

日本の惑星探査と「はやぶさ」

著者	早川 雅彦
雑誌名	静岡地学
巻	103
ページ	iii, 1-7
発行年	2011-06-23
出版者	静岡県地学会
URL	http://doi.org/10.14945/00024723

日本の惑星探査と「はやぶさ」

早川 雅彦

1. 宇宙開発黎明期

(1) **米ソによる宇宙開発競争**：20世紀の第二次世界大戦終結後、国際社会は東西冷戦の時代を迎えた。人類は、東の代表たる共産主義国家ソビエト連邦と西の代表たる資本主義国家アメリカ合衆国が地球上の冷戦状態をそのままに、宇宙開発競争をすることで、その活動範囲を宇宙空間に拡大して行くこととなった。

最初の地球を周回する人工衛星を打ち上げたのはソ連だった(1957年)。先を越されたアメリカはこれを「スプートニク・ショック」と呼び、次こそは追い抜こうとNASA(National Aeronautics and Space Administration)を設立した。1961年、またしてもソ連がアメリカを出し抜いて人工衛星に人間を搭乗させて地球周回させることに成功した。この人類初の宇宙飛行士が「地球は青かった。」という言葉で有名なユーリイ・ガガーリンである。

次なる大きな目標は月面の踏破となった。時のアメリカ大統領：J. F. ケネディは「必ずや1960年代中のうちに月へ人類を送り込む。」と演説で宣言した(1961年)。この演説により始まったのがアポロ計画である。月まで3人の宇宙飛行士を運び、そのうち2人を月の表面に到達させ、さらに無事に帰還させるという、それまでの開発とは質量も格段に上回る計画であった。そのために専用のロケットサターン：V型ロケットが開発され、アポロ1号から綿密で緻密な計画のもとに人類月着陸の計画が進められた。そして、ついに1969年7月20日、アポロ11号により2人の宇宙飛行士を人類初めて月面に着陸させることに成功した。月面への人類初の一步はアポロ11号の阿姆斯特朗船長がしるした。「これは一人の人間には小さな一步だが、人類にとっては大きな飛躍である。」という言葉はあまりに有名である。

アポロ計画はこの後、5回の月着陸を成功させ、のべ12人の宇宙飛行士が月面を踏んだ。しかし、アメリカのベトナム戦争への参戦による経済状態の悪化と政情不安により、20号まで予定されていたアポロ計画は17号で打ち切られた。この間、ソ連では有人月着陸をあきらめたが、数機の無人月探査機ルナによって月面の岩石のサンプルを地球に持ち帰ることに成功している。ちなみに、自力で人工衛星打ち上げに成功したのは3番目がフランス(1965年)、4番目が日本(1970年)である。

(2) **日本独自のロケット**：日本のロケットは1955年に東京国分寺の工場跡地で水平射出された「ペンシルロケット」を起源とする。その設計開発者は「日本ロケットの父」糸川英夫博士である。終戦直後、日本では敗戦国として航空機分野の研究を禁止されていたが、1952年のサン・フランシスコ講和条約を期にその禁を解かれ、多くの航空機研究者はジェット機の研究へとなだれ込んだ。しかし、糸川博士はそんな中で、誰もやっていない新しい研究対象として、世界でさえもまだ先の見えていな

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

い「ロケット」を選んだ。もちろん国内での先行研究は無く、世界の情報も簡単には手に入れられない状況からの手探りのスタートだった。

糸川博士と中島飛行機を前身とするメーカー富士精密工業との出会いが日本最初のロケット：ペンシルロケットを生むことになる。このペンシルロケットを祖とするロケットは、ISAS（東京大学宇宙航空研究所：Institute of Space and Aeronautical Scienceおよび宇宙科学研究所：Institute of Space and Astronautical Science）の主要ロケットとして、ベビー、カッパ（K）、ラムダ（L）、ミュー（M）と発展し、多くの科学衛星を打ち上げた。日本最初の人工衛星「おおすみ」はL-4S-5号機で鹿児島県内之浦町（現・肝付町）から打ち上げられた。また、日本初の人工惑星（地球の重力圏から脱出して太陽の周りをまわる宇宙機）「さきがけ」と「すいせい」はそれぞれM-3SII-1、2号機で打ち上げられ、ハレー彗星に向かった。

これらロケットの特徴は全段が固体燃料であることである。世界の多くのロケットが液体燃料を用いる中、ISASではあくまで固体燃料にこだわり続け、固体燃料ロケットとしては世界最大のそして最高性能のM-V型ロケットの完成に至る。M-V（ミューファイブ）は8号機でその任を終えたが、JAXAでは次なる固体ロケット（ε；イプシロン）の開発を2011年度よりスタートすることが決まった（ちなみに初号機の打ち上げ予定は2013年である）。

※このペンシルロケットからM-V型までの長い道のりは、宇宙科学研究所（ISAS）のHPの「日本の宇宙開発の歴史／宇宙研の物語」というコンテンツを読んでいただくのが最も良いと思う。

http://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/index.shtml

2. 日本の惑星探査

(1)「さきがけ」と「すいせい」：日本における惑星探査はすべてISASが実行している。1章でもふれたが、日本で最初の惑星探査（ここでは地球周回衛星ではないという意）はハレー彗星探査機「さきがけ（MS-T5）」と「すいせい（PLANET-A）」である。「さきがけ」と「すいせい」は双子探査機で「さきがけ」はM-3SII型ロケットの初号機に搭載されるため失敗する場合も考慮して試験衛星という位置付けであった。この2機は、太陽風とハレー彗星の大気との相互作用の観測や、紫外線で彗星のコマを撮像することを目的としていた。「すいせい」は真空紫外撮像装置（UVI）を用いてハレー彗星のコマの水素Ly α 輝線による像を世界で初めて撮像した。この像の観測から、コマの明るさが規則的に変光していることが明らかとなり、変光周期から彗星の核の自転周期が 2.2 ± 0.1 日と推定された。

この2機の探査機は国際共同ハレー彗星探査の一翼を担っていた。この共同探査は1986年に回帰したハレー彗星に、NASA（米）、IKI（ソ）、ESA（欧）、ISAS（日）の4機関がそれぞれの得意分野を生かした探査機（計6機）を同時期にハレー彗星に接近させて相補的に観測を行ったものである。つまり、国益とかではなく純粋に学問的な真理の探究という科学者のモチベーションによる国境を越えた初の共同探査計画になったという点で類を見ない。その研究成果はもちろんのこと、世界が一丸となって一つの目的のために協力するというその姿勢が評価され、その科学成果報告会議の直後、会議出席者が当時のローマ法王：ヨハネ・パウロ2世にヴァチカン宮殿に招かれ賛辞の言葉を受けた。

(2)「ひてん」：2011年現在，日本の月探査機といえば「かぐや (SELENE)」であるが，実は20年以上前の1990年にISASにより工学実験衛星「ひてん (MUSES-A)；飛天=天女の意」が打ち上げられている。その名の通り，月や地球の周りを飛び回り，月惑星探査に必要なスウィングバイ等の工学的な軌道制御技術を習得するための衛星である。10回の月スウィングバイ (その間，地球の大気を利用したエアロブレーキの実験も行っている。これは世界初)の後に月周回軌道に投入され，米ソ以外では初めての月周回宇宙機となった。1993年4月11日に月のステヴィヌス・クレーターとフレネリウス・クレーターの間に衝突させ，計画は終了した (日本の作った物が初めて月に到達したと言える)。この時に画素数は少ないが月面の写真を撮像している。「ひてん」の運用によって得られた軌道制御技術は，この後に打上げられた地球磁気圏観測衛星「GEOTAIL」，火星探査機「のぞみ」，工学実験探査機「はやぶさ」等の運用に活かされている。

(3)「のぞみ」：火星探査機「のぞみ (PLANET-B)」は他国の火星探査機とは違い，火星大気や火星磁気圏の調査を行う探査機であった。その科学搭載機器は14種と小型探査機としては類を見ない多さであった。1998年に打ち上げられた「のぞみ」は2度の月スウィングバイと1度の地球スウィングバイを経て火星に向かう軌道に乗る予定であった。スウィングバイ時に，月の裏側の写真を撮っているが，これも米ソ以外では初めてのものとなった。しかしながら，燃料バルブの不調により火星に到着できる予定の軌道に乗ることができなかった。軌道計画グループは不眠不休で再度軌道設計をやりなおすことにより，2度の地球スウィングバイを追加することで火星に到達できる軌道計画を捻出した。そのため，火星到着は5年遅れて2004年になった。しかし，長期間の宇宙航行の間に通信機能が劣化し，大部分が使用不能となった。1ビット通信にて「のぞみ」の状態を監視するも，さらに電源系統にも異常が発見され，2003年に火星近くまでは到達したものの火星周回軌道に投入することをあきらめ，火星から遠ざかる方向へ燃料を噴射して運用を終了した。「のぞみ」は火星上空約1000 kmを通過したと推定される。最後に火星から遠ざかる運用を行ったのは世界的取り決めを守るためであった。すなわち，殺菌消毒を施していない機器は打ち上げ20年以内に火星に衝突する確率を1%以内に抑えること，というものである。

3. 世界のトップへ；「はやぶさ」

(1)工学実験探査機MUSES-C：2003年5月9日，内之浦よりM-V-5号機で打ち上げられた工学実験探査機MUSES-Cは打ち上げ後に「はやぶさ」と命名された。MUSES-Cとは開発コードで，MU Space Engineering Spacecraftの3番目 (C) という意味である。その任務は小惑星イトカワの表面から岩石 (または砂) のサンプルを採取し地球に持ち帰ることである，と，簡単に書いたが，それはまだ人類が一度も成し遂げたことのない超難関の任務である。「はやぶさ」は工学実験探査機であるとともに小惑星探査機でもあるのだ。

「はやぶさ」で開発・実証を目的としているのは以下の四つの工学的新技術要素である。1) イオンエンジンを主推進機関とした惑星間航行。2) 光学観測による自律的な航法と誘導方法。3) 惑星表面の標本採取技術 (タッチダウン)。4) 惑星間軌道からの大気圏への直接再突入と回収。

これらのどれもが，宇宙技術として難易度が高く，そして世界でまだ誰も成功していないものであ

る。これらの中のどの一つが失敗しても、小惑星のかけらを地球に持ち帰ることはできない。計画のどのステップも初めての技術を試すことになる野心的・挑戦的なミッションである；あのNASAでさえ「本当にやる気なのか？」と尻込みするような。

(2) ミッション達成度は加点方式：このようなハイリスク・ハイリターンなミッションが何故承認されたか？実際にはいろいろな方の尽力があったであろうし、運や巡り合わせがあったかもしれない。あえて言うならばミッション・サクセスの判断に加点法による評価を採用したことだろう。つまり、前述した実証技術はその一つを達成するのに一つの実証機を打ち上げてよいぐらいのものである。それを重量500 kg程度の小型実験機で全部やろうというのであるから、減点方式でやっているのは合格点を貰うのは難しい。

そこで、ある程度の成果が出たら成功ということで100点を貰い、さらなる成果は100点上乗せしていくという方法を提案した。分かりやすく表にすると表1のようになる。

表1. ミッション達成度 (100点満点)

電気推進エンジン稼働開始(3台同時は世界初)	50点
電気推進エンジンある時間(1000時間)稼働	100点
地球スウィングバイ成功(電気推進によるスウィングバイは世界初)	150点
(自律航法に成功して)イトカワとランデブー成功	200点
イトカワの科学観測成功	250点
イトカワにタッチダウンしてサンプル採取	275点
カプセルが地球に帰還、大気圏に再突入して回収	400点
イトカワのサンプル入手	500点

これはあくまで100点満点での採点である。電気推進エンジン(イオン・エンジン)が1000時間稼働すれば合格点で、その後は余剰である。途中を失敗すればその先は無い。結果的に小惑星「イトカワ」のサンプルを地球に持ち帰ることに成功したので、100点満点で500点を取ったことになる。いわば、金メダル5つというところか。

(3) 「イトカワ」着陸前後での試練：さて、結果的には500点を取ることができたが、楽々とミッションを達成したわけではない。ご存知のとおり地球へのカプセル帰還まで様々なトラブルに見舞われた。もうダメと諦めかけたことも何度もある。特に2005年11月のイトカワへのタッチダウン前後には集中してトラブルが起きた。世界で初めて小惑星へのタッチダウンを行うのであるから、起りそうなトラブルには対処法を持って臨んだのだが、それでも想定以上の故障が発生した。

ひとつめはリアクション・ホイールという姿勢制御のための回転する円盤を、X-Y-Z軸向きに計3基搭載していたのだが、そのうちの2基がタッチダウン直前に相次いで故障した。1基の故障は想定内だったが2基の故障は想定外で、リアクション・ホイールが1基になってしまっただけで姿勢制御するのは無理である。そこで精度はかなり落ちるが冗長系として用意していたガスジェットを併用して姿勢制御をおこないタッチダウンに臨んだ。

リハーサルを含め5度のイトカワ表面への降下を行い、2度のタッチダウンを決行した。タッチダウンの時(2005年11月)には「はやぶさ」は太陽を挟んで地球の反対側におり、通信には往復40分以上かかる。状況を見て判断して命令を送っても間に合わないのである。そのため降下開始の命令を送った後は「はやぶさ」の自己判断に任せることになる。地球では「はやぶさ」から送られてくるテレメトリデータを見守ることしかできない。タッチダウンの際にサンプラー・ホーンから弾丸を射出し、イトカワの表面を砕いて採取する手はずであった。2回目のタッチダウンでは予定どおりのタッ

タッチダウンを行い、「弾丸を発射せよ」の内部命令が発せられたことも確認できた。相模原の管制室はその成功に沸いた。

「はやぶさ」はタッチダウンの動作を終了してイトカワ表面から上昇して地球からのコマンドを待っている。上昇後に地球からの指令で詳細なタッチダウンの動作情報が送信されてきた。そこには目を疑うような情報があった。「弾丸発射」の命令は発せられたが、火工品(火薬)に点火したという記録がなかったのである。何らかの安全措置が作動する条件文が紛れ込んでいたらしい。残念ながらサンプル採取機構が思惑通り動作したという確認はできなかったが、タッチダウンの際に舞い上がった小惑星イトカワの砂埃がカプセル内に捕獲されている可能性はかなり高いという判断のもと地球への帰還運用が続行された。

その落胆も冷めやらぬうちに、今度は姿勢制御用ガスジェットの配管からガスが漏れて、その勢いで「はやぶさ」が姿勢を崩し始めたのだ。タッチダウンの衝撃か何かが原因でダメージを受けたと推察された。急遽、配管のバルブをすべて閉めて対応したが、2005年12月9日、姿勢を崩して地球との通信が途絶し、「はやぶさ」は行方不明となった。

(4) あきらめない! : 「はやぶさ」との通信が途絶えたまま新しい年になった。通信ができなければ地球から指示も出せないし、いったい「はやぶさ」に何が起きているのかさえも分からない。致命的である。過去に消息を絶った惑星探査機が見つかった例はない。誰もがもうこのミッションは終わりだと思うのが当然の状態だった。上層部では運用打ち切りの話も出ていたという。ところが「はやぶさ」チームのメンバーは諦めず、毎日受信アンテナを「はやぶさ」の飛行しているであろう方向に向けて電波を送り、周波数を変えながら通信の再開を根気よく待ち続けた。これは川口プロジェクトマネージャーにより「1年粘れば60~70%の確率で救出できる」という具体的な可能性の数値が示されたことが大きい。メンバーそれぞれが「はやぶさ」のゴールは地球に還ることであるという、揺るぎない高い目標を共有していたからでもある。

実は「はやぶさ」にはそんな場合でも時間をかけて姿勢が安定するように設計されていた。非常に受動的ではあるがオイラーの法則に従って「はやぶさ」はやがてZ軸(お椀型のハイ・ゲインアンテナが+Zの方向)周りに緩やかに自転するようになるのだ。つまり太陽電池パドルを風車のように回転させる姿勢だ。この状態になっていれば、今はアンテナが地球の方を向いてないとしても、太陽周りの軌道運動をするうちにいずれ(それは来週か一年後かわからないが)太陽電池パドルに太陽光が当たりかつアンテナが地球の方向を向くタイミングが来るはずである。川口プロマネはそれを具体的な数値として示すことでチームの士気を鼓舞し、上層部に運用続行を承諾させたのだ。予想通り、約7週間後(これはかなり運がいい場合であった)に長野県白田の64 m深宇宙アンテナが「はやぶさ」のかすかな電波をキャッチした。捕まえてしまえば時間さえかければ通信復旧はたいしたことではない。

しかし、重要な問題があった。見失ってから再補足までの7週間の間に地球へと旅立つタイミングを逃してしまったのだ。地球は太陽の周りを一年で回っているが、イトカワ(「はやぶさ」もその時はイトカワと同じ軌道)は太陽の周りを約1年半で回っている。効率よく地球に戻ってくるには地球と「はやぶさ」はある位置関係を満たさなければならず、その機会は3年に1度しかない。タイミングを逃したら次の好機は3年後ということである。図らずも「はやぶさ」の地球帰還は2007年から

2010年に変更された。機体の耐用年数はミッション期間の4年ということでギリギリの設計しかしていない。3年間のミッション延長に耐えられるかどうかは賭けである。

姿勢制御用ガスは噴き出して無くなってしまったので、チームは「はやぶさ」の主推進を担うイオンエンジンの燃料であるXe（キセノン又はゼノン）ガスを生ガスのまま噴出することで姿勢制御をする方法を考え出した。そして新しい姿勢制御方法のプログラムを組んで送信し「はやぶさ」に教え込んだ。幸いなことにXeはかなり余分に搭載していた。それでもXe消費を抑えるために、太陽光の輻射圧を利用して姿勢を制御する方法も編み出した。太陽から遠いところを飛行するときは発電量が少ないので極力省エネに努めた。そして2007年4月、なお3年かかる長い復路についた。

復路でも苦難は襲いかかった。地球帰還を目前にした2009年11月、耐用年数を過ぎたイオンエンジンは4基とも十分な推進力が出せなくなってしまった。エンジンの中和器と呼ばれる部分が長い時間電子に叩かれ続けてヘタってしまったのだ。川口プロジェクトマネージャーも「もはやこれまで」と思ったその時、イオンエンジン開発運用責任者の國中教授から提案があった。「ミッションの初期に不調になったためほとんど使用していないAエンジンの中和器と、中和器はヘタっているが十分動くBエンジンを組み合わせたら必要な推力が出せるかもしれない。」

2つのエンジンの生きている部分を組み合わせて使うニコイチ運転である。國中教授は万が一のために2つのエンジンを繋いでクロス運転できるような回路を仕込んでおいたのだ。クロス運転について思いついたのは設計が進んでしまった後だったので、衛星重量に影響を与えない程度の変更（ダイオード1個）で済ます対処を施した。あまりにも小さな部品の追加だったので川口プロマネにも特に報告をしていなかったという。軌道上での試験運転で地球帰還に必要な推進力が得られることが分かり、満身創痍の機体ながら地球に向けて再び飛行を開始し、2010年6月の地球帰還に至る。

(5) あり得ないぐらい正確な地球帰還：2010年6月13日22時51分、「はやぶさ」が大気圏に突入、23時にはビーコン信号により地球への帰還が確認された。いや、正確には小惑星のかけらの入っている可能性のあるカプセルを地表（南オーストラリア州のウーメラ砂漠）に送り届け、「はやぶさ」自身は地球の大気圏内で燃え尽きてしまった。ビーコン信号は地表に落ちるカプセルが自分の位置を知らせるために「はやぶさ」自身が燃え尽きた後に放ったものである（カプセルは大気突入の際のショックでパラシュートを開傘しその後ビーコン信号を発する）。

カプセルは大気圏突入の約3時間前に「はやぶさ」から分離され、約7万kmを誘導制御なしで目標地点まで弾道飛行をした。その日、オーストラリアでは午前中は曇っていたのだが午後から晴れ渡り、大気圏突入時刻はほぼ無風という好条件であった。オーストラリアに渡った回収部隊は、万が一信号をキャッチできなかったときに備えて、着陸予想エリアの端から金属探知機を持った隊員が10m間隔で一列に並んで前進しながらカプセルを探するという訓練もしていたという。

そんな心配をよそにカプセルは落下予想地点から数100mという地点で発見されている（13日の夜24時の記者会見時にはヘリコプターで現場に行った隊員より目視確認の報告が届いている）。落下予想の誤差楕円は20km×200kmぐらいだったはずだ。無風のためパラシュートがそれほど流されなかったことも大きい。

(6) 「イトカワ」の欠片は我らが手に：帰還から約5カ月後の11月16日、「はやぶさ」サンプルカ

プセルの内部を慎重に精査していたキュレーション・チームからプレスリリースが発表された。回収された微粒子のほとんどがイトカワ由来のものと結論されたのだ。その数約1500個。川口プロマネからは喜びのあまり「1500個は多すぎる」とジョークが飛び出したほどだ(※)。

月以外の天体に行って着陸・離陸して地球に戻ってきた、すなわち惑星間空間を往復したのはこの「はやぶさ」が世界初である。さらに、「はやぶさ」は月以外の天体の物質を汚染なく高温にさらすこともなく採取して地球に持ち帰ってきた初めての探査機である。米露欧州もなしえなかった快挙である。もう一度言う、人類初の快挙である。

(※) これらの粒子は12月以降、初期分析に回され日本全国の科学者が分析を行っている。その中間報告として2011年3月、毎年アメリカのヒューストンで開催される月惑星科学会議で1セッションを独占して発表された。この会議はアポロ11号の持ち帰った月の石の分析結果を報告する会議としてスタートした由緒正しい会議である。500人収容の会議場を満席にしてなお立ち見が出るほど盛況だったと聞いている。国内では5月22日より開催される日本地球惑星科学連合2011大会@幕張メッセ国際会議場で報告される予定である。

4. 次世代へ；「はやぶさ2」計画スタート

最後に未来の展望を記しておく。小惑星の探査はこれで終わったわけではない。小惑星のスペクトル・タイプは無数にあり、地上で手にできる隕石との対応も想像の域を出ない。「はやぶさ」によって今までスペクトル分析からS型(石質)小惑星に分類されていたイトカワが、隕石の分類で普通コンドライトの鉄の多いカンラン石を含むL型とほぼ同じ組成であることが確認されたのみである。今後もシリーズ的に小惑星探査が行われることが強く望まれている。

2011年度予算に「はやぶさ」後継機(仮に「はやぶさ2」と呼んでいる)の費用が組み入れられた。この原稿執筆時にはプロジェクト移行を目指して次世代のチームが鋭意検討中である。「はやぶさ2」では炭素質コンドライト隕石の故郷と思われるC型小惑星に有機物と水・含水鉱物を探しに行く予定である。この原稿が人目に触れる頃には正式なプロジェクトとして発足していることと思う。3月11日の大震災により大変な状態での年度初めとなったが、日本の皆さんに夢と希望を示すことができるよう、気を引き締めて取り組みたいと考えている。