



宇宙科学最前線

金星探査機「あかつき」と小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」を搭載したH-IIAロケット17号機の打上げ。2010年5月21日6時58分。
撮影：杉山吉昭

惑星間航行・編隊飛行のための宇宙機軌道設計

坂東麻衣

京都大学 宇宙総合学研究ユニット 特定助教

宇宙機が宇宙空間を航行するために効率の良い道筋を決めることを「宇宙機の軌道設計」といいます。宇宙機の軌道の設計はどんな宇宙ミッションにも必要不可欠で、その研究は古くから行われてきました。本稿では惑星間航行や地球周回編隊飛行を行うための宇宙機の軌道設計について、これまでの研究とは少し異なる観点から紹介したいと思います。

膨大な情報を効率よく扱う

近年、小惑星アポフィスの発見などにより、地球に接近して衝突する可能性のある小惑星のサーベイ観測や、地球衝突回避のための研究が活発に行われ始めています。「軌道設計」という観点から考えると、これまでの軌道設計では扱い切れな

い問題に直面することになります。まず、これまでの惑星探査では、宇宙機が行くべき対象は木星や金星など数が限られており、探査すべき対象も特定されていました。ところが地球軌道近傍に存在する小惑星の中から限られた燃料・時間でできるだけ多くのものを観測したい、というような要求の場合、「どの対象に」「どの順番で」「いつ」「どのような」軌道を取るのかを設計しなくてはなりません。そのため、膨大な情報を効率よく扱う軌道設計論が必要となってきます。これまでの軌道設計では行くべき対象は決まっていたので、「膨大な情報」を「効率よく」扱うことには不向きでした。そのため私が注目して研究を行っているのが、「母関数」を用いた軌道設計です。

「母関数」を用いた軌道設計とは

まず、従来の設計方法について簡単に説明したいと思います。中心天体の重力のみで運動する宇宙機が、初期位置から目標位置に決まった時間に移行する軌道を見つける、という問題を考えます。宇宙機の軌道は、ある時刻での「位置」と「速度」を決めることで決定します。初期位置と目標位置が与えられているときには、そこをうまく通るような「速度」を求めることになります。これは、ランペール問題と呼ばれる軌道力学の基本的な問題です。古典的な方法では、軌道の幾何学的形状をもとにして繰り返し計算を行って、条件に合う速度を求めていました。しかし、たくさん的小惑星を順番に訪れる軌道を見つけようとすると、時々刻々動く小惑星に合わせて初期位置や目標位置を変えるたびに、軌道を決め直さなければいけません。このような無駄を省くために、初期位置や目標位置を代入すれば、求めたい答えである速度が出てくる「式」を導くことができれば便利です。言い換えれば、初期位置や目標位置を変数として速度を表す「関数」を知ることができれば、位置を変えたら速度はどう変わるかを調べたり、速度が最大値、最小値になるための位置を求めたりするといった「関数」としての扱いが可能になるのです。それが、次に紹介する「母関数」による軌道設計です。

コロラド大学のDr. Scheeresらにより提案された方法では、運動を表すのにハミルトン形式と呼ばれる運動方程式を用います。これは基本的にはニュートンの運動方程式と等価であるものの、アプローチはかなり違います。ニュートンの運動方程式では「速度」は「位置」を時間で微分したものという位置付けですが、ハミルトン形式では「位

置」と「運動量（速度）」を対等な独立変数として運動を調べます。しかもハミルトン形式では、位置や速度ではない量でも独立変数として使うことができます。初期位置や目標位置という時間によって変わらない定数を独立変数にとって、運動を表すことができるのです。ただし、同じ運動を表すためには、新しい変数は元の変数である「位置」「速度」と特定の関係になければなりません。この関係を与えるのが「母関数」で、これが求まれば、まさに軌道を求めるために必要な速度が、初期位置や目標位置の関数として表されるのです。

これまでの軌道設計では「境界条件→軌道」という順番で決まっていたのに対して、母関数の方法では、「軌道(母関数)→境界条件」というように設計の順番が逆になります。図1に、母関数を用いて軌道を求めた例を示します。従来の設計法では、初期位置などの条件を決め、軌道の一つ一つを求めていたのに対して、母関数による方法ではそれぞれの軌道は直接求めず、母関数をつくって、あとは必要な境界条件を与えれば、条件を満たすすべての軌道が求まるのです。図1では、いろいろな初期位置に対して終端速度を0とする軌道を求めています。

複数フライバイ軌道の設計

「母関数」の理論を使うと、今までは計算上不可能であった複数の小惑星を次々と通過する軌道(複数フライバイ軌道)の最適化の計算時間を大幅に減らすことができます。例えば、図2左図のような地球近傍の100個の小惑星の中から必要な速度変化量が最小になるような5つの対象と訪れるべき順番を決め、一定の時間おきに小惑星を通過する軌道を設計しようとする、全部で9,034,502,400通りの順列組み合わせに対してランペール問題を解いて、最適なものを選び出さなければいけません。母関数を使うと、時間間隔さえ固定してしまえば、必要な総速度変化量を計算するための計算式を求めることができます。このため、その計算式に境界条件を代入して必要な総速度変化量を計算すれば、最適なもの、すなわち総速度変化量が小さくて燃料消費が少ない軌道を、現実的な計算時間で見つけることができます(図2右図)。従来の設計方法では、初めに対象や行く順番を決めてしまってから燃料消費が最小となるような行き方を決めるので、時間間隔は設計パラメータになります。しかし母関数の方法では、時間間隔を固定することで最適化を可能にしているので、時間間隔の設計には注意が必要となります。

このほかにも、母関数をうまく使うことで、低推力連続加速宇宙機の軌道最適化といった、より

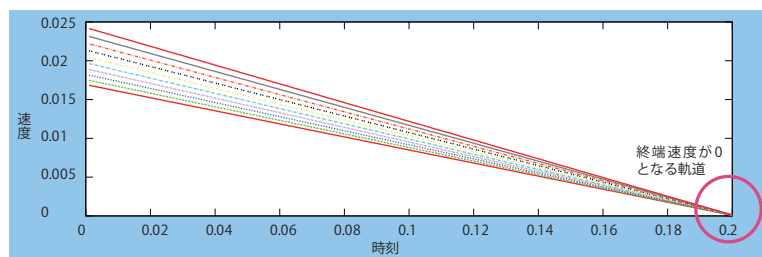


図1 母関数から求めた軌道(速度)

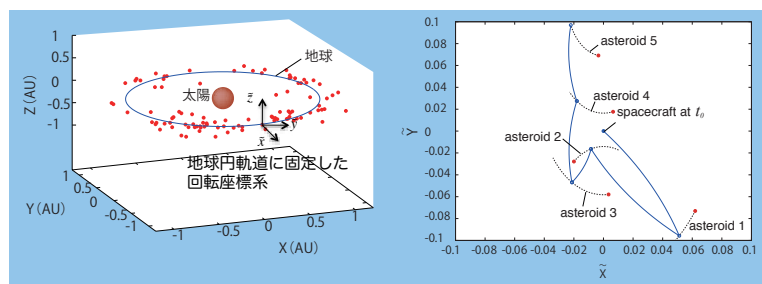


図2 左:小惑星の初期分布、右:地球から見た複数フライバイ軌道

難しい問題にも応用できることが分かっています。

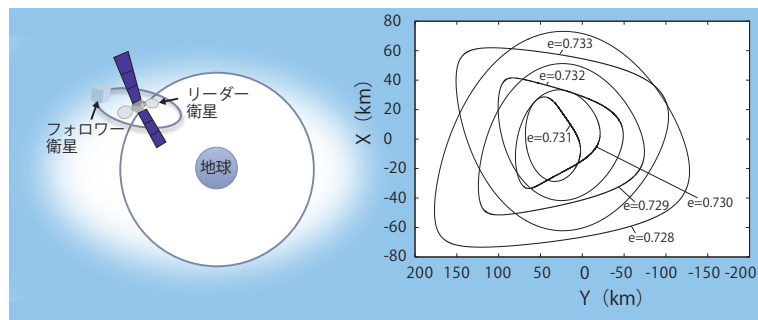
フォーメーションフライトと周期軌道

地球周回軌道上にある宇宙機の点検や補修・回収などの軌道上サービス、宇宙望遠鏡による高精度の科学観測などを目的とし、複数の宇宙機が決められた条件を保ったまま周回軌道を航行する編隊飛行（フォーメーションフライト）が近年注目を集めています。フォーメーションフライトでは、衛星の絶対的な位置より、フォーメーションを維持するための相対的な位置関係が重要となります。このため、地球周回円軌道のリーダー衛星に対するフォロワー衛星の相対的な運動について考えることにします（図3左図）。円軌道からのずれの少ない範囲での相対運動を扱う方程式はヒル方程式と呼ばれるもので、ある基準点の近くで（この場合は円軌道が基準）有効な方程式を得るために、線形化と呼ばれる簡単化を行っています。ヒル方程式は「周期解」を持つので、フォーメーションフライトの軌道を求めるのによく使われます。周期解とは、ある時間に条件に合った位置・速度を持っていれば、永久にその軌道上を周回することを意味します。つまり、周期解を使えば、燃料を使わないでもリーダー衛星の近くを周回し続ける軌道に乗せることができるのです。しかし、これはあくまでも理想的な話で、実際には線形化したときの誤差が蓄積することによって、長い時間をかけてだんだんと周期軌道から外れていってしまいます。それならば、線形化する前の「非線形」方程式の周期解を求めてしまえばいいではないか、ということになります。一般的には非線形方程式の周期解を求めるのは容易なことではありませんが、フォーメーションフライトに関しては、それが可能なのです。

非線形性を考慮に入れた周期軌道

その理由は、相対運動の周期軌道は、慣性系でも周期軌道になっていることにあります。慣性

図3 左：フォーメーションフライト、右：非線形周期軌道の例



系での宇宙機の運動はよく知られる「ケプラー運動」というもので、その軌道は円、楕円、放物線のどれかを描くことが決まっています。この中で、円、楕円となるものが周期軌道です。相対運動の周期軌道は、すべて慣性系での円軌道か楕円軌道になっているはずで、これを利用すると非線形方程式の周期解を求めることができます。図3右図にいくつかの周期軌道の例を示します。ここではリーダー衛星に対するフォロワー衛星の相対運動が描かれていて、慣性系での楕円軌道がゆがんだ軌道になっています。「非線形」方程式に対する周期解をすべて求めることができるので、この方法はさまざまな形状や大きさの周期軌道を使ったフォーメーションフライトに応用することができます。実際にはその方程式にもまだ誤差が存在しているため、軌道を保持するためには「制御」が必要になります。制御のために燃料をたくさん消費していたのではせっかく周期軌道を使う意味がなくなってしまうので、制御の方法にも工夫が必要になり、そのための方法についても研究を行っています。

おわりに

宇宙機が燃料消費をできる限り抑えて、より複雑なミッションを行う軌道を設計するためには、宇宙機の運動が本来持っている性質をうまく取り入れた上手な軌道の設計法を考えるのが重要です。それが少しでも伝われば幸いです。

（ばんどう・まい）

特別公開のお知らせ

日時：2010年7月30日（金）～31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

ロケット・衛星関係の作業スケジュール(6月・7月)

	6月	7月
はやぶさ	● 帰還、カプセル再突入・回収	

「はやぶさ」カプセルの地上回収計画～上手なカプセルの拾い方～

6月の「はやぶさ」帰還を目指して、数度の軌道修正運用が行われている最中です。地上回収チームも昨年来、オーストラリア、内之浦、相模原にてシステムの機能確認や方探スキルの向上に努めてきました。今回は、再突入日・本番での回収計画を概説します。

カプセルの再突入は現地時間（日本との時差はプラス30分）で真夜中になります。高度200kmで大気突入したカプセルは、約1分後に最大空力加熱にさらされ最も明るく輝き、例えば100km離れた地上からはマイナス5等級の流れ星に見えるはず。光学班はこの軌跡を計測し、着地点予測の一助とします。曇り空に備え、付近を飛行する航空機からもNASAと共同で「火の玉観測」をします。

カプセルは高度約10kmでヒートシールドを分離すると同時に開傘し、ビーコンを発信しながら着地まで約20分の緩降下をしますが、予想される着地領域のまわりに配置された4つの地上方探局はこのビーコンを受信し、カプセルまでの方位を求めます。現地本部は、各局からの方位情報に基づいて、巧みな風予測も加え、飛行経路・着地点を求めます（ここまでは、内之浦の気球実験、相模原留保値実験で機能確認、スキルアップ済みのはずです）。それまで空中で低



ぬかるみてスタックした車上で途方に暮れるKさん

速飛行していたヘリコプターは本部からの連絡を受け、着地予想領域に直行し、着地後のカプセルから漏れ出ているであろうビーコンを頼りに、闇夜をライティングしてカプセルを見つけ出します（昨年10月のオーストラリアでのヘリコプター性能実験では、砂漠に逆さまに置いたカプセル模擬機からの信号での探索に成功していますし、ビーコンが出てい

なくても、着地予想領域だけでも発見できています）。

さて、カプセルが見つかったら、今度はヒートシールドの探索に入ります。冬のオーストラリアの砂漠では、落ちたてのヒートシールドは辺りに比べて十分暖かく、赤外線カメラで見つけられるはずで、これも湯たんぽを利用しての実験で実証済みです。それでも、その夜や翌日のヘリコプター探索で見つからなかった場合には、伝統的な奥の手も用意してあります。日を改めての人海戦術です。GPSと衛星電話、サラミとチーズのサンドイッチと水筒を装備した10～20人が、10m間隔で横一列に並んで、着地予想領域をスキャンしていく方法です。計画では1人1日10～20km程度、5日くらいでスキャン完了の予定。中年にはちょっとキツイけど、いいダイエットだねと思っています。安全に注意してみんな頑張ります。

（山田哲哉）

打上げ迫る——インド回収衛星搭載微生物培養実験

現在、つくばISS科学プロジェクト室で準備を進めている「インド回収衛星搭載微生物培養実験」は、インド宇宙機関（ISRO：Indian Space Research Organization）が本年秋に打上げを予定している回収型衛星SRE-II（Space Capsule Recovery Experiment II）に、微生物の培養装置を搭載し、軌道上で6日間の培養を行い、回収後に宇宙環境ストレス応答を調べる生命科学実験です。本実験は、宇宙科学研究所とVSSC（Vikram Sarabhai Space Centre）に所属するSRE-IIプロジェクトとの日印科学協力プロジェクトであり、日本とインドの生命科学研究者が参加して行われます。

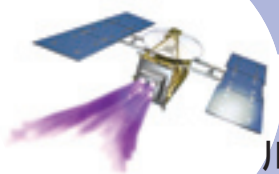
今回利用する回収型衛星SRE-IIは、2007年1月に打ち上げられた1号機（SRE-I）のデザインを踏襲する500kg級の衛星で、PSLV（Polar Satellite Launch Vehicle）16号機で高度670kmの太陽同期軌道に投入される予定です。

チェンナイの100km北にあるスリハリコタに位置するSDSC（Satish Dhawan Space Centre）から打ち上げられ、12日後にチェンナイから140km離れたベンガル湾に着水の予定となっています。フライトモデルはすでに完成、受け入れ試験もほぼ終了しており、5月の引き渡しを待っている状態です。培養装置はバンガロールにあるISAC

（ISRO Satellite Centre）でインド側に引き渡し後、衛星との組み合わせ試験をおよそ2ヶ月間行った後、ハイデラバードにある共同研究者の研究室（CCMB：Centre for Cellular & Molecular Biology）において微生物試料の搭載を行い、SDSCに輸送、打上げの予定となっています。（夏井坂 誠）



SRE-I号機（ISRO HPより）。SRE-II号機も同じデザインを踏襲。



はやぶさ近況

故郷、地球が見えた

川口淳一郎 「はやぶさ」プロジェクトマネージャ

「はやぶさ」は、5月1日から4日の間に、TCM-1（第1回軌道修正）を実施しました。イオンエンジンの連続運転が終了して間もなく4月上旬に0回目の軌道修正を実施しているので、実際には2回目ということになります。もともとは、0回目は計画しなくてよいと考えられていましたが、より小刻みに慎重に軌道修正を行って目標点へ誘導するため、このような方策になっています。TCM-1はおおむね順調に完了でき、その実施誤差も満足できるものでした。もっとも、昨年11月から始めた緊急のイオンエンジン運転形態でのエンジンの性能劣化が散見され始めているところで、残りの3回にわたる軌道修正が順調であれば願っています。

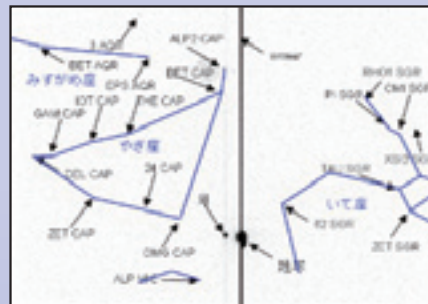
5月11日から12日には、太陽輻射圧によって風車効果で探査機全体の角運動量増加が継続し、ホイールの回転数が増加したため、それをキセノンジェットで低減させる運用を行いました。11日には、これに先立ちイオンエンジンの起動性を確認する試験を行いました。幸い無事立ち上がり、TCM-2への準備を確認できています。

TCM-2以降では、これまでと違って軌道修正は加速方向で運用するよう変更されたため、スタートラッカ（星姿勢計）が地球

方向を見る姿勢となります。12日のホイールの回転数下げ運用に引き続き、スタートラッカのCCDセンサを用いて地球を撮影しました（写真）。地球は圧倒的な明るさでとらえられていて、あまりのまぶしさに、画像にあふれ現象（スミア）が発生しているほどです。月もはっきりと計算通りの位置に写っていて、「はやぶさ」自身、故郷に帰ってきたと実感していることでしょう。地球は、いて座とやぎ座の間に見えていました。もうすぐです。必ず帰すべく誘導（案内）してあげようと考えています。そして、6月13日には、必ずや出迎えてあげたいものです。

（かわぐち・じゅんいちろう）

スタートラッカによる地球と月の撮影（ネガ）
2010年5月12日17時41分



国際ナショナルトップヤングフェロー紹介

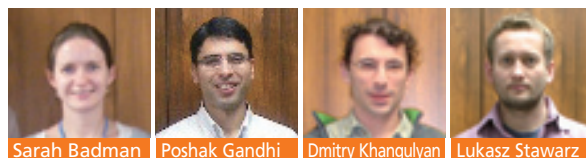
JAXA国際ナショナルトップヤングフェロー（ITYF）は、我が国の宇宙科学研究のさらなる発展を目的として昨年度創設されました。非常に激しい競争を勝ち残って4名の優れた若手研究者が宇宙研に招聘され、すでに研究を開始しています。選ばれた4名を順に紹介します。

Sarah Badmanは、イギリス出身で、イギリス・レスター大学から来ました。木星・土星オーロラと磁気圏ダイナミクスの観測的研究が専門で、ハッブル宇宙望遠鏡を使った惑星大気観測チームの中心の一人です。

Poshak Gandhiは、インド出身で、イギリス・ケンブリッジ大学から理化学研究所を経て、トップヤングフェローとなりました。X線と光赤外線のパデータを統合して国際チームでブラックホール研究を進めています。

Dmitry Khangulyanは、ロシア出身で、ドイツ・ハイデルベルグのマックス・プランク研究所で、宇宙線加速と非熱的放射の理論的研究を進めてきました。宇宙研では、X線・ガンマ線天文から惑星間磁気圏、太陽における粒子加速と、広い範囲で横断的な研究を進めてくれそうです。

Lukasz Stawarzは、ポーランド出身で、アメリカ・スタンフォード大学からやって来ました。フェルミ宇宙ガンマ線望



遠鏡の初期成果を支えた若手の一人で、高エネルギージェット天体の観測的研究が専門です。先日、日本で行われたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡の成果の記者発表にもすでに登場しています。

5月7日からは、4名が主催するセミナーシリーズも開設されています。世界でも著名なこの若手4名が宇宙研にいるという情報は世界に伝わっており、論文を仕上げに宇宙研にやって来る研究者の数が増えています。またすでに、数週間にわたって滞在して共同研究を行いたいという海外からの申し込みも来ています。今年度、2回目のITYFの募集では、工学研究者も含め昨年以上の応募があり、競争もさらに激しくなっています。宇宙科学研究所の魅力にひかれて訪れた海外からの研究者で研究所があふれかえる日に向かって、トップヤングフェローの皆さんの今後の活躍を願っています。これからは『ISASニュース』の巻頭を飾る「宇宙科学最前線」に続々と登場予定だそうですので楽しみに。（高橋忠幸）

種子島撮影日誌

2010年3月19日、金星探査機「あかつき」のフライトオペレーションが開始されました。宇宙科学研究所にとって、種子島宇宙センターにおける約2ヶ月間の長期オペレーションは初めての経験です。

相模原キャンパス出発時の荷姿のまま輸送トレーラーとともに種子島の西之表港に陸揚げされた「あかつき」は、第2衛星組立棟（STA2）に搬入・開梱され、約3週間の最終的な電気系試験や機械系作業の後、衛星フェアリング組立棟（SFA）へ移動しました。STA2やSFAの大扉は必要な広さしか開かず、高さもブラインド様のもので調節されます。探査機の搬入・搬出時には、捕虫網を持った虫隊も出動しました。

SFAに運ばれた「あかつき」は、推進剤充填、ノンフライトアイテム外し、最終外觀検査を経て、ロケットと探査機をつなぐ台座（PAF）と結合の後、小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」や4機の小型副衛星とともに、衛星フェアリングに収納されました。全身に多層断熱材（MLI）をまとった金色に輝く金星探査機「あかつき」の姿は、もう小さなアクセス窓からしか見るできません。

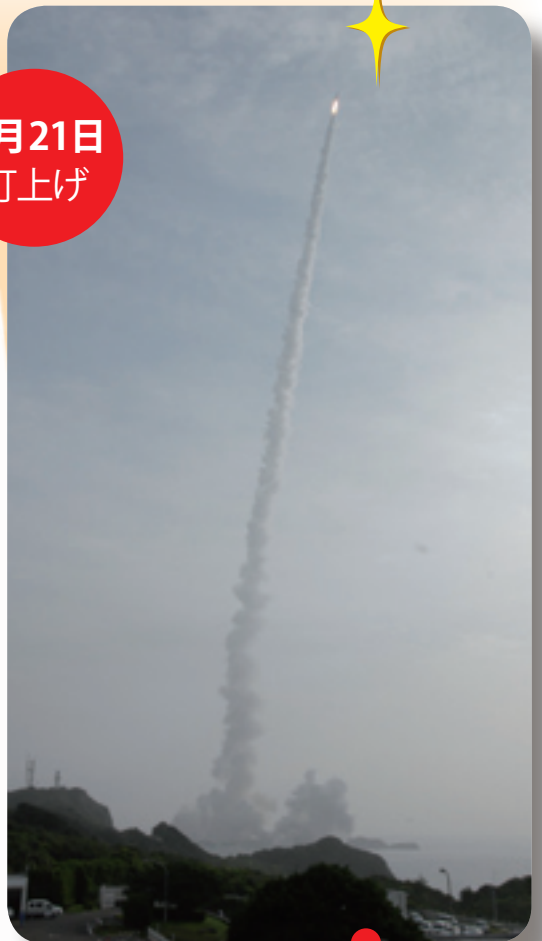
SFAでの約1ヶ月の作業を終え、「あかつき」や「IKAROS」を覆った衛星フェアリングは、専用の移動台車に載り、ものものしい耐火性作業服着用の中村正人プロマネをはじめとする実験班を従えて、大型ロケット組立棟（VAB）まで約1.7km移動しました。そして、耐荷重100トンのクレーンでつり上げられ、ロケットに結合されました。

打上げ前日、VABの世界一大きい引き戸の大扉が開かれ、H-II Aロケット17号機は射座へ移動、最終確認と液体燃料充填を終え、ライトアップされて、打上げの時を待ちました。

5月18日、南上空の氷結層を含む厚い雲に懸念はありましたが、GOの判断のもと、小雨の降る中タイムスケジュールは順調に進みました。しかし、懸念された雲が射場に迫り、発射360秒前に延期となってしまいました。

新たな打上げ日は中2日の5月21日と決定されました。当日の天候は曇り、低空の厚い雲と海上の水蒸気のためか、海に突き出した射点のロケットはかすんで見えました。「Xマイナス60分です」のアナウンスが入り、カウントダウンと作業項目の読み上げが交差して、緊迫感が増していきます。そして6時58分22秒、ロケットは飛び立ち、カウント「10」ほどで聞こえてきた轟音とともに、雲に隠れる約60秒後まで、ほぼ真っすぐに上昇していきました。（杉山吉昭・吉山京子）

5月21日
打上げ

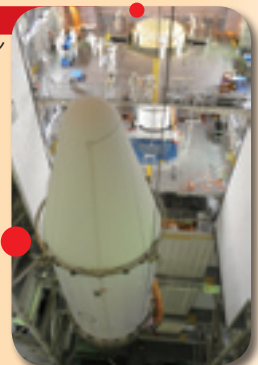


5月18日 発射台のH-II Aロケット



5月17日 射座へ移動

5月9日 衛星フェアリングをつり上げ



5月4日 衛星フェアリング結合



4月30日 頭胴部+あかつき+IKAROS



4月10日 第2衛星組立棟から衛星フェアリング組立棟へ



3月20日 探査機コンテナ開梱



金星探査機「あかつき」の挑戦 第3回



探査機概要と軌道計画

宇宙航行システム研究系 教授
石井信明

金星探査機「あかつき」は、中間赤外線から紫外線に至るさまざまな波長を持つカメラによって金星大気を観測します。図1は探査機の外観と主要機器の名称です。複数のカメラで金星を同時に撮像できるように、探査機の形状は箱形(直方体)とし、1つの面(カメラ面)にすべてのカメラを取り付けました。また、観測データを高速で地球に伝送するために、RLSA(ラジアルラインスロットアレイ)式高利得平面アンテナを新規に開発しました。金星は地球に比べ太陽に近く熱環境が厳しいため、熱を集めない平面型アンテナが有利だからです。そして、リアクションホイール(RW)による3軸姿勢制御によって、金星を撮像するときにはカメラ面を金星に向け、観測データを地球に伝送するときにはアンテナ面が地球を向くように、探査機全体の回転制御を行います。探査機の姿勢検出には、カメラと反対側の面に取り付けた恒星センサや太陽センサ、光ファイバージャイロなどを使用します。直方体6面のうち、上下2面は放熱面とし、探査機内部が高温にならないように内部の熱を効率的に逃がします。残り4つの側面には太陽光が直射するため、金色の断熱フィルムで覆い、熱の流入を防いでいます。上下2面の中心には太陽電池パドルが取り付けられており、探査機本体の回転によらず太陽電池が常に太陽を向き、安定した電力が得られるように制御されます。また、金星周回軌道に入るときには、直方体の8つの頂点に取り付けた12機の姿勢制御用スラスタ(RCS)と1機の軌道制御用エンジン(OME)によって、軌道変更を行います。

地球から金星への軌道を選ぶとき、打上げ日時がとても重要です。地球と金星は共に太陽のまわりを公転しているため、地球を出発した後、金星にうまく会合できるタイミングを選ぶ必要があります。さらに、金星の公転軌道は地球の公転面に対し3度傾斜しているため、これによる上下の位置のずれも考慮しなければなりません。このような2つの惑星の運動を精密に計算しながら、より少ない燃料で金星に行ける軌道として2010年5月の打上げを選びました。

図2は黄道面に投影した「あかつき」の軌道です。地球を出発した「あかつき」は、一度地球公転軌道の外側に出て、少し時間を稼ぎます。そして、遅れてやって来る金星に接近するタイミングを調節します。金星までの飛行日数は約200日です。ちなみに、2010年の次の金星打上げのチャンスは2011年5月ですが、そこでは金星との接近条件を合わせるために太陽のまわりを1.5周回することになり、金星までの到着は約500日と長くなります。その次の2012年6月に地球を出発する場合は、太陽のまわりを2.5周回しないと金星に接近することができず、金星到着まで

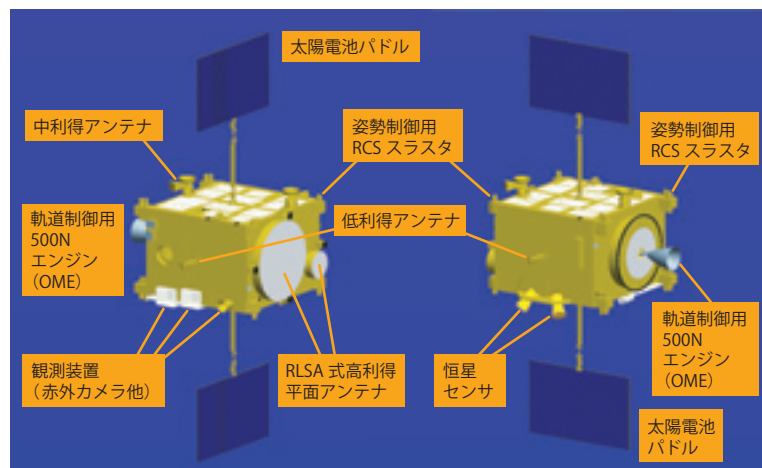


図1 「あかつき」の外観と主要機器の名称
打上げ時には探査機全体が金色の断熱フィルムで覆われる。



図2 地球出発→金星到着までの軌道(図中黒実線)
地球出発後、一度地球軌道の外側に出て少し時間を稼ぎ、遅れてやって来る金星との接近条件を合わせている。地球出発から金星到着までの飛行日数は約200日。2010年12月初旬に金星周回軌道への軌道制御を行い、本格的な金星観測が始まる。

約800日もかかります。

当初「あかつき」は5月18日朝6時44分14秒に打上げの予定でしたが、急激な天候悪化のため、打上げ直前に延期になりました。そして設定された次の打上げ日時は、5月21日朝6時58分22秒でした。このように打上げ時刻が秒まで決まってしまうのは、地球が自転しているからです。ロケットは地球の自転速度を効率的に利用するため、真東に飛行します。そして、今回の打上げでは、ロケットによって探査機を惑星間空間に直接分離、投入したため、ロケットの軌道が決まることによって探査機の地球脱出方向も決まります。その方向を金星に向かう軌道に乗せるために、地球の回転角を秒単位で決める必要があります。打上げが数分遅れるとその間に地球が回ってしまうため、ロケットは金星とずれた方向に飛んでいってしまいます。ちなみに、水星や金星など内惑星に行くためには早朝の打上げ、火星など外惑星に行くためには夕方の打上げになることが多いです。

打上げから約半年後の2010年12月初旬に、「あかつき」は金星を周回する軌道に入るための軌道変更を実施します。そして、いよいよ本格的な金星観測が始まります。

(いしい・のぶあき)

澳門

科技見聞録

「マカオに、出張で行ってきました」「ええっ？ カジノでゲームをしてきたのですか？」「いいえっ、違います。仕事ですよ！」。なぜかそんな会話になってしまうマカオ（澳門）。さらびやかなカジノ、南欧を思わせる瀟洒な街並み、アジアでは珍しいポルトガル語の標識……。そんな異国情緒豊かなマカオの新しい顔が、実は科学と技術です。

3月25日と26日の2日間、International Symposium on Lunar Science (ISLS 2010)、中国語名で「月球科学国際検討会」が、中国マカオ特別行政府の澳門科技大学で開催されました。日本の月周回衛星「かぐや」や、中国の月探査機「嫦娥（チャンア）」の最新データ解析結果がそろったことに加えて、澳門科技大学の開校10周年を記念しての開

スン（巨大な衝突盆地）の地下の様子が分かり、内部構造の二分性（表と裏の違い）が判明したことについて、熱弁を奮います。一緒に行った春山純一さんは、地形カメラの高解像度立体画像でチコクレーターやモスクワの海の上空を飛んで見せて、まるで月旅行を楽しんでいるような雰囲気では会場を沸かせました。一方、中国勢は、今までバールに包まれていた（のかな？）「嫦娥」の成果を、惜しげもなく発表してくれました。早稲田大学の皆さんをはじめ、国内外とも、ガンマ線分光計を使った元素分析の発表が多かったのは、ここ澳門科技大学の研究の得意分野だからでもあります。月の海に分布するカリウムやトリウムの様子など、月の進化を知る上で貴重なデータが紹介されました。シンポジウムの翌日の27日には、これらの研究成果に的を絞った、Gamma Ray Spectroscopy Workshop（ガンマ線分光計ワークショップ）という会議も開催されました。加えて中国の若手研究者・学生の、何と元気なことか。自分が納得できるまで意欲的に、発表者に質問を浴びせます。オリンピックや万博で感じられるチャイナパワーが宇宙科学でも全開で、良きライバルに育ったものだとも頼もしくも感じられます。学会の夜となれば、恒例の懇親会。本格的な中華料理に舌鼓を打ちつつ、次はどのような研究を一緒にしようかと、お互いに夢を膨らませつつ熱い議論が続きました。

マカオは、宇宙科学研究所が位置する相模原市中央区より一回り小さな、島と半島からなり、50万人余りの人々が住む地区です。ポルトガルから中国に返還されたのは1999年。これを機に澳門科技大学が開校したとのことで、東アジアの科学技術の拠点となるべく人材を育てています。学生の過半数は中国大陸の出身だそうですが、少数派のマカオ出身の若者も、「僕の町マカオが、世界の科学技術の中心になるように頑張っています」と誇らしげに語ってくれました。大学から一歩外に出れば、ポルトガル調の街並みが続き、レストランではトマトやカレー（南蛮貿易の名残でしょう）で味付けしたチキンやシーフードが楽しめます。帰国の日の朝、飛行機（正確には香港行きのフェリー）の出発まで少し時間があったので、街を歩いてみました。色鮮やかな洋館や花々、公園には犬と一緒に静かな朝を楽しむ家族連れ、その一方で遠くにはカジノを営む巨大なホテル群。つくづく不思議な魅力を持った街で、またいつの日か訪れて、発展ぶりを見てみたいと思います。けど次は、仕事抜きで来ようかな！？

（いわた・たかひろ）



記念撮影中のひとこま

催です。参加者は70名余り。公式発表の数字ではなく正確ではありませんが、国際会議としてはやや小ぶりでしょうか。けれど、アメリカ、フランス、ロシア、インド、韓国と、世界中で月を研究する科学者の代表が一堂に会した感があります。加えて、地元のマカオや香港はもちろん、北京、上海、南京、吉林省、四川省……。中国の主だった地域から、大勢の研究者が集まりました。

日本からの参加者は8名でしたが、もちろん「かぐや」の成果が中心で、月の地形や元素分布、月の周囲のプラズマ現象などで、会場の関心を引き寄せます。そして私は、子衛星「おきな」「おうな」を駆使して観測した月の重力場から、月の裏側のペイ

岩田隆浩
固体惑星科学
研究系 准教授



宇宙を意識した生物研究

中村桂子

JT 生命誌研究館 館長

国際宇宙ステーションへの食糧や機器の輸送という任務を終えた宇宙飛行士山崎直子さんが、そのときの気持ちを、「瑠璃色の地球も花も宇宙の子」と表しました。和服を着たり、お琴を弾いたりして、宇宙空間と日本文化をつなごうとする意識を思う存分見せてくださった山崎さんならではの五・七・五です。近年、宇宙が急速に身近なものになりつつあり、この短い言葉の中に私自身が感じている宇宙を見る二つの視点を感じ取ってとても共感しました。

二つの視点の一つは、宇宙科学（物理学・天文学・惑星科学など）の進歩によって宇宙の歴史や現在の姿が見事に描き出されてきたことであり、もう一つは、月面着陸以来人類の宇宙への進出が具体化したことです。前者は私はどこから来たのだらうという問いにつながり、後者は私たちが宇宙へと広がりたいたいという願いを生み出しました。こうして「宇宙と生命」、その中での「宇宙と人間」というテーマが浮かび上がってきました。

宇宙と生命について考える基本として、まず地球と生命の関係を考えてみます。地球上の生きものが、いつ、どこで、どのようにして生まれたか、明確には分かっていませんが、38億年ほど前に地球の海の中で生まれたと考えるのが素直だろうと思います。陸上に見られる最古の植物の化石が4億7500万年前のもので、生物は歴史の90%近く水中にいたことになります。そもそも生きものにとって水は不可欠で、そこから離れることは大冒険です。しかも当初、大気中に酸素は少なくオゾン層もなく、紫外線は降り注ぎ放題でしたし、重力に対抗する必要もありますから、地上で暮らすのは大変です。

それでも生物は上陸した……。最近の社会の閉塞感のせいでしょうか。この挑戦に興味をわき調べてみたところ、見事な上陸大作戦が見えてきました。海が混雑して追いやられたという見方もありますが、どう見てもこれは新しい生き方への挑戦ですし、そこに注目す

る方が面白いと思います。まず植物が孢子をつくり、世代を上手に交代する方法で乾燥に耐え、コケやシダとして繁殖することで地上の環境を一変します。土が生まれたのです。岩は無機物ですが、土はそこにいつも生きものが存在し、生きています。そこで、植物は水を吸い上げる維管束をつくり、細胞壁を持つつかたい細胞を積み上げて数十メートルにもなる樹木となり、森をつくっていきました。見事な戦略です。次が昆虫。外骨格をつくり、小型という戦略でニッチを広げ多様化します。興味深いのは、短期間で翅ができ、空へ飛び立つ多種多様な仲間が生まれたことです。

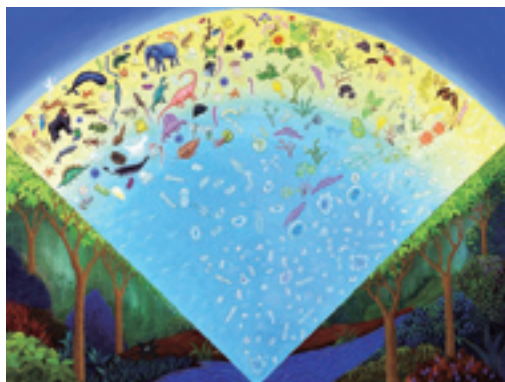
われわれ脊椎動物は、魚類から両生類、は虫類、鳥類、ほ乳類と変化しながら多様化しました。脊椎動物に特徴的なのが、海中に残った魚類もその後、急速に多様化したことです。これを支えたのがゲノムの重複です。5億年以上前の脊椎動物はまだヒレもアゴもない存在であり、ゲノムは10～13本の染色

体で構成されていたと推測されています。ここから上陸までの1億年ほどの間にゲノムが二度も重複し、遺伝子に変化が可能になったのです。最初の重複で骨とヒレ、次の重複でアゴができたと考えられています。こうして上陸が始まったのですが、最も興味深いのはこの先です。魚類（条鰭類と呼ばれる）で三度目のゲノム重複が起き、現存のほとんどの魚、つまり真骨魚類が誕生しました。従って、脊椎動物は陸上、水中ともに2万5000種もの多様な種が暮らしています。

ゲノム重複がなぜ起きたのかは分かりませんが、新しい挑戦は、自らの中に起きた変化と環境とのかかわりの中で生じたに違いありません。人類の宇宙への挑戦も、内にある可能性と環境とをよく見つめる必要があります。生物にとって海が故郷であるように、人類にとって地球が故郷であることを肝に銘じて。

もう一つの大きな課題、宇宙に生命体はいるかという問いについても、太陽系と似た系とそこに存在する惑星など多くのことが分かってきました。太陽系でも火星など現在水がなくとも過去には存在したかもしれないと考えられる、わくわくする話がたくさんあります。そこで、この課題への挑戦に意欲がわきますが、それには、地球の「生命」についてのより深い洞察が必要でしょう。生命の歴史から多くを学ぶことで、宇宙生命科学と呼べる学問が生まれ、私たちが宇宙を故郷と感じられる日が来ることを期待しています。

（なかむら・けいこ）



生命誌絵巻。生命誌の提唱者である筆者が、一つひとつの生きものが持つ歴史性と多様な生きものの関係を示す新しい表現法として考案した図。

原案：中村桂子、協力：団まりな、絵：橋本律子、提供：JT生命誌研究館

科学衛星の成長を見守っています

宇宙科学プログラム・システムズエンジニアリング室 技術領域リーダ

渡戸 満

—— システムズエンジニアリング室とは、どのような仕事をする部署でしょうか。

渡戸：それが一番困る質問なんです(笑)。一般的な「システムエンジニア」と似ているのでソフトウェアなどの設計をしていると思われがちですが、まったく違います。宇宙研では宇宙理学委員会・宇宙工学委員会のワーキンググループで科学衛星の卵が生み出され、その中からプロジェクトとして選ばれたものが科学衛星として開発され、宇宙へ送り出されます。開発中には節目に当たるタイミングでさまざまな審査を受けることになりますが、システムズエンジニアリング室では、これらのサポートなどを行っています。子どもが生まれるとお宮参りや七五三、そして小学校の入学式など、子どもの成長を確かめ、お祝いをします。私たちも、このような審査を通じて科学衛星の成長を見させてもらっているのかもしれない。

—— 大学は機械物理工学科ですね。

渡戸：大学受験の少し前から、宇宙にかかわる仕事がしたいと思うようになりました。調べてみると、東京大学が京都大学の航空宇宙学科に進むのいいと分かったのですが、私には無理。そこで東京工業大学の機械物理工学科へ。当時の東工大は宇宙とは無縁でしたが、機械工学を学んでいれば宇宙につながるのではないかと。今では学科名に「宇宙」が入って、機械宇宙学科となっています。私の選択は間違っていなかったのかな。

—— そして宇宙開発事業団(NASDA)へ。

渡戸：これまで2~3年おきに部署を移動しましたが、有人飛行関係が多かったです。1992年に毛利宇宙飛行士がスペースシャトルで飛行したときは、宇宙実験のサポートをしました。生命科学系の実験ではショウジョウバエやカビなどが相手なので、機械物理工学科出身としては戸惑いも大きかったですね。

国際宇宙ステーション(ISS)の実験施設「セントリフュージ」の開発にも携わりました。人工重力をつくり出すことで、無重力の宇宙環境が生物にどのような影響を与えるかを詳しく調べることができる画期的な実験施設でしたが、残念ながら



わたんど・みつる。1958年、神奈川県生まれ。東京工業大学工学部機械物理工学科卒業。同大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了。1983年、宇宙開発事業団(NASDA)入社。NASDA 宇宙実験グループ、会計検査院出向、有人宇宙環境利用ミッション本部、経営企画部、ISAS 科学推進部研究マネジメント課などを経て2008年より現職。

ら開発中止に。その後もさまざまな経験をしてきました。

—— 有人飛行の魅力は？

渡戸：自分がかかわった衛星が打ち上げられたときの喜びは格別でしょう。有人飛行の打上げも同じです。そして、有人飛行の場合は戻ってきます。打上げと帰還、喜びが2倍です。

—— 趣味は？

渡戸：今は映画やドライブくらいですが、大学時代はオリエンテーリングをやっていました。子どものころにオリエンテーリングをやったことがある人は、歩くというイメージを持っているかもしれません。しかし、オリエンテーリングは走る競技なのです。コースにポイントが設置されていて、参加者はポイントを指定された順番で通過して、ゴールまでの時間を競います。クロスカントリーは走る道が決まっていますが、オリエンテーリングは地図とコンパスを使って次のポイントまでの道を自分で決めます。いい記録を出すためには、どの道を行くか、走りながら一瞬で判断しなければなりません。その道が大正解だったときは、とても気持ちがいい。逆に、弱気になって人の後を付いていくと、失敗することもある。ゴールしたときは毎回、「何でこんなにつらいことをやっているのだろう。もうやめよう」と思います。でも1日たつと、またやりたくなる。オリエンテーリングには不思議な魅力があります。久しぶりにやりたくなってきました。でも、体力が……。

—— 最後に、長年有人飛行に携わってきたご経験から、現在の状況に一言お願いします。

渡戸：宇宙という環境を使って有人で本格的な実験を行ったのは、毛利宇宙飛行士のミッションが日本で初めてでした。それが今では、ISSの「きぼう」日本実験棟で常時、実験が行われています。「きぼう」は計画から完成までずいぶん時間がかかってしまいましたが、続けていくことは大事です。やめるのは簡単ですが、再開することはほぼ不可能です。

ISAS ニュース No.351 2010.6 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
〒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

あかつきさん、IKAROSさん(に載ってるGAPさんも)、やりましたね。関係者の皆さま、打上げ成功おめでとうございます。次は、はやぶささんの出番ですね。トップヤングフェロー主催のセミナーは楽しいですよ。(前田良知)

* 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