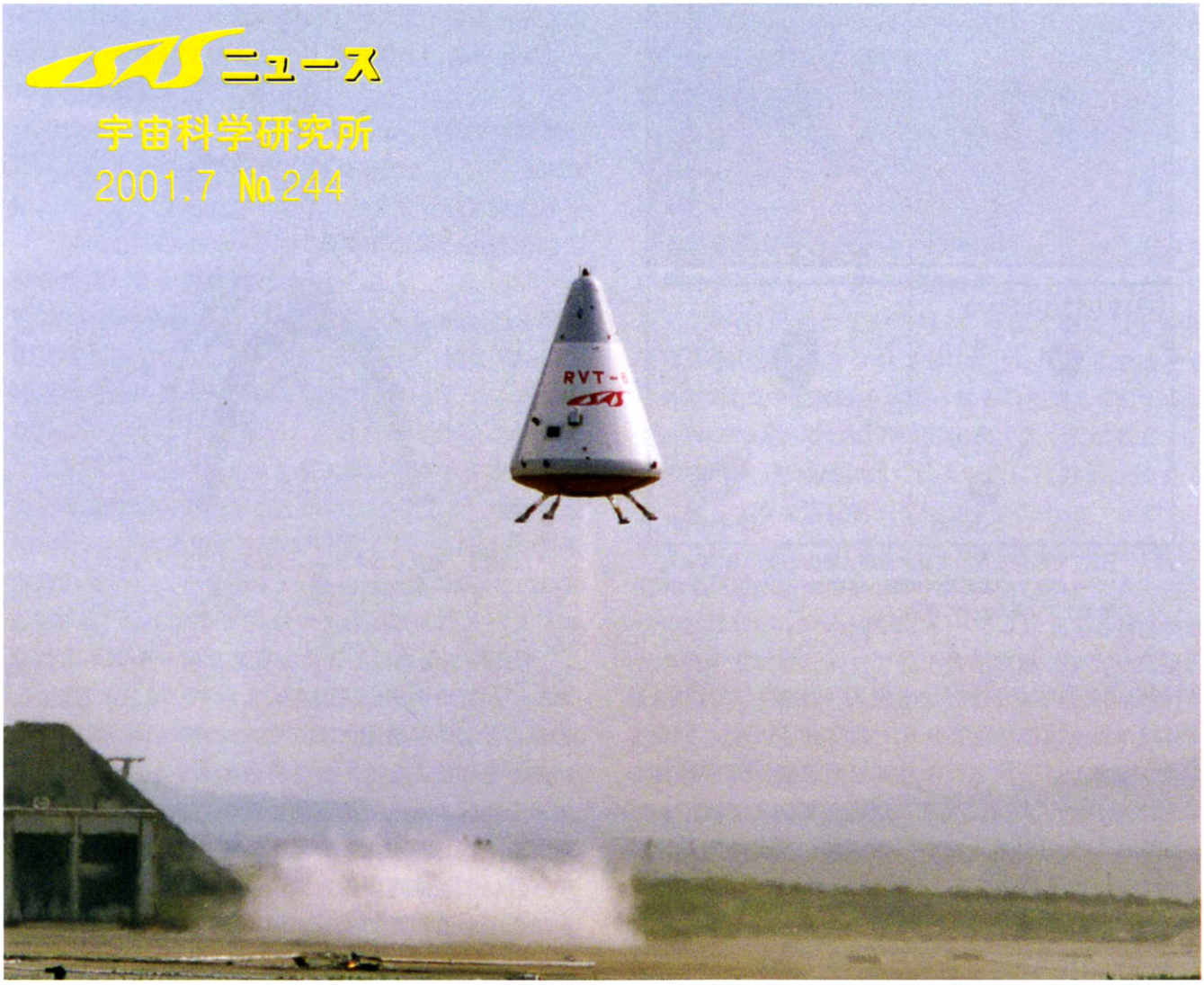
ISSN 0285-2861



▲再使用ロケット実験機第2回離着陸実験（本文記事参照）（撮影：杉山吉昭）

〈研究紹介〉

「ようこう」硬X線望遠鏡でさぐる太陽フレアの磁場構造

坂尾太郎

太陽フレアとは，コロナ中に蓄えられた磁場のエネルギーが爆発的に解放されることでコロナ中のプラズマ粒子を一気に加速・加熱したり，粒子を直接，惑星間空間に大量に放出する現象です。加速・加熱された粒子は，電波からγ線までの広い波長域で電磁波を放射しますが，このうち硬X線は，後述するように，高エネルギー電子が周囲のプラズマと衝突することで放出する，制動放射に起因します。硬X線に対してコロナ（密度10^8/cm^{3}程度）は光学的に薄く，また電波と違いコロナ中の磁場の影響も受けないため，硬X線観測は電子が磁力線（磁気ループ）に沿ってどのように伝搬し，またどこでどのようにしてX線を放射するのかを調べる上で有効な手段となります。

「ようこう」に搭載された硬X線望遠鏡HXTは，14-93keV（キロ電子ボルト）の硬X線域でフレアを4バンド（L，M1，M2，Hバンド；14-23-33-93keV）で撮像し，フレアにともなう粒子加速のようすや加速のメカニズムを調べることを目的としています。HXTの大きな特長は，30keV以上の，いわゆる純粋に「非熱的」な硬X線画像を初めて得ることができた点にあります。本稿ではこの非熱的な硬X線像を用いてフレアの磁場構造をさぐるという研究を紹介します。

まず，非熱的な硬X線で太陽フレアはどのように見えるのでしょうか。図1にHXTが観測した，硬X線像

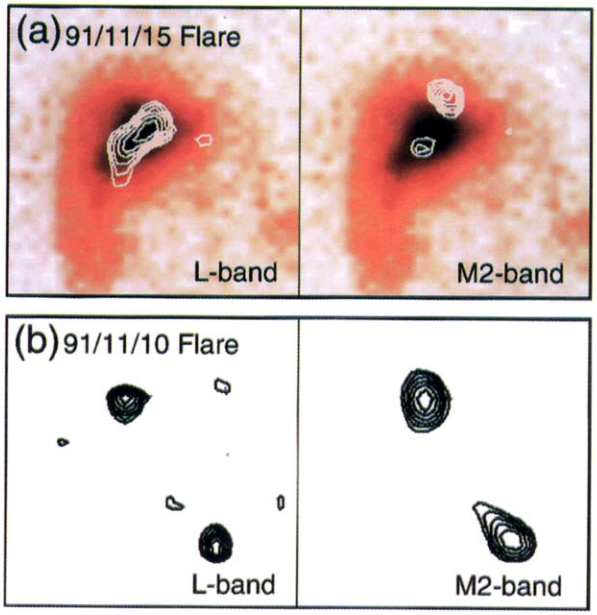


図1　HXTで観測した，フレアの硬X線像の例（等高線）。カラーはSXTによる軟X線像。各図の一辺は79秒角で，太陽面上で約6万kmに相当。

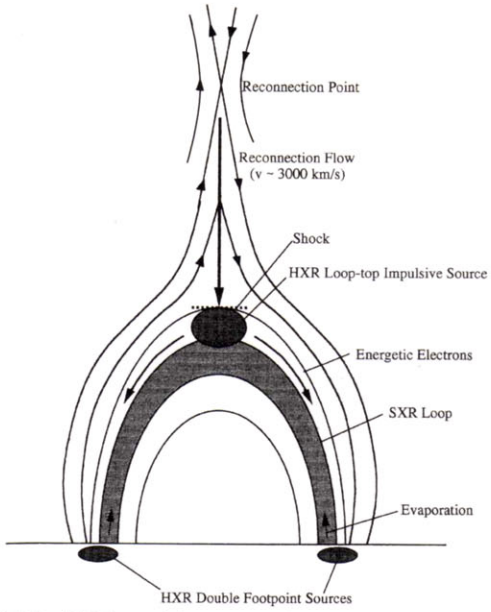


図2　磁気リコネクションによるフレアのエネルギー解放。

の例を示します。M2バンド（33-53keV）では硬X線源は2つ目玉状に見えており，この2つ目玉は，同じく「ようこう」に搭載された軟X線望遠鏡SXTが観測した軟X線ループの両足元部に対応しています。

30keV以上のエネルギー範囲では，硬X線像はこのような2つ目玉構造を多く示すことがわかり，このことから一般に，非熱的な硬X線の大部分はフレアを起こしている磁気ループの両足元部から放射されていることがわかりました（注1)。

さらに，2つ目玉それぞれからの硬X線の強度変動を調べると，両者はほとんど同時（時間差は～0.1秒以内）に硬X線を放射しています。ループに沿って数万km離れた2点を同時に光らせるには，その硬X線を放射するものの速さは10万km/s以上であることが必要です。このことから，30keV以上の非熱的なエネルギー域の硬X線は，磁気ループの上方で光速の数分の一にまで加速された電子が，ループに沿って両方の足元へと降り注ぎ，そこで周囲の密度の高いプラズマと衝突することで放射されていることが，HXTによって初めて明らかになりました。

さて，このように非熱的な硬X線源の性質がわかってくる一方，フレアのエネルギー解放が磁気リコネクションによっていることがHXTとSXTによる観測から発見されました。この，磁気リコネクションによるフレアのエネルギー解放については，ISASニュース2000年6月号の常田先生による研究紹介にわかりやすくまとめられていますので，そちらをご参照ください。

フレアがコロナ中の磁場をエネルギー源とする以上，どのような磁場構造によってフレアが引き起こされているかを知ることは，フレアのエネルギー解放や粒子加速を理解する上で決定的に重要です。「ようこう」が明らかにした磁気リコネクションの描像（図2）では，互いに逆向きの磁力線がつぎつぎとリコネクションにあずかることでフレアのエネルギー解放が進行していきます。さて，その場合，（リコネクションで形成された）閉じた磁気ループの両足元部に位置する，2つ目玉の非熱的な硬X線源は，フレアの進行にともなって上空の電子加速領域がどのように移動していくかを知る上で，優れたトレーサーになると期待されます。例えば，図2では，エネルギー解放域（リコネクション点）が時間とともにコロナのより上方へと移動

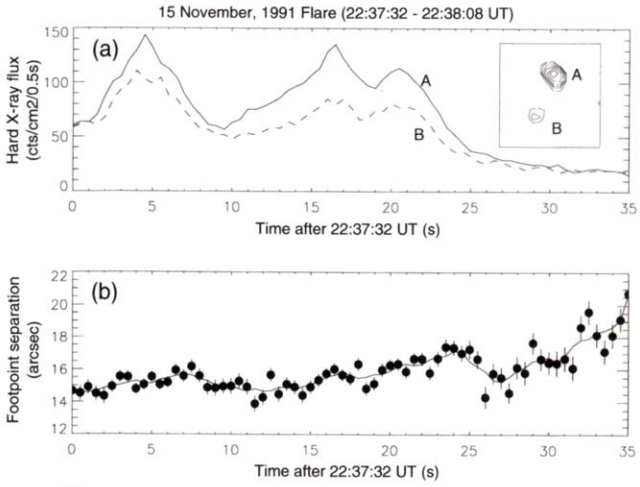


図3　2つ目玉A・B間の距離が広がっていくフレア。

していきますが，それに対応して，2つ目玉の硬X線源は互いに離れていくという系統的な動きを示すことが予想されます。

では実際にはどうなのでしょうか。HXTが観測したインパルシヴ・フレア（注1を参照）のうち，30keV以上のエネルギーバンドで2つ目玉状の硬X線源を示すフレアを取り上げ，2つ目玉の重心間の距離の時間発展を調べた一例を図3に示します。この図の例では，図2から期待されるように，時間とともに2つ目玉間の距離は大きくなっていきますが，反面，特に系統的な距離の増減の見られないフレアもありました。ところが，このような2つ目玉間の距離の振る舞いと，そのフレアの（空間積分した）硬X線スペクトルとの間には不思議な関係のあることがわかりました。図4は縦軸が2つ目玉の距離の広がる速さ（正の値が，2つ目玉が離れていくことを示す），横軸は，正の値が，20-30 keVを境にしてフレアのピーク時の硬X線スペクトルが低エネルギー側で急峻になる（負の値はその逆）ことを表しています。これを見ると，2つ目玉（＝ループの両足元）が離れていくフレアは，系統的に20-30 keV以下で低エネルギー側のスペクトル成分が卓越していることがわかります。

磁気ループの両足元が広がっていくフレアの磁力線の構造は，少なくとも2次元の範囲では図2の描像（「カスプ付きループ型」）と整合しています。では足元が特に広がらないフレアはどのような磁場構造をともなっているのでしょうか。ここでは詳細は省きますが，国立天文台・野辺山太陽電波観測所での電波観測（ISASニュース1999年7月号の西尾先生の記事を参照）や，ハワイ大学天文台でのHα線観測などから，太陽表面から浮上してきた磁力線が上空のコロナ中の磁力線と衝突する，いわゆる「浮上磁場型」の磁場構造（図5の下側の図）を考えれば，このような足元の振る舞いを説明できるのではないかと考えています。

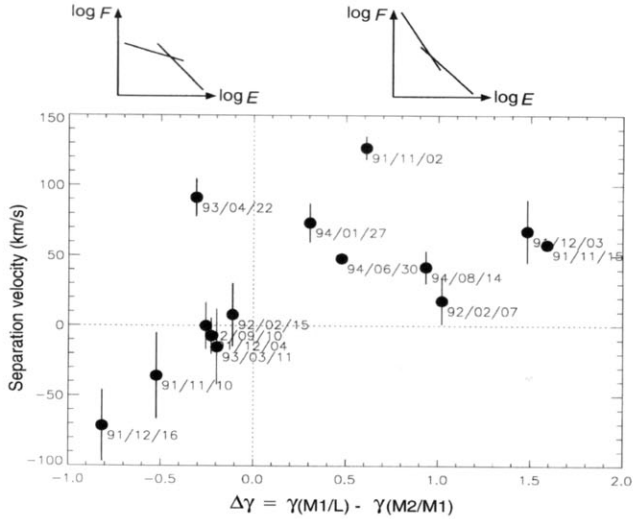


図4　ループの足元の距離の時間変化と硬X線スペクトルの関係。

それでは足元の広がるフレアと広がらないフレアで見られた，硬X線スペクトルの違いは何によっているのでしょうか。それを知るには硬X線画像そのものに立ち帰る必要があります。図1で(a)は足元の広がる（「カスプ付きループ型」の磁場構造をともなった）フレア，(b)は足元の広がらない（「浮上磁場型」の磁場構造をともなう）フレアです。M2バンドではどちらも2つ目玉の硬X線源が見られるのに対して，Lバンド（14-23keV）では両者の形状が大きく異なります。(a)のLバンドの線源は2つ目玉の間に位置し，それらをつなぐような形状をしています。これはフレアで生成された，ループの頂上付近に位置する3000-5000万度の超高温プラズマからの放射を見ています。一方，(b)ではM2バンドと同様にループの足元を示す2つ目玉が見えており，ループ頂上の超高温プラズマは見当たりません。解析した他のフレアについても同様で，このことから，我々はフレアの磁場構造と粒子加速・熱的プラズマの生成に関して，次のように予想しています（図5）。(1)（フレアのインパルシヴ相での）ループ頂上付近の超高温プラズマは，「カスプ付きループ

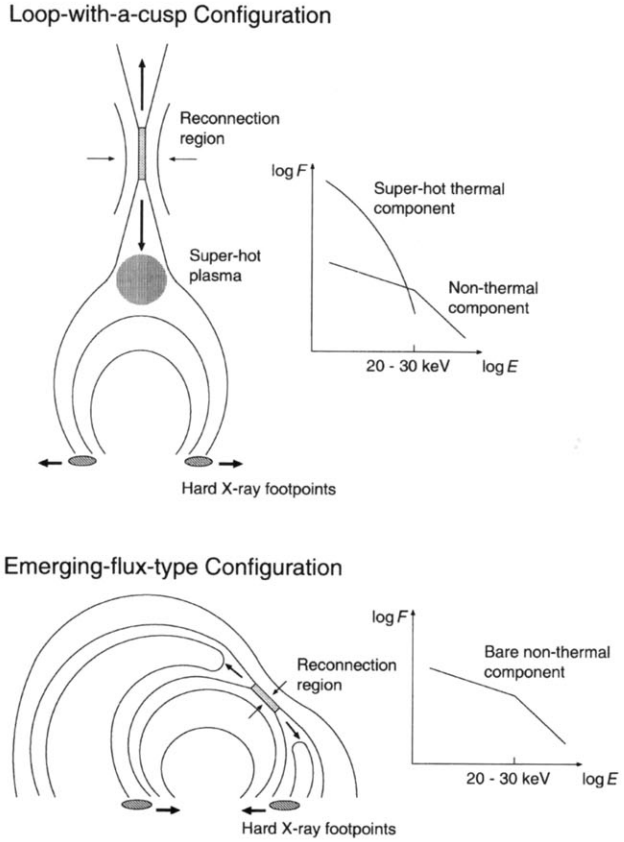


図5　フレアの磁場構造と超高温プラズマの生成。

型」のフレアに限り生成される。(2) 加速電子が放射する非熱的な硬X線のスペクトルは，20-30keVより低エネルギー側で平坦になっており，「浮上磁場型」のフレアではこの非熱的なスペクトル成分のみが見えている。一方，「カスプ付きループ」型のフレアでは，非熱的なスペクトルに超高温プラズマが放射する熱的な硬X線の成分が重なり，低エネルギー側でスペクトルが急峻となる。

これまでは2つ目玉を示す硬X線源の距離を扱ってきましたが，個々の線源はどのように動いているのでしょうか。両足元が広がるフレアについてこれを示したのが図6です。図中の等高線はある時刻での2つ目玉の硬X線源，白丸は0.5秒ごとの重心位置，矢印はその移動方向を表します。面白いことに2つ目玉は一直線上を遠ざかるのではなく，むしろ互いに反平行に進むように遠ざかり，その軌跡はちょうど，Hα観測でよく知られた，フレアの "two ribbon" 構造を連想させます。硬X線源のこのような動きは図2の描像を超えた，フレアの3次元の磁場構造を示唆していますが，紙面の都合でここから先は別の機会に譲りたいと思います。

「ようこう」は幸いにも打ち上げから10年近くになる今日も順調に稼働しており，2000年前後の今太陽活動極大期に発生した数々のフレアでも興味深い観測結果を得ています。Hαを始めとする地上観測や，近々打ち上げ予定のアメリカの硬X線太陽フレア観測衛星HESSIとも協力して，どのような磁場構造によって，爆発的な粒子加速が引き起こされるのか，また，硬X線源がそもそも「2つ目玉」に見えるのはなぜか，すなわち，3次元の磁場構造の中で，なぜ特定の場所にだけ加速電子が集中的に降り注ぐのか，その場所を決めているのは何か（注2），といった問題を解明していきたいと考えています。

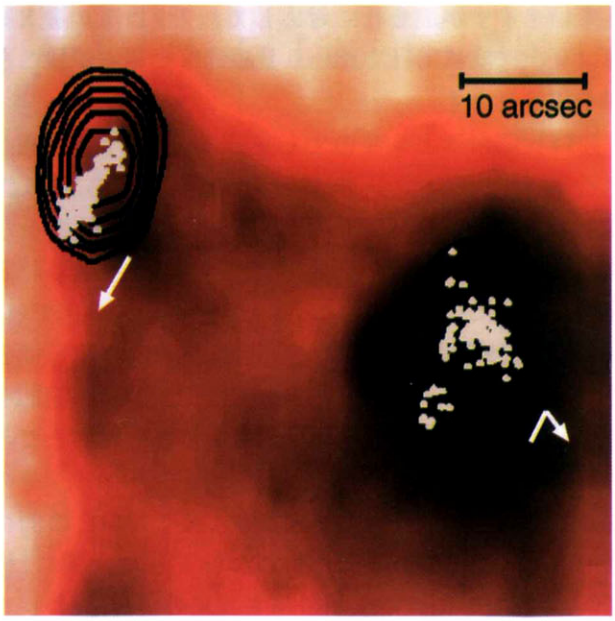


図6　2つ目玉の硬X線源の動くようす（約1分間の動き）。カラーはSXTによる軟X線画像。

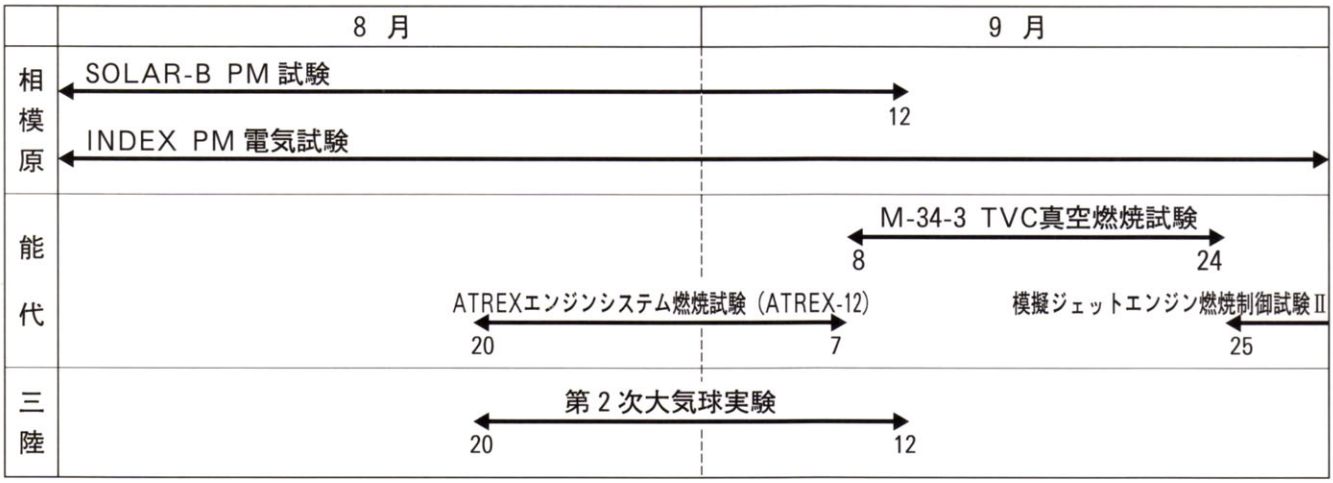
（注1）この稿では，硬X線が数～10秒程度の時間スケールで激しい強度変動を示し，また継続時間も10分程度の，いわゆるインパルシヴ・フレアを対象にしています。

（注2）2000年7月に発生した大フレアでは，30keV以上の硬X線源があたかもHα線像のように細長い2本の帯状（"two ribbon"）をしているのが観測され，このような問題への手がかりを与えるものと期待しています。

（さかお・たろう）

お知らせ

★ロケット・衛星関係の作業スケジュール（8月・9月）



★宇宙科学研究所一般公開

日　　時：平成13年8月25日（土）午前10時～午後4時30分
場　　所：宇宙科学研究所相模原キャンパス　　神奈川県相模原市由野台3－1－1
公　　開：ロケット・衛星模型展示，各研究プロジェクトの紹介
　　ミニミニ宇宙学校，映画上映，水ロケット作成・実演，他
問合せ先：宇宙科学研究所庶務課企画・広報係
　　TEL：042-759-8008（ダイヤルイン）

★シンポジウム

月・惑星シンポジウム
開 催 日：8月6日（月）～8日（水）
場　　所：宇宙科学研究所本館2階会議場

宇宙圏研究会
開 催 日：8月20日（月）～21日（火）
場　　所：立教大学

問合せ先：宇宙科学研究所研究協力課共同利用係担当　　TEL：042-759-8019（ダイヤルイン）

★人事異動（教官）

発令年月日	氏　　名	異 動 事 項	現（旧）職等
		（採　用）	
13. 7. 1	坪井伸幸（つぼいのぶゆき）	宇宙輸送研究系助教授	日本学術振興会特別研究員
〃	中澤知洋（なかざわかずひろ）	宇宙圏研究系助手	日本学術振興会特別研究員
〃	前田良知（まえだよしとも）	宇宙圏研究系助手	日本学術振興会特別研究員
		（昇　任）	
13. 7. 1	高橋忠幸	次世代探査機研究センター教授	宇宙圏研究系助教授

★ASTRO-EII計画始まる

2005年初頭の打ち上げをめざして，ASTRO-E計画がASTREO-EIIとして再スタートし，6月7日に第1回の設計会議を行った。ASTRO-E以来ずっと参加されている方々，今回新しく参加される方，それぞれ，会議途中で写し出されたASTRO-E衛星の鹿児島クリーンルームにおける写真を前に，これをもう一度作るんだ，という新たな決意を感慨とともに持たれたのではないかと思う。

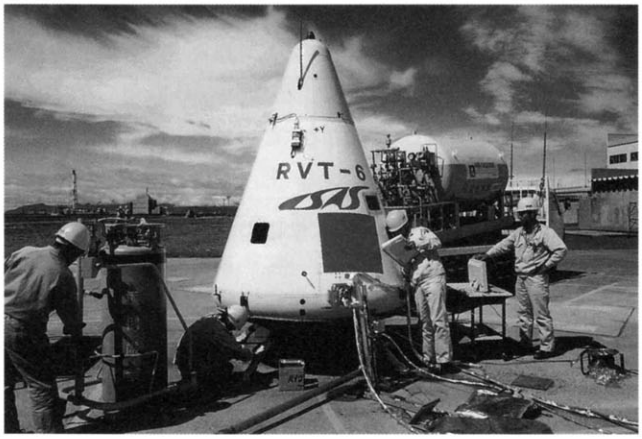
ASTRO-EIIはASTRO-Eと同じものを製作することを基本としており，プロトモデルを製作せずフライトモデルを4年で製作する。しかし，ASTRO-Eの設計を開始してからすでに10年近く経過しているため，入手不可能な部品が多数でてきてしまっている。このためある程度の設計変更は避けられない。一方，観測装置からは，可能な範囲で改良を行い科学的な成果を少しでも大きくしたいという希望もある。現在，これらの設計変更および変更の可能性が詳細に検討されている。次回設計会議までに衛星全体に関わる主要な検討項目は収束させる予定である。

ASTRO-Eの時の設計会議と比べると，プレゼンテーションの多くがパソコン画面のプロジェクター出力で行われるなどの様変わりした点はいくつかあるが，なんといっても強い指導力で計画全体を引っ張ってこられた小川原先生がおられないことが一番の違いであろう。その分，全員の力をこれまで以上に結集し，是非ともASTRO-EIIを成功させる覚悟である。最後になりますが，ASTREO-EII再スタートのために御支援・御助力いただいた各方面の皆様に深く感謝致します。

（満田和久）

－再使用ロケット実験機第２回離着陸実験－

近ごろ都に流行るもの，へそ出しルックに行政改革，信頼性向上の伝染病・・・。「お父さん，たったの9mで宇宙まで行けるの？」こいつら新聞を見やがったらしい。「あほー，千里の道も一歩からじゃ」再使用ロケット離着陸実験は6月9日から能代実験場で始まりました。2年前の第1回実験ではエンジンむき出しの機体をふらふらと浮かしたのですが，それでもなんとか2回連日で飛ばして再使用とか繰り返しとかをやってみました。今回は大幅に機体に手を入れて，もう少しスマートな離着陸と，液水ロケットの繰り返し飛行をさらに効率よくかつ安全に行うことを目指しました。耐久性設計をしたエンジンをはじめ，RT K-GPSを用い



た航法誘導など多くの部分が新しくなっています。機体はもっと高度を上げるのに備えて空気力を管理するためエアロシェルで覆いました。このため燃料の水素漏れには十分な対策や監視の仕立てを用意して運用しました。消火器まで載っています。将来高頻度で宇宙との往復を行う輸送システムや有人仕様の安全性の考察など，次の時代に求められる輸送システムに必要な技術要素の勉強の結果から，特に繰り返し飛行に関わる大事な課題を自ら経験して完全再使用のシステム構築のための基礎データを蓄積することがこの仕事の目的です。

実験は梅雨の北の端が上がったり下がったりする中，エンジン燃焼確認試験に引き続き，3回の離着陸飛行を行いました。高度は10mから20mへ，誘導ループにGPSを入れてと順次進め，6月25日の最後の実験では22mの高度まであげてしゃきっと着陸。着地点のずれは5cm。GPSを用いた誘導もうまく機能し，2日遅れながら予定した全ての実験を無事に終えることができました。前回と違ってゆったりやろうと目論んでいたのですが，天候のせいもあって結果は最後の3日半の間に3回の飛行といういつも通りのドタバタになってしまい，また図らずもQuick Turnaroundを実践することになりました。

「おーい山川ちょっと見てみ」気球を上げて風の様子見。「20mってあそこまで。怖いな。やめとこか」弱気の実験主任はいつでも止める理由を探しています。これにうち勝つには大丈夫という裏付けと実験班の熱意が必要です。ヤケクソではできません。どの飛行も結果は良好で，機体やエンジンをこのくらい手なづけておけば出来上がりはこのくらい，という感覚はだいたい分かってきました。でも調子に乗ってはいけません。高度は22m，いや機体の先っぽは25mだ，と高さを競うのはほとんど意味がありませんが実験班の達成感と歓声の大きさはやはり高度に比例します。この調子では100mも上がって降りてきたらとんでもないことになりそうです。光学記録も含め保安監視のビデオまで良い映像を撮ろうと追跡に懸命です。結果はただの物笑いご愛嬌追尾カメラも出ましたが，いくつかのシーンでは少しは「未来のにおい」がするものも撮れました。においだけでは勿論ダメですがこれも大事でしょう。

この実験は完全再使用という将来の宇宙輸送の革新のための基礎実験です。「少しでも未来に近づいた」のか「ただ危ないことをやっているだけ」なのかの判断はこれを読まれた方に任せます。我々はこのような小規模の実験でも経験することは多いと知ってさらに前に進みたいと思います。

千里の道のゴールにあるのは「誰でも行ける宇宙旅行」とか，「太陽発電衛星の建設」とか今の宇宙の利用とは全くスケールの違うものです。勿論この実験の他にもやるべきことはいっぱいあります。千里の道のりを加速して世の中を前に進めることが我々の目指すところです。宇宙研のロケットの元気の源です。より一層のご批判とご支援をお願いします。

（稲谷芳文）

★平成13年度第１次大気球実験

平成13年度第1次大気球実験は，平成13年5月15日から6月5日まで三陸大気球観測所において実施されました。放球された気球は，BT1型2機，B15型1機，B80型1機およびB150型1機の計5機でした。

BT1-5号機は5月18日に放球されました。実験は東京工業大学の工学系学生が中心に手作りで開発が行われている超小型衛星の長距離通信，コマンド送信等の通信機能の検証を目的に行われました。三陸，東京および菅平による種々の通信機能や搭載機器の動作状態のモニタが実行され，衛星運用に関する多くの経験が得られました。

BT1-4号機は5月20日に放球されました。実験は東京大学の工学系学生が中心に開発が行われている超小型衛星の軌道上と地上局間の通信を想定した通信機能の検証を目的として行われました。三陸，東京および菅平からのデータ受信とコマンド送信が行われ，東京の地上局から420kmの距離を隔てて双方向の通信ができ，超小型衛星の打ち上げに向けて貴重なデータを得ることができました。

B150-6号機は5月23日に放球されました。実験は青山学院大学が中心になり，エマルションチェンバーを用いた高エネルギー一次電子のスペクトルを測定することによって，宇宙線の銀河内伝播の情報および宇宙線の源を調べることを目的として行われました。回収された観測器は現像を終わり，現在解析が行われており，100GeV領域の高エネルギー一次電子スペクトルを明らかにすることができるものと期待されています。

B80-5号機は5月30日に放球されました。実験は東北大学が中心になり，成層圏の大気を液体ヘリウムを用いて大量に採取するクライオジェニックサンプル法で高度14kmから34kmまでほぼ等間隔に11点，大気圧に換算してそれぞれ20リッターの大気を採集することに成功しました。得られた大気試料は関係機関に送られ，さまざまな成分の濃度や同位体の測定が行われ，成層圏における大気循環や光化学過程の解明に大いに役立つものと期待されています。

B15-82号機は6月4日に放球されました。実験は日没時に自動的にバラストを投下して高度を一定に保つためのオートバラストシステムの飛翔性能試験を目的として行われました。排気弁を用い数回にわたり疑似日没状態を作り機能試験を行い所期の目的を果たすことができました。　　（山上隆正）

★西村　純先生が藤原賞を受賞

本研究所名誉教授西村　純先生がこの度第42回藤原賞をお受けになりました。

藤原賞は，「製紙王」の藤原銀次郎氏が正力松太郎読売新聞社主の協力で1959年に設立された賞で，独創的で顕著な業績を挙げた自然科学の研究者に贈られる学術賞であり大変名誉ある賞です。西村先生は宇宙線研究に関して多くの業績を挙げ，長年にわたり世界的指導者として宇宙線学会を導くと共に，宇宙科学・地球科学の研究に不可欠な大気球観測技術を独創的発案で発展させ，国際的に多大な貢献をなされたことで，この賞を受賞されました。心からお祝い申し上げます。
（山上隆正）

★ペネトレータ貫入試験

新たに選定され，その有効性が昨年の貫入試験で確認されたポッティング材を適用したペネトレータの貫入試験が5月21日から6月8日迄，サンディア国立研究所の施設を借用して実施された。今回の供試体は，一

部機器を除きフライトモデル同等品で構成されているため，準認定試験モデルと位置づけられる。別途用意したアルミニウム製ダミー供試体を用いた貫入条件出し試験の後，準認定試験モデルを用いた試験は6月4日に実施された。月の砂を模した砂箱の砂を掘り出し，アンテナ部分のみを露わしたペネトレータにハットアンテナを装着した後，搭載通信系との通信が，予めタイマーでセットされた6月6日午前8時から開始された。最初は手順に手間取り，なかなかペネトレータとのShake Handsが行えずやきもきしたが，通信系がロックし，ペネトレータからテレメトリデータが取得され画面上に表示されると一斉に歓声があがり，周囲で心配そうに見守っていた現地技術者も一諸になって喜んでくれた。

その後砂中での機能試験を1日，砂から掘り出した後室内での試験を2日間行い，6月8日に，予定していた全ての試験を終了した。今後取得データ及び供試体の詳細な検討・調査を行う予定である。

試験場は湿度10～20%と低いが，連日35度を超す暑さ。その中，現地の技術者は早朝から夕遅くまで当方のスケジュールに合わせて作業し，又，今回の結果を自分の事のように喜んでくれた。もうLUNAR-Aチームの一員である。大変感謝している。

今後は，来年5月に予定している認定試験を経て，フライトに臨む事になる。

（中島　俊）

バスティーユ記念日の太陽フレア

－「あすか」を不具にした憎いやつ－

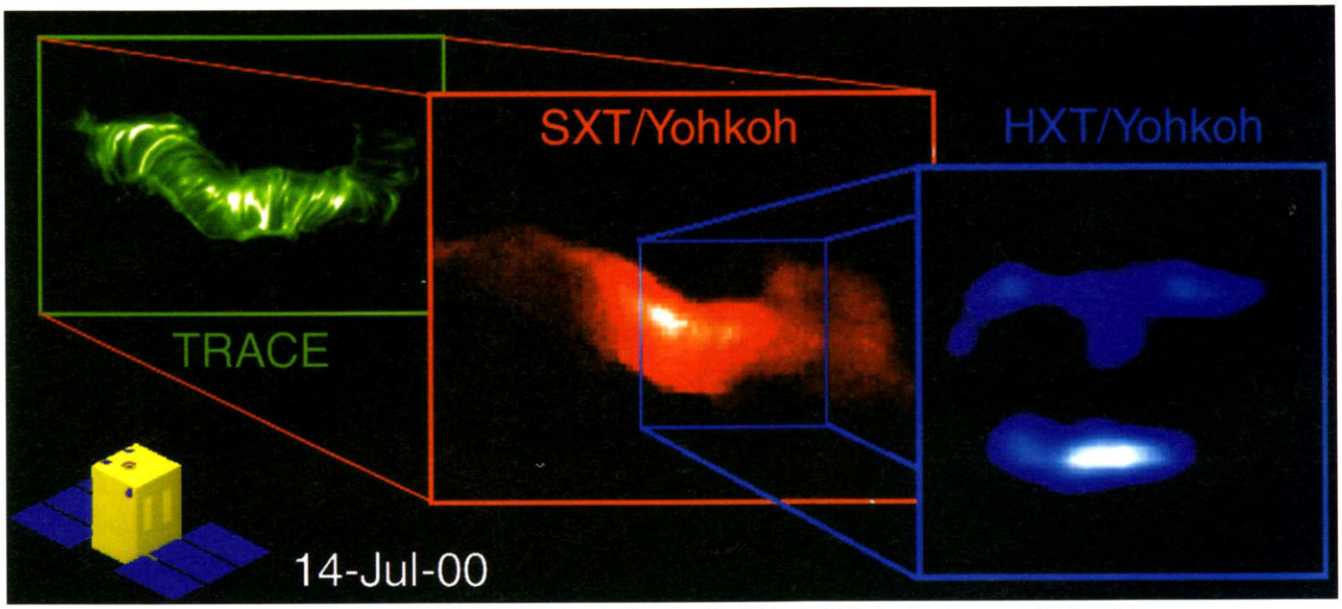
1789年7月14日，バスティーユ監獄にフランス大革命の狼煙があがった。2000年のこの日，太陽で巨大なフレア爆発が起こり，その余波で「あすか」が再起不能のダメージを受けた。宇宙研にとっては憎んでも憎みきれないやつである。

バスティーユ記念日フレアと名づけられたこのフレアは，爆発の激しさと例外的に大きな爆発領域，太陽円盤中心近くで発生し観測条件に恵まれたこと，「ようこう」とTRACE衛星により詳細な同時観測（図参照）が実現したことなどにより，世界の太陽研究者の注目を集め，Solar Physics誌に特集が編まれつつある。

太陽フレアは，黒点群近くの強磁場領域でコロナの磁力線に捩れの形で蓄えられたエネルギーが磁気リコネクション（つなぎかえ）で解放される現象であると考えられている。つなぎかわった磁力線は太陽表面のN極・S極の間を素直に結んだ磁気ループのアーケードになるはずである。バスティーユ記念日フレアはこの予想を出来すぎというほどの見事さで証明した。「ようこう」の硬X線望遠鏡は平行リボン状の硬X線源を鮮明に写し出したが，これは打上げ後9年間で初めてのことであった。

憎むべき太陽フレアも，われわれ太陽研究者にとっては汲めども尽きない研究対象なのである。

（小杉健郎）



紫外線（TRACE衛星），軟X線（「ようこう」），硬X線（同）で撮影したバスティーユ記念日フレア

宇宙を探る 第22回

高速中性粒子の観測

淺村和史

地球近傍の宇宙空間には地球半径の十倍（昼側）から数百倍（夜側）のオーダーの大きさを持つ磁気圏が存在します。磁気圏にはこれまでに多くの磁気圏探査衛星が打ち上げられ，広範な領域にわたってプラズマの直接（その場）観測が行われてきました。宇宙研のGeotail衛星はその代表例です。

ところが，磁気圏でのプラズマ観測には観測された変化が時間変化なのか空間変化なのかを分離するのが難しい，という問題点があります。荷電粒子は磁場の周りを旋回運動（Larmor運動）しますから，観測データに含まれる情報は観測点近傍のものに限られます。地球磁気圏でのH^+のLarmor半径は10^3 kmのオーダー以下で，磁気圏全体に対しては小さなスケールです。

この問題はプラズマ観測にとっては本質的なものですが，プラズマの情報を持ちつつ，遠方にまで到達できるものを使ってある程度解決できると考えられます。その候補の一つが高速中性粒子（Energetic Neutral Atom; ENA）観測です。地球近傍には希薄な低温中性水素の大気が存在します。この低温中性水素と磁気圏高エネルギープラズマ粒子（今回はイオン）が荷電交換衝突をすると，高エネルギー中性粒子，つまりENAが生成されます。ENAには，(1) 電磁場の影響を受けず，弾道飛行をするので，生成領域の情報を持ったまま離れた領域まで到達する。(2) 荷電交換では運動量交換がほとんどないため，ENAのエネルギーはほぼそのまま生成領域のプラズマ粒子のエネルギーを反映する。(3) ENAの粒子種は生成領域のプラズマの粒子種を反映する，といった性質があり，撮像観測することでプラズマ観測と相補的な役割を担うものと期待されています。

ENAを観測するためにはいくらかの工夫が必要です。数十keV以下のエネルギーのENA観測には検出器としてMCP（マイクロチャンネルプレート）がよく用いられますが，MCPは紫外線にも感度を持っています。そして，地球磁気圏では低温中性水素大気によって共鳴散乱される太陽紫外線（波長121.6nm）フラックスがENAより圧倒的に多く，紫外線の除去は必須です。そこで，ENAをイオン化し，静電場などを用いて軌道を偏向して紫外線から進行方向を逸らすことが考えられます。ENAを電離するためには，ENAに非常に薄いカーボン膜を通過させる方法があります。ENAの粒子種や入射エネルギーにもよりますが，例えば2.5nm厚のカーボン薄膜に10keVのHが垂直に入射した場合，反対側から出射した粒子の約20%がH^+になります。ただし，カーボン薄膜を使う場合，低エネルギー，重粒子になると薄膜を通過する際の角度散乱が大きくなり，またエネルギーロスも無視できなくなってくることから，軽い粒子で高エネルギー（Hなら数keV以上）の方が適しています。このほか，仕事関数の低い表面に粒子をすれすれの角度で入射させ，負イオン化する方法もあります。この方法はカーボン薄膜では電離が困難な100eV程度のエネルギー領域で使われます。

一度ENAをイオン化すると後はプラズマ観測器の原理が使えますが，ENAのフラックスは非常に少ないため，相当高い感度を持つ観測器が必要になります。高感度の実現には，エネルギー掃引をしないという方法があります。エネルギー掃引とは観測器内の極板に印加する電圧を変化させ，検出器に到達できるエネルギー範囲を変えてゆくことでエネルギーの情報を得る方法ですが，これをせずに広範にわたるエネルギーを同時にカバーすると等価的に感度が高まります。この場合，（紫外線除去のための）軌道偏向の後でTOF（飛行時間分析）等を用いて粒子分析をすることが考えられます。ここで考えているTOFとは粒子がカーボン薄膜などを通過する際にたたき出される二次電子と入射粒子自体の両方を検出器まで導き，その検出時間差から粒子の速度を割り出すものです。

もう一つENA観測をする上で問題となるのは荷電粒子の除去です。荷電粒子のフラックスも磁気圏の領域によってはENAよりずっと大きいのです。荷電粒子除去は静電偏向によって行うのが一般的ですが，その除去性能を10^4程度より良くするのは簡単ではありません。その理由は極板表面で中性化してしまう粒子があるためと考えられます。

最近では紫外線の透過率は低い（波長によりますが10^{-5}程度）が粒子の通過率は高い（10^{-1}程度）フィルタ（grating）が開発され，アメリカのIMAGE衛星で実際にENA観測器に使用されています。このフィルタは非常に脆弱で取り扱いが大変ですが，使用できるとなればENAをイオン化しなくても紫外線を除去でき，観測器の簡素化と高感度化が可能です。

（あさむら・かずし）

東奔西走 Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory 滞在

戸田知朗

折り悪しく春休みと重なる3月末に出発となってしまった。当初2月からと思われていたのに，縁起でもないけれど今しばらくの宇宙研プロジェクトのように，やむを得ず少しずつ引き延ばしてきた結果である。

成田空港はやはり団体客でごった返していた。こういうときの座席選びは，ある種賭けのようなものがある。なるべく細身で，遠慮深くて静かな前後左右の道連れをと願うしかない。果たして，窓側に陣取った私の横に現れたのは，ラグビーでもやっていたかと思われる，明らかに座席を上回る肩幅ともてあます上腕筋をもった人物だった。遠慮深いという点は当たっていたかもしれない。手首から上を動かさずに健気に食事をする様子は，最早自分を忘れて気の毒としか言いようがなかった。

ワシントンD.C.は快晴であった。殆どの乗り合わせた団体客は，ニューヨーク便に乗り継ぐらしく開放感はひとしおだった。入国審査ゲートで，滞在はと訊かれるので，2ヶ月の観光と答えてみたら，案の定，感嘆符と共に「結構なご身分だな。うらやましいよ。」と天を仰いでみせて，会話に乗ってきてくれる。こんなことでアメリカを実感して安心するのだから，自分の中にも明らかにステレオタイプは存在する。

JHU APLはワシントンD.C.とボルチモアの間に位置している。隣地にはのどかに馬が草を食み，地平線など当たり前の畑が広がっている田舎である。私はここに来るまで “John Hopkins” だと思っていたけれど，本当は “Johns Hopkins”。でも道路標識は “John Hopkins Rd.” となっている。Rt.29からこのJohn Hopkins Rd. に折れるとすぐ，広大な敷地に一群の建物が現れる。門もなければ，植え込みも囲いもない。それと知っていなければ，うっかり通り過ぎてしまうほど入り口はあっさりとしている。付近に不似合いな大きな駐車場があるので，何となく気づかされて誘い込まれていく感じだった。なかなか洒落た色使いのかわいらしい標識が道路に面してあるのだが，何ともこの巨大な組織には似つかわしくない。宇宙研の門構えと交換して釣り合いがとれそうな感じがした。

APLは宇宙研に先行する小惑星探査ミッションNEARの成功で沸き立っているはずで，その雰囲気の覚めないうちに合流したい，と思っていた。既に1ヶ月以上が経過していたけれど，達成感の余韻はそこここに感じられて人と接していても小気味いい。やはり成功というものは，部外者であっても自然に取り込まれて，何となくいい気持ちにされてしまう妙味がある。

4号館の2階に部屋を与えられて8週間を過ごすことになった。APLは各建物の出入り口が本当の門である。ここで厳重な検査を経て，漸く中に入ることができる。APLの建物群は正に「うなぎの寝床」というにふさわしく，殆ど無統一に次々に建物を建て増していったと思えるような造りになっている。傾斜地に立っているので2階が1階になり，1階が2階になったりしていく。

APLの宇宙工学部門はこの4号館に間借りしていて7号館のサイエンスグループと協同している。全部で40号まで数える研究施設だから，宇宙といっても1部にすぎないほど多岐にわたる研究機関である。ここで，NEARのレーザ測距グループに交じって光センシング技術について検討する機会をもった。

忙しさにおいては，宇宙研は自負していいと思っているが，APLも例外ではない。この忙しさのために，私は彼らを捉まえるのに忙しくせねばならなかった。ただ，彼らが多忙なのは17時きっかりに退所するためで，終わりの見えない宇宙研の忙しさとははっきり違っている。

私のいた部屋からは7号館につながる廊下がみえていて，ここの頻繁に壊れて1ドル札をタダ取りする某ケミカル飲料自販機の前で，口惜しがったり，捨てゼリフを吐く所員の姿をよく見かけて面白がった。面白く思えるのは，こういう場面で彼らに期待するステレオタイプのせいかもしれないが，滞在の忙しさを忘れる瞬間だった。実際，彼らは本当に口惜しがっているとは見えない節がある。幸い，私自身はこの自販機に裏切られることはなかった。

APLのミッションはTIMED，CONTOUR，そしてSTEREOと続いていく。　　（とだ・ともあき）

惑星探査テクノロジー最終回

イオンからフォトンへ。推進機関の変革と将来の惑星探査の運用

川口 淳一郎

私たちの進めているMUSES-C計画では，小惑星へのランデブーと離脱のために，高効率の推進機関を必要としていて，イオンエンジンが採用されています。化学推進に比べて同じ加速を行うために必要な燃料は1/10で済むことから，かなりの惑星探査がこの小型の推進機関でも可能な範囲に入ってきました。

彗星へのランデブーもその1つです。従来は，惑星間でこの推進機関だけでの軌道操作が考察されてきましたが，地球のスウィングバイを併用することで，出力の小さい電気推進機関によってでも，大きな軌道操作を行って，実用的な利用ができることが明らかになってきています。これまでは，ロケットの性能で探査機の重量が決まっていましたが，実は，ロケットの上段ステージをこのような高効率の推進機関でおきかえることも，地球のスイングバイを併用することで可能になったわけで，地上発射のロケットの能力に換算していうと，数倍の輸送能力の向上に匹敵することになります。

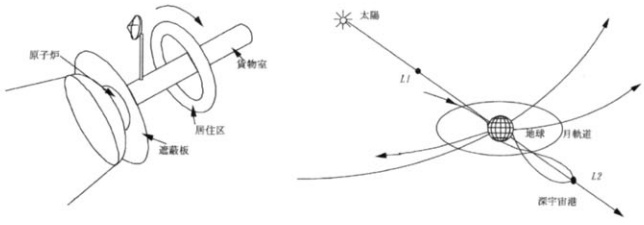
このように，電気推進は多様な応用が期待できるのですが，依然として力学的な運動量の交換を基礎としている以上，キセノンなど噴射させる流体の搭載量が定める増速量が壁となって，きわめて大きな軌道操作を行うことは依然困難です。彗星へのランデブーについても，多様な彗星を探査するためには，現在の増速能力の数倍の性能が必要ですし，また，複数回の小惑星へのランデブー，サンプル収集と地球帰還を行うには，1桁上の増速を行う必要があります。推進機関の性質から述べると，これらを解決するためには，より高速である種の「質量」を排出する機関が必要ということになります。現在，このためのもっとも有力な方式と考えられているのは，「光」です。光子を，つまり光速で「放射」することによって加速を行う方法で，考え方自体は，ずいぶん古くからあります。実際問題，太陽光の輻射圧は，この影響を直接受ける現象で，惑星間探査機の航法や軌道決定においては，この太陽光輻射圧の存在が，最大の誤差源となっているくらいです。光を発生させる方法が，もちろん最大の難関です。電力を確保するためには，おそらく原子力を用いる必要があるでしょう。地上では，一旦電力を経由してから光へと変換するのですが，この間の変換による損失が高効率の推進機関を作るうえの鍵だと考えられています。発光させる波長の選択もふくめて，原子力から光への変換方法の開発がこの応用を考えていくうえでの，大きな課題です。いわば発電所を搭載することになり，どうしても小出力機関では重量対発生電力の効率は低下してしまい，実用となるのは，数千トンという大型の宇宙船の規模になるようです。

このように自らが発光して，それとの運動量交換で推進する方式に対して，古来有力な手段と考えられてきたのは，太陽帆（ソーラセール）です。自らが発光する場合には，太陽系を脱出する飛行も太陽距離に無関係に可能ですが，ソーラセールの場合は，まさに「風」まかせですから，太陽距離が遠くなると効率低下が起こるのは当然です。しかし，地球距離においては，1平方メートルあたり，1.4kWのエネルギーフラックスが利用できるわけですから，ある程度の面積の帆があれば，発電所を抱えるのと等価なことになります。実用となる最小の大きさのセールは，帆の面積で1〜2万平方メートルと考えられていて，これは，数万kWの発電所に相当するわけです。こう考えると，太陽発電衛星とソーラセールは不可分な関係にあるといえます。本所の三浦，長友両先生が早くからこの可能性を説いてこられたことは高い先見性をうかがわせるものです。

このように，高効率の推進機関を利用する宇宙船は，超大型化することが必至で，地上からあるいは月面から打ち上げるのは，ほとんど不可能です。せっかくの高い推進効率も，機体を重力を含めて大きな加速度環境におくことは，機体の構造重量の増加を招くことから，適当ではありません。また，地球周回低高度軌道からの発進も，ポテンシャルの底から惑星間へと脱出させるための増速量が，その後の地球スウィングバイと併用する推進増速量と匹敵してしまうことから，このような大型の宇宙船には適していません。地球からの距離を一定に保ち，かつ軌道安定性をある程度期待できる場所が，発進場所として向いていると考えられます。天文系でも考察されているようですが，そのような場所として，太陽地球ラグランジュ点であるL2点などをあげることができるでしょう。大型で低加速度の推進機関で航行する宇宙船へ，地球上から発進するシャトルから乗客，貨物を載せかえる形態の輸送手段が登場してくるかもしれません。いわば，深宇宙港を建設することに相当します。地球周辺の重力場を利用して脱出させ，惑星間での加速量を地球のスウィングバイを利用して惑星間飛行にふりむけ，外惑星や太陽系外へと向かわせることができるでしょう。

今回まで，多くの専門の方々に，惑星探査にかかわる種々の技術を紹介いただきました。シリーズは今回をもって終了します。惑星探査は無論，科学研究であるわけですが，将来は，資源探査・利用へと展開される時期もおとずれることでしょう。多くの若い理工の研究者が，積極的に関わっていくことを期待してやみません。（かわぐち・じゅんいちろう）

原子力光子（フォトン）ロケット（左）
（発電電力）/（重量）が，10kW〜100kW/kgの宇宙船の規模で実現できます。今は，原子力船などでは，熱の出力が1kW/kg程度なので，まだまだ無理ですが，原子力エネルギーを直接「光」エネルギーでとりだせれば，実用化できるでしょう。



ラグランジュ点と深宇宙港。地球周辺の宇宙輸送航路。（右）
＊航路E-L2 ：地球周辺の宇宙ステーションから，深宇宙港へ。
＊航路M-L2 ：月面基地から，深宇宙港へ。
＊航路L2-J ：深宇宙港から，惑星間へ。

ピンキーとの再会

戸田　勧

去る5月，久しぶりでピンキーに会いに行って来た。26年ぶりでみるその容色は全く衰えること無く，暖かい微笑をもって迎えてくれた。短い時間ではあったが，がらになく胸をときめかせてしまった。

1974年から1年間，科学技術庁宇宙関連長期在外研究員としてカリフォルニア工科大学大学院航空学科に航空技術士課程の学生として滞在した。どうせ行くなら学生で行って卒業生になった方がよいという先達（古賀達蔵先生）の助言で学生登録をしたまではよかったが，最初の授業で宿題が出たことも分からない英語の実力で，当時A. J. Acosta教授（日本機械学会名誉員）のもとでResearch Assistantをしておられた古屋興二さん（現工学院大学教授）に家族ぐるみでお世話になることになった。学生生活の面では，上原祥雄さん（元防衛庁技術研究本部長），樋口博さん（現東北大学流体科学研究所教授）に知恵をつけていただいた。お三方にこの場を借りて厚く御礼申し上げるとともに日頃のご無沙汰のご容赦を乞いたい。

さて，宿題に追われる毎日のある日キャンパスからそう遠くないHuntington Libraryを訪ねた。そこのアートギャラリーでTurner等のイギリス18世紀風景画に囲まれてGainsboroughのBlue Boyと対峙して展示されているLawrenceの“Pinkie”に初めて出会った。とにかく暫くの間ただボーとしてみていた。宿題に疲れた“おじさん学生”にとって一服の“清涼剤”となった。その後，帰国するまで一寸の暇を作ってはピンキーに会いに出かけた。今回はその時以来の訪問であった。26年前と何も変わってはいなかった。時の経過を忘れた。

カリフォルニア工科大学はご案内の通りJPLを運営しており，宇宙開発とも極めて関連が深い。それなのに，“宇宙（space）”の付く学科はない。いまだに航空宇宙工学科でなく航空学科（Aeronautics）である。恩師で航空学科主任でもあった故E. E. Sechler教授の説明では航空工学，宇宙工学の共通基盤としての学問である航空学を教え，研究するという目標・理念を明確に示すために，Von Karman以来ずうっと“Aeronautics”であるということであったと記憶している。我が国にも“航空学”に拘る大学が一つぐらいあってもいいのではないか。

いずれ航空機は亜音速機から超音速機，極超音速機へと進むであろう。そして宇宙輸送機は使い切りロケットから再使用宇宙輸送機，有人宇宙輸送機へと進むのは必然であろう。その頃の航空機と宇宙輸送機の間にいかほどの違いがあるだろうか。その頃の航空宇宙輸送機の実現と究極の信頼性向上に向けて研究するのが航空宇宙技術研究所の使命であると考えている。

ピンキー鑑賞の翌々日，スペースデブリ問題で米国National Research Councilの委員会で一緒に仕事をさせていただいたカリフォルニア工科大学の大先輩宅に招待された。TRWのVice-Presidentを勤めていたということだけあって，その広く落ち着いた大邸宅と，リンゴ，オレンジ，レモン，金柑から種々の草木が植えられ，野生の孔雀までが遊びにきている広大な庭には驚き圧倒された。ディナーとカリフォルニアワインも勿論美味かったが，Rancho Palos Verdesから眼下に広がるロス，パサデナの町を一望しながら飲んだアイスワインの味はいまだに舌に残る。今度はアイスワインを頂きに行くついでに是非またピンキーに会ってこようと思っている。

（航空宇宙技術研究所　理事長　とだ・すすむ）

時々行く相模原市の体育館のトレーニングルームにあるエアロクライム（私は密かにふみふみ機と呼んでいます）について。いろいろ選択できる負荷のパターンの一つに「ブラックホール」というものがあるのですが，トレーニングの最初と最後で負荷が大きく，中頃では一番軽くなります。何か釈然としないものを感じながら汗を流しています。（松岡）

ISASニュース　No.244　2001.7　ISSN 0285-2861
発行：宇宙科学研究所（文部科学省）〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 042-759-8009
The Institute of Space and Astronautical Science
◆本ニュースに関するお問い合わせは，上記の電話（庶務課法規・出版係）までお願いいたします。（無断転載不可）
＊なお，本ニュースは，インターネットでもご覧になれます（http://www.isas.ac.jp）。