

# 講演

ソラシティホール(W)

# 「社会課題の解決に資する地球観測衛星技術」

第一衛星利用ミッション本部 衛星利用推進センター

松浦 直人

## 1. はじめに

JAXA では地球環境問題への認識の高まりを受けて、1990年代から本格的に地球観測衛星を開発するとともに、国際枠組みへの協力と貢献を行ってきた。これまで、技術的に世界最高レベルもしくは世界で唯一の地球観測衛星を打ち上げることができ、衛星計画を日米欧を中心とした国際協働で実現してきた。衛星開発に際しては、国内外のユーザ要求を踏まえ、観測対象を機器仕様に設計し、その成果である衛星データの校正検証を行い、国際的に信頼される品質のデータを提供している。

さらに、これらの衛星データを活用し、省庁、研究機関、大学と協力して災害、気象・気候、環境、農業、漁業等の分野へのデータ利用を進めており、社会課題解決のための取り組みを行ってきた。

本稿では、地球観測衛星技術の現状と社会課題解決のための取り組み状況を紹介する。

## 2. 地球観測衛星技術

JAXA の第3期中期計画中に打ち上げを予定している人工衛星もしくはミッション機器は、陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)、全球降水観測計画/二周波降水レーダ(GPM/DPR)、雲エアロゾル放射ミッション/雲プロファイリングレーダ(EarthCARE/CPR)、気候変動観測衛星(GCOM-C)、温室効果ガス観測技術衛星2号(GOSAT-2)であり、いずれも世界で唯一もしくは世界最高レベルの衛星技術である。<sup>[1]</sup>

### 2.1 ALOS2

ALOS-2では、「だいち」のPALSAR(フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ)と比べ、新たな観測モードで1~3mの分解能を実現するとともに、観測可能領域を約3倍とすることで観測頻度を向上させている。

### 2.2 GPM/DPR

現在、NASAと共同開発した熱帯降雨観測衛星(TRMM)で、熱帯地方の降雨量の観測を行っているが、GPMはDPRとマイクロ波放射計を搭載した主衛星と、マイクロ波放射計を搭載した副衛星群とからなる計画であり、観測範囲を高緯度まで広げ、より高精度、高頻度の降水観測を目指している。

### 2.3 EarthCARE

EarthCAREは、日本と欧州が協力して開発を進める地球観測衛星であり、搭載する4つのセンサ(CPR、大気ライダー、多波長イメージャー、広帯域放射収支計)により、雲、エアロゾルの全地球的な観測を行い、気候変動予測の精度向上に貢献する。

### 2.4 GCOM-C

GCOM-Cは、大気中に浮遊して日射を和らげているエアロゾルや雲、二酸化炭素を吸収する陸上植物や海洋プランクトンなどの分布を長期間にわたり観測し、地球の熱の出入りや温暖化によって変化していく生態系の分布を把握することで、将来の気候変動を予測する数値モデルの改良に役立てる。

### 2.5 GOSAT2

GOSAT2は、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)で有用性を認められた1,000km四方での温室効果ガス濃度算出、その亜大陸レベルでの吸収排出量推定への適用を基に、実用精度までの向上、濃度分布、正味吸収排出量、温暖化対策(排出量把握)に向けての新規知見の習得、新規追加機能の確認、評価を行う予定である。

## 3. 衛星データの利用拡大例

### 3.1 降水予測精度の向上

気象庁では、天気予報や注意報・警報発表の

ため数値予報システムを運用しており、その初期値の作成に第一期水循環変動観測衛星「しずく」のマイクロ波放射計（AMSR2）が活用され、降水予測精度が向上している。[2]

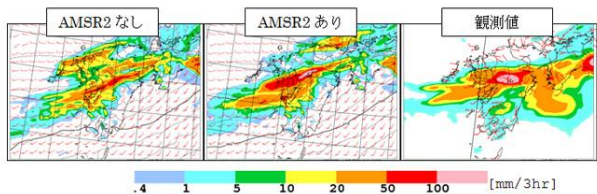


図1 2012年7月11日9時-21時間予報における前3時間降水量予測分布：気象庁

### 3.2 土砂災害の予見

大規模崩壊前兆現象検出として、2011年の台風12号による紀伊半島における大規模崩壊箇所及びその周辺を対象に陸域観測技術衛星「だいち」のデータを用いた崩壊予兆検出の検証を実施し、崩壊箇所の変化を確認した。

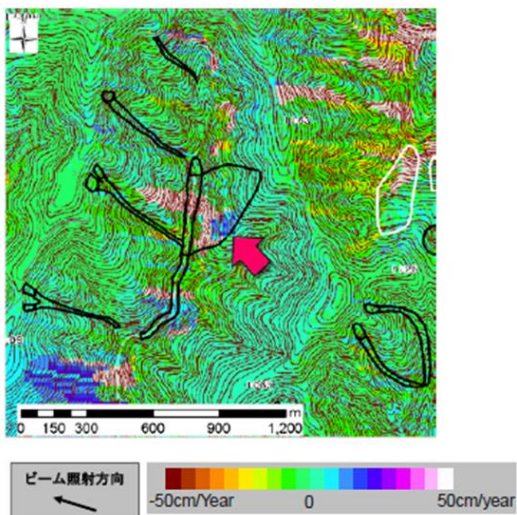


図2 台風12号による土砂災害箇所：平成24年度第3回土砂WG国土技術政策総合研究所資料より

### 4. 社会課題解決に向けた取り組み

最近激しさを増している自然災害に対応するため、JAXAの持つ宇宙・航空技術を結集し、大規模災害において機能する災害対応システムの検討を始めている。

これまでは、災害時の人工衛星による観測、通信、測位や航空機の運航管理等、宇宙・航空の技術を個別に用いた災害対応をベストエフォートベースで行ってきた。これからは、指定行政機関等と連携した災害対応が行なえるように体制を整備するとともに、航空宇宙機器（航空機、無人機、衛星）の統合的な運用による、情

報収集・共有、救援、復旧・復興を効率的に支援する災害対応統合運用システムを検討している。



図3 災害対応統合運用システム

また、衛星データを社会課題を解決するためのソリューションとするために、JAXAの衛星のみならず、海外衛星や現場データを活用するとともに、研究機関や民間企業等と協力してアプリケーションを作成し、ソリューションが提供できる体制を整備しつつある。さらに、関係機関と協力し、グローバルな地球観測データを用いて地球環境を観測、予測、評価することで、地球環境情報に関する新たな事業が創出できる環境を整備することを検討する。

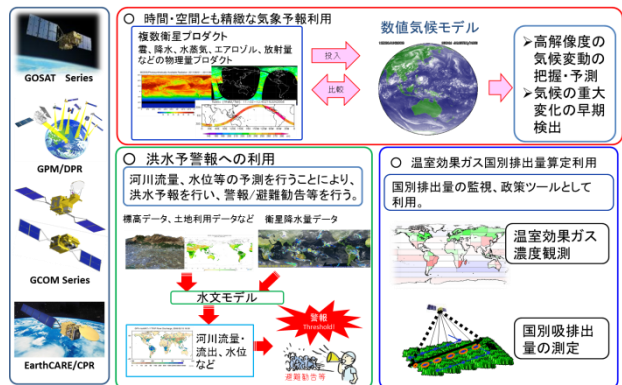


図4 サービスソリューション事例（環境）

### 参考文献

[1] JAXA 人工衛星  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/index_j.html)  
 [2] JAXA 第一期水循環変動観測衛星「しずく」の気象庁での利用について  
[http://www.jaxa.jp/press/2013/09/20130912\\_shizuku\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2013/09/20130912_shizuku_j.html)

# 地球観測の能力向上への貢献

## ～コンタミネーションの管理手法に関する研究～

研究開発本部 電子部品・デバイス・材料グループ

宮崎 英治

### 1. はじめに

コンタミネーション (Contamination) とは、「汚染」を意味する語である。人工衛星上で、特に清浄に保っておきたい部位に汚染物質が付着して、悪影響が顕在化する現象全般が、コンタミネーションと呼ばれている。狭義には、人工衛星で使用されている材料から放出された気体 (アウトガス) が、他の部位に付着し、影響が顕在化することを指す。人工衛星が飛行する宇宙空間は、真空状態である。真空中では、材料からの気体放出が盛んになることは良く知られている現象であり、地上の真空装置などでも発生し、時に問題となる。

大気中で、冷えているガラスや窓ガラスの表面が曇る現象を想像すると理解の助けになるのではないだろうか。大気中では、空気に含まれる水蒸気 (気体) が冷えているガラス表面に接触すると、凝縮して水滴 (液体) になり、曇りガラスになることは御存知のとおり。このような現象は、水蒸気に限らず、どんな気体でも温度によって生じる。すなわち、衛星内で放出されたガスが、冷えている部位に付着して、曇りガラスのようになってしまうのである。

さて、地球観測に用いられる衛星搭載観測装置の検出器 (光の情報を電気信号に変換する素子) や、反射鏡、レンズなどで、コンタミネーションの影響が生じると、観測性能に影響を及ぼすことになる。さらに、一旦打ち上げられた人工衛星には、アクセスすることができないため、洗浄や交換などの補修が困難である。このような、人工衛星特有の事情を考慮しなければならない。これを踏まえて、観測性能の向上と長寿命化の実現に資するため、コンタミネーション管理を行う必要がある。しかしながら、その取扱いは技術的な難しさもあり、現在もなお

研究途上であると言わざるを得ない。

そこで、本発表では、まずコンタミネーションの影響について概説し、管理手法に関する研究、特に、材料のコンタミネーション源としての振る舞いを評価する方法と、影響を定量的に評価する方法について述べる。また、本研究の今後についても触れる。

### 2. コンタミネーションの影響

#### 2.1 実例

これまでに、コンタミネーションの影響が顕在化したと考えられている実例が報告されている<sup>[1]</sup>。ここでは、代表例として、「カッシーニ」での事例を示す。

「カッシーニ」は、NASA が 1997 年に打ち上げた土星探査機である。図 1 は、カッシーニに搭載されたカメラでの観測画像である。画像下の数字は、「年/当該年の通算日」を示している。すなわち、左が 2001 年の 87 日目、右が同年の 150 日目のものである。両画像は、同一の星を、同一の観測カメラで異なる時期に撮影したもので、右の画像は、星の像の周辺に「にじみ」が生じていることが認められる。これは、コンタミネーションの影響によるものであると、結論付けられている。

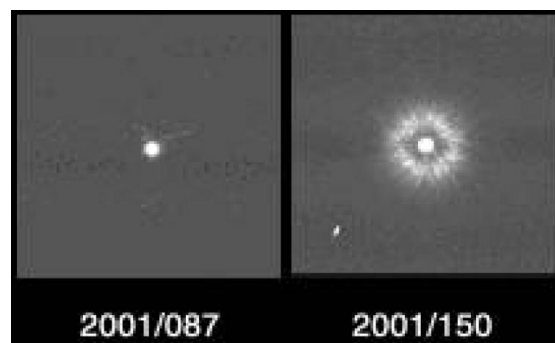


図1 「カッシーニ」光学観測画像の品質低下例<sup>[1]</sup>

この他にも、コンタミネーションが原因と考えられる観測性能の低下事例の報告がある<sup>[2-3]</sup>。

## 2.2 分子状コンタミネーションの振る舞い

気体によるコンタミネーションは、「分子状コンタミネーション」と呼ばれる。これは、固体による「粒子状コンタミネーション」と区別するためである。ここでは、分子状コンタミネーションに焦点を当てて、その振る舞いについて解説する。

まず、人工衛星が飛行する軌道上は、先述のように真空であるため、分子状コンタミネーションの原因となるアウトガスが発生しやすい環境であることが最大の要因である。分子状コンタミネーション物質が発生すると、真空の空間を漂って、別の部位あるいは宇宙空間に移動する。移動した先に人工衛星の構成物があると、そこに接触し、凝縮してそこにとどまるか、あるいは、再度放出される。温度が低い部位では、凝縮することになり、一旦凝縮した部位に次の分子がやってくると、さらに凝縮して付着量を増していくことになる。

光学観測の検出器は、冷却されているケースも多い。その場合は、検出器の入光部でコンタミネーション物質が凝縮し、影響を及ぼすことになってしまうのである。

さらに、コンタミネーションの影響は、軌道上で変化してしまうことも把握されている<sup>[4-5]</sup>。太陽光からの紫外線、低高度での地球大気の残存成分や放射線との相互作用によって、コンタミネーション物質が変質し、その結果、影響の振る舞いが増えるのである。

## 3. コンタミネーション管理

前項で述べたように、コンタミネーションは観測性能に影響を及ぼすことから、地球観測衛星や天文観測衛星の開発において、コンタミネーション管理は重要なものとなる。コンタミネーション管理手法には様々あるが、ここでは、使用する材料の「アウトガスの出易さ」を調べる試験方法と、「影響の度合い」を調べる方法について説明する。

### 3.1 材料スクリーニング試験

まず、設計段階において、使用候補の材料が



図2 JAXAのアウトガス測定装置

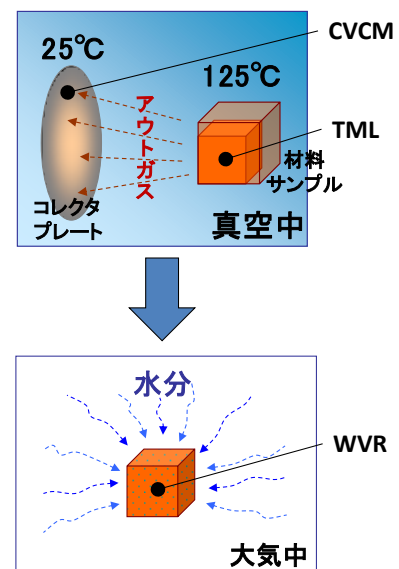


図3 アウトガス測定概念図

使ってもよいものかどうか、大まかに判断するための試験を行う。これにより、「使用不可材料」をふるい落とすことができるため、「ふるいにかける」という意味がある「スクリーニング」が可能となる。この材料スクリーニング試験は、「アウトガス測定試験」と呼ばれる。米国試験規格 ASTM E 595<sup>[6]</sup>や欧州の宇宙機試験規格 ECSS-Q-ST-70-02<sup>[7]</sup>に規定されており、JAXAでは、ASTM E 595 に則った試験を行う装置(図2)を保有し、試験を実施している。アウトガス測定試験は、材料サンプルを真空下で 125°C に加熱し、24 時間での変化を定量的に把握するものである。図3に概念図を示す。アウトガス測定試験によって得られる指標は、「TML」(Total Mass Loss: 質量損失比)、「CVCM」(Collected

Volatile Condensable Material:再凝縮物質質量比)、  
「WVR」(Water Vapor Regained:再吸水量比)で  
ある。

TMLは、試験前後での材料サンプルの質量減少の程度を示すもので、材料サンプルの初期質量に対して何%軽くなったか、を表す。つまり、質量減少分がアウトガスの放出量であると考え、TMLが多い材料は、アウトガスが多い材料と判断される。スクリーニング指針に基づき、TMLが1.0%以上の材料は「使用不適」と判定される。CVCMは、加熱された材料サンプルの対面に設置された25℃の「コレクタプレート」の質量増加の程度を示すもので、材料サンプルの初期質量に対するコレクタプレートの質量増加の比率をとり、%で表す。コレクタプレートの質量増加は、材料サンプルから放出されたアウトガスのうち、25℃の面に凝縮した分に相当する。したがって、この数値が高いと、他面に凝縮してしまいコンタミネーションの影響を及ぼし得る成分が多く含まれている、とみなされる。スクリーニング指針では、CVCMが0.1%以上の材料は「使用不適」と判定される。WVRは、測定されたTML値のうち、水に相当する分を推定する値である。WVRに対するスクリーニング指針は設定されていない。

JAXAで取得したアウトガスデータは、「JAXA材料データベース」で公開している。

([http://matdb.jaxa.jp/main\\_j.html](http://matdb.jaxa.jp/main_j.html))

### 3.2 長期的傾向把握試験

前項の「スクリーニング試験」で使用可能と判定された材料であったとしても、軌道上における使用形態(場所や温度、使用量)によって、設計されたミッション期間の最後まで、影響が顕在化しないかどうか、確認する必要が生じる。この場合、使用予定材料が、コンタミネーション源としてどのような長期的特性を持つのか、把握することが必要となる。長期的傾向を把握する試験は、「アウトガスレート測定試験」と呼ばれ、米国試験規格 ASTM E 1559<sup>[8]</sup>や欧州の宇宙機試験規格 ECSS-Q-TM-70-52A<sup>[9]</sup>に規定されている。JAXAでは、平成22年度に測定装置(図4)を新規導入し、試験を開始した。

アウトガスレート測定試験は、材料サンプルを真空下で加熱し、アウトガスの放出/付着特



図4 JAXAのアウトガスレート測定装置

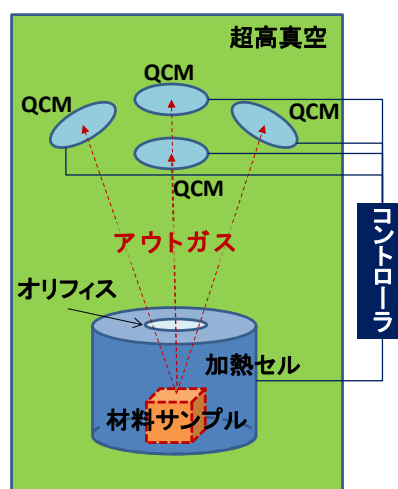


図5 アウトガスレート測定の概念図

性を連続的、かつ定量的に測定する試験である。図5に装置の概念図を示す。材料サンプルは加熱セルに収納し、試験温度(設定可能範囲:室温~125℃)に保持する。材料からのアウトガスは、加熱セルのオリフィスを通り、温度制御された4個のQCM(Quartz Crystal Microbalance:水晶振動子微小天秤)に到達する。各QCMの温度は独立して制御され、-193℃~125℃の任意温度に設定することができる。4個のQCMに入射したアウトガスは、QCM温度に応じて凝縮し、その量がリアルタイムで出力される。これにより、付着量の時間変化が計測できる。この試験では、-193℃の極低温QCMには、放出されたガスがすべて凝縮するとみなし、このQCMの出力値から、材料サンプルの全放出量(TMLに相当)を推定することができる。

### 3.3 光学的影響測定試験

3.1 項と 3.2 項では、コンタミネーションの出入り、付着し易さを調べる試験について述べた。一方で、衛星搭載観測機器及び人工衛星システムの設計者は、付着したコンタミネーション物質がどのような影響を及ぼすか、ということに関心がある。もし、大量に付着したとしても影響が生じなければ問題ないし、反面、付着が少量だとしても影響が大きければ重大な問題となる。従って、コンタミネーション物質がどのような光学的影響を及ぼすのか、知る必要がある。しかしながら、従来、そのようなデータはあまり公開されておらず、入手できなかった。そこで、JAXA では、コンタミネーション物質の光学的影響データを取得する技術を確立することを目指し、平成 23 年度から研究を開始し、測定装置の開発を行ってきた。本年度より測定を開始し、今後、コンタミネーション物質ごとに、光の波長に応じた吸収係数（コンタミネーション物質の付着厚さと、光の吸収率の関係を表す値）のデータベース構築を進めていく計画である。

### 4. 今後の展開

上述のとおり、試験を通じて材料データを取得する活動を進めている。一方で、軌道上の人工衛星におけるコンタミネーション付着量や影響を予測する解析ツールも重要である。JAXA では、コンタミネーション解析ソフトウェアの開発を進めているところである。このソフトウェアは「外部汚染環境解析ソフトウェア『J-SPICE』」（Japanese Spacecraft Induced Contamination Environment Analysis Software）といい、宇宙機形状、温度分布、使用材料のアウトガス特性、アウトガスの付着温度特性等をインプットすることで、コンタミネーションの影響が問題となる面への付着量を予測するものである。現在、2014 年度以降の正式版リリースを目指して、準備を進めているところである。

また、汚染解析ソフトウェアを活用するためには、解析に入力するデータ、すなわち、材料のアウトガス特性や、光学的影響のデータが必要不可欠である。データベース構築に向けた検討を、ソフトウェア開発とともに進めている。

### 5. まとめ

本発表では、地球観測衛星などの性能向上に貢献する技術である、コンタミネーション管理手法に関する研究について概説した。特に、材料のアウトガス特性や、光学的影響測定の研究について、詳しく述べた。

コンタミネーション関連技術は、多岐にわたる分野の複合領域の技術である。従って、その発展のためには、様々な分野の専門家と交流を深め、知見を拝借する必要がある。今後も多くの皆様のご協力をいただければ幸甚である。

### 参考文献

- [1] Haemmerle V. R. and Gerhard J. H., AIAA paper, AIAA-2006-5834, 2006
- [2] 浦山文隆ほか、日本航空宇宙学会論文集、56 巻、543-550 (2008)
- [3] Urayama F., et al, Proceedings of International Space Conference, Protection of Materials and Structures from Space Environment, June 23 - 17, 2011, Okinawa, Japan, 2011, (Eds. J. Cleiman, M. Tagawa & Y. Kimoto), Springer, 235-242, 2012.
- [4] Arnold G. S. and Luey K., Proceedings of SPIE, 2864, 269-285, 1996
- [5] 宮崎英治ほか、第 53 回宇宙科学技術連合講演会講演集、2E08、2009
- [6] ASTM Standard E 595-07 Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment, ASTM International, 2007
- [7] ECSS-Q-ST-70-02C Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials, European Space Agency, 2008
- [8] ASTM Standard E 1559-09 Standard Test Method for Contamination Outgassing Characteristics of Spacecraft Materials, ASTM International, 2009
- [9] ECSS-Q-TM-70-52A Space product assurance Kinetic outgassing of materials for space, ESA-ESTEC Requirement and Standards Division, 2011

# 月・惑星探査の技術開発と成果利用

月惑星探査プログラムグループ  
研究開発室 星野 健、増田 宏一  
SE 推進室 大嶽 久志

## 1. はじめに

世界の 14 宇宙機関が参加する国際宇宙探査協働グループ (ISECG : International Space Exploration Coordination Group) では、国際有人宇宙探査に関わる今後 25 年程度の道筋の議論を進めており、国際宇宙探査ロードマップ (GER : Global Exploration Roadmap) の第二版<sup>[1]</sup>を 2013 年 8 月に公開した。この中では、最終的には火星の有人探査を目指しつつ、国際宇宙ステーション(ISS)の次の有人探査のステップとして月周辺ミッションや小惑星ミッションを位置付けるとともに、ISS を新たな探査技術の実証の場所として用いることや、無人探査による準備活動を実施する計画が述べられている。

月・惑星探査プログラムグループでは、上記の GER 等の国際的な動向と、これまでの我が国の宇宙探査へのアプローチを踏まえて、宇宙探査の長期的な方向性として、「世界を先導する未踏峰挑戦プログラム」と「人類の活動領域の拡大プログラム」の二つのプログラムを柱として、小惑星探査機「はやぶさ 2」の開発や、月着陸探査機「SELENE-2」の検討を進めている。本稿では、まず、現在進行中の探査プロジェクトや、技術開発について簡単に紹介する。

これら技術開発と並び、宇宙探査の成果の社会還元も重要な視点である。かつては、宇宙探査（特に有人宇宙探査）は、国威発揚といった側面が大きかった。しかし、近年、宇宙探査の成果が、具体的に、どのように社会に還元・利用されているかが重要な観点となっている。これは、日本国内だけではなく、国際的にも同様である。ISECG でも宇宙探査の意義に関する報告書を取りまとめ、2013 年 9 月に公開している。この報告書「Benefits Stemming from Space Exploration (宇宙探査による利益)」<sup>[2]</sup> は、宇宙探査が人類にもたらす利益 (Benefit) をとして、

- (1) イノベーション
- (2) 文化とインスピレーション

(3) 地球規模課題解決への新たな手段に分類し、具体的に例示している。

このような状況において、宇宙探査の成果を社会に還元するには、どのような取り組みが必要であろうか。ここでは、宇宙探査の直接的かつ最大の成果である取得したデータについて考えてみる。従来は、探査機で得られたデータは、科学者あるいはエンジニアが科学技術分野の研究に使用するという使い方がほとんどであった。しかし、近年は、科学技術分野だけでなく、教育への利用や、当初想定していない商用利用にもつながる案件が出てきている。これをさらに進めるには、誰もが利用しやすい仕組みを整えることが重要と言える。

そこで本稿では、探査機で得られたデータ利用の現状や、さらなる普及に向けた我々の取り組みについて、月周回探査機「かぐや」のデータの例をとって詳しく紹介する。

## 2. 月・惑星探査プロジェクトと技術開発

### 2.1. はやぶさ 2

「はやぶさ」の経験を活かし、より確実に太陽系天体往復探査が行なえるよう技術の獲得・レベルアップを目指し、「はやぶさ 2」の開発を進めている。「はやぶさ 2」は、「はやぶさ」と同様に小惑星からの物質を地球に持ち帰るミッションであるが、目的の小惑星のタイプが異なる。「はやぶさ」が探査したイトカワは S 型と呼ばれる岩石質の小惑星であったが、「はやぶさ 2」は、1999 JU3 という C 型の小惑星を目指している。C 型小惑星は有機物や水がより多く含まれていると考えられている。その表面の物質は太陽光などによって変質している可能性があるため、「はやぶさ 2」では地下の物質を採取することを目指し、衝突装置の技術を開発している。これにより、地下物質を表面に露出させ採取することによって、変質の度合いの少ない物質を地球に持ち帰ることを試みる予定である。



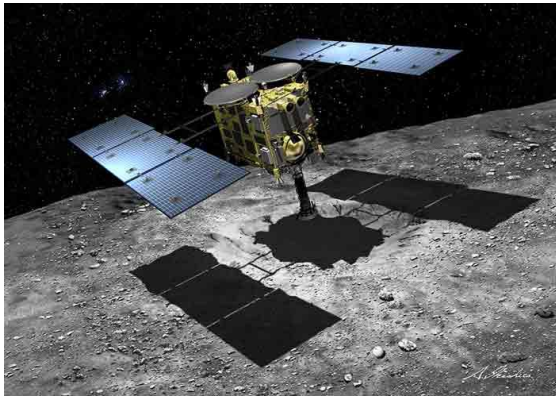


図1 はやぶさ2

## 2.2. SELENE-2

月周回探査機「かぐや」(SELENE:セレーネ)に続く月探査計画として、月着陸探査機(SELENE-2)の検討を行っている。後で紹介するように「かぐや」による月周回軌道からの詳しい観測によって、新しいさまざまな知見が得られた。これに引き続き、月面に着陸して移動ロボット(月探査ローバ)を使った地質探査を実施したり、地震(月震)を利用した地震波の伝わり方から月の内部の構造等を調べたりする予定である。

また、月探査に限らず、火星やその他の天体の探査にも必須な、安全で高精度な着陸技術、天体表面を広く探査する移動技術、月の夜のような厳しい環境に耐え得る、越夜技術などの技術開発を進めている。

着陸技術は、すでにアポロ等で実施されているが、「降りられるところに降りる」技術であり、今後の探査には、「降りたいところへ安全・確実・高精度に着陸する」技術の開発が必要である。天体への着陸技術は、今後宇宙探査を進めるうえでの「必修科目」であり、早期の獲得と実証が必要であると考えられる。



図2 SELENE-2 着陸機の想像図



図3 月探査ローバの試験モデル

## 3. 月・惑星探査の成果利用

### 3.1. 探査で得られるデータについて

まず、ここでは、探査機で得られた観測データがどのように処理されるかについて簡単に述べる。

地上局へダウンリンクされた観測データパケットはID(多くの場合は観測機器に対応)ごとに分割されたレベル1データとして保管される。その後、観測条件(時刻、位置、視線方向など)等の諸情報をヘッダとして付与され、感度・幾何等の補正を施されてレベル2データとなる。

月・惑星探査の場合、レベル2データのフォーマット、格納方式はNASA 惑星探査で採用されている「Planetary Data System (PDS)」<sup>[3]</sup>が世界的な標準となっている。図4のように、基本的にディレクトリツリー構造で、データとその識別のためのラベルが格納されている。

Filename	Size	Last Modified
<a href="#">aareadme.txt</a>	2.7 kb	Mon, 21 Mar 2011 15:57:26 GMT
<a href="#">catalog/</a>		Wed, 23 Mar 2011 16:56:26 GMT
<a href="#">data/</a>		Mon, 21 Mar 2011 17:48:00 GMT
<a href="#">document/</a>		Mon, 21 Mar 2011 15:57:26 GMT
<a href="#">index/</a>		Mon, 21 Mar 2011 17:49:44 GMT
<a href="#">voldesc.cat</a>	3.7 kb	Mon, 21 Mar 2011 15:57:26 GMT

図4 PDSにアクセスした例

そのため研究者等のユーザがデータを取得しようとした際、データ構造や保管場所の規定が複雑なこともあり、データの特典・取得が困難となる場合が多く、地図上での範囲指定などのユーザインタフェースアプリケーションが別途必要とされることが多い。

### 3.2. サイエンスデータの利用

「かぐや」のレベル2データは、現在のところ、「かぐやデータアーカイブシステム」<sup>[4]</sup>から一般公開されている。本システムでは「かぐや」で取得した全球 TC 画像（地形カメラの画像）をベースマップとした、地図参照型の位置指定も可能としている（図5）。このため、利用者は月の地形上のどの位置に対してデータを取得しようとしているのかが、非常にわかりやすくなっている。また、「かぐや」の観測条件機器の特性に適したパラメータ指定による検索も可能であるため探査機高度などの条件を設定してデータを取得することも可能となっている。

データは世界各国からダウンロードされ、特にアメリカ、ドイツ、中国など月探査、あるいは探査計画の検討が活発に進められている国を中心に活用されているところである。

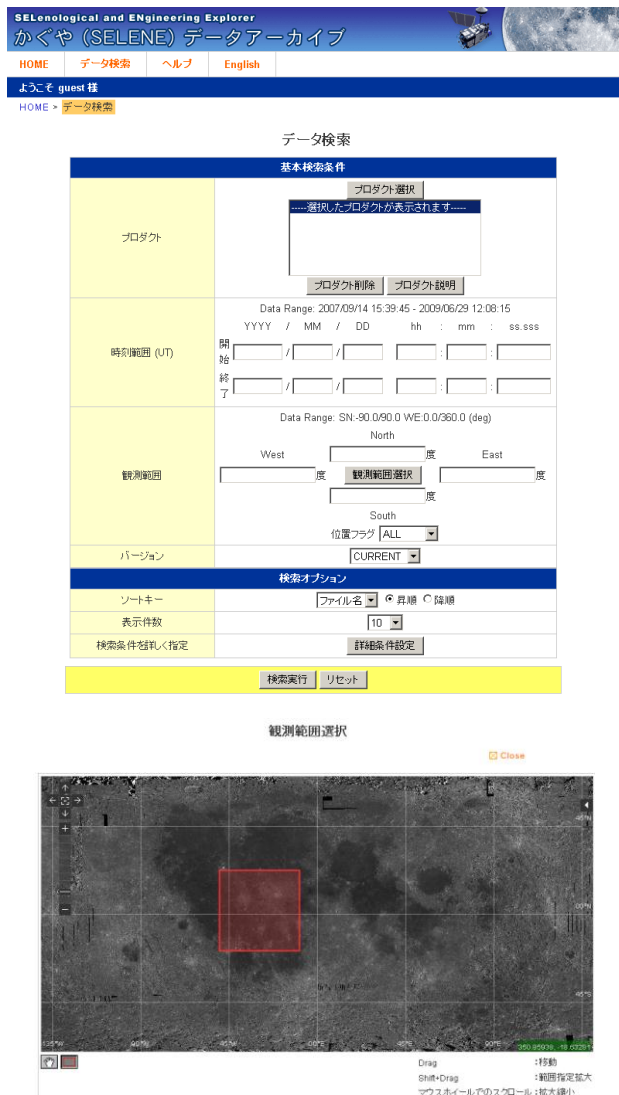


図5 かぐやデータアーカイブシステムと位置指定

これにとどまらず、さらなる利便性の向上を目指している。「かぐや」は14の観測機器による同時観測で多種多様な分野の観測データを取得しており、それらを統合させた解析研究や探査計画の検討が可能という点で、世界の月探査データにおいても類を見ないメリットを有している。その特徴を最大限活かすことができるよう、これまでは個々の観測機器のレベル2データ配信を主眼としていた、前述の「かぐやデータアーカイブシステム」を維持しつつ、観測結果を立体的な月面図に張り付けたり、複数の観測機器の観測結果を重ねて分析したりできる新たな統合解析用のデータ配信システムの整備に着手している（平成27年度より公開予定）。

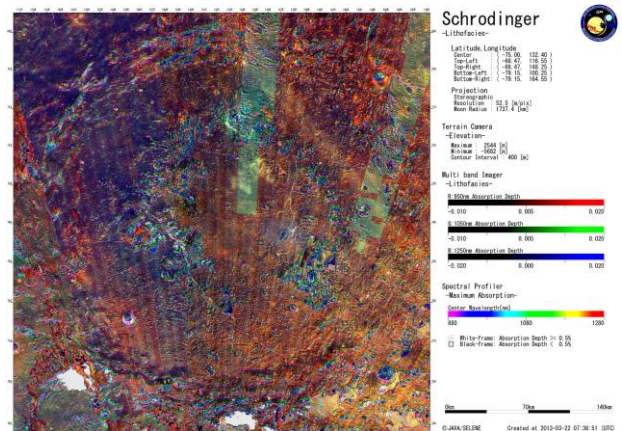


図7 統合解析用データのイメージ

### 3.3. 一般向け成果普及

前述のサイエンスデータの公開のみでなく、日本国内の一般の利用者向けに、「かぐや」で得られた成果をよりわかりやすく、使いやすい形で提供するため、「かぐや3D ムーンナビ」<sup>[5]</sup>を公開している。

かぐや3D ムーンナビでは、レーザ高度計 (LALT)により取得されたデータから、月面の標高情報を3次元化して月面上の任意の場所をナビゲートできるとともに、各種観測機器から得られた月重力分布などの各種データを色分けにより視覚化するなど、一般利用者の使い易さを考慮している。

現在のところ、PCからの利用に限定されているが、昨今のタブレット型端末の普及により、手軽にインターネットへのアクセスが可能となってきていることから、かぐや3D ムーンナビのタブレット型端末での利用も視野に入れ、検討を進めている。

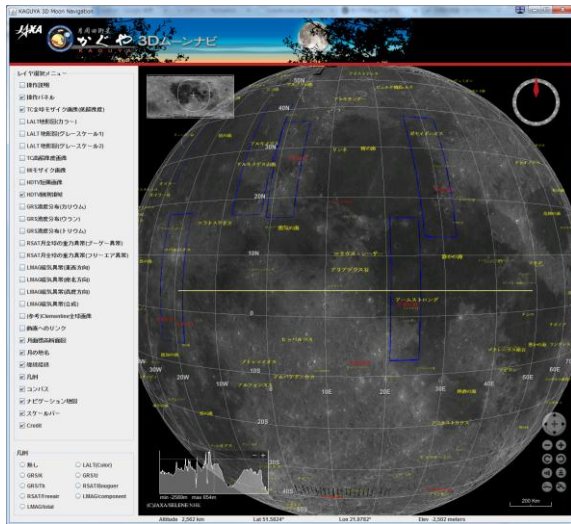


図6 かぐや 3D ムーンナビ

「かぐや」では、学術的な観測データだけではなく、高精細映像取得システム(HDTV)による月面上空からの非常に精細で迫力のある映像を取得している。これらは、すでに JAXA 動画<sup>[6]</sup>などで公開されているが、公開映像は取得映像の一部にとどまっている。本 HD 映像をより一般の方々にも身近に楽しんでいただけるよう、すべての映像について一般公開するための準備に取り組んでいる。

### 3.4. 教育との連携

月・惑星探査プログラムグループでは、島根大学教育学部、及び北海道紋別市立紋別中学校との連携体制を築き、「かぐや」で得られた成果の教育分野での利用方法について、検討を進めている。

島根大学教育学部では、「かぐや」の成果の教育利用と、教材開発を行うにあたっての学校教育カリキュラムの分析が行われ、第 57 回 宇宙科学技術連合講演会にて、その成果<sup>[7]</sup>が発表された。

一方、紋別中学校との連携では、「かぐや」の成果を利用した教材開発を進めている。中学理科の授業で使用してその効果をみるなど、教育現場への広い展開を目指して取り組んでいる。また、3.3 項で紹介した「かぐや 3D ムーンナビ」の教育教材としての利活用についても、検討を進めている。

### 3.5. 新たな利用分野

「かぐや」の成果の利用は、学術、教育の範囲に留まらず、レーザ高度計から得られた地形データを芸術的な創作活動に利用したいとの海外からの要望を受けたり、「かぐや」が捉えた月面の様子の臨場感あふれる映像をゲームに利用したいとの制作会社からの依頼を受けたりするなど、これまでにはなかった文化的な活動領域にも広がりを見せている。

これらの利用が進むように、さらなる普及に向けた取り組み考えている。

### 4. おわりに

月・惑星探査プログラムグループは、「かぐや」の高度な技術による観測機器から得られたデータを世界中の研究者に効果的に提供することに努める一方、研究者の分析により、月に関してこれまで知り得なかった事実を数多く解明することに貢献している。さらに、学術利用の枠を越え、教育や文化的活動の中でもその利用価値を見だしつつある。

このように、日本国民に支えられた宇宙開発・探査は、未知なる宇宙を少しずつ解明し、私たち子孫の新しい世界を開拓する事業であるとともに、人類に夢と活気をもたらす活動であると考えている。

今後も、月探査を含む日本の宇宙探査計画において、国民のみなさまのご理解とご支援を承ることができれば、幸いである。

### 参考文献

- [1][2]<http://www.jspec.jaxa.jp/enterprise/international.html>
- [3]<http://pds.nasa.gov/>
- [4]<https://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html>
- [5]<http://wms.selene.darts.isas.jaxa.jp/3dmoon/>
- [6]<http://www.jaxa.jp/video/>
- [7] 高須佳奈 他、かぐやデータの教育利用と教材開発を目的とした学校教育カリキュラムに関する分析、第 57 回 宇宙科学技術連合講演会、3L05、2013

# 「きぼう」静電浮遊炉が拓く材料の新たな可能性

有人宇宙ミッション本部 宇宙環境利用センター  
田丸 晴香

## 1. はじめに

近年、レアメタルやレアアースは他物質に添加したものや物質そのものの性質が多くの高性能を示すことから、ハイブリッド車のモータ用磁石、携帯電話等のデジタル機器の電池や半導体、超伝導素材など、身の回りの幅広い機器に応用され、現代生活において不可欠な物質となっている。しかし、世界的な需要の増加や資源ナショナリズムの台頭により、価格高騰や供給不安が顕在化している。また、化石資源の枯渇が叫ばれて長く、地球温暖化などの環境問題の解決と持続的・安定的なエネルギー供給のため、今後より一層の省エネルギーや新エネルギー開発の取り組みが重要となる。

これらの課題解決の鍵となるのは、自然エネルギーや火力による発電を高効率化するタービンや蓄電池用の材料創製、レアメタルに代替する新機能材料の開発である。だが、画期的な材料研究や開発の基本となる物性値が分からない物質も多い。

国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」日本実験棟への搭載を目指し開発している静電浮遊炉を用いれば、地上で測定できていない物質の物性値が取得でき、また融液を過冷却状態から凝固させることで、通常と異なる機能を持った新材料の創製の研究が可能となる。本稿では、静電浮遊炉の概要と共に、「きぼう」への搭載に向けた地上研究・技術開発の成果を紹介したい。

## 2. 静電浮遊炉の概要

ISS の微小重力環境では、容易に物質を浮遊させることができるが、残留重力や擾乱の影響で、そのままでは熔融や観察に十分なほど位置を固定することはできない。そこで、試料を帯電させ、図1のように周囲の電極との間に働くクーロン力を利用して試料の位置制御を行う手法を用いた装置が、静電浮遊炉である。試料を

浮遊させた状態で加熱レーザーで熔融するため、容器を使用することなく 3000℃といった高い融点を持つ物質の熔融状態の観察や物性値の取得が可能となる。しかし、浮遊しやすさは帯電のしやすさに寄るため、安定した浮遊の実現のためには位置制御に高速のフィードバック制御を必要とする。JAXA ではこの浮遊制御技術や観察技術の向上のため、20年以上研究開発を行い<sup>[1]</sup>、地上においても安定した浮遊が達成されるなど、技術進展は著しく、特筆すべき成果も数多く挙げられている。

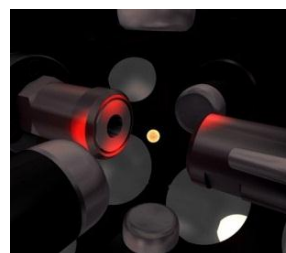


図1 「きぼう」搭載用静電浮遊炉での試料熔融 (イメージ)

## 3. 無容器プロセッシングによる地上成果

### 3.1 エネルギーの有効利用と熱物性計測

発電効率の向上のためには、発電用タービンの熱効率や稼働効率を上げ無駄を少なくすることが重要である。更なる高温・高圧に耐えられる優れた温度強度を持つ高融点材料の使用や、耐熱コーティングといった工夫により性能の向上を目指し、シミュレーションによる材料選定の効率化や casting 過程の最適化が行われている。こうしたシミュレーションを精度良く行うためには、基礎データとして熱物性値を正しくインプットする必要がある。

しかし、高温に耐えられる坩堝(るつぼ)の種類が限られるため、物質の熔融自体が困難であり、高融点の熱物性値は測定例が少なく解析には推定値を用いているのが現状である。また坩堝と融液が反応し不純物となって物質に混入し、

取得されているデータもばらつきが大きい。

静電浮遊炉を用いれば、坩堝を使うことなく高精度の熱物性値を測定することが可能である。図2にこれまでの地上での測定実績を示す。金属中最高の融点をもつタングステンを含め、2000℃以上の融点を持つ多くの金属の密度・表面張力・粘性係数の測定に成功している<sup>[2]</sup>。

地上では重力に拮抗するような高電場での実験となること等から試料種が限られたが、微小重力環境では酸化物や絶縁体、半導体など地上で実施不可能であった試料の物性取得が可能となり、材料選択の知見が広がることが考えられる。

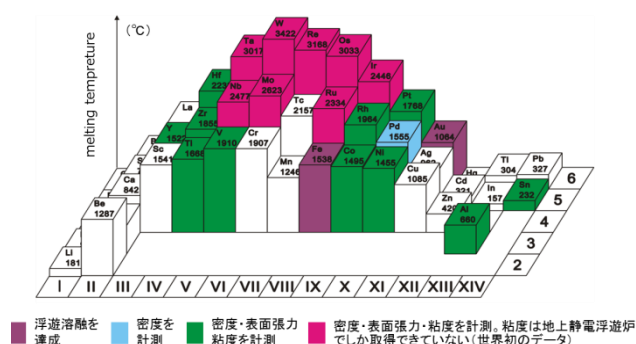


図2 地上静電浮遊炉による高融点金属の熱物性値の取得状況

### 3.2 新たな資源としての機能材料創製

鋼などの材料は熱処理の方法によって性質が異なるように、静電浮遊炉でも容器からの核生成が抑制されることにより、深い過冷度という普段得られない温度条件を実現できるため、特異な結晶組織や準安定相が形成され、新機能が発現する可能性がある。地上静電浮遊炉で得た成果の一例を下記に示す。

セラミックスの1つであるチタン酸バリウム ( $BaTiO_3$ ) は、その高い比誘電率からコンデンサ等の電子デバイスによく用いられている。一方、室温では準安定相として存在する別の結晶構造の  $BaTiO_3$  は通常のものよりはるかに良い誘電率の温度安定性を示すが、低誘電率のため実用に適さず、研究も進んでいなかった。

そこでこの結晶系の  $BaTiO_3$  を過冷却状態から凝固させたところ、図3のような単結晶が得られ、通常と異なる微細組織により、室温で10万以上という通常の30倍以上の巨大誘電率が得られた。さらに、温度を変えても高い誘電率を保持し続けるという、優れた温度安定性も兼

ね備えていたのである<sup>[3]</sup>。

酸化物の浮遊溶融は地上では難しく成功例は少ないが、微小重力環境で静電浮遊炉を用いれば、新機能材料として注目を集める準結晶や金属ガラスなどに代表される準安定相を中心に、多くの過冷凝固物を得ることができる可能性がある。また、プロセスの観察により準安定相創製のメカニズムの研究が進めば、実用材料設計の一助となる。



図3 地上静電浮遊炉で作製したチタン酸バリウム ( $BaTiO_3$ )

## 4. さいごに

静電浮遊炉は2015年度の打ち上げを目指し、株式会社 IHI エアロスペースと共に開発を進めている。

レアアース等の資源や効率的なエネルギー供給の課題は、資源の備蓄や自然エネルギーによる発電といった既存の取り組みだけで解決できるものではない。新たな付加機能を発揮する材料の開発や未知の物質の熱物性取得により材料選択の幅を広げ、既存材料に頼らない仕組みを作り、エネルギー創出技術を向上する能動的取り組みが重要である。

「きぼう」の微小重力環境を利用し、世界に先駆けて熱物性値の取得や高機能材料の探索を行うことで、エポックメイキングな成果が期待される。静電浮遊炉が科学的・産業的研究の場として多くの方に利用され、成果が日本の発展に寄与されることを願ってやまない。

## 参考文献

- [1] T. Ishikawa, P.-F. Paradis, and S. Yoda, J of Jpn Soc. of Microgravity Appl. 18 (2001), 106-115.
- [2] T. Ishikawa, P. -F. Paradis, and S. Yoda, in press, Int. J. of Thermophysics.
- [3] J. Yu, P.-F. Paradis, T. Ishikawa, S. Yoda, Y. Saita, M. Itoh, and F. Kano, Chem. Mater. 16 (2004), 3973-3975.

## 1. はじめに

航空宇宙研究開発関係者の視点ではあるが、社会課題の解決手段は、テクノロジーによるものと、それ以外に分けられる。本論では前者を考えるが、テクノロジー進歩にも、いくつかの異なる方向性が挙げられる。ここでは、数値シミュレーション技術による設計の洗練と、機器のスマート化を支えるソフトウェアエンジニアリングに関する当センターの取り組み例を示す。例えば、CO<sub>2</sub>の増加という社会課題に対し、クールビス等はテクノロジー以外の対応であり、機器の効率改善はテクノロジーによるもの、その中でも、エンジンやコンプレッサーなどの効率改善は設計の洗練、精密な制御による無駄の排除はスマート化と分類できる。

当センターでの設計の洗練とスマート化への取り組みについて、最近、打ち上げに成功した、イプシロンロケットへの適用技術を例にご紹介したい。

## 2. リフトオフ時音響の低減

身の回りには、空気・水・油など様々な流れが存在し、その挙動の正確な把握と利用は、設計の洗練と強く結び付いている。流れは複雑な非線形偏微分方程式で記述されるが、これをスーパーコンピュータ（以下、スパコン）で計算するCFD（計算流体力学）がスパコン能力の急速な進歩と共に発展し、現在では、自然現象の解明、設計開発などの重要なツールとなっている。当センターではCFDによる宇宙機に関わるロケット、ロケットエンジン、スラスタなどの開発技術の革新に取り組んでいるが、スパコンの進歩の影響を分かりやすく示すものとして、噴流音響の大規模解析を用いた、イプシロンロケットのリフトオフ時音響の低減を取り上げる。

ロケットリフトオフ時には高速の噴流により、旅客機のエンジン騒音の1万倍の音響エネルギーにもおよぶ、すさまじい音が発生する。これにより、ロケットや人工衛星に振動による損傷

を与えることもある。

この音は、超音速の噴流から流体力学的なメカニズムにより発生するものであるが、近年まで、実験に基づく経験的手法しか、予測・射場の設計手法がなく、正確とは程遠い状況であった。2002年に導入されたJAXAの前世代スパコンを用いることで、噴流騒音の発生と伝播の仕組みの概要が分かるようになった。それにより、これまでの経験的な方法の問題点や、新しい設計の良否が判定できるようになり、H2B用の新射場の設計確認に用いることが可能になったが、実施可能なケース数も少なく、設計確認の利用にとどまった。(図1)

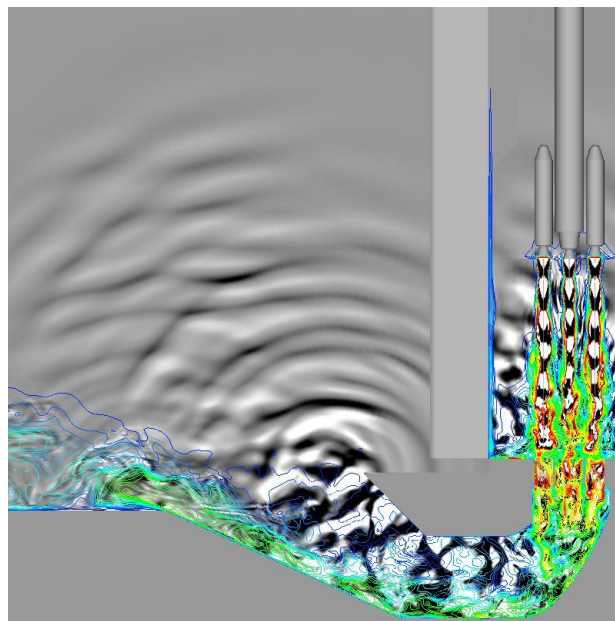


図1 H2A リフトオフ時の噴流（マッハ数等高線）と音の伝搬（密度変動白黒シャドウグラフ）

JAXAのスパコンは2009年4月に10倍以上の能力を持つ現用マシン（コストはほぼ同じ）に更改され、処理時間が3日程度に短縮されたため、設計のためのパラメトリック計算が可能となった。結果として、イプシロンロケットの射場設計では、前のM-Vロケットのものと同様の鉄とコンクリート製ではあるが、形状の工夫によって世界最静粛レベルの音響環境を実現す

ることができた。

この例で示されるように、CFD など数値シミュレーションを用いて、物理現象を正確に把握し、それを設計に反映することで顕著な設計の洗練が可能である。また、スパコン能力向上に伴い、現象理解と設計の確認のみの段階から、多数の計算結果を用いた、設計の洗練へと利用方法が進歩していくことも分かる。

現スパコンを用いても、エンジン内の燃焼現象（これも流体现象が大きな影響がある）に関しては、現象理解の端緒についたばかりであるが、近い将来設計に有効活用できると予想している。

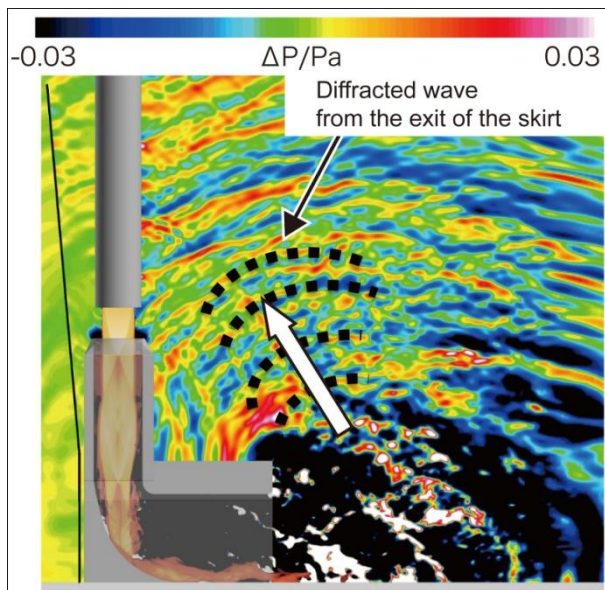


図2 イプシロンロケットリフトオフ時の音の伝搬

### 3. 高信頼性 RTOS の実用化

「スマート化」は色々な意味でつかわれるが、ここでは、生物における広義の神経系を機械に備えるものとする。意識せずとも手足を自由に動かせるのも神経の働きであるし、思考する頭脳も神経の塊である。機械でこのような機能の中心にあるのがコンピュータである。コンピュータを人間の思うように機能させるためにはソフトウェアが必要であり、高信頼のソフトウェアなしには安全・安心なスマート化は実現不可能である。当センターは高信頼ソフトウェアの実現のために、開発プロセス改善、独立検証等に取り組んでいるが、ここでは、イプシロンロケットにも採用された RTOS(Real Time Operating System)を取り上げる。

コンピュータを機能させるには、それを実現

するソフトウェアをプログラムする必要があるが、宇宙機をはじめ現在の機械に要求される複雑な機能を直接プログラムするのは、プログラマー負担が過大である。そこで、ユーザープログラムとコンピュータを仲介する別のソフトウェア=OS(Operating System)を用いることが多い。例えば、パソコンでは Windows とか MacOS というような OS が用いられている。宇宙機の神経として制御に使うには、動作時刻を厳密に保証するために RTOS が必要である。

高信頼なソフトウェアには高信頼な RTOS が必須であるが、RTOS に関しては、以前は外部のものしか選択肢がなく、どの程度の信頼性を持つのか検証の手段がなかった。

そこで、JAXA では、RTOS に対する検証プロセスの研究からスタートし、その高信頼化技術をハンドブックとしてまとめた。

またオープンソースソフトウェアに基づいた高信頼性 RTOS を完成させ、H2B で初フライトの後、イプシロンロケットにも採用され、実用化以来、RTOS 起因の不具合 0 という成果を上げている。

### 4. さいごに

本論で述べたテクノロジーが、社会貢献に結びつくルートは次の二つがある。まず、JAXA の人工衛星やそれを支えるロケットなどの技術は、地球観測による環境問題へのデータ提供等で社会課題解決に貢献するものであり、我々の技術はそれを下支えするものである。また、本論で示した CFD やソフトウェア技術は、宇宙分野のみならず幅広い適用分野を持つもので、そのルートを通じても、社会課題解決に役立つものとしていく所存である。

#### 参考文献

- [1]堤誠司、宇井恭一、石井達哉、徳留真一郎、和田恵、「イプシロンロケット打上げ時の音響環境計測試験」、第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集、JSASS-2011-4032、2011
- [2]佐藤伸子、石濱直樹、片平真史、川崎朋実、「宇宙機搭載用リアルタイム OS に適用した高信頼化技術のハンドブック化(Establishment of a Reliability Handbook for RTOS in Spacecrafts)」、情報処理学会 組込みシステムシンポジウム、2011

# 乱気流事故防止機体技術の研究開発

航空本部 航空技術実証研究開発室  
町田 茂

## 1. はじめに

航空機による旅客および貨物輸送において、万が一事故が起こると直接的な人的・物的被害だけでなく、短期的には欠航や特定機種種の飛行停止による輸送量減、長期的には航空機利用者への心理的影響等による利用減等、それらが及ぼす社会的・経済的影響が非常に大きい。国土交通省運輸安全委員会の航空事故調査報告書によると、我が国の旅客機の事故の半数は乱気流等の気象現象に関連しており、その件数は増加傾向にある。現在では、乱気流は航空機の安全運航を阻害する最も危険な要因の一つとして取り上げられ、その対策の重要性は言うまでもない。

乱気流を検知するために、空港や旅客機には気象レーダが設置/装備され有効利用されているが、雲や水分を伴わない晴天乱気流は電波を用いたレーダの映像には写し出されない。一方、晴天乱気流を検知できるドップラーライダー（レーザ光を用いて遠方の気流を観測する装置）は一部の空港に設置されているが、大多数の空港には設置されておらず、また設置されていても巡航高度までの観測能力が無いので、飛行中の航空機は機上から晴天乱気流の存在を事前に行うことができないのが現状である。従って、晴天乱気流に起因する事故の低減には、乱気流を検知することはもちろん、瞬時に危険性を判断し、その結果をパイロットへ警報、そして危険回避操作が必要となる。

このような現状を踏まえ、JAXA 航空本部では、所有する世界トップレベルのドップラーライダー技術をベースに、乱気流中の揺れを抑制する突風応答・荷重軽減システムの技術開発を進め、旅客機用乱気流事故防止システムの技術実証に取り組んでいる。本稿では、本技術実証の位置付け、実証計画の概要を説明する。

## 2. 本技術実証の位置付け

「積極的に安全性が阻害される要因や状況を事前に把握しパイロットへ情報を与える」対策の例として挙げることでできる搭載型気象レーダは、雲や水分を伴わない乱気流を対象とできないものの、気象現象を機上から事前に把握する装置として本技術実証で対象としている航空機搭載型ライダーと同じ分類であり、その開発および航空機搭載の経緯は注目される。

この開発の歴史から、航空機の安全性を向上させることでできる装備品の開発から搭載義務化への道のりは、要素技術の開発、実機搭載への技術成熟度向上、製品化、運用による有効性の証明と経験の蓄積、そして耐空性基準による搭載の義務化となっている。本技術実証の対象である航空機搭載型ドップラーライダー技術の乱気流検知としての有効性は、JAXA において既に飛行実証済みであり<sup>[1]</sup>、要素技術の開発とシステム実証フェーズに当たる。本技術実証は次の段階の実機搭載に向けた技術成熟度向上フェーズの位置付けであり、今後の製品化、運用による有効性確認および搭載の義務化に向けた重要な段階である。

## 3. 技術実証計画の概要

JAXA の航空機搭載型ドップラーライダーの飛行実験<sup>[1]</sup>では、旅客機が巡航する高高度であっても 9 km 以上の検知距離を実証した。巡航中の乱気流回避のための飛行コース変更は、管制の許可を受ける必要があり時間が数分以上かかるので、現状では現実的でない。文献<sup>[2]</sup>によると、パイロットがシートベルトサインをオンにしてから乗客がシートベルト着用を完了するには 90 秒必要で、巡航時の飛行速度からすると 22km の検知距離が必要であり、現状の技術レベルでは不十分である。一方、着陸進入時における乱気流事故回避のための着陸復行はパイロット単独の判断で実行でき、30 秒前の警報で充分実用性があるので、現状のライダー性能で対応



できる。このような事から、飛行フェーズに応じて以下の方針とすることとした。

- 1) 離陸時：近年事故例がないため、対象としない。
- 2) 着陸進入時：着陸復行のためのパイロット判断の支援を行なう。なお、マージンを考慮して1分前の検知とした場合でも、2kmの検知距離で充分であり、現状の技術レベルをベースに小型軽量化することにより対応できる。
- 3) 上記以外の巡航および高度変更時：1秒前の気流情報に基づき舵面制御し、乱気流に遭遇した時の機体動揺低減制御を行なう。

本技術実証の目的および目標を次のように設定した。

旅客機の乱気流事故防止技術を開発し、国が進める航空輸送の安全性向上に貢献するとともに、航空産業としてのアビオニクス分野で本邦メーカーの参入に貢献する事を目的とする。この目的のために、JAXA が有する乱気流検知技術及び動揺低減技術を実験用航空機により飛行実証し、旅客機の乱気流事故を半減し得る乱気流事故防止システム技術としての有効性を確認する事を目標とする。具体的には、着陸進入中に乱気流をパイロットに警報する技術の実証と、巡航及び高度変更中の乱気流に対する機体動揺低減技術の実証である。

乱気流事故防止システムは、乱気流検知装置、乱気流警報装置及び機体制御から構成される。乱気流検知装置に必要な要素技術は、気流センサー技術及び信号処理技術、同じく乱気流警報装置には危険性判定技術及び警報技術、機体制御には機体動揺低減制御技術が必要となる。図1には旅客機へのシステム搭載のイメージ、図2には旅客機での運用構想案を示す。

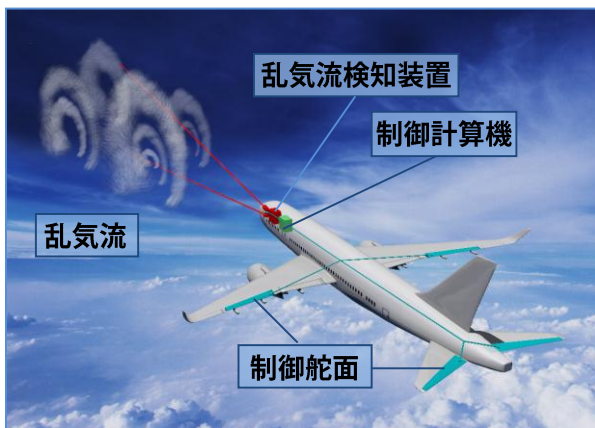


図1 旅客機へのシステム搭載のイメージ

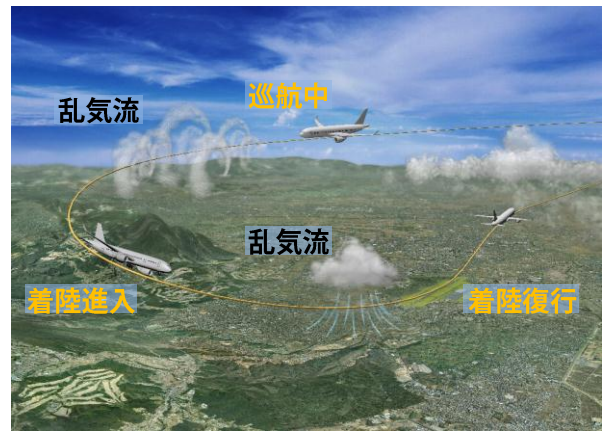


図2 旅客機での運用構想案

JAXA 航空本部では、10年先の乱気流事故防止システムの旅客機搭載を想定し、本乱気流事故防止機体技術を5年以内に実験用小型航空機により飛行実証する計画である。

#### 4. まとめ

JAXA 航空本部においてこれまでに開発してきたドップラーライダー技術をベースに、乱気流中の揺れを抑制する突風応答・荷重軽減システムの技術と融合させた、旅客機搭載用乱気流事故防止機体システムの実現を目指した乱気流事故防止機体技術の実証計画の概要を説明した。この技術実証された乱気流事故防止機体技術が旅客機に導入されれば、乱気流に起因する事故を低減させることにより、機内ではサービスや就寝を妨げられることなく、安心して快適な環境を提供することが可能となる。産業界への貢献、社会への貢献を強く認識しつつ、技術実証活動に取り組んでいきたい。

#### 参考文献

- [1]井之口浜木, 古田匡, 稲垣敏治, 航空機搭載型ドップラーライダーの高高度飛行実証、第51回飛行機シンポジウム講演集、1D09、2013
- [2] Rodney K. Bogue, Kenneth Larcher, Aircraft Cabin Turbulence Warning Experiment, NASA/TP-2006-213671, April 2006

# 新型基幹ロケットの目指す世界

宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系システム技術研究開発センター  
沖田 耕一

## 1. 概要

人工衛星等を他国に依存することなく打ち上げる能力を保持すること（自律性の確保）は我が国宇宙政策の基本であり、我が国が宇宙輸送システムを保有することは自律性確保の観点から不可欠である。

これまで我が国は液体燃料ロケットのH2A/Bを開発・運用してきた。H2Aでは開発当初の目標であった製造費用の低減を実現し、世界最高水準の打上成功率に至っているものの、コスト、打上実績、フレキシビリティ、ユーザーとのコミュニケーション等の観点から、世界の商業打ち上げサービス市場では未だ十分な競争力を有していない状況にある。

また、15年以上大型ロケットの本格開発を行っていないことによる開発経験者の減少や、射場等の輸送システム関連のインフラの老朽化に伴う経費の増大等も課題である。

これらの課題を克服し、高い信頼性と低価格の実現により市場への本格参入を果たし、設備などの維持コストを削減して、我が国の宇宙輸送システムの産業基盤・技術基盤を持続可能なものにしていくためには、打上げシステム全体を刷新する新型基幹ロケットの開発が必要である。

## 2. 基幹ロケットの課題

### (1) 政府衛星の打上げ

政府衛星の打上げには、国内ロケットを優先的に使用することを基本とされており、特に、安全保障に関わる衛星の打上げには、国内ロケットを利用することが重視されている。一方、打上げ能力に関しては、衛星の重量・軌道に対して、余剰が常態化しつつあり、非効率となりつつある。

### (2) 輸送システム技術の維持・向上

我が国はH2Aの開発に着手した1996年以降、15年以上大型ロケットの本格的開発を

行っていないため、実際の開発に従事した経験者が減少しており、開発能力の維持、向上が課題となりつつある。

### (3) 打上げサービスの現状

打上げサービス市場では、コスト、信頼性、フレキシビリティ、ユーザーとのコミュニケーションの観点が重視される。保険市場では信頼度（成功率、打上げ実績）、認知度、技術が主な評価軸となっており、我が国のロケットは、成功率や技術での評価は高いが、認知度が低いこと及び打上げ成功回数が少ない。また、打上げ実績に基づく市場における高い信頼性と価格の低減が求められている。

### (4) 打ち上げ関連設備の維持

我が国の射場等の輸送システム関連のインフラについては、老朽化が進み、毎年多額の維持運用費を要しており、早期の対策が必要である。

## 3. 新型基幹ロケットの目指す姿

新型基幹ロケットにおいては、効率的に宇宙輸送の自律性を確保するために、持続可能な宇宙輸送システムの実現を目指している、

### (1) 自律的な宇宙へのアクセス確保

・ロケット開発・運用能力を国として保持し、かつ、開発運用中の不具合等を解決する技術能力を保持して打上げを安定して継続できる状態

### (2) 持続可能な宇宙輸送システムの実現

・宇宙輸送コストをライフサイクル全体で低減して効率的に宇宙輸送事業を実施できる状態

・国際競争力を確保し、民間が自律的に打上げサービス事業を展開して産業基盤を維持する体制が構築できている状態

(3) 上記の(1),(2)を実現に向けて、以下の①～④により、図1のような効率化が目指す姿である。

① 打上げコスト低減で宇宙利用を拡大

② 維持費の抜本低減で政府支出を効率化

③ 事業規模の低減分を商業受注および輸出拡大で補い、産業基盤を維持・強化

④技術競争力を強化し、国際協働を促進、システムインテグレーション技術を含め、将来にわたる競争力を継続的に確保

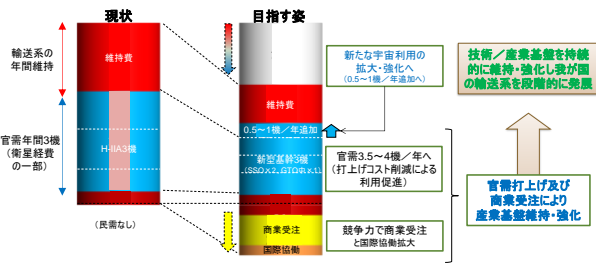


図1 宇宙輸送の目指す姿

#### 4. 実現に不可欠な要素

##### 4.1 ユーザ目線の徹底

目指す姿の実現には、ユーザ目線に立ったロケット及び設備のミッション要求設定が必要不可欠である。また、ユーザの要求は常に変化するものである。このため、今後は、衛星の技術動向の変更等にタイムリーに対応するために顧客要望や意識調査などを的確に取り入れ、PDCA サイクルを回すことで継続的に改善する仕組みの構築が必要である。

##### 4.2 コスト低減

効率的な自律性を確保するには、コスト低減は重要である。このため、以下の①～⑦の技術開発を実施することにより、効果的なコスト低減を実現する。

###### ・機体及び設備

- ①ロケット機体の高機能化（自動点検）や電動化することにより、機体と設備のインタフェースを減らすとともに、簡素な地上設備を実現
- ②機体側の機能付加に対しては電子機器の集積化技術の発展等を活用し、コストダウンと両立
- ③整備方式の見直しを含め、作業性を向上し、作業期間・コストを大幅圧縮
- ④設備が簡素になることにより、維持費を含めたライフサイクルコストを低減

###### ⑤H-IIA/Bの設備を効率的に活用しつつ整備

###### ・飛行安全・通信系システム

- ⑥地上と機体間の機能・性能配分の抜本見直し
- ⑦地上設備を集約し、運用性向上と維持費低減を両立

##### 4.3 高信頼性の確保

コスト低減に当たっては、特に高信頼性の確

保が必要不可欠である。図2にH2A ロケットの不具合の件数の推移を示すとおり、従来のシステム実証主体の開発プロセスでは、設計・試作段階で識別できていない不具合が運用段階で発生している。また、開発・運用ともに不具合の6～7割が設計起因である。製造・使用条件等のばらつきに起因する不具合が設計段階で十分な識別と対処がなされていないことが原因である。

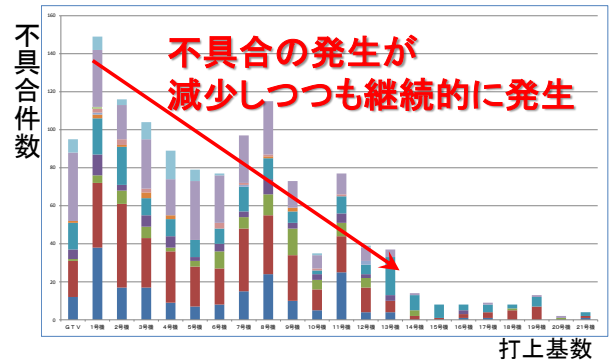


図2 H-IIA 不具合発生件数の推移

これらを改善するために、これまでの開発知見や情報技術の進展を踏まえた新たな開発プロセスの構築が必要である。基本的な考え方を図3に示す。

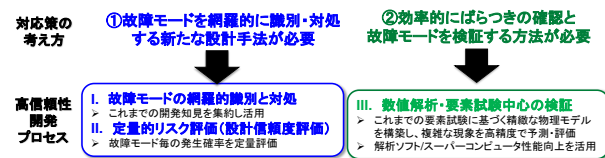


図3 高信頼性開発プロセス概要

①抜けなく故障モードの識別には、図4に示す、過去の不具合/他産業・海外の膨大な失敗事例の分析結果をデータベース及び支援ツールにより体系的・一元的に蓄積・分析する情報システムを構築し、こうした情報技術によって、膨大なデータも効率的に分析することとしている。

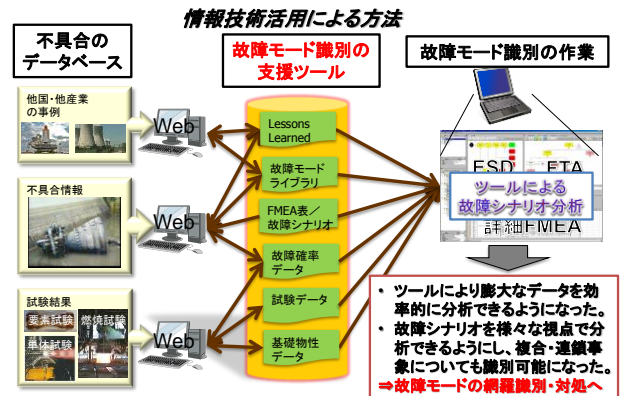


図4 故障モードの網羅的識別

②大規模な試験や不具合による手戻りを減らし、信頼性を確保しつつ開発費を低減することを目的に、精緻な物理モデルを構築し、数値解析や要素試験を充実化する。これまでの要素試験に基づく精緻な物理モデルを構築し、複雑な現象を高精度で予測・評価するとともに、解析ソフト/スーパーコンピュータ性能向上を活用する。

図5に液体ロケットエンジンの研究開発における解析事例を示す。

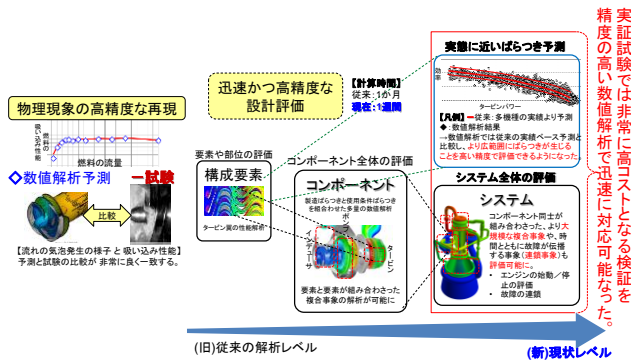


図5 物理モデルによる数値解析事例

### 5. 新型基幹ロケットの目指す世界とは

新型基幹ロケットの目指す姿においては、効率的な自律的持続可能な宇宙輸送を実現するだけでなく、これまでのロケットの開発プロセスを抜本的に改善することにより、エンジニアリングを革新させる。これは、これまでの開発能力の維持・向上の課題を解決するだけでなく、技術基盤をより強固かつ持続可能とするものである。新型基幹ロケットの目指す世界では、こうした将来の高度なミッション実現に向けた技術開発に必要な不可欠なエンジニアリングの革新も重要な目的である。

### 6. 新型基幹ロケットの検討状況

表1に新型基幹ロケットのミッション要求概要を示す。

表1 新型基幹ロケットミッション要求

項目	要求事項	システム構想 対応方針	
打上げ能力 軌道投入精度	打上げ能力 SSO軌道	3ton/高度800km	・機体サイズの条件とする ・開発におけるリスクとコストを抑制し、現有技術と製造・射点設備を有効活用する機体形態を選定する。
	打上げ能力 GTO軌道	2ton~6.5ton (衛星静止増速ΔV1500m/s)	
	軌道投入精度	H2Aと同等	
打上げ価格 設備維持コスト	打上げ価格	現行基幹ロケットの半額程度を目標とする。	・システム構成の簡素化 ・機能配分の見直し等による運用性の向上 ・最新民生低コスト技術の活用
	設備維持コスト	現行基幹ロケットの設備維持コストの半額程度を目標とする。	
年間打上げ可能機数	年間6機の製造、打上げに対応可能なこと。	・運用性の向上により対応。特に、設備の保全を含む射点作業を大幅短縮(70日→30日)。製造設備も対応	

こうしたミッション要求に加え、現在さらにユーザ目線での詳細な要求をまとめているところである。新型基幹ロケットとH2A/Bロケットのラインアップを図6に示す。

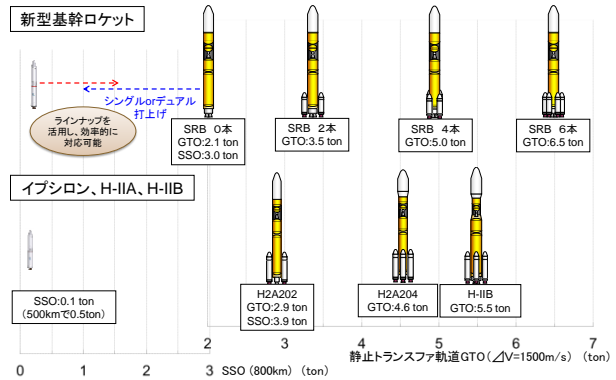


図6 ラインアップ比較

ユーザの衛星重量の変化に柔軟に対応できるよう、GTOミッションに対しては、中型固体ブースタを装着(本数を調整)することとしている。また、コスト低減の検討状況について、図7に示す。現在、システム構想を実現するキー要素技術候補を抽出し、成立性評価及び課題識別を実施しているところである。

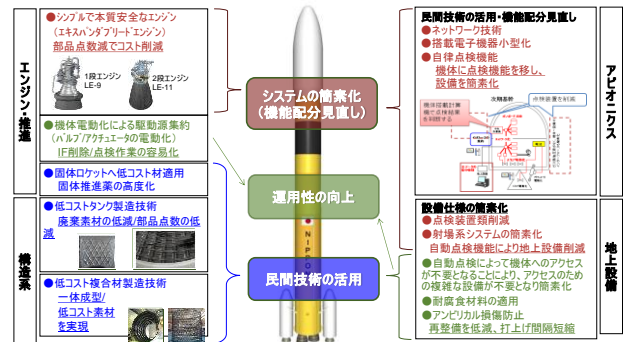


図7 コスト低減方策

また、図8に示すとおり、イプシロンロケットとのシナジー効果を出すべく、固体モータだけでなく、アビオニクス機器などの検討も進めているところである。

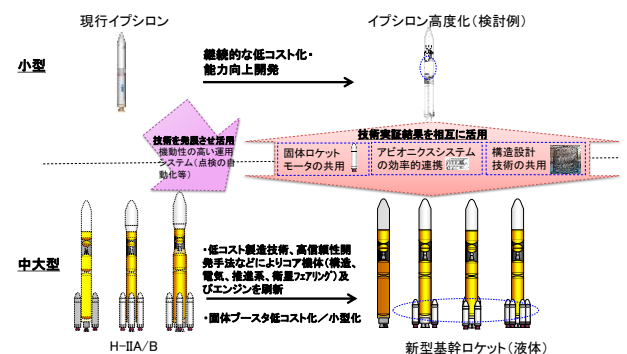


図8 イプシロンロケットとのシナジー効果例

## 7. まとめ

ユーザ目線の重要性や高信頼性プロセスなど新型基幹ロケットが目指す世界について、主要な点をまとめた。

新型基幹ロケットの開発は 2020 年初号機打上げを目指して、来年度からの開発に着手するとされている。新型基幹ロケットの実現は、効率的な自律的持続可能な宇宙輸送の確保することとなり、これは宇宙利用促進を支えるものである。また、エンジニアリングを革新させることで、技術基盤を強固かつ持続可能とするだけでなく、より高度なミッションを実現には不可欠なものである。

今後、より一層、ユーザ目線の検討を進めつつ、更に、直接ユーザからの要求を収集し、要求仕様へ詳細化させていくとともに、それらを実現する技術を深めていく必要がある。

### 参考文献

[1] 宇宙政策委員会 第 16 回会合、資料 1-1 新たな基幹ロケットの開発着手に当たり整理すべき事項の検討状況、

<http://www8.cao.go.jp/space/committee/dai16/gijisidai.html>

# 水素エネルギー社会の構築に貢献する、 航空機的運航が可能な宇宙輸送システムの研究

宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系  
丸 祐介

## 1. はじめに

地球周回低軌道（LEO）への輸送システムは、地球の人類の宇宙活動にとって最も基本的なインフラの一つである。現在は使い捨てのロケットによっているが、これを再使用可能なシステム、特に単段でLEOに到達し、それ全部が帰還して再使用されるシステム（SSTO; Single-Stage-to-Orbit）とすることは、宇宙輸送の究極のゴールである。再使用宇宙輸送システムのメリットは輸送コストの低減にあるが、低コストの成立は、システムを如何に高頻度に繰り返し運行できるかに依存する。この「高頻度・繰り返し運行」のイメージを他の輸送機関に例を求めるとすれば、航空機になるであろう。輸送機が宇宙を往還するための技術に加え、高頻度に運用する技術、すなわち航空機的運行を可能とする技術の開発も重要である。しかしながら現時点では、そもそも高頻度運行を要求する需要が何かに対する具体的な見通しや方針が定まっていないために、再使用宇宙輸送システム構築へ必要な投資が得られておらず、結果としてそのような機運は高まっていない。

ところで、使い捨てのロケットにおいても、燃料として非常に大量の水素を燃料として消費してきている。輸送機の燃料はそれに求められる役割によって選択肢があるが、SSTOを考える場合には、その推進性能の高さから水素を用いる必要がある。このように、宇宙輸送機にとって水素は切り離せないものになっている。

一方、低炭素社会を実現するエネルギーシステムの在り方として、水素を媒体とするエネルギーシステムが提案され、技術開発や実証研究が進められている。しかし、水素エネルギー社会の構築にあたっては、インフラ整備の課題が大きいとされ、石油や天然ガスといった使いや

すい化石燃料の枯渇が現実のものとして認識されていない現在においては、その構築に向けた動きはまだ本格的になっていないとは言えない。

このように、再使用宇宙輸送システムも、水素エネルギー社会も、その意義や必要な投資に対するコンセンサスが得られていない状態であるが、仮に、完全再使用宇宙輸送機が実現し、これが高頻度に運行される未来の世界を想像すると、その世界では、燃料として非常に大量の水素を供給する能力を有するエネルギーシステムが構築されている必要がある。すなわち、再使用宇宙輸送システムの社会的成立は、水素エネルギー社会の構築を前提としているといえる。宇宙輸送の分野は、現在も他の需要に対してより多くの水素を消費し、利用していることも併せて考えると、宇宙輸送の分野こそが、宇宙輸送自身の将来のためにも、水素エネルギー社会の構築へ向けた動きを牽引していくべきではないかと考える。高頻度に運行される宇宙輸送機で必要な水素の技術は、水素エネルギー社会のインフラ構築に必要な技術に直結する。特に、宇宙輸送機では水素を液化して貯蔵する必要があるから、液体水素に関連する技術については、宇宙輸送の分野が是非先行してその有効利用を喚起していく必要がある。

このような考えのもと、本講演では、高頻度に運行される完全再使用宇宙輸送システムの特徴を述べ、そこで必要となる水素の技術として、宇宙輸送機が必要とするエネルギーを主燃料である液体水素で賄う「推進・エネルギー統合システム」について紹介する。これは、水素ベースで統合したエネルギーシステムを輸送機機上に構築する試みであり、将来の水素エネルギー社会におけるプラントシステムのパイロットケースとなるものである。

## 2. 航空機的に運航される宇宙輸送システム

### 2.1 なぜ再使用か？

米国では、スペースシャトル退役後の LEO までの輸送システムは民間主導で開発されており、民間の技術やしぐみによってロケットのコストの低減が図られている。しかしながら、民間のやり方をもってしても、輸送コストは現在のせいぜい半分程度にしかならない。一方、日本ロケット協会が過去に行った検討では、宇宙旅行事業および太陽光発電衛星による電力供給事業を経済的に成立させるためには、宇宙輸送コストを現在の 1/100 まで下げる必要性が示されている。このような大幅なコスト低下は、使い捨てロケットではどうも実現できない。自動車や航空機など他の輸送機関では当然のことであるが、機体を繰り返し再使用して、1 回あたりの輸送コストを下げる必要がある。

### 2.2 なぜ高頻度か？

宇宙輸送の需要とコストは、いわゆる鶏と卵の関係である。仮に再使用宇宙輸送機が実現されたとしても、低コストを維持するためには多くの需要が必要であり、また逆に、多くの需要を引きつけるためには低コストが必要である。この「多くの需要」が具体的に何であるかは極めて重要であり、この需要が具体的にならない限り、再使用輸送システム構築への必要な投資は得られないことは認識すべきである。その上で、仮に何らかの具体的な需要が生まれ、再使用宇宙輸送システム構築への投資が得られた場合を想像すると、飛行技術の意味で宇宙輸送機を往還させることができるだけでは不十分で、これを高頻度に繰り返し運用するための技術やしぐみを整えておく必要がある。

運用や整備のしぐみの重要性は、退役した米国のスペースシャトルの反省に見ることができる。もともとスペースシャトルの飛行間隔（宇宙から戻ってきて、再び同機体が宇宙へ行くまでの期間・ターンアラウンドタイムという）は、最短 1 週間を目標にしていたようであるが、最も高頻度に運用された年で約 10 回の飛行（複数機合わせて）であり、2 度の事故のあとは、せいぜい年 4～5 回となってしまった。その他の要因も含めた結果として、一回あたりの輸送コストは使い捨てのものよりもかえって高くなってしまいう結果となった。

### 2.3 なぜ水素か？

上述したように、推進性能の高さから、再使用宇宙輸送システム、特に SSTO では燃料に水素を用いる必要がある。これを高頻度に運行する必要があるから、非常に大量の水素が必要となる。

スペースシャトルの外部燃料タンクにはおよそ 106ton の液体水素が貯蔵される。これを標準状態（0℃、1 気圧）の水素ガスに換算すると、およそ 118 万 Nm<sup>3</sup> になる。日本ロケット協会が行った宇宙観光用ロケット「観光丸」の検討<sup>[1]</sup>では、宇宙観光事業が成り立つためには、50 人乗りのロケット 60 機を毎日運用するとされている。高頻度運行としてこの規模を想定すると、一年間に 2190 億 Nm<sup>3</sup> の水素が必要になる。現在の国内の水素需要は、約 1.6 億 Nm<sup>3</sup> であり、燃料電池車が 200 万台普及した場合の水素需要でも約 25 億 Nm<sup>3</sup> と見込まれている<sup>[2]</sup>にすぎないことを考えると、現在の想定を大きく超える水素供給能力が、再使用宇宙輸送の前提になっていることは認識されるべきである。

## 3. 水素エネルギー社会

燃料電池をはじめ、水素エネルギーに関する技術開発が国内外で盛んであるが、水素エネルギー社会の実現に向けた動きはまだ具体的にないように思える。その理由の一つは、水素を利用するためのインフラ設備の整備に必要な投資が大きいことであり、石油や天然ガスの枯渇が現実的になっていない現在では、その投資を得られていないのである。

ここで、石油や天然ガスの枯渇が本当に現実のものとなったことを想像してみる。電力の供給については、現在の技術の延長線上にある何らかの方法で可能であろう。また、自動車も、電気自動車や燃料電池などいくつかの選択肢がある。では、飛行機はどうだろうか。電動飛行機も研究されているが、単位重量あたりの出力が性能に直結する飛行機においては、現在のジェット旅客機の機能を果たせるような電動飛行機の出現は難しいだろう。もし、石油が枯渇した後もジェット旅客機のような移動手段を必要とするならば、電力という形態ではなく、燃料から爆発的にエネルギーを取り出す必要がある。石油もない、天然ガスもない状況では、水

素が唯一の選択肢ではないだろうか。

水素エネルギー社会の構築にあたっては多くの課題があり、地上の活動においては、天然ガスも含めた化石燃料と比較してしまうと、メリットがほとんど無いのも事実である。しかし化石燃料はいつかは枯渇するという事実まで考えるならば、将来必ず水素エネルギーが必要になるはずである。

宇宙輸送の分野は、古くから大量の水素を消費してきた。水素、特に液体水素の取り扱い技術においては、他の分野に対して一日の長がある。宇宙輸送自身にとって、水素エネルギー社会の構築が必要であるからこそ、宇宙輸送の分野が、水素エネルギー社会に向けた動きを牽引していくべきであると考えられる。

#### 4. 宇宙輸送機におけるエネルギーシステムの水素ベース統合化

宇宙輸送システムの航空機的運航とは、高頻度繰り返し運行であり、安全を確保しつつ飛行間隔を如何に短くするかが問われる。そのために必要な技術のひとつとして、宇宙輸送機が必要とするエネルギーを主燃料である水素をベースとして統合するシステム（推進・エネルギー統合システム）について述べる。

従来の宇宙輸送機における推進・エネルギーシステムの例として、スペースシャトルにおけるエネルギーシステムを概観する（図1）。スペースシャトルでは、主推進系の燃料として液体酸素／液体水素を搭載していたほか、補助ブースターとして固体推進剤、OMS や RCS、APUの燃料として、NTO/ヒドラジンといった有毒な貯蔵性液体推進剤が搭載されていた。自動車や航空機が、それぞれガソリンやジェット燃料

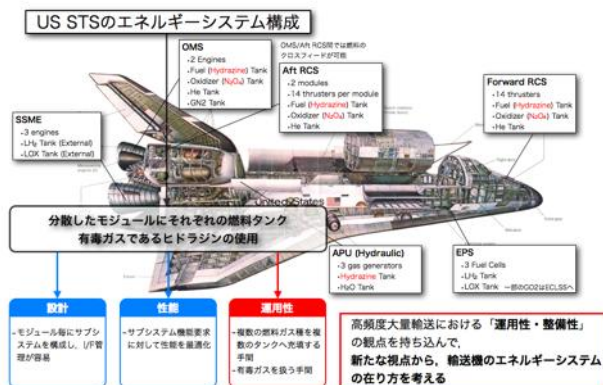


図1 スペースシャトルのエネルギーシステム

のみで必要なエネルギーを賄っていることと対比して考えると、充填などの取り扱い作業のコストが大きく、無駄が多い。特に、有毒なヒドラジンの使用は、運用作業コストに大きな影響を与え、また有人の観点でも影響が大きかった。

推進・エネルギー統合システムは、宇宙輸送機に必要な全エネルギーを、主推進系の燃料である液体酸素／液体水素のみで賄うシステムである。図2に、推進・エネルギー統合システムの構成要素を挙げたブロック図を示す。これらの構成要素の機能は、貯蔵、燃焼、熱交換、昇圧、発電、蓄電、油圧、動力、極低温流体運用というように、水素エネルギー社会において必須の機能である。このように、宇宙輸送機の推進・エネルギー統合システムは決して特別なものではなく、一般の水素技術を組み合わせたシステムである。水素エネルギー社会のインフラと多くの共通点を有し、いわば「ロケット機上に構築された、水素エネルギーシステムの縮図」と言える。宇宙輸送機上でこのシステムを実現する場合は、重量リソースの問題と極限環境条件下（低温、低圧、振動、放射線など）での運用が求められる、これらの点が一般、地上の水素技術との差違である。

宇宙科学研究所では、将来の水素エネルギーシステムのパイロットケースとなる、推進・エネルギー統合システムの研究を進めている。必要な要素技術の開発とシステム設計の観点で研究を行っている。当面の目標は、地上に統合システムを組み上げて、システムとしての原理確認、機能実証を行うことである。

主推進系としては、再使用ロケット実験機（RVT）で開発されたロケットエンジンをを用いることができる。このエンジンは、推力は1ト

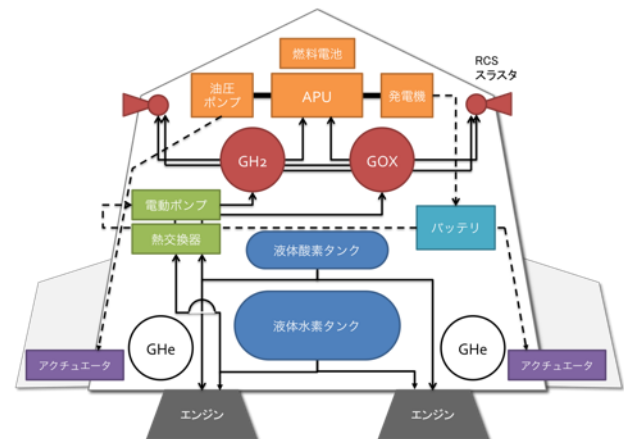


図2 推進・エネルギー統合システムの概念図



ン級と小型ながら、ターボポンプをもつ本格的な液酸液水ロケットエンジンである。

姿勢制御用の補助推進系としては、ガス水素／ガス酸素を推進剤とするスラスタの開発を行ってきた。触媒着火や無冷却チャンバの先進的技術を取り入れつつ、スラスタ単体としては完成の域にある。

これら2つの推進系をベースに、統合システムを構築することを考えると(図3)、この他に必要な要素技術としては、

- ・ 補助推進系の推進剤を貯蔵する気蓄器
- ・ 液体水素を気蓄器に導入するポンプ
- ・ 発電：燃料電池や燃焼式発電機

がある。

補助推進系の推進剤を貯蔵する気蓄器に求められる特徴は、(1)補助推進系の燃焼圧より高圧であること、(2)液体水素由来の水素を貯蔵するため極低温になり得ること、が挙げられる。すなわち、高圧・低温がキーワードとなる。宇宙科学研究所では、極低温の複合材タンクの開発を行ってきたが、さらに高圧化に対応できる容器を検討している。

液体水素を昇圧し、水素を気蓄器に高圧で圧送するためのポンプも重要な構成要素である。将来の液体水素ステーションにおける液体水素ポンプの開発研究が、NEDOによって行われた例がある。機上に搭載可能なレベルの軽量化が今後の課題となる。

スペースシャトルのLessons Learnedとして、油圧システムがクイックターンアラウンドの実現を妨げていたとの指摘がある<sup>[3]</sup>。昨今の電動アクチュエーターの高出力化もあり、宇宙輸送機でもアクチュエーターの電動化が進むものと考えられる。発電機能を果たす要素としては、水素酸素から発電する燃料電池や航空機のAPU(補助動力装置：ジェット燃料のガスタービンエンジン)のような水素酸素の燃焼による発電機が候補になる。

上述したように、これらの要素技術は、宇宙の分野に独特のものではなく、将来の水素エネルギー社会のインフラで必須の技術である。一般社会と連携しながら、水素システムのパイロットケースである推進・エネルギー統合システムの研究を進めていく。

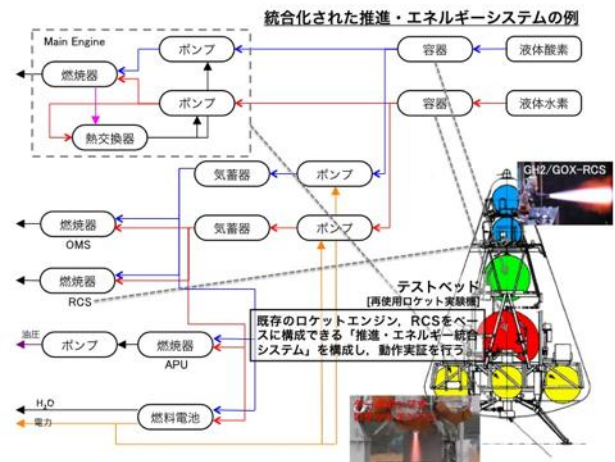


図3 推進・エネルギー統合システムの構成例

## 5. まとめ

本稿では、宇宙輸送の将来のあるべき姿である航空機般的運行が可能な宇宙輸送システムと、水素エネルギー社会の構築が密接に関係していることを述べ、宇宙輸送の分野が水素エネルギー社会構築の動きを牽引すべきであると主張した。そして、両者に共通する水素技術の研究例として、宇宙輸送機における推進・エネルギー統合システムの研究を紹介した。この統合システムは、種々の機能をもつ水素ベースのプラントを宇宙輸送機上に構築する試みであり、水素エネルギー社会のインフラ構築に向けたパイロットケースになり得る。

また、本文には記述しなかったが、水素ベースのエネルギー統合化において、液体水素を冷媒とする超電導技術が有効となる可能性があり、大いに着目している。例えば、超電導電力貯蔵システム(SMES)や超電導液位センサが挙げられる。

## 参考文献

- [1] 日本ロケット協会運輸研究委員会、「宇宙旅行用標準機体「観光丸」開発・製造費用報告書」、1996年
- [2] [http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/spaceindustry/jp\\_industry/interview/005/p1.html](http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/spaceindustry/jp_industry/interview/005/p1.html)
- [3] Hernandez, F.J., et al., "Selected Lessons Learned in Space Shuttle Orbiter Propulsion and Power Subsystems", AIAA paper 2011-7275.

# 宇宙開発における持続性確保のためのソリューション

## ～スペースデブリ問題の現状と除去技術について～

研究開発本部 未踏技術研究センター  
河本 聡美

### 1. はじめに

宇宙は衛星通信、測位、放送、気象観測等、今日の日常生活に不可欠なインフラとなっているだけでなく、今後も地球温暖化、エネルギー問題等の地球上の課題解決や、宇宙観光、人類の活動領域拡大等の様々な発展可能性を秘めている。その宇宙利用の長期持続性を危うくしているのがスペースデブリ（宇宙のゴミ、以下デブリ）問題である。かつては広大な宇宙空間にデブリを放置しても問題になるとの認識が薄くデブリの数は増加の一途をたどっていたが、1990年～2000年代にはデブリをなるべく発生しないようにする国際的なガイドラインも制定され、その増加は抑制されつつあるかに見えた。しかし近年衝突や爆発が相次ぎ、デブリの与えるリスクは今や無視できない問題となってきている（図1）。

宇宙開発関係者を除くとデブリ問題は現時点では日常生活に直接影響していないため、深刻な課題として認識されていない。しかしながら、現状を放置すると、気象衛星のデータがある日突然得られなくなったりするなど、将来の日常生活に影響する社会的課題になる可能性は否定できない。

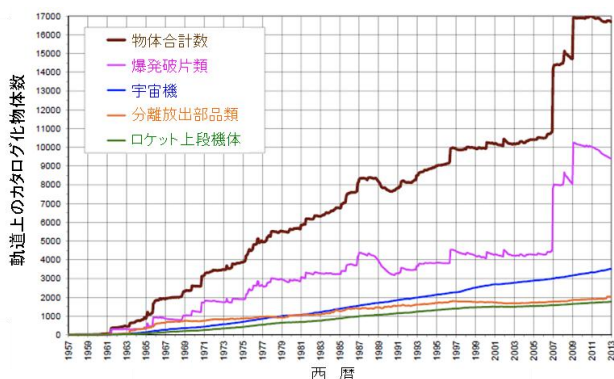


図1 軌道上のカatalog化物体\*注の変化[1]

\*注：カatalog化物体：地上から観測・追跡されている、起源が同定されている物体。運用中の宇宙機約1000個を含む。この他に起源不明物体約6000個が追跡されている

研究開発本部未踏技術研究センターでは、安心な宇宙開発・利用活動を維持するために、デブリ問題解決を目的として、デブリ除去技術を研究しており、その要素技術を軌道上実証する計画も進めている。本稿では、デブリ問題を紹介し、デブリ除去技術の研究状況について報告する。

### 2. スペースデブリの現状

#### 2.1 スペースデブリとは

スペースデブリとは軌道上にある不要な人工物体の総称であり、使用済みあるいは故障した人工衛星、打ち上げロケットの上段、ミッション遂行中に放出した部品、爆発・衝突し発生した破片等様々な種類がある。これまで4900回以上の打ち上げと200回以上の軌道上爆発の結果、現在地上から追跡されている10cm以上の物体で約2万個、1cm以上は50～70万個、1mm以上は1億個を超えるとされている。

宇宙機もデブリも低軌道では秒速7～8kmで地球を周回しているため、デブリが衝突する場合には相対速度は秒速10～15kmもの超高速衝突となる。これはピストルの10倍以上速い速度であり、小さなデブリでも巨大な運動エネルギーを持つ。そのため1cm以上のデブリが衝突すると宇宙機に壊滅的な被害を与えるとされ、数百μmのデブリでも、ハーネス等衝突場所によってはミッション終了につながる被害を与える可能性がある。これまで5回のカatalog化物体同士の衝突が発生し、衝撃を受けて軌道が変化したり突然破片デブリを発生させる等、微小物体の衝突が疑われる事例、宇宙機の故障はさらに多数発生している（表1）。2009年のイリジウム衝突事故では2000個以上のカatalog化デブリが発生した。同時に数万個の1cm級デブリ、数百万個の1mm級デブリを発生させたと考え

られている。また宇宙ステーションや回収された宇宙機の表面には数十 $\mu\text{m}$ ～数 $\text{cm}$ の微小サイズのデブリ衝突痕が多数発見されている。

表 1 主なデブリ衝突事例

年	衝突事例
1996	フランス軍事観測衛星 CERISE にアリアンロケット破片が衝突、ブーム損傷
2009	米国の通信衛星イリジウムに使用済みロシア衛星が衝突、大破
2013	エクアドル小型衛星 NEE-01 Pegaso に旧ソ連ロケット破片衝突。高速回転し衛星通信途絶 微小デブリ衝突が疑われる主な事例
2006	ロシア通信衛星 Express-AM11 故障。冷却液が噴出、衛星の姿勢が失われ機能不全に
2007	欧州気象衛星 Meteosat-8 不具合。軌道が突然変化し東西方向の位置制御スラスタ破損
2013	ロシア小型技術実証衛星 BLITS 故障。突然スピンドレート及び高度が変化

## 2.2 スペースデブリの対策

研究開発本部ではデブリ対策研究として、静止軌道および低軌道上デブリの観測技術の研究、今後のデブリ数変化を予測するデブリ推移モデルや衝突確率を解析するツール開発のための研究、デブリから宇宙機を防護する技術の研究等を実施している[2]。また研究だけでなく実際にデブリの衝突から宇宙機を護るために、地上から追跡されているデブリに関しては、衝突が予見される場合には衝突回避運用を行っている。近年宇宙ステーションは一年に2、3回、無人宇宙機も世界では年120回以上衝突回避運用を実施している。また宇宙ステーションは1cmのデブリまで防護できるとされるデブリバンパを有している他、無人宇宙機も最近は数百 $\mu\text{m}$ の微小デブリ衝突に関しては、ハーネス等クリティカルな機器・要素を防護するためのデブリバンパを設けるなどデブリ防護設計を行っている。しかしデブリ衝突回避運用は燃料を消費してしまうだけでなくミッションの中断等が負担になりつつある。またデブリ防護に関しても、重量増加や設計変更は宇宙機設計者への負担になっている。さらに、その間の数 $\text{mm}$ ～10 $\text{cm}$ 程度のデブリは防御も回避も不可能であり、壊滅的な被

害を受ける可能性を残している。

デブリを発生させないための取り組みとしては、JAXA はスペースデブリ発生防止標準 JMR-003B を制定しており、国際的にも2002年に国際機関間スペースデブリ調整会議(IADC)、2007年に国連宇宙空間平和委員会でデブリ低減ガイドラインが制定される等、デブリ発生低減は遵守されつつある。しかしすでに、今後デブリを出さないようにするだけでは不十分と考えられている。図2はIADCで、6機関が同一条件から推移予測をした、低軌道のデブリ数の予測である。今後ミッション終了後デオービットを90%の宇宙機が遵守し、爆発は発生しない、というデブリ低減ガイドラインが十分遵守された条件でも、今既に軌道上に存在しているデブリ同士の衝突により数が増加していく自己増殖が開始していることに関し、よく一致した結果が得られた[3]。そのため、今後はデブリを発生させないようにする「デブリ低減」だけでなく、根本的な解決方法として「デブリ除去」が必要と考えられている。

## 2.3 デブリ除去に関する国際動向

2009年のイリジウム衝突事故以来、デブリ除去の重要性が世界中で認識され、米国・欧州・ロシア・中国等でデブリ除去のシンポジウムが相次いで開催された。欧州宇宙機関(ESA)では組織横断チームを組んだ CleanSpace イニシアチブの中で3年以内のデブリ除去ミッション設計を計画している他、ロシアは2012年ベルリンエアショーにてデブリ除去システム開発の計画を発表し国際協力を呼びかける等、各国将来の産業化を意識して産業界と共にデブリ除去の研究を急速に進めている。ドイツやカナダも得

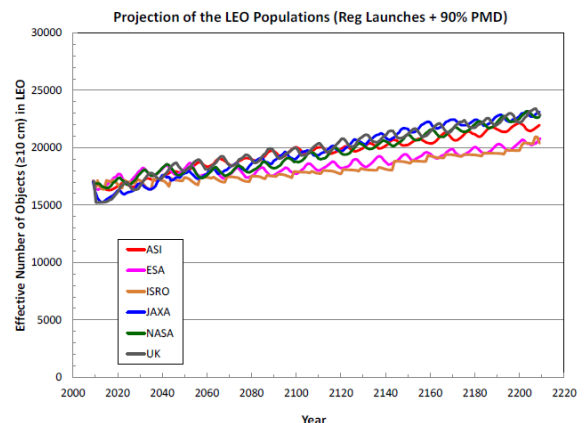


図 2 今後の低軌道上物体の推移予測[3]

意のロボット技術を活かすことを検討している。また米国も新宇宙政策にデブリ除去の研究開発について明記している。

### 3. デブリ除去技術について

#### 3.1 デブリ除去の必要性和対象

図2は10cm以上のカタログ化デブリの推移予測であるが、これらカタログ化デブリの増加よりも、数mm～数cmの小さいデブリはさらに急激に増加する可能性も指摘されている。微小デブリの増加は地上からはすぐにはわからないが、増加した後では対処が困難で、宇宙環境は悪化した状態になってしまうため、早急な除去の開始が必要と考えられている。

デブリは使用済みの大型宇宙機のような大型デブリから、破片等微小デブリまで様々な大きさが存在しているが、軌道上環境の維持のためには混雑軌道の大型デブリを除去することが必要である。宇宙機に直接のリスクを与えているのは数の多い破片サイズのデブリであるが、これら破片サイズのデブリは広大な宇宙空間に多数存在しているため除去するのが困難であるに加え、たとえ微小デブリを除去できたとしても大型デブリ同士が衝突するとまた無数の微小デブリを発生させるため、発生源である大型デブリの除去が一番効率的である。混雑軌道にある使用済み衛星やロケット上段等の大型デブリを毎年5～10個程度、あるいは今あるうちの100～150個程度を除去すれば、軌道上環境は維持できると考えられている。どのデブリを除去すると軌道上環境改善の効果が高いかは、推移モデルを用いて評価している。

#### 3.2 デブリ除去技術について

デブリの除去のためには、通常のランデブー・ドッキングと異なり、通信や捕獲のための手段を有していない非協力ターゲットであるデブリに、衝突することなく接近し、捕獲、デオービットさせる必要があり、高度な技術を要するため世界でもまだ実現されていない。さらに、デブリ除去は新たな価値を生み出すものではないため、また、将来デブリ除去は国際的枠組みで産業化される可能性が高いとされているがその際に優位に立つために、なるべく低コストで達成できることが重要である。

デブリ除去の対象としては、衛星デブリとロケット上段デブリが存在しているが、さまざまな形状があり複雑な姿勢運動をしている物も観測されている衛星デブリに比べ、ロケット上段デブリは長いパドル等を有さず形が比較的似通っている上、磁場との干渉で回転が止まってほぼ重力傾斜安定しているとの検討結果もあり、また実際回転していないと考えられる物体も多数観測されている。さらに、ロケット上段は機密性の問題も衛星に比べると少ないため、技術的にも非技術的にも除去の対象として適していると考えられている。なおデブリは不要物体といえど所有権が残っており、現在他国のデブリを除去することは不可能である。そういったデブリ除去の法的課題についても JAXA 法務課にて研究がおこなわれている。

デブリ除去技術としては、1) GPS や光学カメラ等を用いた非協力対象への接近、2) 光学カメラ画像処理を用いた相対位置・姿勢推定、3) 伸展ブーム等を用いた推進系取付、4) 取り付けが容易かつ大電力や多量の燃料不要の高効率推進系である導電性テザー、5) イオンビームによる静止軌道デブリのリオービット、等の研究を実施している。導電性テザーを用いたデブリ除去の流れについて図3に示す。各研究の詳細は JAXA にて隔年開催されているスペースデブリワークショップ講演資料集[4]を参照されたい。

#### 3.3 導電性テザー

導電性テザー (EDT) とは、長さ数 km 程度の導電性のテザー (紐) を伸展し電流を流すことにより、地磁気との干渉を利用して軌道降下させる高効率推進系である。原理的に燃料、大電力が不要であり、また微小推力であるためデブリへの取り付けが比較的容易であるというメ

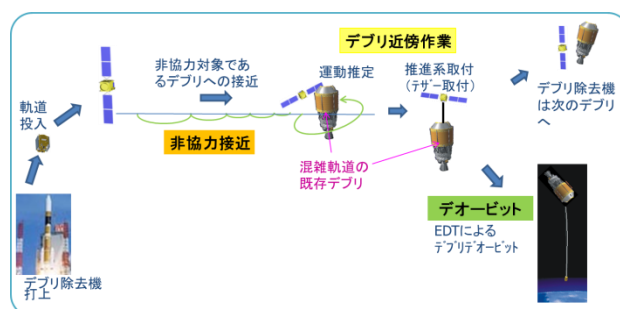


図3 デブリ除去の流れ

リットがあり低軌道のデブリデオービットに有望と考えられている。

デブリ除去においてはデオービットのための推進系の選択が、推進系取付手法および推進系取付作業の際の相対位置制御精度等の要求を大きく左右する。そこでデブリ除去の実現のために、図4のようにまず要素技術としてHTVを利用したEDT技術の実証[5]、次のステップとして小型衛星等を用いたデブリ除去システム実証を検討している。並行してデブリ除去の法的課題、国際的枠組みの検討により、デブリ除去実用化を目指している。

HTV 6号機では、テザー伸展特性および電流駆動特性を取得するための実験を計画している(図5)。HTV 非与圧部背面の太陽電池パネルを取り外した跡地に開口を設けて、そこにエンドマスおよび保持放出機構を搭載し、エンドマスをバネで天頂方向に放出することにより、700m級のテザーを伸展させる。ISS 接近制御に使用しているランデブセンサを利用し、ランデブセンサ用リフレクタを張り付けたエンドマスの運動をモニターすることができる。伸展中及び伸展後のエンドマス運動を、HTV のランデブセンサで計測することで、テザー伸展特性データを取得する。次にHTV 側に搭載した電界放出型電子源から電子を放出することで10mA級のテザー電流を駆動する。電子放出に伴うHTV自身の電位変動データ、及び、相互作用する周囲プラズマ特性データの取得を行うために静電プローブ機能付き帯電電位モニタを、また、発生するローレンツ力を算出するために磁気センサを搭載している。実証実験後は切断機構によりテザーを切断する。本実験により取得された特性値を



図5 HTV搭載EDT実証実験のイメージ図

用いてデブリ除去に必要な大型化テザーの設計を行う予定である。

#### 4. おわりに

スペースデブリは宇宙開発への新規参入を妨げ、制約を与える厄介者と思われることが多い。しかしその解決には新しい技術が必要とされており、新しい市場の可能性がある。環境立国としての日本がこれまでの技術蓄積を活かして世界に貢献し、また将来想定される産業化において優位に立つために、デブリ問題解決研究を世界に先駆けて進めるべきと考える。

#### 参考文献

- [1] NASA The Orbital Debris Quarterly News 17-1 (2013, Jan).
- [2] 平子敬一他、JAXA 研究開発本部のデブリに関わる研究、第57回宇宙連合講演会1013、2013.
- [3] IADC Working Group 2, Stability of Future LEO Environment, IADC-12-08, Rev.1 January.
- [4] 第5回スペースデブリワークショップ講演資料集、宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 未踏技術研究センター主催、2013.
- [5] 井上浩一他、導電性テザー実証実験計画、第57回宇宙連合講演会1B12、2013.

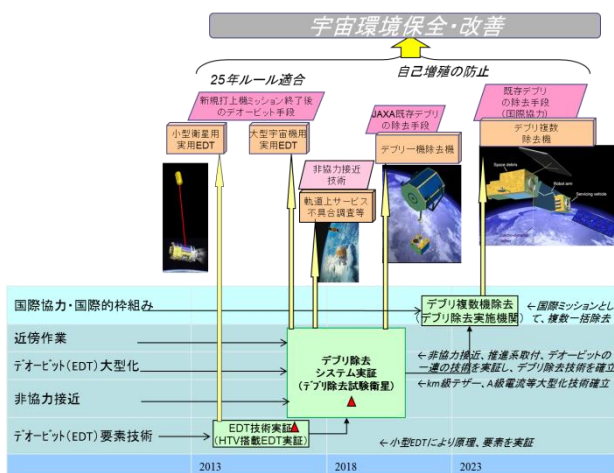


図4 デブリ除去ロードマップ