2.9σ) であるという結果が得られました(図2右)。

さらに翌年にはGRB 110301AとGRB 110721Aの2例の明るいGRBからも、それぞれ $70 \pm 22\%$ (有意度 3.7σ) と $84 (+16, -28)\%$ (有意度 3.3σ) という、非常に高い偏光を検出しました。これら2例に対しても偏光角の時間変化を調べましたが、有意な変化は見られませんでした。継続時間が10秒程度と短いため、先のGRB 100826Aとは状況が異なるのかもしれませんが、GAPはこれまでに30例のGRBを検出していますが、有意な偏光を検出できたのはこれら非常に明るい3例のみです。そのほかからは偏光度の上限値を得ていて、すべてを包括して考えると約30%程度が平均的な振る舞いであると考えています。

見えてきたジェットの内部構造

GAPの観測から、相対論的ジェットの内部環境を推測してみましょう。まず、ガンマ線放射が高い偏光度を示していることから、放射メカニズムはシンクロトロン放射であると考えることが自然です。問題は、バーストの最中に偏光角が変化したという事実をどのように捉えるかです。

相対論的ジェットを形成するモデルの一つに、らせん状の磁場を考えるものがあります(図3)。プラズマは磁場と相互作用して自由に散逸できなくなるので、細く絞るには好都合です。それを正面から見ると同心円状の磁場になっているはずで、もし、放射領域が小さなパッチ状に点在していて、場所ごとに磁場の向きが異なるのなら、GRBのパルスごとに偏光の向きが異なることも説明できます。小さな放射領域では、磁場は局所的にそろっているため高い偏光度を示し、かつ偏光角が変化するという2つの観測事実を同時に説明できるわけです。GAPの観測から、GRBのジェットには内部構造があり、具体的な磁場の形状が見えてきました。宇宙ジェットの形成という高エネルギー天文学の大問題に、重要な示唆を与えることになります。

電磁波が散乱した場合でも偏光を示すと紹介しましたが、実は、GRBの理論モデルの中にもそのような状況を考えているものがあります。今回の観測だけでは、統計精度が不十分で完全にそのモデルを棄却することはできませんが、高い偏光度を示していることからシンクロトロン放射モデルに軍配が

図2 GAPで観測したGRB 100826Aの偏光データ(左)と統計解析を行った結果(右)
二山のモジュレーションが見られるが、前半と後半で位相が逆転している。平均的な振る舞いとして、 $27 \pm 11\%$ の偏光度を示している。

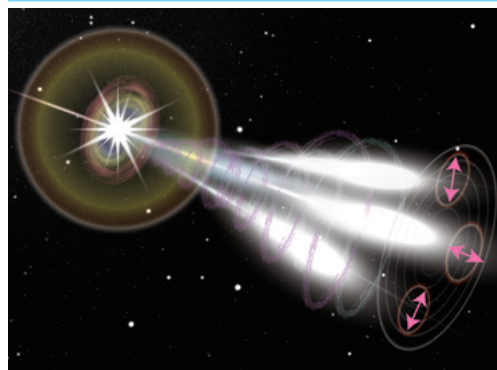
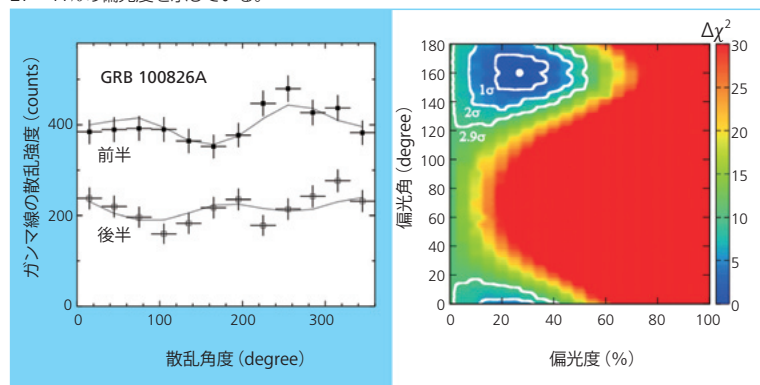


図3 ガンマ線バースト(GRB)の想像図
らせん状の磁場により、相対論的ジェットが細く絞られており、その内部で複数の放射領域が光っていると考えられる。それぞれが異なる偏光方向を示すことで、偏光角の時間変化を説明できる。

上がると考えています。

GAPと独立したGRB偏光観測計画として、東京工業大学と宇宙研が主体となって開発しているTSUBAME衛星の打上げが間近に迫っています。国内のPolarIS計画やNASAのGEMS計画など、本格的なX線・ガンマ線の偏光観測の黎明期を迎えています。明るい天体であればASTRO-Hも高い精度で偏光観測を実施できるでしょう。偏光観測が、今後の高エネルギー天文学における一つの分野として発展していくことが期待できます。

おわりに

本研究の実験・観測の成果により、第6回宇宙科学奨励賞をいただきました。また、村上敏夫先生と共同で北國文化賞を受賞し、本研究で理論検討を一緒に行った當眞賢二氏は、日本物理学会の若手奨励賞、日本天文学会の研究奨励賞をダブル受賞しています。我々の小さな実験プロジェクトを大きく評価していただけたと感じております。IKAROSという完全に工学分野の探査機に、理学観測装置を搭載する機会を与えていただけたことは大変な幸運でしたし、工学系の先生方と一緒に研究活動を行えたことも良い経験になりました。最後になりましたが、村上敏夫先生(金沢大学)、郡司修一先生(山形大)、三原建弘先生(理研)、クリアパルス社をはじめとしたGAPチーム、本来のIKAROSプロジェクトだけでも大変なときにGAPにまで多大なるご配慮を頂いたIKAROSメンバーおよびメーカーの皆さま方に、心よりお礼を申し上げます。

(よねとく・だいすけ)

「宇宙科学・探査ロードマップと各分野の将来計画」シンポジウム報告

2014年5月8日午後、「宇宙科学・探査ロードマップと各分野の将来計画」と題するシンポジウムが、宇宙研の宇宙理学委員会、宇宙工学委員会、宇宙環境利用科学委員会の委員長名で、東京大学本郷キャンパスにて開催された。これは昨年の夏に内閣府の宇宙政策委員会から要請を受けて、三委員会が宇宙研執行部や関連研究分野などと協力し、「宇宙科学・探査のロードマップ」を作成したことに端を発する。この段階ではロードマップは、H-IIAロケットを用いる「戦略的な中型計画」、イプシロンロケットを駆使する「公募型小型計画」、多様な打上げ機会を利用する「小規模プロジェクト群」という、三本柱を骨子とする形で提示されたが、各研究分野の将来計画をその枠組みの中に具体的肉付けしていく作業は、引き続き宿題となっていた。そこで3月31日に関連する各研究分野に向けて分野ごとの将来計画の検討をお願いし、分野を超えて検討状況を共有する目的で、今回のシンポジウムが開催されたものである。

当日は、まず議論の前提となる「イプシロンロケットの将来計画」および「小型衛星による探査の将来計

画」が、宇宙研関係者より報告された。次いで理学分野では、X線・ガンマ線天文学、光・赤外線天文学、宇宙電波、惑星間プラズマ、惑星探査、太陽、宇宙での基礎物理学、宇宙生物学の8分野の代表から、検討状況が報告された。工学分野では、全体をロケットや惑星間航行を中心とした「宇宙輸送・航行工学」と宇宙機に重点を置く「宇宙機システム工学」の2つにくくって報告が行われ、さらに宇宙環境利用科学分野からの報告があった。最後に1時間弱の総合討論を行い、閉会となった。参加者は170名を超え、会場となった理学部4号館の講義室はほぼ満員の状況であった。

今回は当初から具体的なミッションの選定を目的としてはいなかったもので、明確な結論に達したわけではないが、理工をまたいで異なる分野間の議論を共有できたことは、極めて意義が大きかった。今後、さらに検討を継続してロードマップに肉付けを行い、その結果を、日本学術会議を含む研究コミュニティ、JAXA、文部科学省、宇宙政策委員会などに提示していくことになる。

(宇宙理学委員長 牧島一夫／宇宙工学委員長 山川 宏)

特別公開のお知らせ

通常の見学では見ることができない施設の公開や、最新の研究内容を分かりやすく紹介します。建物内が非常に暑くなる可能性もございます。飲み物の持参など、十分な暑さ対策を各自でお願い致します。詳細は宇宙科学研究所ホームページでご確認ください。http://www.isas.jaxa.jp/

日時：2014年7月25日(金)・26日(土) 両日ともに10:00～16:30

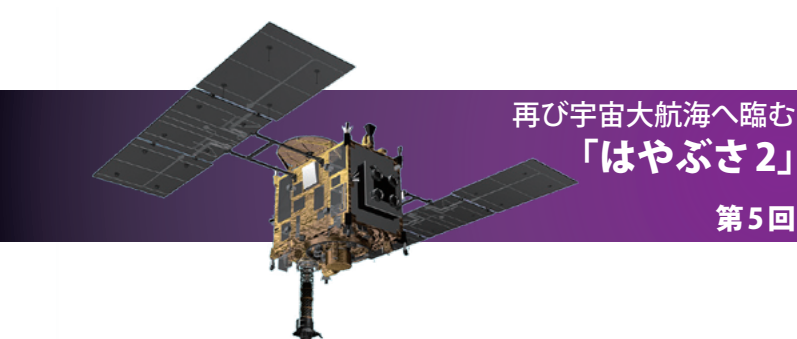
会場：宇宙航空研究開発機構 相模原キャンパス

**特別
公開**

JAXA相模原キャンパス

ロケット・衛星・大気球関係の作業スケジュール(6月・7月)

	6月	7月
ASTRO-H	一次噛合せ試験 (筑波)	
BepiColombo		フライトモデル総合試験 (相模原)
はやぶさ 2		フライトモデル総合試験 (相模原)
大気球	平成26年度第一次気球実験 (大樹町)	
S-310-43号機	噛合せ試験 (相模原)	フライトオペレーション (内之浦)
S-520-29号機	噛合せ試験 (相模原)	



航法誘導制御

照井冬人 「はやぶさ2」プロジェクト 航法誘導制御担当

「はやぶさ2」でも「はやぶさ」と同様、小惑星到達後に接近、近傍観測、タッチダウン、小惑星表面物質の採取を予定しています。今回は初号機での経験と、滞在時間が初号機の3ヶ月に比べて1.5年と長いことから、小惑星近傍での航法誘導制御も余裕を持って対応したいところですが、以下のような課題が少なからず存在します。

- 目標とする小惑星 1999JU3 の情報は地上からの観測によってある程度推定可能だが、その3次元形状、姿勢運動のスピンの周期、表面反射率、重力に関する不確定性は高く、イトカワの場合とは異なる戦略を強いられる可能性がある。
- 新たに衝突装置（SCI）と呼ばれる機器で小惑星表面にクレータをつくるという運用が追加され（第4回「衝突装置」参照）、小惑星表面近くでの衝突装置放出→爆発→衝突までの間に、衝突体が破壊される際の破片、および衝突の際に発生する小惑星自体の破片や小片から探査機を守るために急いで安全な場所（小惑星の裏）に退避させる必要がある（図1）。
- 衝突で表に出た小惑星内部の物質を採取する目的で、衝突装置でつくったクレータ周辺（可能であればクレータの中）にピンポイント・タッチダウンするという新たな運用が追加された。

航法誘導制御系が使用する機器は初号機の設計を引き継いでいますが、信頼性向上のため、搭載計算機（AOCP）が待機冗長構成、航法画像処理制御計算機（ONC-E）がミッション系制御計算機（DE）と機能冗長構成になっています。また、恒星センサ（STT）の台数が1から2へ、リアクションホイール（RW）の台数がX、Y、Z軸に各1個の計3個から、X、Y軸に各1個、Z軸に2個の計4個に増加しています。初号機での経験を踏まえ、リアクションホイールの延命のため小惑星往復のフェーズではZ軸ホイール1個のみを一定の回転角速度で回すバイアスモーメントとし、化学推進スラスタとイオンエンジンの推力方向を変更させるジンバルを駆使して姿勢を制御する予定です。

小惑星への接近、降下、タッチダウンの方法は初号機のやり方を踏襲しています。図2に示す高度約40m以上の「接近フェーズ」において、縦方向（高度方向）位置はレーザ高度計（LIDAR）の距離計測値を用いた搭載計算機による自動制御を行う予定です。横方向（小惑星—地球を結ぶ直線に対し直交する方向）位置の計測と制御に関しては、次の作業を地上オペレータが行います。

- ①高度20km近辺の地点から望遠カメラ（ONC-T）と航法カメラ（ONC-W1）で撮像した小惑星画像群を用いて、小惑星の3次元形状モデルを地上で事前に作成。
- ②3次元形状モデルの表面に小惑星表面の岩やクレータといった視覚的に目立つ特徴点を配置した「3次元特徴点地図」を作成。さらに、「3次元特徴点地図」を2次元射影して「2次元特徴点地図」を作成。
- ③実際の運用では、探査機から送られてくるONC-W1画像中の特

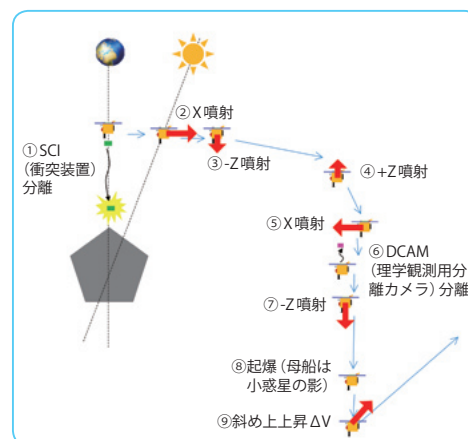


図1 衝突装置分離とその後の退避マヌーバ

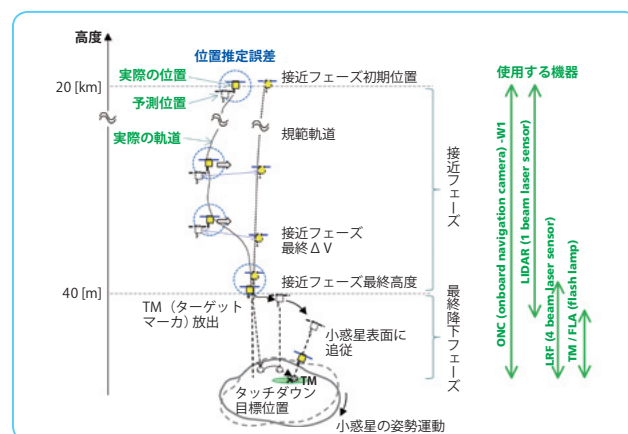


図2 タッチダウンシーケンス概念図

徴点と「2次元特徴点地図」の特徴点とをPCのウィンドウ上で重ね合わせて、小惑星との相対位置を求める。

まさに初号機で培われた「匠」を組み込んだ人海戦術です。計測結果に基づき、画像（探査機→地球）とコマンド（地球→探査機）の伝送時間（片道約20分）を考慮に入れた軌道修正用スラスタ噴射コマンドを探査機に送信する誘導を行うことで、予定の軌道に沿って一定速度で小惑星に近づいていきます。

接近フェーズの終端で高度が低下するに従って、通信時間遅れが長い地上からの指令に基づく誘導では対応しきれなくなってきました。そのため図2の高度約40m以下の「最終降下フェーズ」においては、初号機同様、制御方式を自動に切り替え、次のように運用する予定です。

- ①ターゲットマーカ（TM）と呼ばれる、道路標識に似た反射特性を持つ素材で覆われたバウンドしにくい玉を小惑星表面に投下。
- ②ストロボ照射で光るTMのONC-W1画像を搭載計算機で処理して、TMの画像内位置を計算。
- ③4本のレーザビームを照射して小惑星表面の4点までの距離を計測するレーザレンジファインダ（LRF）出力と②の結果を用いて、TMとの相対位置と小惑星表面との相対姿勢を計測。
- ④上記計測を用いた自律画像航法誘導制御により、小惑星表面に姿勢を合わせながら降下することでタッチダウン、小惑星表面物質を採取して上昇。（てるい・ふゆと）

重力に注目して物質科学と宇宙科学をつなぎたい

学際科学研究系 教授

稲富裕光

—— 子どものころに好きだった教科は何ですか。

稲富：数学です。小学校高学年のとき、新聞の記事で関 孝和を知りました。江戸時代に日本にも偉大な数学者がいたことに驚き、少しでも近づきたいと思いました。その後、物理や生物にも興味が広がっていきました。そして高校生のとき、講談社ブルーバックスの『金属とはなにか』という本を読み、材料は面白い、と思いました。超伝導という現象に衝撃を受けたのです。中学や高校の教科書ではオームの法則を習っていたので、電気抵抗がゼロになる材料があるとは思っていませんでした。材料は新しい考え方をもち、世の中に大きく貢献できることを知りました。そこで大学では、材料科学を学ぶことにしました。高温超伝導ブームが起きたのは、ちょうど大学院へ進むときでした。

—— 高温超伝導の研究をしようとは思わなかったのですか。

稲富：当時、新しい方法で新しい材料をつくらうという新素材ブームもありました。私は高温超伝導とは別の何か新しい研究がしたいと思いました。そのとき、栗林一彦先生（現 宇宙航空研究開発機構 名誉教授）から、宇宙実験による無重力という切り口で新しい材料科学をやろうと声を掛けていただき、修士課程の学生として宇宙研にきました。そして博士課程まで進みましたが、就職先にはメーカーやほかの研究機関を考えていました。

—— なぜ宇宙研で研究を続けることにしたのですか。

稲富：固体材料をつくるには、固体ができる過程を理解することが重要です。しかし、水が氷になる過程さえ、完全に解明されているわけではありません。私は博士論文で、学術・産業応用に重要な化合物半導体が結晶化する過程を研究しました。その審査をしてくださった先生の一人に、宇宙研に残るように勧められたのです。その研究で私は特殊な顕微鏡を開発して、実際の製造プロセスと同様に高温液体から化合物半導体の結晶が成長する過程を高空間分解能かつリアルタイムで3次元観察することに、世界で初めて成功しました。その研究を宇宙研で続けるべきだ、と言われたのです。

重力の影響で液体中では浮力による対流が起きます。その対流の影響で、化合物半導体の結晶成長の過程を深く理解することはできませんでした。対流を止めて実験するのに最適な場所は、重力の極めて弱い宇宙環境です。私は博士論文の残された課題を解決



いなどみ・ゆうこう。1964年、神奈川県生まれ。工学博士。1992年、東京大学大学院工学系研究科金属材料学専攻博士課程修了。同年、宇宙科学研究所 助手。フライブルグ大学結晶学研究所 文部省在外研究員、宇宙科学研究所 准教授などを経て、2014年より現職。

することを目指して宇宙研に就職することにしました。そして、SFU(宇宙実験・観測フリーフライヤー)や国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」、観測ロケット実験での材料実験に携わってきました。対象は半導体だけで

なく、有機物や金属、酸化物などさまざまです。しかし現在でも、博士論文の課題を解決する宇宙実験は実現できていません。その実験のためだけに特殊な顕微鏡を宇宙に運ぶ機会は、なかなか得られないのです。

—— 今後の夢は何ですか。

稲富：博士論文の研究を完結させる実験の機会をこれからも探し続けていきますが、ほかにもぜひ発展させたい研究があります。

宇宙には、さまざまな強さの重力場があります。例えば、月面の重力は地球上の約1/6、太陽表面は約28倍です。さらに地球上の10万倍以上の巨大な重力場を持つ天体があることが知られています。太陽表面くらいの重力では、よほど低温でない限り固体中の1個ずつの原子・分子の運動に与える影響は微弱ですが、地球上の数万倍もの重力を受けると熱運動の影響を上回り始めます。そして核生成や結晶成長など物質のでき方に大きな影響を与えるはず

です。さまざまな重力や強い衝撃波など宇宙特有の環境でどのような物質ができるのか、私たちは東北大学、北海道大学、熊本大学など多くの研究機関と共同研究を進めています。そのような極端な重力環境を利用した実験でつくられる物質から新しい現象が見つかるかもしれません。また、地上の物質科学実験と、天文観測や探査機によるサンプルリターンを連携させた研究を行い、宇宙でつくられる物質を理解することで、宇宙科学に貢献できるはずです。私は重力の影響に注目した物質科学を切り開き、宇宙科学とつなげたいと思います。

—— 超伝導に匹敵するような現象を発見できそうですか。

稲富：可能性はありますが、見つからないかもしれません。それでも、せっかく宇宙研にいるのですから、例えば生物学などさまざまな研究分野とのつながりにより新しいことに挑戦し続けていきます。

ISAS ニュース No.399 2014.6 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

発行責任者／ISASニュース編集委員会 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/>) でもご覧になれます。

デザイン／株式会社デザインコンビニア 制作協力／有限会社フォトンクリエイト

編集後記

今年は梅雨入りした直後から激しい雨の降る日が多いようです。その激しさは、もはや梅雨というより、いわゆる南国のスコールのような感じです。かつて洪水で車が水に浸ってしまったことがあるものですから、豪雨の中の運転はちょっと緊張してしまいます。(羽生宏人)

* 本誌は再生紙(古紙100%)、植物油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

