

## 宇宙科学最前線

再生冷却方式のLOX（液体酸素）気化ノズルを用いた酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットエンジンの気化燃焼実験  
 酸化剤を冷却剤として用いた再生冷却方式のハイブリッドロケットエンジンの燃焼実験に世界で初めて成功。（首都  
 大学東京 湯浅研究室/ハイブリッドロケット研究WGにおいて実施）

# 次世代の宇宙輸送は ハイブリッドロケットで！

宇宙飛行工学研究系 教授 嶋田 徹

### はじめに

宇宙工学の代表的な成果といえば、宇宙ロケットと人工衛星です。言うまでもなく、前者は宇宙空間に物資や人を輸送するための技術、後者は軌道にあってさまざまな用務を果たすための技術です。宇宙研は1950年代にロケットの研究開発に着手し、1970年に国産初の人工衛星打上げに成功後、M（ミュー）型ロケットを発展させて、多くの科学衛星を打ち上げてきました。これらの宇宙工学研究開発は、現在開発中のイプシロンロケット、再使用観測ロケット、水星探査機BepiColombo、X線天文衛星ASTRO-Hなど、ロケットや衛星開発に継承されています。

ここでは、これからの宇宙輸送と社会の要請に

応えるために、大学と宇宙研の研究者がワーキング・グループ(HRrWG)を結成して取り組んでいるハイブリッドロケットの研究について紹介します。

### ハイブリッドロケットの長所

ハイブリッドロケットの長所は、安全性、高性能、環境への優しさ、燃焼中断／再着火／推力絞り制御などの機能性、低コスト性と考えられています。なぜハイブリッドロケットにこれらの長所が備わっているのか、これから見ていきましょう。

図1にハイブリッドロケットエンジンの主な構成を示します。図のようにハイブリッドロケットは、燃料を固体で、酸化剤を液体で搭載しているので、燃料と酸化剤が自然に混じり合うことはありません。すなわち爆発の危険性のない安全な口

ケットです。火薬ではないため取り扱いが容易であり、管理コストも抑えることができます。酸化剤には酸素、過酸化水素、亜酸化窒素などが、燃料には末端水酸基ポリブタジエン、ポリエチレン、ポリプロピレン、ワックス、アクリルなどの炭化水素系高分子が用いられます。ここで挙げた材料は日常多く使われているものであり、特別な固体推進剤と異なり安価です。

これらを適切な配合比で燃やすと、固体推進剤に比べて10%以上高い比推力が得られます。すなわち、排気ガス単位質量当たりが生み出す推進力が高い高性能なロケットをつくれることを意味します。また、例えば炭化水素と酸素を反応させる場合、生成物に塩素化合物などを含まない、環境に優しいエンジンをつくることができます。また、酸化剤の流量を制御することによってエンジンの出力調節、停止・再着火が可能であり、機能性の高いロケットとなります。

### 境界層燃焼がハイブリッドロケットの鍵を握る

エンジンの作動時には、高圧ガスやポンプで圧された液体酸化剤が固体燃料を充填した燃焼室に吹き込まれます。通常、自然には着火せず、別途用意した点火器で熱を加えて着火します。着火がうまくできると、固体燃料の表面に火炎が形成されます。実は固体燃料は、熱によって分解または熔融し、燃料気体を発生させます。一方、液体酸化剤も熱によって蒸発し、酸化性気体となっています。これら2種の気体が対流・拡散しつつ

適度に混じり合ったところで、化学反応が起き火炎をつくるのです。このような火炎を拡散火炎と呼んでいます。いったん火炎が生じると、それ自体の熱によって新たに燃料と酸化剤の気化が促され、化学反応が継続的に起こり火炎を維持します。通常は、燃料表面に沿って酸化剤を流し、この流れが固体表面で粘着するために形成される「境界層」内に拡散火炎ができるので、この現象を境界層燃焼と呼んでいます。図2に境界層燃焼で起きている物理・化学現象をまとめました。化学反応、物質の相変化、物質と熱の輸送など、多様な現象が関係し合う複雑な過程であることが見て取れます。ハイブリッドロケットの技術は、境界層燃焼をいかに上手に取り扱うかにかかっています。

### 燃料後退速度の重要性

単位質量の固体燃料が単位時間に気化する量は、燃料が気化温度にまで上昇するのに要する熱と、燃料物質の気化熱（潜熱）と、外部から単位時間当たりに加える熱量によって決まります。単位時間に単位表面積から発生する燃料気体の質量を固体燃料の密度で割ると、局所的な燃料後退速度が得られます。

燃料後退速度は上記の理由で、外部から加えられる熱が大きいほど大きくなるのが分かります。この熱は火炎から対流や輻射によって伝わってくるので、火炎が燃料表面に近ければ近いほど単位時間・単位面積当たりには伝わる熱量が大きくなります。固体推進剤や液体推進剤の場合は、火炎と燃料との距離が数十 $\mu\text{m}$ 程度と考えられますが、ハイブリッドロケットのような境界層燃焼の場合は、その程度が数mm程度あると考えられます。このため、燃料へ伝達される熱量が小さくなってしまふことは否めません。

燃料後退速度が小さいことがロケットの設計に及ぼす影響はいろいろあります。困った点としては、図1のような単純円筒形状の燃料を用いた場合、燃料の縦横比が燃料後退速度に逆比例するということです。すなわち燃料後退速度が小さくなると、縦横比が大きくなり、細長いロケットになります。この場合、燃料の体積充填率も低くなり、構造重量的にも効率の悪いロケットになります。一例を挙げると、固体推進剤を用いているS-520観測ロケット規模を想定した場合、これを燃料後退速度1mm/sのハイブリッドで代行すると、初期の燃料内孔直径が30cmのとき燃料の縦横比は約40になると試算されます。S-520ロケットの縦横比が約10であることを考えると、これは大き過ぎるといわざるを得ません。

図1 ハイブリッドロケットエンジンの構成

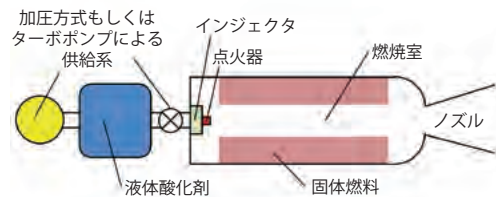
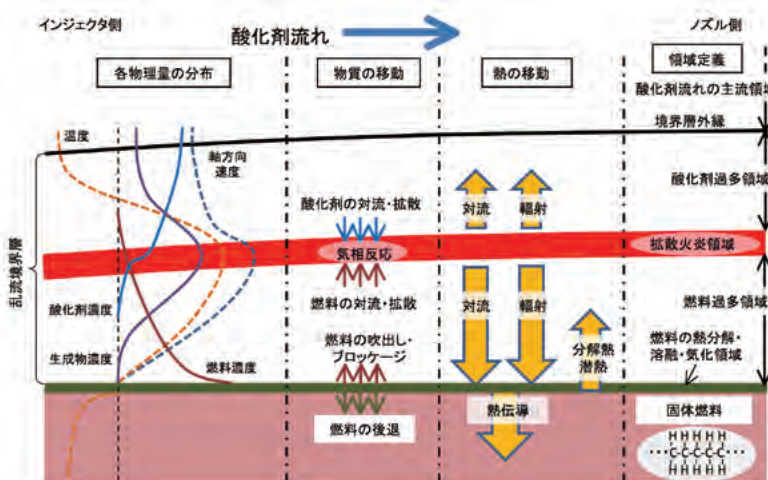


図2 境界層燃焼



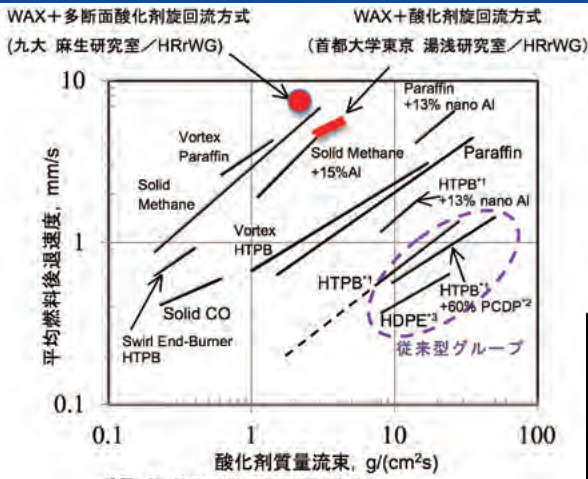


図3 燃料後退速度の向上成果（酸化剤：気体酸素）

この不都合をある程度克服する方法として、燃料に複数の穴を開けて燃料表面積を増やすマルチポートという手法があります。2004年に有人で高度100km到達を連続2回成功させたSpaceShipOneのハイブリッドロケットで採用されています。しかし、マルチポートの場合、燃料の燃え残りが生じやすく、設計が難しい点が指摘されています。この問題を根本から解決するためには、燃料後退速度を高くすることが重要です。

### 燃料後退速度と燃焼効率の向上

図3に、これまでに内外で得られた燃料後退速度のデータを酸化剤の質量流束（単位面積・単位時間あたりに流れる質量）に対してプロットしたグラフを示しました。ここでHRrWGでは、燃料後退速度を向上させるために、大別して2つの方法に取り組んでいます。第一の方法は酸化剤流を旋回させることで、遠心力の効果により火炎を燃料表面に近づけることです。火炎が燃料表面に近づくことによって、軸流噴射に比べて燃料後退速度を3~4倍高くすることができます。図4に示すように、酸化剤流旋回型の燃焼室の中で火炎は表面近傍に形成されていることがわかります。酸化剤に液体酸素を用いる場合は、液体酸素をインジェクタ上流で気化することで、旋回流の効果を発揮させることができます。その目的で、HRrWGでは表紙に示すように、液体酸素を気化させるための再生冷却方式のノズルの開発研究を行っています。

燃料後退速度向上のための第二の方法は、GAP（グリシジル・アジド・ポリマー）系やWAX燃料を用いることです。GAPを従来型燃料に混ぜることで、GAPの自己発熱分解の効果により燃料後退速度を高くすることができます。またWAX燃料の場合、表面で溶融した燃料が液滴になって流れに巻き込まれて飛散する現象が起き、熱の効果に力学的効果が加わることで燃料後退速度が高くなります。

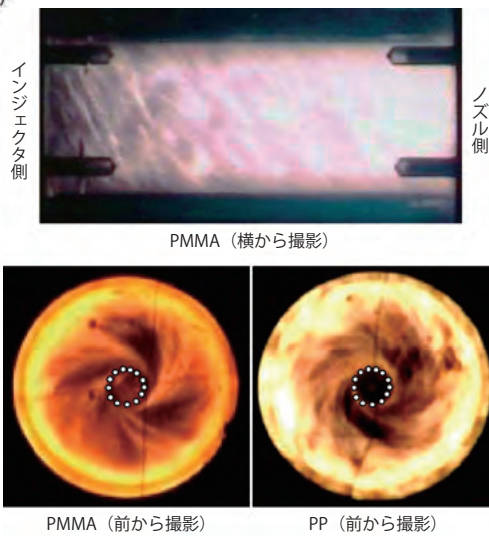


図4 酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットエンジン内の燃焼の可視化

上図の燃焼室内を横から撮影した写真からは、らせん状に旋回しながら燃焼している様子が分かる。下図の前方から撮影した写真（中心の円はノズルスロット孔を示す）からは、旋回流によって火炎が燃料表面近傍に形成されている様子が分かる。また、燃料がPMMA（アクリル樹脂）の場合はPP（ポリプロピレン）の場合より火炎帯が薄くなっていることが分かる。（首都大学東京 湯浅研究室/ハイブリッドロケット研究WGにおいて実施）

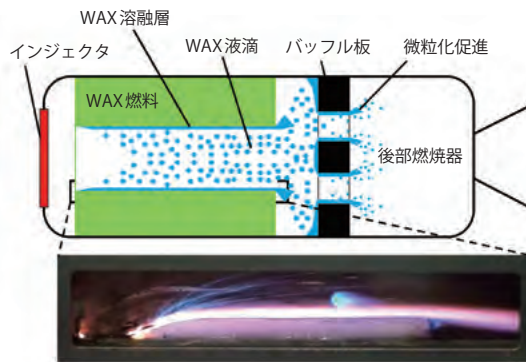


図5 バッフル板を用いたエンジン模式図とWAX燃料の燃焼の様子

WAX燃料は加熱されると表面で液化し主流に液滴として巻き込まれる。液滴は気化して燃える一方で、滞留時間が短いと未燃のまま放出される。その対策としてバッフル板により液滴の微粒化を促進し、燃焼効率の向上に成功。また、液滴が巻き込まれる様子を世界で初めて可視化することに成功した。（東海大学 那賀川研究室/ハイブリッドロケット研究WGにおいて実施）

HRrWGでは、WAX燃料に酸化剤を旋回噴射することによって、従来のハイブリッドロケットに比べて1桁高い後退速度が得られることを確認しました。また、多断面旋回の手法によって、さらに高い後退速度の可能性も確認しています。しかし、燃料後退速度を高めるだけではロケットとして十分ではありません。同時に燃料を効率よく燃焼させる必要があります。その目的で、HRrWGでは図5に示すようなバッフル板を考案し、燃焼気体特性から理論的に決まる排気速度（特性排気速度）に対して95%以上の効率が得られることを確認しています。

### おわりに

ハイブリッドロケットは、安全・安心、環境・エコ、高性能と高機能などの長所を持ち、将来の有人宇宙輸送や低コスト物資輸送の社会ニーズに応えられる新たなロケットです。国内大学と宇宙研の研究者がつくるHRrWGでは、鍵となる境界層燃焼の理解を進めるとともに、現実のロケットに必要な燃料後退速度と燃焼効率を向上させる技術の実証に取り組んでいます。現在、その第一歩として5kN級の技術実証用試験設備とエンジン（HTE-5-1）を製作中であり、今後その試験についても報告したいと思っています。

（しまだ・とおる）

## 宇宙の夏，相模原の夏

あっという間に季節は巡り，JAXA相模原キャンパス特別公開が開催される夏がやって来ました。4月に宇宙科学研究所広報・普及係に着任した私にとって，そして広報関係者全体にとって特別公開準備のために全速力で駆け抜けた，いや文字通り駆け回った3ヶ月間でした。途中何度，「今年の特別公開は中止!」と思ったことでしょう。

JAXAという組織，宇宙開発の現場に私が初めて触れたのは，2005年の夏の宇宙研一般公開（当時）でした。採用試験を受けているにもかかわらずJAXAの事業所には足を運ばなかった私が，内定をきっかけに初めて訪れたのが，当時の宇宙研だったのです。今思えば，7年後にこの「特別公開」に携わるようになったのは，何かの巡り合わせだったのかもしれませんが。

さて，今年の特別公開は7月27日（金），28日（土）に開催されました。最高気温35℃という酷暑の中，夏休み中ということもあり，お子さんからご年配の方まで多くの方にご来場いただきました。この2日間で計1万3845名の方にお越しいただきましたが，特に2日目は前日や当日朝のTVニュースを見てご来場くださった方も多かったようです。

今年は，第1会場の出展ブースを昨年と大きく変え，月・太陽・探査関係の研究を行っている出展ブースが1ヶ所に集まり，また一体感のある会場を目指して各ブースが連携したことが大きなポイントでした。多くの来場者からも，新鮮だった，会場内を回りやすかったとお褒めのコメントを頂きました。第1会場のほかにも普段の見学では入ることができない施設が開放され，出展したブースは昨年より増え計44ブースとなりました。一時期，ある会場が特別公開中に使えなくなるのでは？とヒヤヒヤしましたが，無事キャンパス内に第1から第5会場，また中庭会場を設け，キャンパス外では国立近代美術館



JAXAクラブ宇宙実験室

相模原分館，相模原市立博物館，また水ロケット工作教室の開催場所として共和小学校（土曜のみ）にご協力いただくことができました。

ご来場の方に記入いただいたアンケートの中で，特に印象的だったのは「JAXAの人や学生さんがとても楽しそうに説明していて，生き生きとしている」というコメントです。このコメントは，特別公開に携わっている者にとって，大変大きな励みであり喜びになると思います。

来年も，今年と同時期に特別公開を開催する予定です。小学生は夏休みの自由研究の題材探しに，中学生，高校生や大学生は将来自分がどんな道に進み，どんな人生を歩むと幸せになるのかという自分探しに，ぜひ来年の夏の一日を相模原キャンパスでお過ごしください。きっと，相模原キャンパス特別公開は何かアツい想いを呼び起こしてくれるはずですよ。

最後になりましたが，今回ご協力いただきましたすべての皆さま，ご来場いただきました皆さまに心よりお礼申し上げます。（原田まり子）



探査ロボットのデモンストレーション



共和小学校で行われた水ロケットの打上げ

## GEOTAIL 打上げ 20 周年

2012年7月24日、磁気圏尾部観測衛星GEOTAILは、打上げ後満20歳の記念日を無事に現役で迎えました。先輩の磁気圏観測衛星「あけぼの」と共に長寿命を誇ります。これまでGEOTAILを支えてきてくださったすべての皆さまに、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。



GEOTAIL 運用時のQL (クイックルック) 画面の一部

写真は、満20歳を迎えた日の衛星運用時のQL (クイックルック) 画面の一部です。GEOTAILは、衛星状態にはほとんど問題なく、今も世界第一級の観測データを提供し続けています。衛星運用時には衛星状態を確認するために読み合わせを行うのですが、打上げ時刻(1992年7月24日14時26分、世界標準時)直後から20年間ほぼ同じ値を刻み続けているものもあります。衛星運用当番に協力してくださった皆さまには、きっと懐かしく思い出される数字もあることでしょう。

GEOTAILは20年前の衛星ということもあって、このQL画面は、今ではほとんど見掛けない汎用大型計算機の端末に映し出されています。このように、衛星

よりも地上にある旧式な計算機器類が先にくたび果ててしまうことが心配されていたのですが、今年度にはいよいよ汎用大型計算機から新しい計算機システムへと地上系システムの移行が始まりました。こうして、地上系システムの故障のリスクを乗り越えることで、GEOTAILはますます長

期間の科学観測を続けることができるようになるはずです。

昨年度の理学委員会では2015年度末までの観測運用の延長を認めていただきました。今後打ち上げられる国内外の科学衛星との新たな共同観測をはじめ、これまで通り、科学成果に貢献し続けたいと考えておりますので、観測運用の継続にも皆さまからのご支援をよろしくお願い致します。

なお、来る11月11～14日に都心にて、GEOTAIL 打上げ20周年を記念する研究会を開催する予定ですので、ご興味のある方はぜひご参加ください。

(篠原 育)

## 内之浦宇宙空間観測所の現状

6月27日午後、TV会議をしていた我々の部屋がフツと暗くなりました。照明もTV会議システムも落ちたようです。「停電だ」。その場にいた全員がそのことは理解できていたものの、停電の原因が内之浦宇宙空間観測所(USC)内道路の崩落であったとは、誰も想像できてはいなかったのではないのでしょうか。1週間ほど降り続

いた雨がさらにその勢いを増したこの日、USCの施設を含む肝付町の各所は大きな被害を被りました。USCの宮原エリアで作業をしていた小型科学衛星1号機SPRINT-Aのチームは国道の崩土、崩落により夜遅くまで孤立状態となるほどでした。

場内の被害現場を見る限り、7月21日に予定してい



内之浦宇宙空間観測所の門衛所～計器センター間の崩落した道路。  
左は2012年6月28日午前9時撮影、右は復旧後の2012年7月24日撮影。

たH-II Bロケットはもちろん、観測ロケットの夏期打上げも、とても対応できるものではないと私は感じました。しかしながら、施設系、総務系、射場系といった各系関係者の迅速な情報収集や状況判断と的確な作業により、見る見るうちに復旧が進んでいきました。被災より10日程度で電力や水などのライフラインはほぼ通常運用をこなせるまでに回復し、そのほかの失われた機能の復旧も早々にめどが立ちました。そして(私にとっては)驚くべきことにスケジュールを乱すことなくH-II Bの打上げに対応し、さらに観測ロケットの夏期打上げを実施する見通しが立っています(本稿が掲載された『ISAS ニュース』が発行されるころには打上げが終わり、良い成果が出ているものと思います)。これら一連の復旧対応は、

あらためてUSCの底力を感じるものでした。

現在の内之浦は、この豪雨災害からの完全復旧作業を継続するとともに、来夏のイプシロンロケット打上げに向けての整備作業が本格化しています。幸い今回の豪雨ではイプシロンの打上げ整備作業の現場となるM台地周辺に大きな被害はなく、イプシロン打上げに向けた各種の工事が現在も粛々と進められています。イプシロンを迎え入れ、小型科学衛星シリーズの1番機SPRINT-Aを宇宙へ連れていくために、縁の下の力持ちとなるべく施設設備も頑張っているところです。11月11日にはUSC開所50周年の記念となる特別公開も予定されていますので、USCへぜひ足を運んでいただければと思います。(荒川 聡)

## 「宇宙学校は学校じゃないよ」の巻

千葉県初開催だ!と勇んで応募した「宇宙学校・とうがね」は、7月15日(日)、1200席の東金文化会館大ホール満席!のユメがウインドーワイパーの一拭きのごとくクッキリとはらわれて、親子110名前後のウツツとなった。

開催直前に相模原キャンパスへ伺った際には、参加申し込みが少ないこと、昨年盛況の「はやぶさ帰還カプセル展」以上に気合を込めてPRしたことなどをお話しし平身低頭。それでも宇宙研担当者は「はやぶさは別格ですよ」とサラリと微笑むばかりで、動員数の少なさを責めたりもしない。

ところが、である。校長・阪本成一教授、1時限目の津田雄一助教「はやぶさ・イカロス・日本の太陽系探査」、2時限目の樋香奈恵宇宙航空研究員「系外惑星をめざして」とも、そんなことはすでに突き抜けているかのように来場者に語り掛け、狂言回したる阪本校長の巧みな話術とともに「質問ある人!」にスッ、スッと小さな子から高校生まで手が挙がり、まさに手妻を見るようだ。だだっ広い原っぱの一隅に車座になって、盛り上がるようにも見えて、満席の夢の結晶のように子どもたちは輝き始める。誰も手を挙げなかったらどうしよう、なんて杞憂であった。

「どうして、はやぶさは四角な面でつくられたんですか?」「四角だと詰め込む機材などいろいろな設計計



休憩時間も先生に質問!

算がしやすいんです。確かに流線形だとカッコいいけどね」「その惑星は何座の方角にあるんですか?」「研究対象の惑星ははるか彼方で、何座の方向という言い方もしないし、できないし、星座のことはあまりよく知らないんです」。質問する子どもたちに背伸びも感じられず、答える先生も子ども以上に背伸びがない。先生なのに

先生じゃない。ただ宇宙科学に関する疑問がかみ砕かれ、あるいは疑問が疑問として吟味され、何かが舞台と客席の間を行ったり来たりしている。質問する子どもも答える大人も視線は同じ高さで交差する。休憩時間にも終了後も子どもたちは先生に吸い付いて質問が途切れない。余韻嫋嫋、素晴らしい音楽会を聴き終えたような充足感に満たされ、宇宙学校の企画担当として、たかが114人の幸福と幸運を素直に祝福する気持ちになれた。

誤解を恐れずに言えば、宇宙学校とその先生は、私の知る学校でも先生でもなかった。ペンシルロケットから「はやぶさ」のサンプルリターン成功へと続く宇宙研気質、自由闊達なイメージの横溢する「子ども宇宙科学研究所」の名前の方がふさわしいのではとも思えて、宇宙科学研究所の日常をも彷彿させる。

その後、地方での宇宙学校参加者数平均が「ヒャクニサンジュウ」と聞いて、胃の痛みは少し引いたが、

それにしても残念だったのは、24年度の最初の宇宙学校が東金で、よその下見ができなかったこと。素晴らしい音楽を文字に変換するのは容易ではないが、音楽会の感動は声を大にして言える。

宇宙学校は小さな運動かもしれないが、学校そのものを考える上でも、人間関係を見直す上でも、刺激的、

かつ示唆に富んだイベントであると思う。すなわち、宇宙学校開催を全国の有志に勧めたい。

来場者の「こんな素敵な企画なのに参加者が少ないのはもったいない」。まったくもって仰せの通り。集客戦略の立て直しと周到な準備で、ぜひ再挑戦したい。運動に後戻りはない。(東金こども科学館/久我敦彦)

## 「こうのとりの」3号機打上げ成功！

7月21日、宇宙ステーション輸送機「こうのとりの」(HTV)3号機が無事に打ち上げられました。「こうのとりの」3号機には実験関連機器がぎっしり詰まっています。一番大きいのが、「さばう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに設置される「ポート共有実験装置」で、主に地球大気などの観測に使われます。また、メダカなどを長期間宇宙で飼育する実験のために開発された水棲生物実験装置や、星出彰彦宇宙飛行士がロボットアームを使って宇宙に小型衛星を放出するプロジェクトで使われる衛星も、「こうのとりの」に積み込まれています。

さて、今回ご紹介したいのは、NanoStepという実験です。タンパク質結晶の表面を、干渉計を用いて観察し、結晶成長条件によってその成長速度、表面の状態や結晶の品質がどう変わるかを詳しく調べようというものです。実験機器は今回の「こうのとりの」で打ち上げられ、この夏から実験開始の予定です。タンパク質が古くなるといけないので、ぎりぎりのタイミングで試料の調製を行い、打上げの前の週に種子島宇宙セ



結晶確認作業の様子

ンターで最終確認を行いました。タンパク質の種結晶をガラスの容器の中に接着させていますが、これが輸送時の振動などで落ちてしまっていないか、溶液が変に濁ったり漏れたりしていないか、ガラスの容器が割れていないかなどの確認を行いました。まったく問題なく、ほっとしました。

打上げの直前まで荷物の搭載ができるのは、実験担

当者にとっては非常に助かることです(直前での荷物の引き渡しのことを、業界用語でレイトアクセスといいます)。しかし、すでにH-II Bロケットと「こうのとりの」が接続し、ロケット組立棟の中で立ち上がっている状態で荷物を搭載することになるので、搭載できる荷物の大きさや重さ、個数が厳しく制限されています。今回のNanoStep機器に関しても、寸法や、人が運べる20kg以下の重さかどうかチェックされました。

「こうのとりの」の国際宇宙ステーション到着は7月27日。一足先に到着した星出宇宙飛行士たちの手によって荷物が運び込まれ、たくさんの新しい実験が始まります。(吉崎 泉)

### ロケット・衛星・大気球関係の作業スケジュール(8月・9月)

	8月		9月	
ASTRO-H				システム熱真空試験(筑波)
BepiColombo				フライトモデル単体環境試験(相模原)
小型衛星				フライトモデル単体環境試験(相模原)
大気球				平成24年度第二次気球実験(大樹町)
S-310-41号機	フライトオペレーション(内之浦)			

## 糸川英夫生誕100年記念企画展を開催

最近宇宙研では地元相模原市との連携をさらに強めています。道を隔てて隣接する相模原市立博物館との共同事業もますます盛んになってきています。

代表的なものが、2010年夏の「はやぶさ」帰還カプセルの世界初公開です。相模原キャンパスの特別公開に合わせて実施したところ、わずか2日間の会期にもかかわらず約3万人の方にお越しいただくことができました。相模原キャンパスが特別公開でごった返す中、それだけの数の見学者を受け入れることができたのは、市立博物館と市の強力なサポートがあってこそです。これを受けて2011年夏には、特別展示室での企画展「宇宙とつながる私たち—探査機に託したメッセージ—」を実施。研究・開発の成果よりむしろ国民と宇宙のつながりを中心に据えて、地元や一般国民の視点からの太陽系探査とのつながりについて取り上げていただきました。

ありがたいことに市立博物館からは、今年以降も特別公開に合わせて夏には宇宙関連の企画展を実施したい旨の提案をいただきました。今年どうしても取り上げておきたいことといえば、7月20日に生誕100年を迎えた「日本の宇宙開発の父」こと糸川英夫先生、そして2月2日に起工式から50年を迎えた内之浦宇宙空間観測所です。そこで、これらを記念するために市立博物館と共同で、7月14日から9月2日まで企画展「宇宙科学の先駆者たち～糸川英夫と小田稔～」を開催することにしました。当時の品々やエピソードを紹介することで、日本の宇宙工学と宇宙理学をリードした先駆者の業績に触れ、教訓とすることを目指して

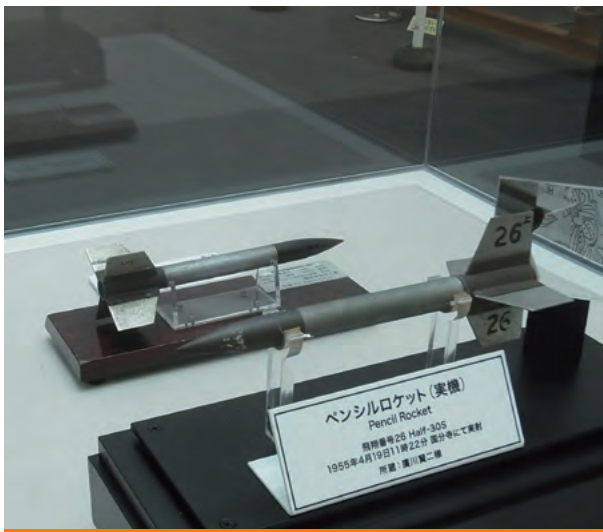
のことです。

今回の企画展で展示物のメインになるのは、ペンシルロケットや、すだれコリメーターなどです。ところがよく知られているように、宇宙研ではペンシルロケットの実機を1機も所有していません。そこで、これを機に現存する個人所有のペンシルロケットなどを1ヶ所に集めて皆さんに見ていただこうと考えました。幸いにして所有者のご協力を得ることができ、多数のペンシルロケットやベビーロケットなど日本の初期の宇宙開発に関わる実物や、X線天文学を飛躍的に進めたすだれコリメーターの試作品などを展示することができました。その陰には多くのボランティアの協力があります。

また、広い特別展示室を活かして、2005年のペンシルロケット50周年記念水平発射再現実験で使用されたランチャーやターゲットも展開されています。

展示品の中には、宇宙研の敷地内を探して出てきたものもいくつかあります。中でも目玉は、幻のL-4Sロケット6号機に関連する部品。これに関する構造部品やロケットランチャーは国立科学博物館の目玉展示として展示されていますが、搭載機器類のいくつかは宇宙研に残されていました。個人が管理していた加速度計も発見されました。

今、JAXAでは、相模原キャンパス内に専用の展示館を設置すべく働き掛けを始めています。実現のあかつきには、これらの貴重な歴史的展示物を常設して、より多くの皆さんにご覧いただきたいと思っています。  
(阪本成一)



東京・国分寺で実射された記録が残るペンシルロケット2機。共に個人蔵。



ペンシルロケット50周年記念水平発射再現実験の際に使われたランチャーとターゲット、そして再現実験で実射された機体17機。



# イプシロンロケットが拓く 新しい世界

第8回

## イプシロンロケットの 誘導制御系

田村 誠

イプシロンロケットプロジェクトチーム



### イプシロンロケットの誘導制御系

イプシロンロケットの誘導制御系も、開発コストの削減や開発期間の短縮のため、M-VやH-II A/Bロケットなどで開発済みのコンポーネントを活用した構成となっています。誘導制御系の全体構成図を下に示します。

1段および2段推力飛行中のピッチ／ヨー制御は可動ノズル(MNTVC)装置により行います。また、その期間のロール制御とモータ燃焼終了後の3軸制御については、1段は固体モータサイドジェット(SMSJ)装置、2段はヒドラジンガスジェット装置により行います。

3段はコスト削減と軽量化のために固定ノズルスピン安定方式を採用しました。小型液体推進系ポスト・ブースト・ステージ(PBS)を搭載したオプション形態では、3段ステージの軌道誤差をあらかじめ低減する目的で、スラスタ1基によるラムライン制御(スラスタをスピン1回転につき1パルス噴射することによる姿勢制御)を行います。それによって、PBS燃料の削減が可能となります。また、PBSは50Nスラスタ8基を装備しており、増速と3軸制御に共通で使用することでスラスタ基数を削減しています。

誘導制御用のセンサとしては、ジャイロと加速度計を装備した慣性センサユニット(IMU)を搭載し、機体の誘導・制御に必要な各種信号を誘導制御計算機(OBC)に出力します。M-Vは誘導計算を地上で行って誘導コマンドを電波でロケットへ送信する電波誘導方式でしたが、イプシロンでは機上のOBCで誘導計算を行う慣性誘導方式を採用しています。また、1段にはレートジャイロパッケージ(RG-PKG)と横加速度計測装置(LAMU)を搭載し、1段フェーズの制御安定化や迎角の低減に使用します。

### 誘導アルゴリズム

イプシロンでは慣性誘導方式を採用していますが、固体ロケットフェーズではM-Vの誘導アルゴリズムをそのまま機上のソフトウェアへ搭載する形を採っています。具体的には、航法計算により導出された現在の位置・速度情報をもとに基準軌道に対する軌道誤差を求め、その軌道誤差から感度行列による数値計算もしくはテーブル方式を用いて誘導コマンド(姿勢補正量、

点火時刻補正量)を計算します。

一方、低推力スラスタで構成されるPBSでは、誘導開始時の誤差が大きく、燃焼時間が比較的長い一度の燃焼フェーズでの速度増分は比較的小さいという特徴があります。そのため、PBS誘導には、このような状況において有効な誘導解を得ることが可能であり、宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)での適用実績がある長秒時対応VIC(Velocity Increment Cutoff)誘導則を採用しました。具体的には、航法演算結果から軌道投入精度を確保するための誘導計算を行い、要求姿勢と動力飛行開始時刻、タイムツューゴー(PBSカットオフ時間)の算出を行います。

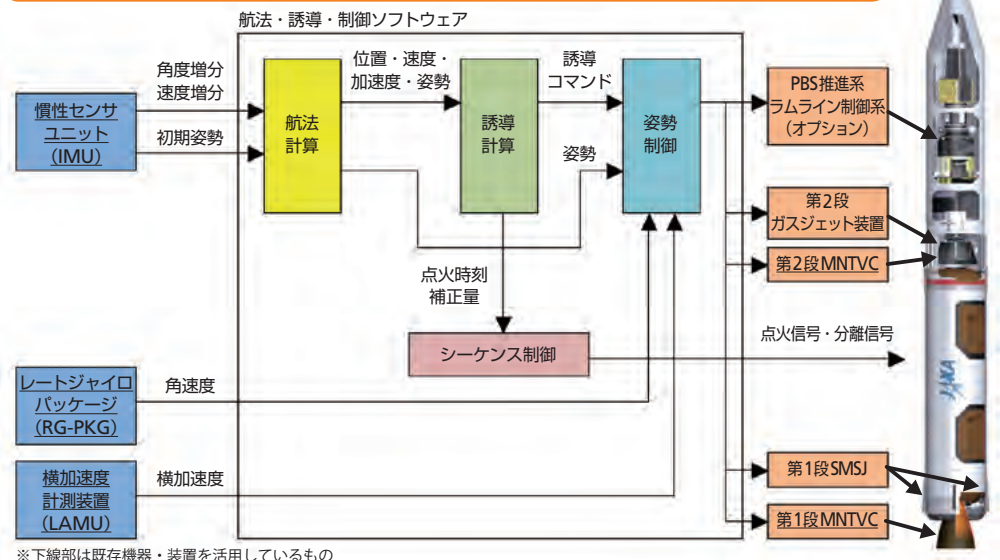
### 制御アルゴリズム

イプシロンではM-Vで実績のある固体ロケットに適したロバストな制御アルゴリズムを採用しています。一方、1段SRB-Aモータによる正弦波振動が過大となっているため、イプシロンの衛星分離部には振動を緩和する制振機構が装備されています。この制振機構のモードを考慮した制御系検討を行った結果、2段飛行中については1次モードのゲインまたは位相の安定化が必要であることが分かりました。これに対しては、制御則の次数を従来の6次から最大10次に変更する対策を行うことで、評価となる2段燃焼末期の安定化が可能となりました。

### 結び

簡単ではありますが、イプシロンの誘導制御系について紹介させていただきました。来年夏の初号機打上げに向け、今年秋には相模原キャンパスのC棟磁気シールド室にて姿勢制御系の健全性を確認するためのモーションテーブル試験を実施する計画なので、ご協力よろしくお願ひ致します。(たむら・まこと)

### イプシロンロケット誘導制御系の全体構成



# 美食の都でヒートパイプ三昧

熱・流体グループ 開発員 岩田直子

日本中がまだ金環日食の興奮冷めやらぬ5月21日朝、第16回国際ヒートパイプ学会(IHPC)に参加するために、フランスはリヨンに向けて成田をたちました。IHPCは1973年からほぼ2年おきに世界各国のヒートパイプ研究者ゆかりの地で開催されてきた学会で、日本でも東京と筑波で開かれたことがあります。私は今回が初めての参加でした。ちなみに国際ヒートパイプシンポジウムというのもあるのですが、こちらはアジア・オーストラリア中心の学会です。

翌日、小雨のなか学会会場に着いてみると、コンサートを行うような大きなホールに300名ほどの参加者が一堂に会していました。こぢんまりとした発表会場を想像していた私はいっぺんに気後れしてしまったのですが、参加者全員が一つの講演を聴くというのはなかなかよい形式で、発表者への質疑を通して聴講者である研究者同士の議論がうかがえたりしました。発表はヒートパイプ(HP)だけにとどまらず、可変コンダクタンスヒートパイプ、ループヒートパイプ(LHP)、自励振動ヒートパイプ(OHP)、サーモサイフォンなど多岐にわたりました。特徴的だったのは、基礎研究はややされ尽くされた感のあるHPやLHPなどはアプリケーションに関する発表が多く、逆に、それらよりは開発されてから日の浅いOHPについては物理現象やモデル化を追うような研究が多かったことです。

ここで私の研究対象でもあるOHPをちょっと紹介し

ますと、OHPは1990年代に日本人技術者により発明された、従来のHPとはまったく異なる方式のヒートパイプです。HPやLHPには必要不可欠かつ技術的キープポイントであるウィック(毛細管力を生み出すメッシュや溝状のもの)が不要で、細管を折り曲げるだけという単純な構造から、日本だけでなく世界中に研究が広まりました。OHPの特性を把握するためにパラメータスタディを中心とした数々の実験的研究が行われてきましたが、現象をすべて説明できる理論が確立していないのが現状です。IHPCで行われたOHPのレビュー講演でもそのことが強調されており、また、あちこちで「OHPは今最もhotな研究」という言葉を耳にし、OHPを研究する者として非常にinspireされました。

講演以外の場で研究者と交流が持てたのも有益なことでした。私はほとんどの参加者と面識がない状態で、偶然昼食で隣り合わせた若いタイ人の女性研究者と話しているうちに、彼女が実は私がよく読んでいた論文の著者だということが分かり、びっくりするなんてこともありました(著者は年配の男性だと勝手に思い込んでいました)。

参加者がそれほど多くなく、参加者同士が知り合いであることも多いIHPCは終始和気あいあいとしたムードでしたが、最もそれを顕著に感じたのは懇親会の場でした。IHPCでは「参加者が国ごとに出し物をする」という伝統があり、30人超(開催国フランス)、ときには1人(なぜかアメリカ)で母国の歌などを披露しました。我々日本チームは10名ほどで「ふるさと」(急きょ指名された私の選曲)を熱唱しました。優勝は会場を巻き込んで民族舞踊を踊ったタイのチーム(2名)で、盛大な拍手が送られました。

リヨンはいわずと知れた美食の都で、街中におしゃれなレストランがたくさんありました。これまでフランス料理などほとんど口にしたことのない庶民の私が、毎日フルコースの食事という何ともぜいたくな4日間を過ごしました。極め付きは帰国前夜に行ったミシュラン3つ星のレストランで、これは以前パリ駐在を5年間務めたという方に「リヨンに滞在するならぜひ」と教えていただいたPaul Bocuseというお店です。どんな有名店かもよく知らずに予約し(木曜夜というのが幸いしたのか、あっさり予約が取れました)、お店に到着するとそこはさながら異空間(=高級な雰囲気)で、食べたことのないようなおいしい料理を堪能することができました(お値段も見たことのないようなものばかりでしたが……)。実はこの話には後日談があり、帰国後、くだんの方に「教えていただいたお店に行ってみよう」と報告すると、「まさか本当に行ってくるとは!」と驚かれ、逆にこちらがびっくりしてしまいました。

2013年はIHPC創設40周年で、インドのKanpurで大々的に開催されるそうです。来年もぜひOHPの成果を携えて参加したいと思います。(いわた・なおこ)



奇抜な外観のレストランPaul Bocuse。右下は看板メニューの「黒トリュフのスープ」。さてお値段はいくらでしょう?(答えはページ右下)



# 宇宙への入り口

## 島井武四郎

細谷火工株式会社 代表取締役社長

「いも焼酎」欄に寄稿を依頼され、何も考えずにお受けしました。それは、「いも焼酎」という名前が気に入ったからです。私はどちらかというと、清酒いわゆる日本酒党ですが、家内は芋焼酎派です。党?と派? 権力争いになりそうなので深くは突っ込みませんが、分かれています。うまくすみ分けができています。しかし、たまには党から出て、派閥の動向も探ります。

昔の芋焼酎は本当に臭くて、なかなか飲めませんでした。最近は自分の味覚が変わったのか、蔵元の努力なのか、ずいぶん飲みやすくなりました。癖がなくなったと九州男児の方はお怒りかもしれませんが、途中から参加させていただいた内陸の間は、飲みやすくなったのは大歓迎で、身体にいいの、悪酔いしないのと言いながら結構飲み過ぎます。何でも過ぎるのはいけません。そんなわけで、芋焼酎でも飲みながら気楽に読めるそんな投稿欄かと思いましたが、さあ大変。寄稿者は著名な大学教授、学者先生ばかりです。小学生レベルの作文では大変失礼ですが、ハードルを下げる役目は頼まれなくともできそうです。お付き合いください。

少々前になりますが、映画『はやぶさ 遥かなる帰還』を映画館で観賞しました。当然ですが実在する人物も会社も、ましてやJAXA宇宙科学研究所まで出てくるのですから、製作者は気を使ったのだろうと他人事ながら心配してしまいました。『ISASニュース』の今年の新年号に、川口淳一郎先生と映画の中で川口先生役を演じた渡辺謙氏の対談が載っていました。その中で渡辺謙氏から川口先生へ「研究者の思考回路が僕たちとまったく違うことに驚きました」とありました。私も、あるセミナーの基調講演で、川口先生が「はやぶさプロジェクト」について話されたのを聴講させていただきました。そのときも同様に感じました。理論的で明晰な回路をお持ちの方なのだろうと。

実は映画を鑑賞する前に、脚本文庫本を

読んでいたので、展開が次々と頭に浮かんできます。ここで、イオンエンジンの技術者はこう反論する。「そうそう」と自分でうなずく。ストーリーが分かり過ぎているのです。あとは自分の想像したイメージとどのような違いがあるかですが、結論からいえば、脚本文庫本を読んでからの映画鑑賞はお勧めできないということです。当然ですよ。

観賞したのは公開最終日の最後の回、いわゆるレイトショーでした。ましてや平日だったので、空いているのだろうと想像はしていましたが、なんと観客は私一人。大きなスクリーンを独り占めするのは気持ちが良いのですが、夜の映画館はちょっと気味が悪い。

本誌をご高覧されている方は、ストーリーはご存知だと思うので述べませんが、「日本人技術者の諦めない気持ち」「職人の魂」がよく表現されていたと感じました。宇宙への壮大な夢。ロケット打上げの瞬間は感動ものです。

ロケット打上げの瞬間の緊張する気持ちは、私も少しは分かります。当社でも防衛関



筆者近影

連の火工品を製造しているので、ミサイルのロケットモーター切り離し装置がうまく作動してくれるか、心臓が口から飛び出しそうな緊張を経験したことがあります。宇宙ロケットと比較すれば比べものにならないでしょうが、それでも緊張はします。人工衛星などを搭載しているロケット打上げは、考えるだけで卒倒しそうです。成功の自信は3乗以上あるのかもしれませんが、どんなに自信があっても……。

前置きが長くなってしまいましたが、私どもの会社は東京都あきる野市に本社・工場があり、主に防衛関連の火工品を製造しています。JAXA宇宙科学研究所とも古くからお付き合いをさせていただいており、あきる野研究施設\*1は我が社の近傍にあります。と、いいですか、以前我が社で誘致させていただいた施設です。まわりには誘惑\*2させられるものは何もない林の中に存在します。小型ロケットモーターの燃焼もできる研究施設となっており、あきる野市民としては、誇りに思う「宇宙への入り口」の施設です。日々、新しい固体ロケット推進薬の研究をされているのでしょう。

当社の基本理念は「高エネルギー物質利用で国家社会に奉仕する」です。火薬学会でも高エネルギー物質の一種である、ADN(アンモニウムジニトラミド)\*2などさまざまな新規物質の研究がなされています。当社も微力ながら合成法の研究を行っています。まだまだ使いこなすまでには課題がいくつもあるようですが、近い将来、環境に優しく、そして力強い固体推進薬として主流になることに期待し、また、ヒドラジンに代わる低害化した液体燃料の開発も行っていますので、今後もできる限りの協力をさせていただこうと思っています。

「宇宙への入り口」を眺めながら!

(しまい・たけしろう)

\*1 『ISASニュース』2012年7月号 (No.376)  
ISAS事情欄参照

\*2 『ISASニュース』2011年10月号 (No.367)  
宇宙科学最前線参照

# 美しい宇宙研を次世代に

衛星運用グループ/通信・データ処理グループ 開発員

平原大地

## —— 科学や技術に興味を持ったきっかけは？

平原：企業のエンジニアだった父が、科学雑誌『Newton』を定期購読していて、家の本棚にバックナンバーが並んでいました。幼稚園のころ、それらを取り出して、科学衛星の観測画像や深海生物の写真などに好奇心を刺激され、気になったことは父に質問したりしていました。

やがて自分でも記事を読めるようになるにつれ、難しい宇宙探査の実現や科学的な発見には、技術の発達が不可欠なことに気付くようになりました（今では経済や政治的背景から技術以外の発展要素の重要性も見えてきましたが）。私は子どものころからロジカルに物事を考える癖があります。日本が強いエレクトロニクス技術を学べば、世界でも通用する実力を付けることができるはずだ、と考えました。そして家族や教師の勧めもあり、早くから専門的な技術を学ぶことのできる高専に進学しました。

ちょうど、カラー液晶の携帯電話が出始めたころです。小型で多機能な携帯電話に、先端エレクトロニクス技術の大きな可能性をひしひしと感じました。そして高専のときから、テラヘルツ波受信デバイスなどの先端技術を学びました。やりたいことが早くから見つかり、それをとことん学ぶには、高専はとてもいい環境だと思います。

## —— そして高専から大学へ進学されました。

平原：まだまだ学びたい、より充実した環境で研究開発を経験したいと大学へ進み、次世代半導体や、修士課程で光集積回路など挑戦的な次世代技術を好んで学びました。そして、集中して深く研究する分野をもっと知見を増やしてから検討したいという希望もあり、修士課程を修了した後は全体がよく見て取れる組織に就職したいと思いました。

## —— JAXAに研究開発系として入社、宇宙研での仕事は4年目ですね。

平原：試験設備や運用施設の維持・改修、利用調整を行う一般管理業務が中心の衛星運用グループに所属しています。私の部署は特にそうですが、宇宙研では仕事のやり方が明確化されていないことが多く、とても苦勞してきました。新しく部署に赴任した人は、所内を走り回って話を聞くべき人を探し出し、顔と名



ひらはら・だいち。1984年、東京都生まれ。工学修士。横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻修士課程修了。2009年、JAXA入社。

前を覚えるところから始めなければいけません。職人技とされるノウハウを、十年かけて修得することが求められる仕事もあります。そして役割分担があいまいなため、あつれきが生じるケースがあります。

そのような仕事の進め方にやる気が低下し、疲れ切ってしまった人がたくさんいます。実際に若手から離職者も出ています。

私は、宇宙研などが成し遂げてきた宇宙科学の成果を子どものころから見聞きすることで、科学技術に興味を持ち、勉強も頑張ることができました。その宇宙科学の研究所である職場をより魅力的にしたいと思います。ノウハウを持った団塊の世代の人たちが続々と引退されている中、今は業務の体系化やノウハウのマニュアル化が必要となる移行期だと思います。十年かけて修得していたノウハウも、きちんとしたマニュアルをつくれれば、半年で修得することが可能かもしれません。

## —— どこから手を付ければ改善できますか？

平原：一人ひとりが身の回りを整理整頓するだけでも、かなり仕事がしやすくなると思います。宇宙研には引退した方が残っていた手付かずの箱があちらこちらにあります。それらを整理することで、自分の装置を置く場所がなくて困っている若手研究者の方々に、スペースを提供できるはずですよ。少なくとも、今の部署に次に来る人が私と同じ苦勞をしなくて済むように、物や書類を整理しておきたいです。

そのような職場環境の改善を進めながら、私には将来、ぜひ実現したい夢があります。観測機器や電気・通信系を網羅した「究極の宇宙エレクトロニクス」です。

## —— 具体的には？

平原：それは内緒です。日本のエレクトロニクス技術の進展を見ながら、私の夢が技術的に実現可能な時期が来たら、具体的なプロジェクトを提案したいです。大好きだった日本のエレクトロニクス産業は今、苦境に立たされています。その産業界にいる人たちに宇宙から元気づけ、応援するようなプロジェクトにしたいですね。そのために今は、若さと健康を保ちつつ、必要な勉強を進めています。

ISAS ニュース No.377 2012.8 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ビア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

編集後記 夏恒例の「特別公開」に今年も多数の来場があった。今年は大スクリーンで「ひので」の動画を存分に上映して、その解説を行った。多数の方に足を止めて見ていただき、質問をもとにさまざまなお話ができて参考になった。(清水敏文)

\*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

