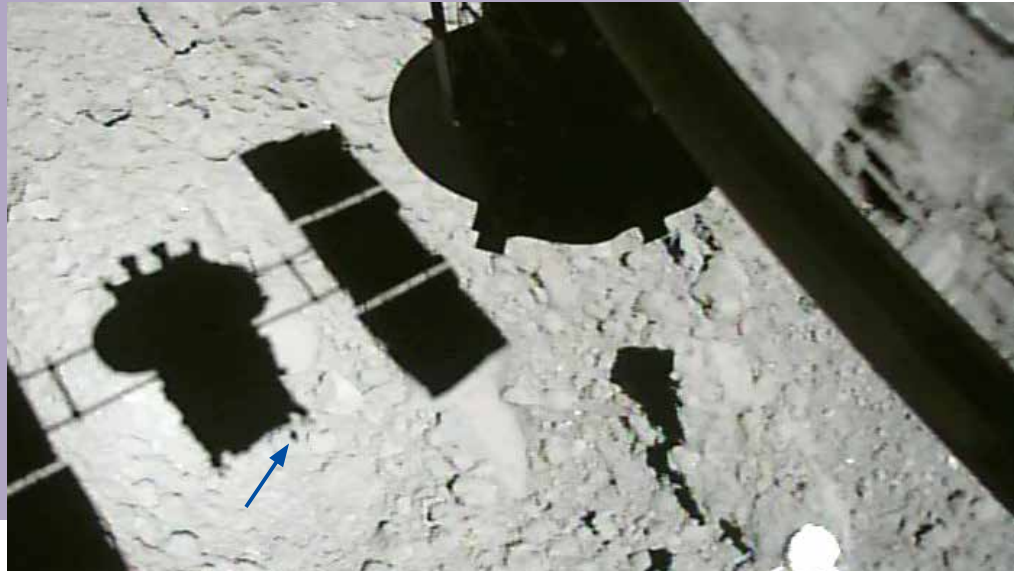


「はやぶさ2」2つめの ターゲットマーカ投下成功！

PPTD-TM1A運用（関連記事4ページ）において分離されたターゲットマーカ（右下の白いボール状の物体）。小型モニターカメラ（CAM-H）によって分離直後に撮影された画像で、ターゲットマーカはリュウグウ表面に向かって降下している。撮影の時刻は2019年5月30日、11:18（機上、日本時間）で、このときの探査機の高度は約8mである。探査機の影の下に見える小さい黒い点（矢印）はターゲットマーカの影である。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

船舶レーダと宇宙応用

宇宙機応用工学研究系 特任教授 川崎 繁男（かわさき しげお）

1. はじめに

発展し続ける現代社会の中で、その繁栄を持続させながら人類の生存を継続させていくサステナブル（持続発展可能な）社会が提唱されている。大都市圏内では、仕事や生活に必要なインフラストラクチャーは、十分完備されている。しかし、過疎地や僻地、空や海、また、今後広がるであろう宇宙圏でも、人類が持続発展的に生存・生活するためには、「衣食住＋医情輸電（衣服、食料、住居と医療と健康、情報、輸送、電力）」が必要であると筆者は考える。

これらを実現する方法のひとつとして、グリーン・エコ（自然環境・生態適合・経済的実用化）技術開発がある。グリーン・エコ技術の一つとして、筆者らは、エレクトロニクス技術を用いて電波や赤外線の性質を効率よく利用した、情報・通信・エネルギー技術（Information, Communication and Energy-Transfer Technology：ICET）でサステナブル社会を支えることに、日々努力を重ねてきている。事実、無線通信に関して言えば、携帯電話やスマートフォンが日常生活の向上に、いろいろな便利さをもたらしてくれている。

今後のサステナブル社会のグリーン・エコ開発を推し進める技術として、第5世代移動通信システム“5G”や、通信に加え家電や生活設備などのセンサや制御器について、データ伝送

や制御を自律的にインターネット上で行える「モノのインターネット（IoT）」、電波や熱などの環境エネルギーを電子機器などの駆動電力に換えるエナジーハーベスタなどが、開発から実用化のレベルにきている。筆者らの研究グループでは、これらの利用を地上の生活空間に留まることなく、海や空、宇宙にまで拡張する研究を行ってきた。本稿ではそのセンサ情報の一例として、民生用レーダとして船舶（マリン）レーダを取り上げ、これを情報通信技術として宇宙用へと展開するため行った「はやぶさ2」のサンプル回収用追跡レーダシステムを紹介する。

2. レーダ技術

レーダとは、Radio Detection and Ranging（RADAR）の呼称であり、電磁波のうちVHF/UHF波からマイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波、赤外線を放射し、遠方にある船舶、車両などの目標物の距離、方位、速度などを探知する装置である。また、これらのパラメータを信号処理することによって、地図化（マッピング）することもできる。送信周波数を一定の帯域で変動させ、特定の周波数の反射信号を検波し解析する連続波（CW）動作と、短いパルス信号の反射信号により検波を行うパルス動作の2つがある。レーダはもともと測距・測速機能をもつが、高周波信号を低周波に変換し、信号処理によりその機能を拡張することができ、追跡レーダ、合成開口レーダなどで高機能化

することができる。

レーダで船舶や飛行機などの目標を探知するには、レーダの送信電力が届く距離を半径とする円や球内の搜索領域からのレーダエコー（送信電波が船舶などから反射する信号）を受信し、解析する必要がある。受信信号は処理器による信号解析が行われたあと、表示器で目標の位置と速度を表示する。レーダエコーを受信し目標の位置と速度を表示するには、原理的にパルス波の送信受信で理解することができる。探知距離 R は c を光速とすると、電磁パルスがレーダと船舶や自動車など

の目標物との間の往復時間 t から $R=c \cdot t/2$ より測定できる。またレーダと目標物とを結んだ線方向の速度は、レーダ送信機の周波数を f 、船舶、自動車などの目標とレーダとの間の相対速度 v_r から、ドップラー周波数 $f_d=2v_d \cdot f/c$ より求まる。方位角、および、距離と垂直な面内の速度は、レーダの送受信アンテナの回転角度と回転スピード（角速度）から求められる。

レーダで船舶や飛行機などの目標を探知するためには、送受信機の性能としてレーダエコーの受信信号電力 S と、受信装置などから発生する雑音電力 N を知る必要がある。つまり、レーダの送信アンテナから放射されるパルスが目標に照射され、それがエコーとして再びレーダで受信され、信号処理によって目標と判別される。この時、レーダエコー受信信号は、レーダ受信機の内部から発生する雑音電力によって、目標判別能力が劣化してしまう。レーダエコー受信信号が、雑音電力よりどれだけ強いかが、目標探知に要求される（定量的な説明を、本稿最後の補足説明「レーダ方程式」に示した）。このように、目標を探知するために必要な信号対雑音電力比を、ビジビリティファクタと呼ぶ。

これまでの説明はレーダ探知能力を示しているが、コンパクトで安価な民生用マリンレーダには、海面からの反射を抑えて目標探知をより正確に行うことや、船舶の大きさや識別など安全運航などの観点から、現行マリンレーダより改善すべき点がいくつかある。その中でも重要なポイントとして、レーダの探知距離を延ばすために、レーダエコー受信信号を、受信機内の回路で時間的に短縮すると振幅が増加する（パルス圧縮技術という）技術を用いることが考えられる。この技術は、雑音電力は増加させず、受信信号を圧縮することで目標からの受信信号の先頭電力を増加させ、ビジビリティファクタを改善させることができる。また、漁船やタンカーといった船舶などのレーダエコーは目標からの受信信号として表示器に表示させるが、目標以外の波や島などの背景からの反射電力（クラッタという）を抑圧できれば、目標探知精度はさらに上げられる。一般に雑音は信号のレベルからすると振幅は小さく、各反射パルスで位相も変動する。これを使って多数（数100パルス程度）の反射パルスのS/Nを計測し、周波数変換して低周波に変換したのちデジタル信号処理を行って時間平均を取り、ビジビリティファクタを向上させる方法がある。これを積分と呼ぶ。また、目標が陸上や海上にあるときは、その背景からのクラッタがあり、これについては、積分後一定の受信レベル以上に閾値を設け、この閾値レベルより以下の受信電力レベルを目標でないと判断し、クラッタを除去（抑圧）し、目標の探知能力を上げる方法もある。

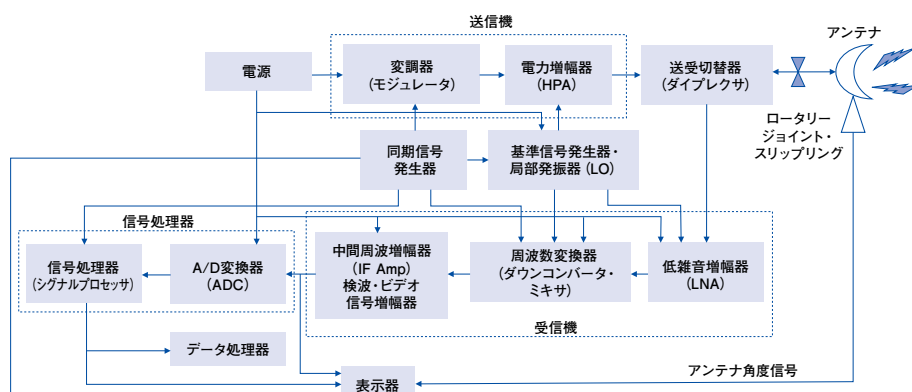


図1 一般的なレーダの構成（参照：「レーダ技術」p.6 図1.2 一般的レーダの構成より）

一般的なレーダの構成は、図1に示すように、アンテナ、送信機、受信機、送受切替器、信号処理器、データ処理器、表示器などがあり、ハードウェアとして送受信機はアンプ、周波数変換器、ベースバンド信号処理器、電源などがある。部品・モジュールへの機能要求としては、高性能多機能化、コンパクト化、低コスト化があげられる。また、コンポーネントとしては、安全航行などの改善要求の点から最先端技術の適用が望まれており、送信系GaNアンプ、受信系LNA MMIC、AIA、フェーズドアレーアンテナなどのアンテナ回路モジュールの開発が重要である。筆者らの研究グループでは、「はやぶさ2」と同時に打ち上げられた探査機 PROCYONでその世界一の性能を実証した高性能GaNアンプ試作技術を、以下の民生用固体化マリンレーダに適用したので、レーダ機能に加えて、これについても解説する。

3. 船舶（マリン）レーダ

レーダ技術のシステム応用には、航空管制レーダ、気象観測レーダ、マリンレーダなどがある。ここでは、ICETによるレーダ技術の民生応用の例として、半導体集積回路を用いたコンパクト固体化マリンレーダを取り上げる。

レーダの性能は、最大探知距離、中心周波数、送信先頭出力、送信パルス幅、パルス繰り返し周波数、受信機雑音指数、受信機帯域幅、アンテナ利得、アンテナ回転速度、最小探知距離、距離・方位分解能などで決まる。JAXA宇宙探査イノベーションハブで試作した「100W級低コストGaNアンプ」によるマリンレーダの性能諸元を表1に示す。なおここでは、ビジビリティファクタ向上のため、改善技術として前に紹介した、受信パルス幅を縮めて先頭電力を上げ、探知距離を伸ばすパルス圧縮技術を用いた。

上記の成果に基づき開発した「400W級電力合成GaNアンプ」を用いたマリンレーダ、モジュール、概観、表示器画面を図2に示す。

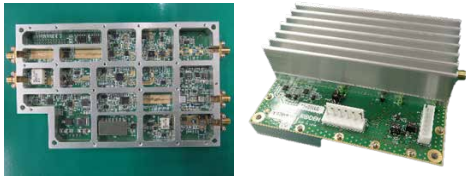
GaNアンプを用いたコンパクトな送受信機は、信頼性が高く多機能化が容易で、情報量が多く、これまでの電子管の

表1 試作レーダ仕様

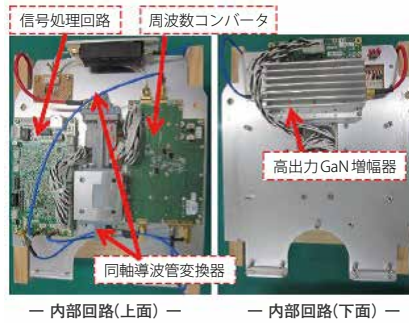
項目	試作レーダ
中心周波数	PON: 9390 MHz QON: 9410 MHz
送信 尖頭電力	100 W
アンテナ	利得: 28 dBi 水平ビーム幅: 1.2 deg 垂直ビーム幅: 22 deg
電波の型式	PON、QON
パルス幅	PON: 0.08 ~ 1.2 μsec QON: 5 ~ 18 μsec
繰り返し 周波数	450 ~ 2600 Hz
アンテナ 回転速度	24 rpm or 48 rpm



(a) マリンレーダを備えたボート



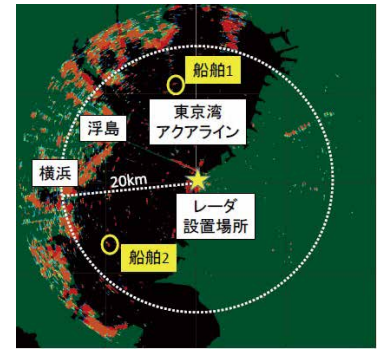
(b) 開発した100W級GaNアンプの内部とヒートシンク付モジュール



— 内部回路(上面) — — 内部回路(下面) —



(c) レーダ概観(内部回路収納部の400W級高出力GaNアンプ付)



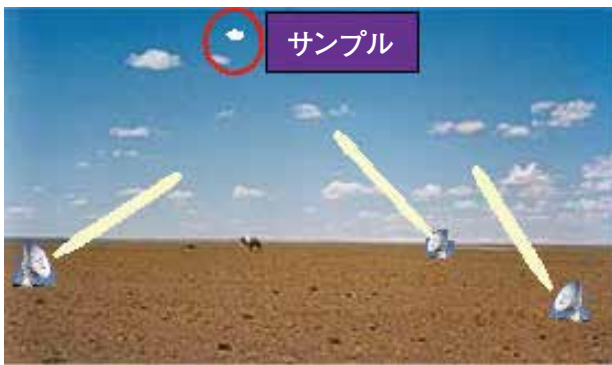
(d) 表示器PPIによる監視レーダ画面

図2 マリンレーダ

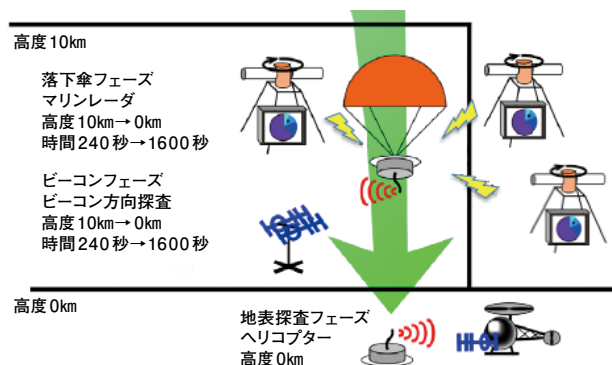
場合に比べて一機能当たりのコストパフォーマンスは高い。船舶の大きさに応じたレーダ断面積による反射電力の違いが生じるが、薄い扇のような距離方向に広がったアンテナビーム形状により、反射電力の違いが表示器 (Pulse Position Indicator: PPI) 上に輝度の差となって明確に表れている。なお、積分によるS/Nの改善と閾値設定によるクラッタ抑圧によって、船舶の識別が容易になっている様子もうかがえる。

4. 宇宙応用

コンパクト固体化マリンレーダの開発のもうひとつの目的は、宇宙用探査追跡レーダとして、搜索 (search) ・捕



(a) システム構想図



(b) サンプル回収シナリオ

図3 「はやぶさ2」サンプル回収レーダシステム

(acquisition) ・追尾 (tracking) 機能を追加できるデュアルユー

スのレーダを開発することである。その候補のひとつが、「はやぶさ2」サンプル回収用追跡レーダである。図3に、複数のマリンレーダによるサンプル回収サブアレーアンテナシステム構想とシナリオを示す。複数の搜索レーダ情報の位相情報をできるだけ正確に合わせるなど、効率よく信号処理させることで、レーダ断面積の小さいサンプルを精度よく捕捉し、追尾することが可能となる。

5. おわりに

これまでに、サステナブル社会のグリーン・エコ開発を進める技術として、レーダ技術を、固体化マリンレーダを例にとつて説明した。GaNアンプという、近年注目の高性能半導体アンプを使用することで、低コストで高機能な宇宙用民生両用の高性能搜索・追跡レーダが実現できることを示した。ここで示されたレーダ技術は、CubeSatの通信系に適用でき、筆者が提唱する「オールワイヤレス化衛星システム」の開発を加速させることが可能であると考えている。

補足説明「レーダ方程式」

パルス動作しているレーダの送信アンテナ (利得 G_t) から、周波数 f (波長 λ) で放射される電力 P_t の一部が目標物に到達し、この目標の面積 (レーダー断面積 σ_t) に応じた反射電力をレーダ側に送り返すとき、レーダの受信アンテナ (反射波を受信する受信アンテナの有効開口面積 $\sigma_r = \lambda^2/4\pi$ 、受信アンテナ利得 G_r) が受信する電力 P_r は、前述した信号電力 S に等しく、

$$P_r = S = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma_r}{4\pi R^2} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_r$$

$$= \frac{1}{(4\pi)^3 R^4} \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t$$

となる。また、システムの雑音電力 N は受信機内の雑音電力 N_i とほぼ等しいとすると、ボルツマン定数を k 、システム雑音温度を T_{sys} 、受信機の帯域幅を B として、 $N_i = kT_{sys}B$ である。レーダの探査能力を決定するためにレーダ方程式が使われるが、一般にアンテナは送受信で同一 ($G_t = G_r = G$) であり、信号電力 S と雑音電力 N の比は、

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 \cdot k \cdot T_{sys} \cdot B}$$

のように表される。

「はやぶさ2」2つめのターゲットマーカ投下成功！

「はやぶさ2」は、小惑星リュウグウ表面に人工クレーターを作ることになりました。ここまでで、ミッションの成功基準に謳われている項目のうちリュウグウにおいて行うことは、そのほとんどが終了しました。唯一残った項目が「表面に露出した小惑星の地下物質のサンプルを採取する」ということです。これは、エクストラサクセスに分類されている項目なので、可能ならば行うというものです。もちろん、「はやぶさ2」はエクストラサクセスも達成できるよう開発されています。また、未知だったリュウグウ、そして人工クレーターやその周辺の状況も今や正確に把握できています。これらをもとに、プロジェクトとしては地下物質採取を実行するつもりで準備を進めています。

地下物質を採取するためには、2回目のタッチダウンを行う必要があります。そのために、まずはターゲットマーカを地下物質が降り積もっていると考えられる場所に投下する必要があります。

ターゲットマーカを投下し低高度観測を行うPPTD-TM1運用を5月14日から16日にかけて行いました。探査機は、衝突装置の衝突目標点近くのS01^{*1}という領域を目指しましたが、高度50mくらいに達したとき突然上昇に転じてしまいました。ノーマルアポート^{*2}です。レーザ高度計（LIDAR）による距離計測の値が異常となり、危険回避のために探査機が自律判断で上昇したのです。

LIDARが正しい距離計測ができなかった理由はすぐに解明されました。LIDARのレーザ光が低高度でターゲットマーカに当たってもLIDARのセンサーが壊れないように、受光感度の切り替えを行おうとしたのですが、その切り替えのところでノイズが入って

しまったのです。

そこで、ノイズが入らないような切り替え方式に変更して、5月28日から30日にかけて再度降下運用を行いました。運用名はPPTD-TM1Aです。アポートしたPPTD-TM1運用では、低高度からのリュウグウ表面撮影には成功しました。その画像を検討してみると、より人工クレーターに近いところであるC01^{*1}領域にターゲットマーカが投下できそうであることがわかり、PPTD-TM1A運用ではC01領域を目指しました。

運用の結果、ターゲットマーカはC01領域に無事に投下できました（図、表紙の写真）。2回目のタッチダウンに向けて一歩前進です。今後、タッチダウンの可能性についてさらに慎重に検討を進めます。

（吉川 真）



図 広角の光学航法カメラ（ONC-W1）によって撮影された分離直後で降下中のターゲットマーカ（中心付近の白い点）。撮影時刻は2019年5月30日、11:19（機上、日本時間）で、撮影の高度は約10m。左側に探査機の影も見える。

^{*1} http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20190527_PPTD-TM1A/を参照。 ^{*2} センサー出力の異常など、軽微な異常の際に発動されるもので、探査機は降下を中止して上昇に転じる。

SLS搭載超小型探査機とNASA深宇宙追跡網の適合性試験

来年打上げ予定の米国 SLS EM-1 ミッション（有人宇宙船の無人打上げ）では、6Uサイズ（1U：約10cm立方、大きさを表す単位）の CubeSat 13 個の放出が計画されており、日本はその中で OMOTENASHI と EQUULEUS という2機のミッションを計画しています。CubeSat はデスクトップ PC と比較しても小さく消費電力が小さく、代表的な科学衛星が使用している搭載通信機（中継器）をそのまま流用することができないので、宇宙研では CubeSat の規模に合わせて、2016 年から世界最小の X 帯搭載通信機の開発を進めてきました。

2 機の CubeSat は SLS ロケットによる打上げ・放出直後から、初期チェックアウトや軌道操作のために NASA 深宇宙追跡網ディープスペースネットワークを利用します。このため、開発を進めてきた搭載通信機が NASA のシステムとの間で正しく通信できる、また相模原の管制室から NASA の設備を通じて問題無く運用できるということを、各種試験を通じて打上げ前に探査機を確認しておく必要があります。

具体的には高周波（RF）シミュレータと呼ばれる搭載通信機の模擬装置と、搭載計算機（OBC）を模擬するシミュレータの2つの地上試験用機材を、米国カリフォルニア州モンロビアにある NASA/JPL の試験施設（DTF-21）に持ち込み、NASA が実際に地上局運用で使用してきた通信機との間で有線接続して、通信性能に問題無いかどうかということを確認します。

DTF-21 において予定していた5月13日から5月31日までの3週間で無事に試験を終了しました。このような宇宙機関間の共同試験は現場レベルで実務担当者が顔を合わせて作業する日米交流でもあり、とても貴重な経験となりました。試験を通じて得られたさまざまな知見が、今後の宇宙開発を担っていく若手にとって、大きな刺激となったことは言うまでも無く、実り多き米国出張となりました。

（富木 淳史）



適合性試験に参加した OMOTENASHI と EQUULEUS のプロジェクトメンバーたちと適合性試験に使用したコンパトレーラ（CTT-22）。筆者は左から3番目。

令和元日 CAESAR/SRCプリプロジェクトチーム発足！ (Comet Astrobiology Exploration SAmple Return / Sample Return Capsule)

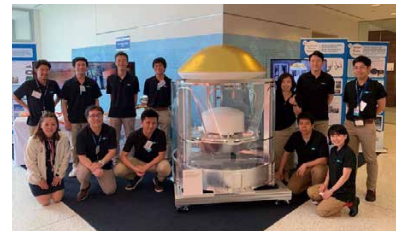
皆さんは令和元日であった2019年5月1日、如何お過ごしでしたか？私は新時代到来の瞬間を、米国はNASAの Goddard Space Flight Centerで迎えました。というのも、NASAが募集している太陽系の探査を目的とするNew Frontier計画の4号機に関する最終選考会が、まさに令和元日に行われていたからです。残念ながら、米国にはゴールデンウィークも新元号も関係ありませんので(笑)。

米国コーネル大学が、彗星の物質を低温のまま地球に持ち帰ってくるという野心的なCAESAR(シーザー)計画を提案しており、「はやぶさ」のヘリテージを有するJAXAは、そのサンプルリターンカプセルというミッション成立に必須な技術を担っております。成功すれば、小惑星にはない未変質な有機物や氷を低温のまま彗星から持ち帰ることができ、人類は太陽系における最も原始的な試料を手にすることになります。それを地球上に存在する最新の技術で分析することができるのです。もっとも、その時期は19年後の2038年にはなるのですが…。

いや、その前に、まだこのCAESARミッションの実現が決まったわけではありません。NASAの最終選考会にはもう1つのミッション(土星の衛星タイタンに着陸するドラゴンフライ計画)も臨んでおり、どちらか一つだけが選考されるからです。まだ選考過程ですので当日の詳細は述べられませんが、われわれCAESAR

チームメンバーは、米国側も日本側も“人事を尽くして天命を待つ”という状況です(実際には待つはいなくて各種検討を進めています)。

そんな5月1日でしたが、最終選考会開催と令和元日以外にも、ゴダード宇宙飛行センターの開設60周年記念日でもあり、JAXAとしてCAESAR/SRCプリプロジェクトチームが発足した日でもあり、色々と重なる特別な一日になりました！令和20年11月、低温の彗星試料を携えて地球に帰還したサンプルリターンカプセルを無事に確認し、令和元日のことを目を細くして想い出す日が迎えられるように、着々と準備を進めたいと思います。(今村 裕志)



令和元日選考会終了後にサンプルリターンカプセル試作品前で日本チーム集合写真(筆者は上段左から3番目)。



同終了後、CAESAR チーム全体の集合写真。

次期ミッションとして選定された“LiteBIRD”と“小型JASMINE”

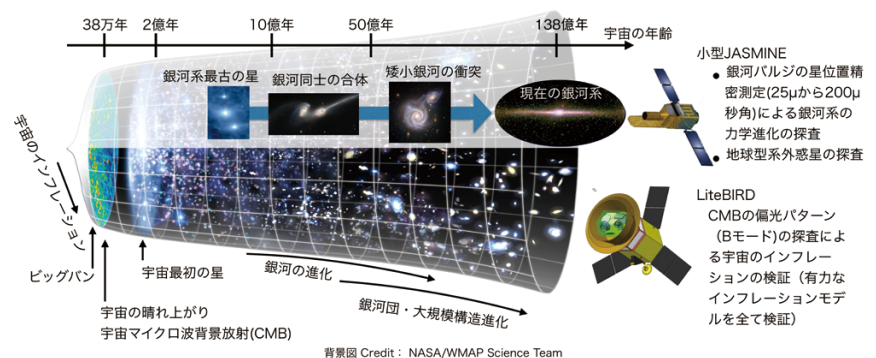
JAXAは2019年5月21日の宇宙政策委員会 宇宙産業・科学技術基盤部会 宇宙科学・探査小委員会において、宇宙科学研究所が次のミッションとしてLiteBIRDと小型JASMINEを選定し、JAXA経営レベルでの計画精査プロセスへ向けて作業を進めていることを報告した。

LiteBIRDは、KEK、東大IPMUなどの研究者が中心となって提案した、MMXに続く戦略的中型計画の候補である。なぜ現在の宇宙はこれほど正確に平坦で、かつては光でも情報のやりとりが困難であった遠く離れた宇宙が基本的に同じなのか、星から大規模構造に至る階層的な構造の種はいかにして作られたのか？これらの基本的かつ重要な疑問に一度に答えるのが、「宇宙のインフレーション」の考え方である。ビッグバン以前の宇宙に発生した原始重力波が宇宙マイクロ波背景放射に残したわずかな痕跡を探索し、LiteBIRDはインフレーションを検証する。LiteBIRDの測定能力は、有力なインフレーションのモデルを検証可能な感度設定されている。

小型JASMINEは、国立天文台などの研究者が中心となって提案した、DESTINY+に続く公募型小型計画の候補である。我々が住む天の川銀河系にはビッグバンからわずか3億年後に生まれたと推定される星が見つかる。天の川銀河はその時代の物質を材料に、銀河同士の合体や衝突を経て、

現在の姿に成長したと考えられている。小型JASMINEは、銀河中心領域の力学構造を星の精密な位置測定により運動学的に調べることで、銀河の進化過程を読み解くことを第一の目標としている。さらに安定した赤外線測光能力を使って、太陽系外の惑星系の中に、液体の水が存在可能な環境にある地球型の惑星を探索することを第二の目標とする。

LiteBIRDは、インフレーションの痕跡が検出されてもされなくても、我々の宇宙の理解、さらに基本的な物理学の理解に大きな影響を与える。また、小型JASMINEが作り出す星のカタログは、我々の銀河系を理解するための人類共通の財産となるであろう。いずれも2020年代後半以降に解決すべき重要な科学テーマに挑むミッションである。(満田 和久)



背景図 Credit : NASA/WMAP Science Team

はやぶさ2プロジェクト Aviation week Award 受賞報告

はやぶさ2プロジェクトが2019 Aviation Week Laureate Award を頂きました。アメリカの大手航空宇宙雑誌“Aviation Week”が1年間に活躍した機関、会社、個人、グループなどを表彰する歴史ある賞で、JAXAでは「かぐや」「はやぶさ」に次ぐ受賞でした(筆者調べ)。受賞の連絡は2月のタッチダウン成功前でしたので、実績よりもミッション全体を評価して頂いたようです。

我々が頂いたのはSpace部門のTechnology & Innovation賞でしたが、Space部門の大賞はNASAのMars Exploration Roversを差し置いてRocket Lab Electronという民間打上げサービスでした。「差し置いて」と感じるのは日本特有で、民間の宇宙企業が多数活躍しているアメリカでは官民に上下はないのかもしれません。



着物とタキシードで出席(左から、津田プロマネ、小野田ワシントン駐在所長、筆者)。

授賞式は2019年3月14日にワシントンDCの国立建築博物館のホールで行われました。美味しい食事をしながらのパーティ形式でした。実は津田プロマネは前日にワシントン入りするはずが大雪で欠航となり、あわや欠席となるところでした。なんとか当日午後のフライトで駆けつけ、空港からの車中でタキシードに着替え、メインディッ

シュとともに着席し、すぐに壇上に呼ばれてトロフィーを受け取りました。それはまるで、降下開始が遅れたにもかかわらず、ちゃんと帳尻を合わせた「はやぶさ2」のタッチダウンのようでした。(中澤 暁)

はやぶさ2プロジェクト 日本航空宇宙学会賞 受賞報告

2019年4月19日に東京大学生産技術研究所で開催された日本航空宇宙学会年会にて、はやぶさ2プロジェクトが日本航空宇宙学会賞技術賞を受賞しました。受賞題目は、「はやぶさ2による小天体ランデブーのための深宇宙航行技術の進展と小惑星Ryuguへの到着」です。つまりこの賞は、「はやぶさ2」の打ち上げから小惑星到着までの成果を評価いただいたものになります。イオンエンジン航行、スイングバイ・光学電波複合航法等の深宇宙軌道設計・誘導技術、DDOR・Ka通信等の深宇宙通信・航法技術、ソーラーセイル姿勢安定化技術や深宇宙光リンク等の先進的な工学実験の成果が認められました。「はやぶさ2」は既にRyugu近傍での活動が佳境に入っており、小惑星到着は遙か昔のことのようですが、「太陽系を渡る技術」にもきちんとスポットライトを当てていただいたのはひときわ嬉しいことです。(津田 雄一)



授賞式にて(左から、航空宇宙学会会長 大林先生、筆者)。

ROBOMECH表彰および日本化学会第99春季年会優秀講演賞を受賞

ぜんどう
蠕動運動型人工筋肉混合搬送機(以下、蠕動ミキサ)を用いたコンポジット推進薬製造技術の研究チームが、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門のROBOMECH表彰(産業応用)および日本化学会第99春季年会優秀講演賞(産業)を受賞しました。

蠕動ミキサは世界初の空気圧人工筋肉を用いたミキサとして、主に筆者(当時総研大生)、指導教員だった羽生宏人准教授と中央大学バイオメカトロニクス研究室が共同で開発しました。コンポジット推進薬は固体ロケットに用いる一般的な推進薬で、酸化剤粒子や金属燃料粒子を液状ゴムと混和させてゴムの硬化反応で固めたものです。蠕動ミキサはこのコンポジット推進薬を安全に混和することができます。また消化管のように動くことで連続的な混和も期待できます。

本研究が日本機械学会・日本化学会という異なる分野から評

価されたのは、蠕動運動による攪拌のメカニズムに未解明の部分が多い中で、確かにコンポジット推進薬の混和を達成した点にあります。蠕動ミキサによって推進薬が混和されるメカニズムを、ロボティクス分野の方々と共に一から考えることは、難しくも新しい発見ばかりで新鮮でした。混和達成にはミキサの機械的な改良に加えて、推進薬の流動特性を考慮に入れた混和条件設定が鍵だったのです。今思えば当然のようなことですが、ロボティクス分野と化学工学分野両面からの検討を突き合せたがゆえに、このことにいち早く気付くことができました。これこそまさに学際的に研究を進める利点でしょう。

また、両賞共に本研究に産業応用への可能性を見出して頂きました。本研究は実用化を見据えて、当初から産学連携でのロケットモータ燃焼試験での実証に拘ってきました。カーリットホールディングス(株)・日本カーリット(株)に標準小型ロケットモータ燃焼試験を行って頂きました。たった約3秒の燃焼時間でしたが、モータ点火前の不安と期待が渦巻く祈るような気持ち、終わった後の安堵感、関係の方々とお交わした握手は今でも鮮明です。

今回の受賞を糧にさらなる実用化へ向けて研究を進めていきます。今後は実用に足る推進薬品質を目指し、また連続的な混和もできるようにしていく予定です。(岩崎 祥大)



ROBOMECH表彰受賞会にて。右から2人目が羽生宏人准教授、前列一番左が筆者。



日本化学会の賞状は所長を通じて授与頂きました(右から2人目が羽生宏人准教授、左から3人目が筆者)。

「みお」つくし

第2回

世代も国境も越え水星へ挑むベピコロンの物語

水星／「惑わない星」より



ベピコロンの挑むサイエンス：水星が握る太陽系の鍵

各国による惑星探査が激化する今日において、水星はいまだに謎多き惑星と考えられている。水星周回軌道への探査機の投入には太陽系脱出よりも膨大なエネルギーが必要となる。しかも地球の10倍以上の強烈な太陽光を浴びることから、非常に探査が困難な惑星であり、過去の水星周回探査機は2011年に周回軌道投入に成功したNASAのメッセンジャー探査機のみである。メッセンジャーがもたらした多くの発見は、それまで科学者にとっても地味な対象だった水星を一躍「おもしろい」存在へと引き上げた。一方で、1機に搭載できる観測装置の限界と北半球に限られた軌道の制約などから、未だに多くの未解決問題が残されている。ベピコロンの計画では水星磁気圏探査機「みお」(Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO)と水星表面探査機(Mercury Planetary Orbiter: MPO)の2機による総合的観測で水星に残された謎に挑み、そこから太陽系惑星、特に地球型惑星の「起源」、「進化」、そして「環境」の理解を目指す。

水星の最大の特徴の一つに、惑星直径の約80%にも及ぶ巨大な金属コアの存在がある。これは地球や金星、火星の40-50%と比べてはるかに大きい(図1)。また水星は太陽に最も近い惑星であるにもかかわらず、表面の鉱物組成には予想よりはるかに多い揮発性元素をもつことがメッセンジャーにより発見された。その特異な惑星形成過程については様々な提案がなされつつあるが、これらの特徴すべてを説明できるものはなく未だに解明されていない。このことは逆に、水星の「起源」と形成過程を解明することが地球を含めた惑星形成を理解する重要なカギとなることを示している。地球の起源となった固体岩石物質がどういうものだったのかすら未解明であるが、実はその答えは惑星進化の過程ですっかり変性してしまった地球ではなく、誕生当時の面影を強く残した水星にあるといえる。MPOによる観測から水星の地質情報や組成情報を読み解くことで、我々は地球型惑星の起源の謎に迫る。

水星のもう一つの大きな特徴が磁場である。水星には内部の流動的な金属コア起源と考えられる磁場が存在し、地球の約1/100の強さをもつ。地球型惑星のうち現在も固有磁場をもつのは地球と水星のみであるが、その発見以前は「太陽系最小の惑星である水星の内部はとっくの昔に冷え固まっており、地球のような固有磁場はない」という考えが定説であった。なぜ水星はいまだに磁場を維持できているのか？その惑星内部の「進化」過程における大きな謎は、水星の探査対象としての意義を一変させた。またメッセンジャーによる観測では、磁気赤道が水星半径の約20%も北にシフトしていること(図2)が発見された(ただし、軌道の制約から南半球のデータはない)。「みお」とMPOの2機による多地点同時観測ならば太陽風起因の擾乱成分を除去でき、かつ南北対称の軌道からこれまでよりは

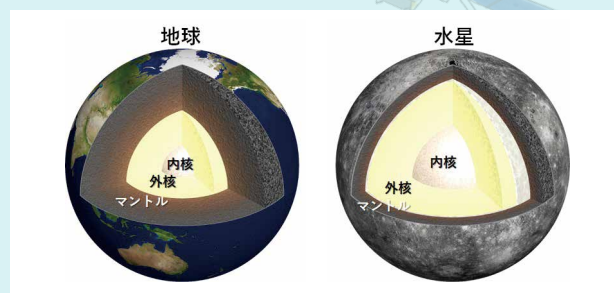


図1 地球と水星の内部構造の比較(画像：鎌田俊一氏提供)。

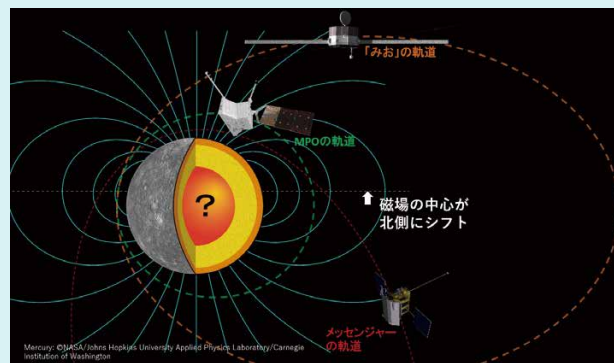


図2 水星磁場の分布とメッセンジャー、「みお」、MPOの軌道。

るかに精密な水星固有磁場の観測が可能となる。磁場として漏れ出る水星内部の情報を捉えることで、謎に包まれた固体惑星の進化過程を読み解く。

太陽に最も近く強烈な太陽風にさらされ、かつ弱い磁場をもつ水星は、太陽系で最もダイナミックな磁気圏を形成している。また惑星が小さく重力が弱いために大気は希薄であり、固体惑星表面と宇宙空間のガスが直接に接触する水星特有の複雑な物理過程を展開する舞台となっている。そのような「環境」において、磁気圏というバリアを形成する水星は果たしてどれだけ太陽風の影響を受けるのか？この観点は、恒星のごく近傍を回る系外惑星が多数発見されたいま、従来の磁気圏・宇宙プラズマ物理的なものだけではなく「第二の地球」探索へとつながる重要な課題となった。日本はこれまで地球磁気圏探査において世界をリードし続けてきた。こうした観測技術を応用した水星磁気圏探査機「みお」は水星環境の観測に特化した初の探査機であり、磁気圏を介して恒星風が惑星環境へ与える影響への理解を飛躍的に向上させることができる。

ベピコロンの取り組むサイエンスは惑星形成論から内部進化、ダイナモ磁場、磁気圏物理など非常に幅広い。2026年の本格的な観測開始とともに来る「水星が主役となる時代」に向け、若手研究者らとともに鋭意準備を進めている。

BepiColomboプロジェクトサイエンティスト 村上 豪(むらかみ こう)

》火星の地下へ。 新しい火星探査の幕を開けたい。

火星の水の起源と行方と変遷を追う

——2018年から宇宙研に。それまでは？

大学院では地球の地質学を専攻していました。地質学では野外調査が欠かせず、知力と体力の合わせ技であるところが魅力でした。しかし、地球についてはだいぶ理解が進んでいます。これから自分が新しいことをやるのは遅いかもしれないと思っていたとき、アメリカのテネシー州立大学で火星探査機のデータを解析する研究者を公募していることを知りました。火星には現在でも薄い大気があり、また火山活動や川や海があった痕跡が見つかっていて、地球とよく似ています。地球の地質学の知識も活かせると考え、迷わず応募しました。

1970年代にアメリカの「バイキング」が火星着陸に成功しました。その後、火星探査は失敗が続き、次に着陸したのは1997年、「マーズ・パスファインダー」の「ソジャーナ」です。そして2004年、「マーズ・エクスプロレーション・ローバー」の「スピリット」と「オポチュニティ」が着陸に成功しました。私がアメリカに行った2005年は、まさに火星探査が盛り上がっていた時で、とても面白かったです。

2009年にNASAに移り、火星隕石を用いた火星の水に関する研究も始めました。水は、火星の進化や生命の存在と密接に関わっています。外国人研究者がアメリカで認められるのは大変だからこそ、誰もが火星の本質だと考えるテーマを選んだのです。

——火星隕石とは？

火星に微惑星などの小天体が衝突した際に火星から放出され、地球に飛んできた岩石です。火星の水の起源については、彗星か小惑星か、2つの説がありました。火星隕石に含まれる水の水素同位体比（水素Hと重水素Dの割合）を調べると、どちらかわかります。しかし火星隕石には地球の水が混入してしまうため、正確な分析ができていませんでした。私は、隕石の中の流体包有物という小さなカプセルに閉じ込められた水に注目しました。微小な領域にある火星の水だけを分析できる手法を開発し、それが小惑星起源であることを明らかにしました。また、かつて火星表層にあった水はすべて宇宙空間に散逸したのではなく、凍土などとして現在も地下に貯蔵されていることを示しました。さらに2012年に東京工業大学に移ると、過去から現在までの変遷を明らかにする研究を始めました。起源、変遷（散逸）、そして行方（貯蔵量・貯蔵場所）という火星の水に関する三部作の完結を目指し、宇宙研でも研究を継続しています。

編集後記

令和になって、最初の編集でした。
10連休のリハビリもかねて、原稿チェックをしました。
見落としがないことを祈っています。
レイアウトが刷新されて、編集後記も大きくなったそうです。
隅から隅までお読みいただくと幸いです。（石川 毅彦）

太陽系科学研究系 教授

臼井 寛裕（うすい とみひろ）

1976年、福岡県生まれ。1999年、東京工業大学理学部地球惑星科学科卒業。2004年、岡山大学大学院自然科学研究科地球・環境システム科学専攻博士後期課程修了。博士（学術）。岡山大学地球物質科学研究センターCOE研究員、テネシー州立大学研究員、NASA ジョンソン宇宙センター研究員、東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻助教、地球生命研究所准主任研究員などを経て、2018年より現職。



火星の衛星から試料を持ち帰るMMX

——現在の主な研究は？

火星衛星探査計画（MMX）に参加しています。MMXは、火星の2つの衛星フォボスとダイモスを観測し、そのうち1つからサンプルを採取して地球に持ち帰ります。火星衛星からのサンプルリターンは世界初です。火星と衛星の距離が近いので、火星表面から飛び出した砂粒が衛星の表面に堆積しています。持ち帰る試料には火星の砂粒も含まれていると期待できます。火星隕石は我々の手元にあります。火星のどこから来たか詳細にはわからず、変成も受けています。探査機からは詳細なデータが送られてきますが、現物を手にできないもどかしさもあります。サンプルリターンは、火星やその衛星の試料を変成を受けていない状態で手にできるのです。

MMXは日本が主導し、アメリカ、フランス、ドイツなどが参加する国際ミッションです。私は、各国の代表研究者が出席する国際サイエンスボードのオーガナイザーをしています。各国がそれぞれ主張をするので会議は毎回紛糾します。ただしMMXを成功させたいというゴールは一致しているので、最後はまとまる。皆さんは第一級の研究者なので、学ぶことも多いです。

——MMXの次は？

火星着陸ミッションを検討しています。この20年ほどで、火星の表面についてはずいぶんわかってきました。日本は後から行くのですから、これまでの探査とは違うことをやるべきです。私は、地下を掘って水の存在を確認したい。掘らずに、地層が露出している崖にアプローチする方法もあります。「はやぶさ」が小天体からのサンプルリターンの先陣を切ったように、私たちの手で新しい火星探査の幕を開けたいですね。

さらに将来には、さまざまな形の探査機をたくさん火星に送り、それぞれが異なった目的の探査を行う、そんなミッションを実現したいですね。丸いロボットが転がりながら広範囲を探索したり、虫のようなロボットが崖を登ったり。ガンダム世代なんです。

——所属をいくつも移ってきました。

宇宙研の印象や今後の抱負をお聞かせください。

楽観的なので、なるようになると公募のポジションをつないで、今に至ります。5年以上同じところにいたことがありません。MMXは2024年打上げ予定ですから、宇宙研には初めて5年以上いることになるでしょう。これまでの経験を活かしつつ新しいことをやるので、毎日が楽しい。まだ勝手が分からず時々怒られますが、それも新鮮です。



ISASニュース No.459 2019年6月号

ISSN 0285-2861

発行／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
デザイン制作協力／株式会社アズディップ
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL: 042-759-8008