



新たにオープンした 宇宙科学探査交流棟

ペンシルロケットから天文・太陽系探査まで幅広い分野の展示物があります。“展示館”とも呼ばれるようになり、専門家から親子連れまで、連日見学者でにぎわっています。開館時間は10:00～17:30（入館は17:15まで）。見学ツアーあり。休館日はウェブでご確認ください。

所長就任のご挨拶

宇宙科学研究所は、これまでに組織や構成員、所掌課題をスクラップ＆ビルドしながら、ペンシルロケット→弾道ロケット→宇宙輸送システム→高層大気観測→天文衛星→太陽系探査へといつも新たな領域に挑戦してきました。今後目標とする中心的課題は、「宇宙の始まりと銀河から惑星に至る構造形成の解明」と「太陽系と生命の起源の解明」であり、それを支え牽引する「宇宙機及び宇宙輸送システムに関わる宇宙工学技術の革新」です。

大規模で高度な宇宙科学ミッションを実行するに当たり、宇宙科学研究所は、大学共同利用システムの機能を発揮させて、ボトムアップのプロセスとして全国の大学から知識・技術・人材を糾合します。そのためにこそ、宇宙科学研究所が要となって理工一体となった自由闊達な議論を活性化し、ミッション立案に向けて日本の総意を集約します。また関連省庁や上位組織と調整した上で、宇宙科学研究所が最終責任を負いながらも参加組織との責任分界点を明確にして、全体として高性能で統率の取れたシステム開発と宇宙運用を行い、科学成果の最大化を図ります。

この10年間で飛躍的に国際協働が深化しました。宇宙科学研究所は、これまでの活動と成果に世界中から敬意と憧憬が表され、十分な信用を勝ち取ることができました。その結果、より複雑でより深遠な宇宙に到達するような国際共同ミッションや国際宇宙探査に請われ参画できるようになりました。ここに日本の叡智を供出することで、一国では実施し得ないビッグサイエンスを主体的かつ戦略的に分担し、結実を目指します。宇宙活動にて取得された科学データを積極的に公開し、自由に利用できる体制と機構を作ります。さらに、社会活動に親和性の高い工学技術を地上実装することにも努力します。

科学振興、技術研究開発、宇宙活動、組織運営、予算獲得などに多くの課題が山積する中、職員一丸となれば、世界にソリューションを示すことができるはずです。宇宙科学研究所の活動にご理解とご賛同をいただき、引き続きご指導ご鞭撻を賜れば幸いです。

JAXA 宇宙科学研究所 所長

國中 均（くになか ひとし）

「MEMSでなんとかならないの？」 ～集積化マイクロマシンが宇宙に羽ばたく夢を見て～

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 准教授
文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム
東京大学VDEC微細加工拠点マネージャ
三田 吉郎 (みた よしお)

緒言：小型軽量への夢

我が国のロケットはペンシルロケットに始まり、「より大きく」「より重い」ペイロードの「より頻繁な」宇宙への輸送を目指して研究開発が進む。現在公募型小型計画の選定が行なわれているイプシロンロケットは590 kgの重量を高度500 kmの円軌道（太陽同期軌道）に投入可能^{*1}。H3ロケットでは太陽同期軌道に4トンの重量を打ち上げると聞く^{*2}。…と、こんな調子でいくら書いても釈迦に説法。読者諸賢にお叱りを受けそうだが、2016-17年度のISAS客員准教授を縁に、宇宙工学委員会そして各種評価委員会からのお誘いを全部受けて早や2年。其々素晴らしい目的と先端の工学が詰まったミッション提案が、限られた打上げ機会と重量との座を巡って切磋琢磨している様を目のあたりにして、門前の小僧ならずとも「なんとかならないか」と心底思う。この思いに筆者が応えられるとしたら「MEMSでなんとか軽く小さく出来ないの？」という要望だろう。

筆者は「ナノテクノロジープラットフォーム東京大学VDEC微細加工拠点^{*3}」のマネージャである。半導体微細加工と相乗り集積回路試作ファウンドリを活用した「集積化マイクロシステム（CMOS-MEMS）」とを得意とする、世界的にもユニークなオープンイノベーション拠点である。研究者兼運営者という、車の両輪戦略による「利用者目線のきめ細かい運営」と「負担金の安さ」で評判である。結果、宇宙分野を含むあらゆる分野の大学・国研・企業の研究者から「MEMSでなんとかならないか」という相談が引っぱりなしに寄せられる。これら千差万別の要望にお応えするべく、筆者以下チーム一丸となって装置・技術を日夜ブラッシュアップ、知恵を絞っている。本稿ではフランス語に言う“Promettre la lune”：月を約束⇒出来そうもないことを約束しないように、MEMSに期待する読者諸賢に基本から最新展望まで、簡単に解説させていただこうと思う。

MEMS：「マイクロな」力の変換器

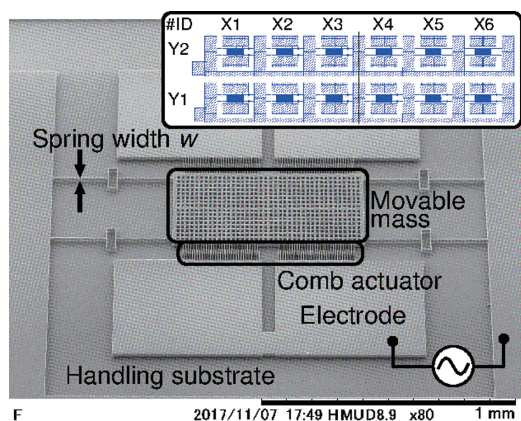
MEMSとは、半導体（特にシリコン）の微細加工技術を用いた微細構造素子ならびに加工技術全般を指す。我々電気電子工学の立場では、電圧、電流、電荷、電力といった「電の字の付く世界」と、機械・熱・流体といった「電の付かない世界」との間にエネルギーを変換する素子と理解できる。（1）微細構造そのもの、（2）可動部分を設けたセンサ、または（3）力の発生機構を設けたマイクロアクチュエータ等、応用は幅広い。

我々の世界のスケールではシリコンは硬くて脆い「石みたいな材料」である。結晶面に沿って割れやすいのが厄介で、虎の子のシリコンウエーハを割って泣いた経験は数知れない。ところが物理法則とは面白いもので、硬いはずのシリコンをマイクロメートル（ μm ：百万分の1メートル）程度の板状に極めて薄く加工すると、ばね定数 k が1に近づき自分の厚みの何倍も曲げられるようになる。静電引力を利用したマイクロアクチュエータはナノからマイクロニュートン（ $\text{nN} \sim \mu\text{N}$ ）程度の力を発生するので、MEMSばねと釣り合ってちょうど自分の寸法（ μm ）程度変位する。しかも割れの原因となる最大内部応力は弱くなり、曲げやすくて割れにくいという「いいところ尽くめ」の微小電子機械がMicro Electro Mechanical Systemsなのである。

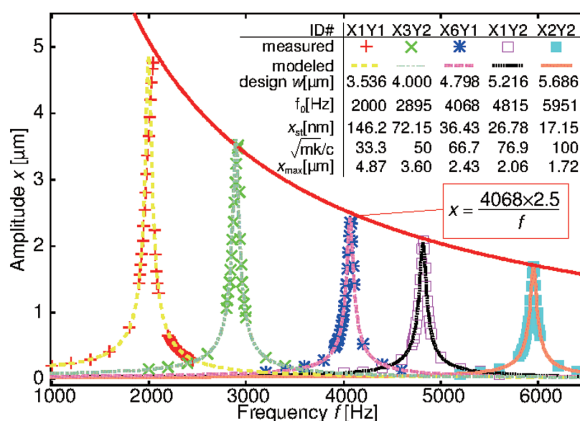
MEMSの設計論：「なんとかなること、ならぬこと」

MEMSに任せると、どんなことでも「なんとかなる」のだろうか？ 筆者が最近再認識した面白い事実で検証してみよう。MEMSは程良く軽くて硬いので、重さとはばね定数をうまく合わせると、「鉄琴」や「音叉」のように機械共振させられる。以下、厳密な計算と解析は文献^{*4}に譲り、ざっくりとした（減衰の小さい系の）議論をしてみよう。

振動の微分方程式を解くと、バネ・マス・ダンパから



(a)



(b)

図1 (a) 自作したMEMS機械振動子(ID番号X6Y1：固有振動数4068Hz)。(b) 梁の太さ w が異なる5種類のMEMSデバイスの振幅一周波特性。「最大振幅と共振周波数のトレードオフ(積が一定)」が観察される。

なる系の固有角振動数 ω_0 (固有振動数 f_0) は、

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \cdots (1)$$

と出る。「 $k=1\text{N/m}$ のばね」と「1《ナノキログラム》 $[\text{nkg}] = 1 \text{ マイクログラム } [\mu\text{g}]$ 」の質量による f_0 は 5035Hz となり、工学的に使いやすい機械共振周波数となる。共振はブランコ遊びと同じ理屈で、フックの法則で変位できる量 (静的変位量)

$$x_{\text{st}} = \frac{F_0}{k} \quad \cdots (2)$$

の 30 ~ 100 倍という「大きな変位」を簡単に稼げる、非常に魅力的な現象である。

ところが早合点は怪我の元。「固有振動数」と「最大変位量」は両立しないのだ。図 1 (a) に、筆者のスーパークリーンルームで試作した「面内振動子 MEMS」の電子顕微鏡写真を示す。デバイス X1Y1 ~ X6Y1 の 5 種類の MEMS 素子は、板ばねの厚みだけを変化させた。MEMS が単振動する様子を観察し、振幅を縦軸、周波数を横軸にとって図 1 (b) のようにグラフ化する。素子の共振周波数がばねの厚みに依存して変化、すなわち厚いばねは周波数が高くなり、めでたしめでたし! …とはうらはらに、「共振ピーク点」における最大変位が減少してしまった。結局、振幅と周波数の積が一定という事実が示されたわけだ。

結果の意味を簡単に解析してみよう。共振周波数の式 (1) と、共振時の最大変位 x_{max} の式、

$$x_{\text{max}} = \frac{\sqrt{mk}}{c} x_{\text{st}} \quad \cdots (3)$$

(c は減衰係数) の積を取り、さらに (2) 式を代入すると、あら不思議。 m と k がぴったりに打ち消しあって、

$$x_{\text{max}} \cdot \omega_0 = \frac{F_0}{c} \quad \cdots (4)$$

という、非常にスッキリした関係式となる。

結局、機械共振は便利だが、速く動かすことと大きく動かすことは両立せず、

(A) 周波数 (ω_0) と変位 (x_{max}) のどちらかを取るか、

(B) 投入する力 (F_0) を増やすか、

(C) 減衰 (c) を減らすか、

という「トレードオフ問題」の枠内での最適化が MEMS の設計だと (4) 式は教えてくれる。確かに、機械構造自体はエネルギーを生み出さないで (保存則の言い換え)、「どのような MEMS であっても」全体を増やすには力の入り (F_0) を増やすか、出 (c) を減らすかの二択しか無い。「MEMS に王道なし」で、若干がっかりする結論かもしれない。しかし勿論、印加する電圧や電流が力に変換される効率 α は設計によって天と地ほども違うので、デザイナーが腕を奮う余地は十分残っているのである (エンジニアの皆様、御安心を!)。

「なんとかなる MEMS」: 最先端を速やかに実用化する集積 MEMS

以上のように、MEMS 研究者は、皆様からの「なんとかならないの?」という熱い期待を浴びながら、「あちらを立てればこちらが立たぬ」現実の壁 (物理法則) と日夜戦っている。ナノテクプラットフォームのお蔭で異分野の先端研究者と日常的に協業し、素子や加工手法の知見が継続的に蓄積された結果、ぱっと見では信じられないような芸当が続々と可能になっている。是非本誌読者諸賢とも協業を一、とのお誘いがてら、呼び水として筆者らの最近の研究成果:「高電圧を発生するオンチップ集積直列太陽電池」をご紹介します。

宇宙を含む、外界と隔離された環境で自律的に動作する超小型 MEMS の電源として、太陽電池は魅力的である。太陽電池の起電力は材料の物性で決まり、シリコンではせいぜい 0.4 V。一方、これまで見てきたように、高周波数かつ高振幅の MEMS 駆動には高電圧が必要である。必要な電圧範囲は 10 V から数百ボルト。此方「0.4 V 生成」、片や「100 V 必要」という絶体絶命の板挟み (曰く、「そもさん」) である。「せっぱ」詰まったこの公案に対し、筆者らは 2 ステップの集積 MEMS 加工法を考案した^{※5}。

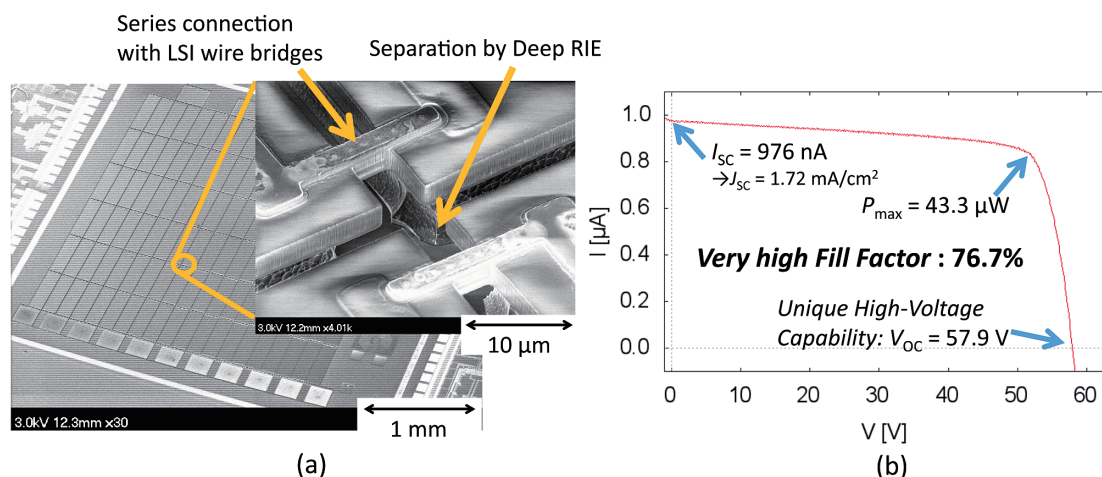


図2 (a) ファウンドリ LSI を大学のクリーンルームで後加工して実現した、125 直列集積化太陽電池と絶縁部分の拡大 SEM 写真。(b) 緑色 LED 光下での電圧電流特性。電流を取り出しても電圧降下が起こらない「高曲線因子」と、通常実現困難な高電圧発生機能を実現した。

【STEP1】素子の裏面が絶縁膜になっている、silicon-on-insulator (SOI) 基板に P-N 接合（電池要素）の直列接続を作製する。【STEP2】MEMS 加工を施し、電池要素同士を等方性エッチングで素子分離する。図 2 (a) のように、接続配線が中空に浮いた「直列太陽電池」が出来上がる。測定結果は図 2 (b) で、(1) 単体で 57.9 V の高電圧を発生し、(2) 理論限界に近い曲線因子をもたす新機能太陽電池チップが完成した。曲線因子 (Fill Factor) とは (最大電流) × (最大電圧) で求まる「皮相電力」と、素子から実際に取り出せる「実効最大電力」との比のことで、得られた値 $FF = 76.7\%$ は市販の太陽電池に肩を並べる高性能だ。「MEMS で何とかなる」安堵の結果である。

「でも、毎日が徹夜の苦労の開発結果なんでしょう？」

※ 1 イブシロンロケットパンフレット <http://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/01/rocket07.pdf>

※ 2 H3 ロケット詳細設計結果について http://www.jaxa.jp/press/2018/01/files/20180124_h3.pdf

※ 3 <http://nanotechnet.t.u-tokyo.ac.jp/>

※ 4 Yoshio Mita et al., "Progress and opportunities in high-voltage microactuator powering technology towards one-chip MEMS", *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, 04FA05 (2018) doi:10.7567/JJAP.57.04FA05

※ 5 Isao Mori et al., "Discharging-phototransistor-integrated high-voltage Si photovoltaic cells for fast driving demonstration of an electrostatic MEMS actuator by wavelength modulation", *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 04EF12 (2016) doi:10.7567/JJAP.55.04EF12

※ 6 Yoshio Mita et al., "Opportunities of CMOS-MEMS Integration through LSI Foundry and Open Facility", *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 06GA03 (2017) doi:10.7567/JJAP.56.06GA03

「いえいえ、ここまで付けても、卒論一人の、平日昼間の楽勝作業になります（おおー!）」。これは実話で、【STEP1】は企業の量産ラインを標準条件で利用し、【STEP2】の新規プロセス加工だけを大学のナノテクプラットフォームで施すことが成功の秘訣である^{※6}。汚染を徹底的に排除した環境制御が必須な LSI 試作工程（大学では実現不可能）は企業で行い、量産ラインでの開発試行が不可能なプロセス開発を大学で行うことで、新素子の機能開発と同時に技術成熟度レベル (TRL) を一気に実用まで引き上げられるというわけだ。この仕組みは東大 VDEC を通じてどなたでも利用できる。大学発の CMOS-MEMS が続々と宇宙に飛んでゆく、そんな「なんとかなる」夢の未来の足音が、確実に感じられる。

ISAS 事情

「はやぶさ2」の光学航法カメラが捉えた小惑星リュウグウの光

去る2月26日に、「はやぶさ2」にとって記念すべき小惑星リュウグウの初観測が実現した。3月1日に行ったプレスリリースでは分かりやすさ優先で、ノイズを除去したきれいな図を提供した（図1）が、実際に得られたのはノイズだらけの画像であった（図2）。だが、ノイズの多さから読み取れる情報もある。本稿ではノイズ付きの元画像も示しながら初観測の解説をする。

ノイズがたくさん現れる理由は、一にも二にも小惑星が暗いからである。探査機が小惑星に近づいたと言っても130万kmの距離から直径1kmに満たない小天体を有効径1.5cmのレンズで撮像するのである。大阪にあるバスケットボールを東京から小さなデジカメで撮像するに相当する。光量を稼ぐため、露光時間は最大の約3分にした。これだけ長い露光時間にすると、暗電流ノイズ（1画素ごとの輝点の多く）が現れるし、宇宙線ノイズ（複数画素にわたる輝点の多く）も多数写ることになる。これらを除去して、背景星（数画素にわたる対称な形の光分布を持つ輝点の多く）に対して動いている像としてリュウグウが確認されたのである。

さらに、この時期はイオンエンジンの運転が優先されるため、高利得アンテナを長時間にわたって地球に向けることができず、通信量は非常に限られる。データ量をギリギリまで削減するため、取得された画像の1/64の面積のみを切出して地上に降ろすこととした。そのため、探査機の姿勢が計画値から少しでもズレたら、リュウグウ像は降ろした画像には入らない。また、姿勢制御が正しくても、万が一リュウグウと探査機の位置関係が予定

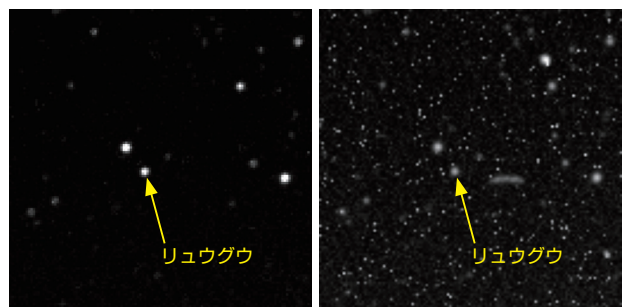


図1 ノイズを除去した画像。

図2 ノイズを除去する前の画像。

2018年2月26日12時(日本時間)にONC-T(望遠の光学航法カメラ)によって撮影された画像から面積で1/64の部分抜き出したもの。画角は約0.8度。

画像提供: JAXA/東京大学/高知大学/立教大学/名古屋大学/千葉工業大学/明治大学/会津大学/産業技術総合研究所

からズレていたら、やはりリュウグウ像は入らない。

このような条件をクリアして得られたのが図2である。画面の予定位置にピッタリ写っていた。ノイズだらけでも、探査機とリュウグウがあるべき位置にいることを確認でき、大収穫であった。探査機をここまで持ってきてくれた工学やメーカの方々への畏敬の念が湧くと共に、ここからが理学者として勝負時と身が引き締まる。

光学航法カメラによる次のリュウグウ撮像の機会は、イオンエンジンを停止してアプローチフェーズに入った時である。その時も像は点にしか見えないが、光量は5桁も増えるので、宇宙線ノイズや暗電流ノイズもほとんど乗らないきれいな画像が得られて、圧倒的にクッキリとリュウグウが見えるはずである。どのような姿を見せられるか楽しみである。(東京大学 杉田 精司)

火星衛星探査計画(MMX)の準備状況

火星衛星探査ミッション(Martian Moons eXploration: MMX)は、火星の衛星からの世界初のサンプルリターンミッションです。火星衛星の起源の解明、惑星形成過程と物質輸送への制約、火星圏進化史への新たな知見の獲得とともに、宇宙工学を先導する航行・探査技術の獲得をミッション目的として掲げ、2024年度の打上げを目指し、JAXA 宇宙科学研究所にて検討を進めています。

『生命に至る惑星等の起源と進化を知ること』は重要な科学目標です。そのため、生命を持つ地球と似た表層環境をかつて保持していた火星は重要な探査対象です。火星衛星には、数十億年に渡って火星から放出された堆積物が存在し、それらを観測することで火星表層の進化の情報も得ることができます。もし火星衛星が巨大衝突によって生じたものならば、火星の起源物質や形成過程を理解できますし、小惑星捕獲によるものならば、地球型惑星の揮発性成分(水など)などの運搬過程が明らかになります。つまり、火星衛星探査は、単に衛星を知ることだけでなく、今後の惑星科学の中で重要な意味を持っているのです。

探査機は、打上げの約1年後に火星圏に到達、火星衛星近傍には約3年間滞在し、火星衛星や火星のリモートセンシング観測を実施します。また、火星衛星に接近・着陸し、サンプリング装置を用いて表面から試料を回収

します。回収後、探査機は火星圏を脱出、地球への帰路につき、約1年後に地球に到達、試料を収納したサンプルリターン



MMXイメージ。

カプセルは地球大気圏に突入して回収されます。

探査機は、火星往復に必要な軌道変換を実現するため、打上総質量が約3000kgを超える、我が国最大の深宇宙探査機になると想定されます。探査機に搭載するミッション機器は、火星衛星表面の観測や周辺環境の計測に用いる科学観測機器、サンプリング装置、サンプルリターンカプセルから構成されます。

2015年夏から概念検討活動を開始し、これまでにミッション定義と概念設計、特にクリティカル技術の開発研究を重点的に進めてきました。今後は、2019年度からの開発移行に向けて、引き続きクリティカル技術の開発研究を進めてリスク低減を行うとともに、探査機システムの仕様を決定して、プロジェクト移行に向けて進んでいきます。(川勝 康弘)

宇宙科学探査交流棟オープン

相模原キャンパスの一角に、どなたでも見学いただける新たな施設が、2018年2月2日、誕生しました。昨年8月に竣工した建物内に、テーマごとの展示を整備し、プレゼンもできる交流エリアを備えた施設です。展示の準備にあたっては、研究者や関連企業をはじめ地元行政や市立博物館など、多くの方にご協力いただきました。

かつての研究管理棟の1階ロビーでの展示を知る方からは、「すいぶん雰囲気が変わりましたね」とよく言われます。新しい展示空間は明るい雰囲気で天井も高く、これまでにない大きな展示物が目を引く存在となっています。M-V ロケットのフェアリングやIKAROSの1ペタル(セイル全体の1/4)など、高さのあるものを展示できるようにしました。「はやぶさ」帰還カプセルは、専用のスペースを設けて初の常設展示となっています。「あらせ」ミッション部 熱試験モデル、月の南極地域の地形

模型、「はやぶさ2」実寸大模型、宇宙研の歴史を物語る文書資料など、新たに登場した展示物も多数あります。

限られた面積・予算の中でどんな展示にしていけるか、これまで所内の展示物検討チームや外部有識者を含むISAS広報委員会で議論を重ねてきました。流行りのバーチャルな体験で完結するものや、他館でも真似できるようなものよりも、研究室から出てきたものや、ここで見られない実物を優先する方針で整備しました。実物を見て研究開発のリアリティを感じていただき、これからの宇宙探査にも想いをめぐらせる場となるよう、今後も改良を続けていかなければなりません。展示に完成はありません。ミッションの進展に合わせた展示物の追加・更新、わかりやすさの改善や体験型の展示物導入を行い、施設鮮度を維持する運営をめざしています。ぜひ一層の展示の充実にご協力をお願いします。(大川 拓也)



宇宙科学探査交流棟ウェブサイト
<http://www.isas.jaxa.jp/visit/>

第4回宇宙科学研究所賞(外部表彰)

JAXA 宇宙科学研究所は、宇宙科学・探査プロジェクトの実施にあたり顕著な功績又は貢献のあった外部機関所属の方々に「宇宙科学研究所賞」を授与しています。

第4回宇宙科学研究所賞は、これまでで初の特別賞を含む以下4名の方々に授与されました。

(特別賞) 長井 嗣信 氏 (東京工業大学)

【授賞理由】 同氏は地球周辺の宇宙空間(磁気圏)に関して、世界的に高い評価を得る研究成果を創出してきました。特にジオテイルのデータ解析から磁気リコネクションという物理過程を解明してきたこと、そこに新しい研究手法を導入し磁気圏観測研究を現代化したことが顕著な貢献です。

(特別賞) アルバロ・ヒメネス 氏 (前欧州宇宙機関 (ESA) 科学局長)

【授賞理由】 同氏は2011年5月からESA科学・無人探査局長、2016年1月からESA科学局長として、欧州の宇宙科学コミュニティをとりまとめ、ISAS/JAXAとESAとの宇宙科学共同ミッションの創出・実現に多大な貢献をされました。

佐藤 明良 氏 (株式会社 IHI エアロスペース)

【授賞理由】 同氏はイプシロンロケット上段モータの品質保証方法刷新の取組みの中、IHI エアロスペース品質保証部技師長として研究開発を強力に推進されました。中でも2号機第3段モータに対して、2015年11月に新開発の超音波探傷検査により品質保証を実施し、信頼性を維持したままでの大きなコスト削減に寄与しました。

鹿野 良平 氏 (国立天文台)

【授賞理由】 同氏はNASA 観測ロケット CLASP において、従来の手法では不可能であった彩層からコロナの磁場情報を獲得する新手法を原理実証しました。PIとして自ら顕著な貢献をしつつ若手研究者や学生を先導し、難度の高い技術開発を成し遂げ顕著な成果を生み出しました。

JAXA 宇宙科学研究所はこのような機構外からの協力・支援に心から感謝するとともに、この4名の今後ますますのご活躍を期待します。
(科学推進部 総括ライン)

第10回宇宙科学奨励賞 榎戸 輝揚氏と北村 圭一氏に授与

公益財団法人宇宙科学振興会では、毎年、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、宇宙科学の発展に寄与した若手研究者に宇宙科学奨励賞を授与しています。創設以来10回目となる今年度は、京都大学白眉センター・特定准教授の榎戸 輝揚氏(理学分野)と横浜国立大学大学院工学研究院・准教授の北村 圭一氏(工学分野)に宇宙科学奨励賞が授与されました。

榎戸氏の授賞の対象となった研究業績は「超強磁場中性子星マグネターに関する研究：観測上の多様な振舞いの統一理解と将来観測実験の推進」でした。

榎戸氏は「すざく」衛星を用いて突発増光したトランジェント型のマグネターを複数観測し、硬X線放射が明確に存在することを発見しました。これにより、硬X線放射がマグネターに普遍的に存在することがほぼ確実になり、その後続く同種の観測の嚆矢となったことが評価されました。

北村氏の授賞の対象となった研究業績は「衝撃波を安定にとらえる流体計算法の提案とそれを用いたイプシロンロケットの空力特性の解明」でした。北村氏は衝撃波をとらえる際のこれまでの流体計算法の問題を整理し手法を改良することにより、宇宙機の開発に役立つ流体計算法を提案しました。更に、イプシロンロケットについて、提案手法を用いた空力解析や風洞実験に取り組み、



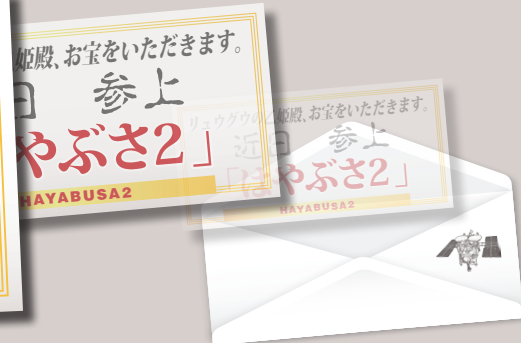
今回受賞された榎戸 輝揚氏(前列左)と北村 圭一氏(前列右)。

イプシロンロケット開発に主導的な貢献を果たし打上げの成功に寄与してきたことが評価されました。

表彰式は、3月8日に霞が関ビル内東海大学校友会館で、多数のご来賓、関係者列席のもと開催されました(写真)。当振興会は今回受賞された榎戸氏と北村氏に心からお祝い申し上げますと共に、今後の宇宙科学研究の一層の発展の中で、両受賞者の更なるご活躍を期待しております。なお、本授賞の対象となった榎戸氏および北村氏の研究内容については、近いうちに本誌で順次紹介いただく予定です。ご期待ください。

(公益財団法人 宇宙科学振興会 事務局長 佐々木 進)

リュウグウの乙姫殿、お宝をいただきます。 近日参上 「はやぶさ2」 HAYABUSA2



プロローグ

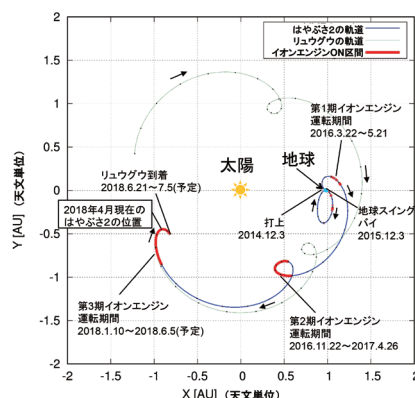
2014年に宇宙へ飛び立った「はやぶさ2」。いよいよリュウグウ到着が目前になった。往路28億kmの航行をひとことと言うと「順調」。2015年12月には地球スイングバイを成功させ、その後の3期にわたるイオンエンジン長時間運転は、あと第3期の半分を残すのみである。ただし、ご注意あれ。順調はプロジェクトメンバーの苦心と努力により成ったもので、決して暇だった訳ではありません。たとえば、軌道計画は飛行状況を慎重に見極めつつ安全度を増す重要な修正が3回実施されたし、イオンエンジンの調整は毎週のように行われている。「はやぶさ2」で初めて導入された新しい姿勢制御・通信・航法技術も、安定航行に一役買った（それらの詳細は連載の中で紹介していきます）。

「はやぶさ2」プロジェクトのもうひとつの特徴は、来る小惑星近傍フェーズ運用に向けて大規模な訓練を行ってきた点であろう。超遠距離管制と天体着陸を忠実に再現した訓練は、少なくとも国内では初めての試みで、200人以上が関わり、3億km彼方の探査機を果敢精密に制御するためのチームワークと運用練度向上に繋がった。

探査の要諦は、未知世界への挑戦だ。未知なのだから、どんなに計画が綿密であっても不完全。しかし、だからこそ実行する意義がある。新しい英知とはそのようにして勝ち取るべきものである。

プロジェクトメンバーのモチベーションもそこに立脚しているし、その過程も成果も人類全体で共有してゆこう。願わくは、推定を超える美人の乙姫様に拝謁できんことを（むしろ美人の概念を覆されるのかもしれないが）。それから、一つまみでよいので、お宝をいただければ。

プロジェクトマネージャ 津田 雄一（つだ ゆういち）



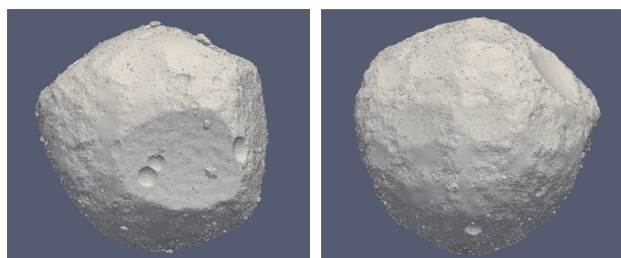
「はやぶさ2」の往路軌道（太陽と地球を結ぶ線を固定した座標系）。

リュウグウ近傍での運用をシミュレートする - RIO訓練

「はやぶさ2」は、初号機に比べて若いチームで運用するので、経験不足を補うために、到着までの時間を使用して「訓練」を行っております。訓練のメニューについては、プロジェクトメンバーで議論して準備を進め、2017年度から実施することになりました。

「はやぶさ2」の訓練は、大きく分けて2つあります。1つは、小惑星到着後の様々な観測に基づいて、どこにタッチダウンするかを決定するLSS（Landing Site Selection）訓練、もう1つは、クリティカル運用となるタッチダウンを含めた降下運用に対し、実時間で人の動き等を確認するRIO（Real-time Integrated Operation）訓練です。LSS訓練は2017年度前半に実施し、2017年度後半から2018年度初めにかけてはRIO訓練を実施しております。

RIO訓練では、主要コンポーネントの地上モデルと、リアルタイムダイナミクスシミュレータをベースとしたHIL（Hardware In the Loop）系を構築し、更に、新たに開発した画像生成装置と遅延模擬装置を組み合わせる訓練を実施しております。「はやぶさ2」では、探査機が撮像した画像を地上で処理して、降下の制御を行うフェーズがあるのですが、画像生成装置が、撮像時探査機位置と姿勢に基づいて、リアルタイムに小惑星画像を作成することができ、このような地上（人間）を含めた制御の訓練が実現可能となっております。また、降下運用では



「はやぶさ2」の運用訓練で使った仮想の小惑星リュウグウ。プロジェクトチームでは、「リュウゴイド（Ryugoid）」と呼んでいる。3Dモデルで4億ポリゴンに近い高精細なものである。

探査機と地球との距離が非常に離れており、通信の遅延が発生します。これを遅延模擬装置によって実現することで、系に時間遅れが発生し、よりリアルな訓練ができるようになりました。

RIO訓練も、最初のうちは探査機を小惑星表面に近づけることもなかなかできなかったのですが、訓練を始めて数カ月後には精度良く降下させることができるようになりました。この訓練で、人間が運用に慣れることはもちろん、探査機の「クセ」をつかむことが非常に重要だと認識しました。訓練なので実機ではないですが、人間と探査機の人馬一体の運用に近づくことができた気がします。本番でも良い成果を挙げたいと思います。

プロジェクトエンジニア 佐伯 孝尚（さいき たかなお）

20年の宿題

宇宙飛行工学研究系 助教

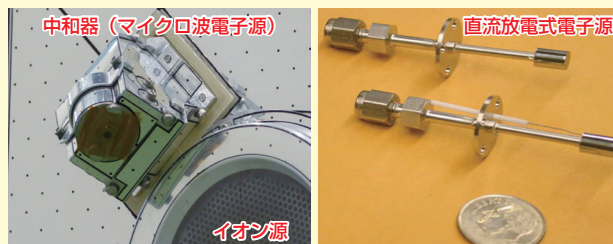
月崎 竜童 (つきざき りゅうどう)

今から20年前、「はやぶさ」のマイクロ波イオンエンジン開発当時、「なぜアメリカから中和器用に電子源を買わないのか?」という周囲からの問いに、「それは意地だ!」と國中先生は答えた。しかし高性能と噂される米国製電子源を否定できるほどの明確な答えを、当時は持ち合わせていなかった。1年間アメリカで小型イオンエンジンの研究をしてきたことで、長い間解けなかった宿題に充分に答えられるようになったので、ここに記す。

2016年9月16日から2017年10月21日まで、カリフォルニア大学ロサンゼルス校(以下、UCLA)の電気推進研究室に、海外長期派遣研修制度を使って行ってきた。ここではNASA/JPL出身のRichard Wirz教授の下、小型イオンエンジンの研究を行っている。また電気推進の教科書『Fundamental Electric Propulsion』の著者Dan Goebel博士も客員教授として参加し、米国最大の電気推進研究室となっている。ここで研究されているイオンエンジンは直流放電式と呼ばれ、ヒータで1000℃以上加熱すると電子が出てくる特殊な材料を使って、プラズマを作るのが特徴だ。世界的にも主流で、日本でもJAXA統合以前から筑波や調布で研究され、先日打ち上げられたSLATSの小型イオンエンジンも直流放電式だ。

一方で私がこれまで研究してきたのは宇宙研独自のマイクロ波イオンエンジンだ。マイクロ波は電子レンジにも使われている電磁波で、永久磁石とあわせ、燃料のキセノンガスを加熱しプラズマを作り出す。他のイオンエンジンに比べ、小型で省電力、耐久性が高いのが特徴だ。

一般にイオンエンジンのような電気推進機でもっとも開発が難しいのは、電子源だ。図の中和器は、電子を出す電子源で、イオンエンジンには必要不可欠な部品である。マイクロ波放電にしろ、直流放電にしろ、電子源は一の電荷の電子を排気するために負電圧に印加される。そのため+イオンが電子源のオリフィスなどの壁面に衝突し、損耗劣化する。電気推進機は低推力のため長時間の作動が必須で、この耐久性こそがシステムの寿命を決めると言っても過言ではない。それでいて推力を発生する部品ではないので、中和器に投入する



イオンエンジンの中和器に使われるマイクロ波電子源(左)と直流放電式電子源(右)

電力や燃料となるキセノンガスは、可能な限り少ない方が、性能が良い。少ないリソースで身を削りながら作動する、極めて過酷な運命を担った部品である。

「はやぶさ」の中和器のために開発したマイクロ波電子源は、地上実証2万時間に対し、軌道上では1万5千時間にとどまった。それでも当時の相場が数千時間であることを考えると、世界記録だった。UCLAでは、小型イオンエンジンの中和器のために、マイクロ波式とちょうど同じくらいの電子をだす直流放電式電子源を研究している。この電子源は1000℃以上に温める必要があるため、小型エンジンにみあった省電力で高温を実現しなければならない。大型エンジンにとっては大した損失ではないかもしれないが、UCLAやJAXAが開発している小型エンジンにとっては中和器に割く電力や燃料は、致命的な性能低下につながってくる。

実際に研究を進めると、マイクロ波電子源では8W程度の電力で作動するが、直流放電式では、中和器に最低でも25W以上の電力をいれないと作動しない。加えて熱が逃げないよう極限まで追求された設計は、配管が非常に薄く振動やストレスに弱い。使用するヒータも髪の毛ほどの細さでできおり、熱サイクルによって断線するリスクを内在する。私自身も慎重に扱ったが壊れたことが2度あった。高融点金属と特殊な溶接技術でできているため修理は容易ではなく、外部の専門工場に委ねることとなった。必要となる燃料も、省電力になればなるほど反比例するように増え、最低でもマイクロ波電子源の2倍程度必要で、作動も不安定だった。

学術雑誌や国際会議の輝かしい発表を飾るアメリカの高性能イオンエンジンだが、なぜ小型の直流放電式イオンエンジンが宇宙に飛ばないのか、その実情を知る体験だった。冒頭の通り、直流放電式で小型イオンエンジンの中和器を作っていたならば、推進性能は世界最低となり、寿命は半減し、「はやぶさ」の地球帰還は不可能だっただろう。マイクロ波こそが当時でも、そして現在でも小型イオンエンジンの唯一の解だったことを、今回の滞在を通じて身をもって理解した。あの「意地」はまさに慧眼だった。



ISASニュース No.445 2018年4月号
ISSN 0285-2861

発行 行/国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

発行責任者/宇宙科学広報・普及主幹 生田 ちさと

編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 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。

デザイン制作協力/株式会社アドマス

編集後記

ベビコロンボ水星探査機はオランダにある欧州宇宙技術研究センターでの試験が終了し、南米ギアナにあるアリアンロケット発射場への輸送が始まっています。MMOの愛称とメッセージへの応募、誠にありがとうございました。(小川 博之)

*本誌は再生紙(古70%)、植物油インキを使用しています。

R270
古紙/パルプ配合率70%再生紙を使用

VEGETABLE OIL INK