

講演

みらい CAN ホール

災害救援航空機情報共有ネットワーク(D-NET)の研究開発

～東日本大震災で明らかとなった技術課題への対応～

航空プログラムグループ 運航・安全技術チーム
奥野善則、小林啓二

1. はじめに

東日本大震災では、300機を超えるヘリコプタが被災地周辺で救援活動を行った。この中には、自衛隊、消防防災、海上保安庁、警察、ドクターヘリなどが含まれている。消防防災ヘリコプタとは、全国の都道府県や政令指定都市の消防局などで運用されているヘリコプタである。その任務は、情報収集、救急・救助、物資・人員輸送、空中消火など、多岐にわたっている。現在、全国で70機あるが、地震発生の翌日(3月12日)には、そのうち45機が東北3県(岩手、宮城、福島)に集結していた。小型のものから大型のものまでさまざまな機種があり、人命救助用のホイスト(懸吊装置)や、機体によっては映像伝送システムなども装備されている。機体の性能や装備によって効率的に実施できる任務が異なるため、時々刻々集まる災害情報に基づいて、各々のヘリコプタに最も適した任務を割り当てていくことが重要となる。また、被災地近隣からの応援だけでは不足する場合には、総務省消防庁が、被災した都道府県からの要請に基づいて、全国の消防防災ヘリコプタの中から適した機体を選んで被災地への派遣(広域応援)を要請する。どの機体にどの任務を割り当ててどのように飛行させるか、その計画を立てて実行することを「運航管理」と呼んでいる。本稿では、JAXAが総務省消防庁および神戸市消防局との協

力のもとに研究開発を進めている、消防防災ヘリコプタの最適運航管理システムの研究開発状況について報告する。

2. 運航管理システムの期待される効果

災害が発生すると、その規模に応じて都道府県等の自治体や国の省庁等に災害対策本部が設置される。さらに、被災地近隣の空港やヘリポートに、ヘリコプタの運用拠点が設置される(図1)。東日本大震災では、いわて花巻空港、山形空港、福島空港等が運用拠点となった。運用拠点では、ヘリコプタの離着陸、駐機、給油、整備等の作業が行われるほか、災害対策本部から電話やFAXで送られてくる要請に基づいて、各機体に任務を割り当てて出動指示が出される。運用拠点と航空機の間は、航空無線(空地通信)を用いた音声通話によって、任務に関する指示や報告が伝えられる。

災害の規模が大きくなると、必要な任務や集結するヘリコプタの数が飛躍的に増大する。現状では、全て人間の判断によって運航管理が行われているが、情報のデータ化と、そのデータをコンピュータで処理して最適な運航管理の判断を支援するシステムが実現すれば、集結したヘリコプタをより効率的に運航することが可能になる。



図1 大規模災害時のヘリコプタ運航の流れ

JAXA では、「災害救援航空機情報共有ネットワーク(D-NET)」(図2)の研究開発を進めている。この研究の主な目的は以下の2点である。

- ・災害時に、航空機と災害対策本部等との間で、運航管理に必要な情報をデータとして共有化するための標準規格を策定し、防災関連機関や機器メーカー等に提唱する。
- ・共有化された情報を用いて最適な運航管理を行うシステムの研究開発を行い、その有効性を実証する。

このようなシステムが実用化されれば、世界初となる。

現在研究開発を進めている消防防災ヘリコプタ用の運航管理システムには、現地用と広域用の2つの機能がある。

(1) 現地用運航管理システム

被災地周辺に集結した航空機に対して、最適な任務、飛行経路、飛行開始のタイミング等を指示する機能を有している。これによって、給油や離着陸の順番待ちのように、任務の遂行に直接必要のない「無駄時間」を削減したり、航空機同士が近接した場所を飛行する回数を減らして空中衝突の危険性を低減する効果が期待される。

(2) 広域用運航管理システム

全国の消防防災ヘリコプタの中から被災地で必要とされている任務に適した機体を選定し、以下のような条件を考慮しながら、最適な飛行経路等を算出する機能を有している。

- ・ヘリコプタは定期的に点検を行う必要がある。点検までの残り時間が少ないヘリコプタを派遣しても、十分に活動することができない。
- ・同時に他の災害が発生する可能性を考慮し、国内の各地方に最低限必要な機体を残しておく必要がある。



図2 「災害救援航空機情報共有ネットワーク(D-NET)」の全体概念図

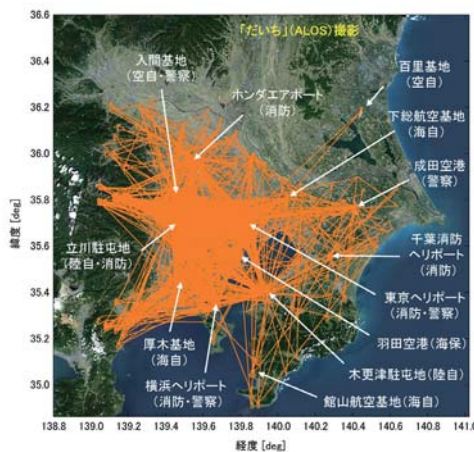
- ・ヘリコプタは有視界飛行方式(パイロットが目視等によって安全を確認し、自らの判断で飛行する方式)で飛行することが多いが、天候が悪い地域を飛行するためには、機体が計器飛行方式(定められたルートを管制官の指示に従って飛行する方式)に対応していることが必要条件となる。

3. シミュレーションによる効果の検証

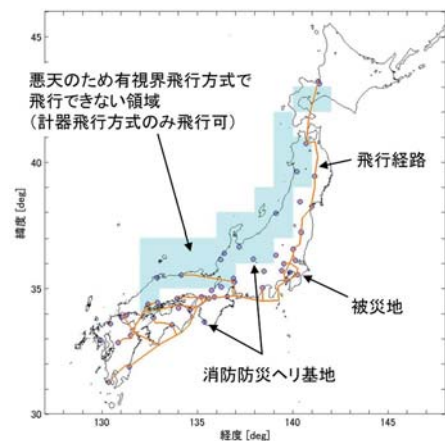
図3は、首都直下地震の発生を想定し、ヘリコプタの運航をコンピュータでシミュレーションした結果

表1 シミュレーションによるD-NET導入効果の例

	被災地周辺		広域応援
	無駄時間 【時間/機】	異常接近 【回/時間】	所用時間 【分】
D-NETなし	2.9	0.82	317
D-NETあり	1.4	0.28	228
導入効果	53%減	66%減	28%減



(1) 被災地周辺



(2) 消防防災ヘリコプタの広域応援

図3 首都直下地震を想定したヘリコプタの運航シミュレーション

である。内閣府の中央防災会議が策定した被害想定や、それに基づいて総務省消防庁が策定している部隊運用計画等を参考にして、JAXA で独自に条件を設定し、各機体の飛行性能、任務の割り当てと実施、離着陸や給油、等の運航の流れを模擬している。

図 3(1)は、発災直後から 9 時間の間の被災地周辺におけるヘリコプタの飛行の軌跡である。全 425 機、のべ 1100 回の飛行が模擬されている。この例では、D-NET を使って最適な運航管理を行うことにより、無駄時間を 53%削減し、ヘリコプタ同士の異常接近の回数を 66%低減できる効果が示された(表 1)。ここで、異常接近とは、航空機で広く用いられている空中衝突防止装置である TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System) の回避指示が作動する状態としている。

最適解を計算するために、「遺伝的アルゴリズム」と呼ばれる手法を用いている。これは、生物の進化が環境に対して最適化されることを模擬した計算手法である。災害のように、予測不可能な状況にも柔軟に対応できることがこの計算手法の特長である。

図 3(2)は、発災初日の全国の消防防災ヘリコプタの飛行の軌跡を示したものである。図中に水色で示したのは、天候が悪いために、計器飛行方式に対応した機体だけが飛行できると想定した地域である。この例では、D-NET を用いて最適な運航管理を行うことにより、配備完了までの時間を 28%短縮できることが示された(表 1)。

広域運航管理の最適解の計算には、「ダイクストラ法」という手法を用いている。経路案内ソフト等でも使われている手法である。

今後は、東日本大震災におけるヘリコプタ運航のシミュレーションを実施し、実際の運航記録と比較することによって、シミュレーションの精度の向上と検証を行う予定である。

4. 東日本大震災で明らかとなった課題への対応

JAXA では、東日本大震災で救援活動に携わった関係諸機関の協力を得て、技術課題の調査を進めている。これまでに明らかとなった主な課題は以下のとおりである。

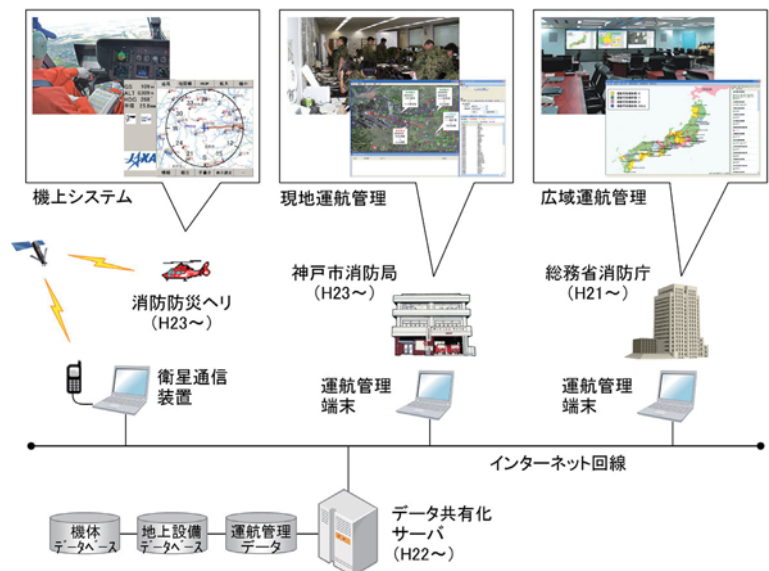


図 4 D-NET 評価用システムの構成(括弧内は開発・評価の開始年度)



図 5 神戸市の消防ヘリコプタ「KOBÉ-Ⅱ」(BK117 C-2 型機)

- ① 運用拠点が被災した場合、事前に想定したマニュアルどおりの対応が困難となり、臨機応変な判断が必要となる。
- ② 多数の機体が同時に運用拠点に集結すると、給油の順番や任務の割り当てを待つ時間が長くなり、効率的な運用が困難となる。
- ③ 空振り出動(既に任務の必要がなくなっていた)、重複出動(複数のヘリコプタが同じ任務にあたってしまった)等の事例が報告されている。
- ④ 被災地が広範囲にわたっているため、運用拠点と航空機との空地通信が山等の障害物によって遮蔽されたり、複数の機体が同時に送信して通話が困難になった事例が報告されている。

D-NET が実用化されれば、このような課題にも対応することが可能になると考えられる。例えば、①～③のような課題については、運航管理をコンピュータで支援することによって、時々刻々変化する状況に応じて常に最適な判断を行うことが可能になる。また、④の課題については、航空無線(空地通信)に

代わって衛星通信を、音声通信に代わってデータ通信を用いることによって、場所に関係なく、多数のヘリコプタと災害対策本部の間で同時に情報共有を行うことが可能になる。

5. 評価用システムの開発

最適運航管理システムを実現するためには、以下のような機器やソフトウェアの開発が必要となる。

- ・航空機と災害対策本部等の中でデータの共有化を行うためのシステム
- ・最適運航管理の計算アルゴリズム
- ・パイロットや運航管理者が情報の入出力を行うためのヒューマン・インターフェイス

現在 JAXA では、総務省消防庁および神戸市消防局との協力のもと、これらのシステムを試作し、評価・実証を行う計画を進めている(図4)。消防庁は全国の消防防災ヘリコプタをとりまとめる国の機関であり、また神戸市は 1995 年に発生した阪神・淡路大震災の経験を踏まえて大規模災害時のヘリコプタの有効活用に積極的に取り組んでいる。平成 23 年 9 月には、神戸市の消防ヘリコプタ「KOBE-II」(図5)に D-NET の機上システムを搭載した。このシステムは、パイロットや後席搭乗員(消防隊員等)用の機上ディスプレイ、プロセッサ、衛星通信装置等の機器から構成される。図 6 に機器の構成と搭載状況を示す。図は岐阜県ドクターヘリに搭載されている D-NET 機上システムであるが、機器の基本的な構成は消防防災ヘリコプタも同様である。

D-NET の機上ディスプレイ(図7)には、運航管理に必要な、自機や他機の飛行情報、任務情報、周辺の地上設備の情報等が表示される。また、消防防災ヘリコプタのニーズに対応した新しい機能の開発も進めている。図8は、上空から発見した災害の位置、範囲、種類等の情報を機上でデータ化して入力するための画面である。現在は、「ヘリテレ」と呼ばれる映像伝送システムを搭載した機体が主に情報収集の任務を分担しているが、D-NET のこの機能が実用化されれば、救急・救助や人員・物資輸送用のヘリコプタからも災害の発生状況をデータとして送信することが可能になる。ただし、搭乗員のワークロード(作業負荷)が過大とならないよう、必要な情報を簡単な操作でデータ化できるヒューマン・インターフェ

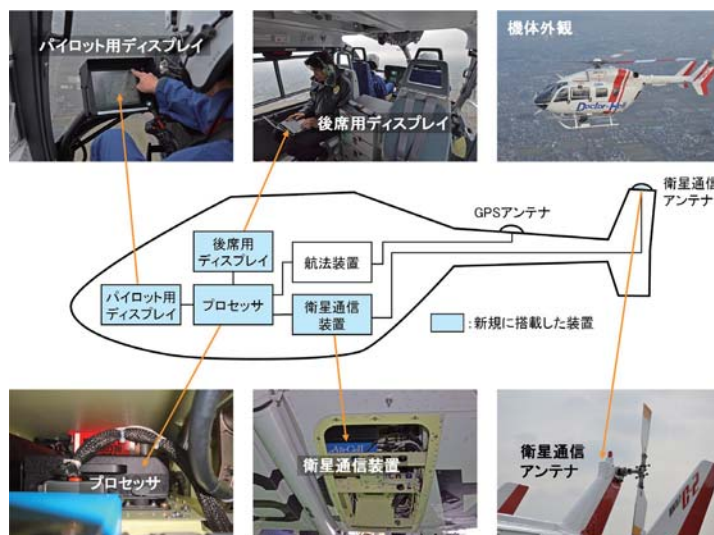


図 6 D-NET 機上システムの構成と搭載状況(岐阜県ドクターヘリ)



図 7 D-NET 機上ディスプレイ(神戸市消防ヘリコプタ)



図 8 D-NET 機上ディスプレイ表示例(災害情報入力画面)

イスの開発が課題となる。

6. 今後の計画

消防防災ヘリコプタを使った本システムの評価を、本年 12 月から約 1 年間にわたって行う予定である。この間、訓練や実際の運用をとおして、本システムの課題の抽出や有効性の評価を行う予定である。平成 25 年度には、これらの評価結果を反映し、より実用性を高めたシステムの開発を目指す。

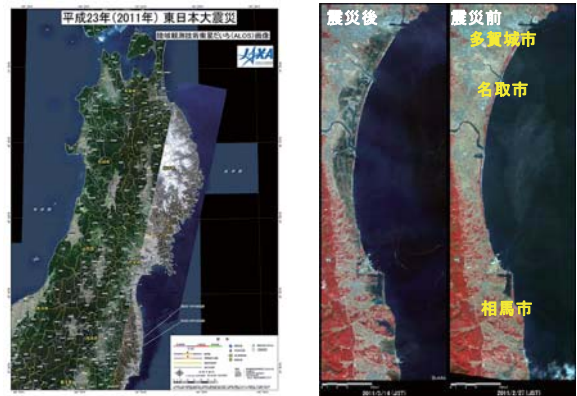
東日本大震災における衛星利用成果

宇宙利用ミッション本部 衛星利用推進センター
五味 淳

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、陸域観測技術衛星「だいち」打上げ後から進めてきた防災利用実証活動の枠組みに基づき、関係省庁並びに被災地等の地方自治体に対し、「だいち」及び国際協力の枠組みから提供された衛星画像及びその解析結果の迅速な提供を行った。また、岩手県災害対策本部等からの要請により、超高速インターネット衛星「きずな」、及び技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」による被災地での通信回線の提供を行った。本報告では、これらの衛星の東日本大震災への対応について報告する。

東日本災害における災害対応機関への提供プロダクトは約80種類（図1）、中央省庁、地方自治体等による「だいち防災WEB」へのアクセスは述べ1,430件にのぼった。



2. 東日本大震災における衛星利用

2.1 観測衛星による活動

東日本大震災への対応として、JAXAでは「だいち」による災害監視を行うとともに、国際災害チャータ、センチネルアジアなどの災害監視に関する国際協力を活用して、政府や自治体による情報集約活動・支援活動への貢献を行った。

「だいち」による観測は、3月12日から被災地の緊急観測を最優先に実施し、4月22日の電源系の異常発生までに450シーン以上の衛星画像を取得した。

また、これまで海外の大規模災害について「だいち」で積極的に国際貢献してきたことにより、国際災害チャータ、センチネルアジアなどの国際協力により、14ヶ国・地域、27機の海外衛星による集中観測が行われ、約5,000シーンの衛星画像の提供を受けた。

これらの衛星画像を防災機関が利用しやすいようJAXAで処理・解析し、内閣官房、内閣府（防災）を始めとする10府省・機関や地方自治体に情報を提供し、地上や航空機では取得困難な広域俯瞰的な被害状況の把握や災害対応計画の立案等に用いられた。



図1 提供プロダクト例

2.2 通信衛星による活動

(1) 超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)

3月15日岩手県災害対策本部からの要請により、岩手県庁、釜石市、大船渡市に地上局を設置し、ハイビジョンテレビ会議、インターネット利用等の通信手段を「災害等特別運用」として提供した。

テレビ会議は、県災害対策本部と現地対策本部（釜石）間、及び現地対策本部と大船渡間等の情報共有に利用された。また、インターネット回線は、住民による安否情報確認・発信に利

用されるとともに、自治体派遣の医療チームや海上保安庁による関係者との情報共有・地図情報確認にも活用された。

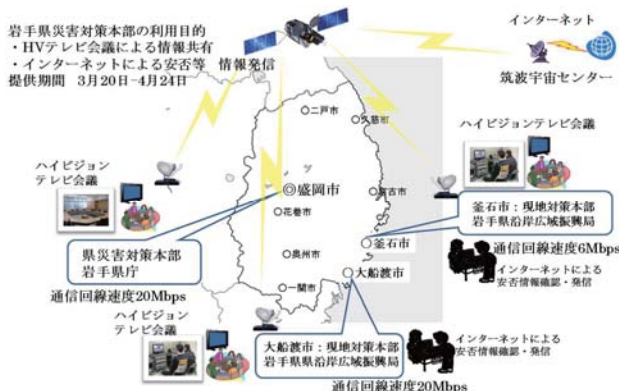


図2 「きずな」による通信回線提供支援の概要

(2) 技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」(ETS-VIII)

岩手県大船渡市からの要請により大船渡市に、岩手県災害対策本部からの要請により大槌町に、宮城県女川町からの要請により女川町に地上局を設置し、インターネット回線を提供した。

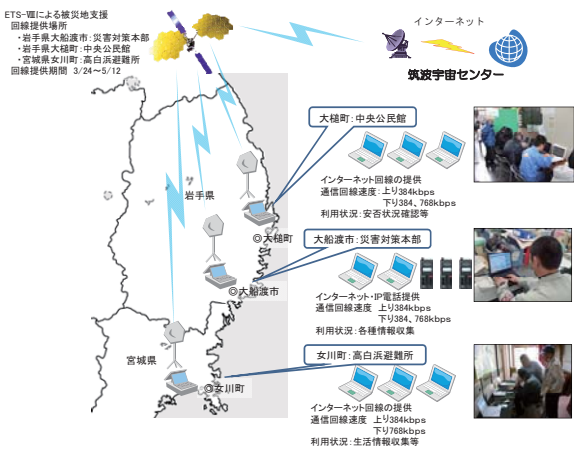


図3 「きく8号」による通信回線提供支援の概要

「きずな」同様、災害対策本部の情報収集から避難所における安否情報確認など、行政利用から一般利用まで被災地のニーズに沿って様々な情報収集に活用された。「きく8号」については回線速度に制約はあるものの、通信端末の機動性・運用性に優れていることから、大災害発生時の初動対応としての回線確保に有効であることが実証された。

表1に「きずな」「きく8号」の回線利用状況のサマリを示す。

表1 被災地での回線利用についてのまとめ

対象	詳細	用途	回線容量	備考
被災者		安否確認のための通話、メール利用	数十 Kbps～ (上下回線)	生存安否や救急救命連絡等で通話必須
避難所		安否確認、被災情報や生活関連情報収集のための通話、インターネット利用	ETS-VIII実績: 768kbps～	岩手県大槌町、宮城県女川町の避難所
派遣チーム		現地からの情報発信と派遣元との共有、映像配信、地図情報等の情報収集利用	数 Mbps～	現地映像配信から避難所と被災地自治体の間の回線容量とした。
被災地自治体	現地対策本部あり	情報収集、共有、発信のためのインターネット利用、情報共有のためのTV会議利用	WINDS実績: 6Mbps～	岩手県災害対策本部、釜石及び大船渡の現地対策本部(沿岸広域振興局)
	現地対策本部なし	情報収集、共有、発信のためのインターネット利用	ETS-VIII実績: 768kbps～	岩手県大船渡市役所

3. 今後の方向性

3.1 衛星による災害監視について

「だいち」の後継として、SAR を搭載したALOS-2 及び光学センサを搭載したALOS-3 を早期に打上げ、今回の震災対応で有効であった「広域観測」と「高分解能観測」を同時に実現し、「SAR と光学の相互利用」で被災状況把握の精度を向上する。また、国際災害チャータやセンチネルアジアなどの国際協力の取り組みを今後も継続する。

3.2 衛星による災害時通信について

被災下でもインターネットは情報収集手段として非常に強力である。特に、音声だけでなく、地図情報やリアルタイム映像等が非常に重要。バッテリーや自動車の電源等で使える衛星通信の可搬局によりブロードバンド・インターネット接続環境を確保することが重要である。

一方、緊急情報の提供という観点では、災害発生直後に、緊急情報(津波警報、避難経路等)を住民の携帯電話に人工衛星から直接、伝達する等の利活用が期待できる。

参考文献

[1] 東日本大震災に関する「だいち」(ALOS)の活動について:
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos/news/2011/110324.html>
 [2] 高橋 陪夫: 宇宙航空研究開発機構の取り組み～ALOS[だいち]による災害復旧・復興の支援～ 写真測量学会 第49回学術講演会 2011年.

探索・救難ヘリコプタのための視覚情報支援技術

研究開発本部 飛行技術研究センター
船引浩平、津田宏果、飯島朋子

1. はじめに

探索、救難、緊急輸送などの人命救助や大規模災害発生時の対応に、ヘリコプタの有効利用が強く求められている。そのためには悪天候時や夜間においても安全に任務を遂行できる能力が必要である。特に夜間および低視程時には、パイロットの周囲からの情報取得が困難となり、飛行が困難となる。JAXA では、コクピットディスプレイを通じて FLIR (Forward Looking Infrared) 映像および合成地形表示を提示することでパイロットの視覚情報を支援する技術研究 SAVERH (Situation Awareness and Visual Enhancer for Rescue Helicopter) を、2008年度より島津製作所、NEC と共に進めてきた^[1]。飛行実験等を実施し、FLIR 映像および合成地形表示の有効性を検証するとともに新たな知見を得られたので報告する。

2. 概要

2.1 目的

SAVERH では開発対象として、ヘリポートや飛行場から離陸、山岳地や離島などの現状周辺まで飛行、探索や救難任務を実施して帰投するような任務を想定した。図1に想定する運航を示す。ここでは、ヘリコプタは都市部のヘリポートを離陸し、有視界飛行方式あるいは低高度の計器飛行方式によって、災害現場まで飛行する。その後、有視界飛行条件を維持しながら、災害現場近くのヘリポート等を経由し、山岳地での低高度での探索、救出任務にあたる。このような運用を想定し、以下のような具体的な表示アプリケーションを開発対象とした。

- (1) 現場あるいはヘリポートまで誘導するトンネル型表示方式^[2]
- (2) FLIR 映像による周辺地形等の表示

- (3) 地形データベースに基づく合成地形の表示
- (4) HMD (Helmet Mounted Display) を用いた全周囲情報表示



図1 想定する運航のイメージ

2.2 システム構成

図2にシステム構成を示す。JAXA 実験用ヘリコプタ MuPAL-ε^[3] (図3) に、HMD^[4] (島津製作所製、図4) および FLIR カメラ (NEC 製 “AERO EYE”、図5) を搭載した。速度高度などの基本情報に、赤外線画像および 3D 合成地形を重畳させた情報が、計器板上の実験用モニタ (HDD: Head Down Display) および HMD を通してパイロットに提示される。

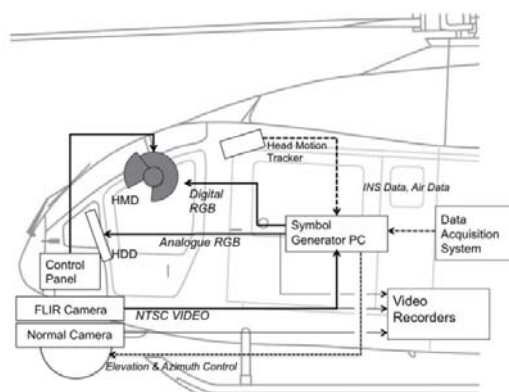


図2 システム構成



図3 実験用ヘリコプタ MuPAL-ε



図4 Helmet Mounted Display



図5 FLIRカメラ

3. 表示内容

3.1 トンネル型誘導表示

トンネル型誘導表示は目標飛行経路を透視図法的に表示することでパイロットに経路追従のための航法情報と誘導のキューを与えるものである。図6にHMD、図7にHDDに表示した例を示す。

これまでHDDへの表示を前提に開発を進めてきたが、HMDではHUD(Head Up Display)と同様に実角で表示されることから、HDDに比べて

表示のゲインが高くなる(ディスプレイに表示されたシンボルの動きが大きく見えるようになる)とともに、トンネルの全体形状が捉えにくくなる。そこで、主に飛行シミュレーション実験によってHMDにおいて適切なトンネルの表示サイズを求めた^[5]。また、空港への離着陸を行う飛行実験においてHMDによるトンネル表示を用いた操縦性が妥当であることを確認した。



図6 HMD表示の例

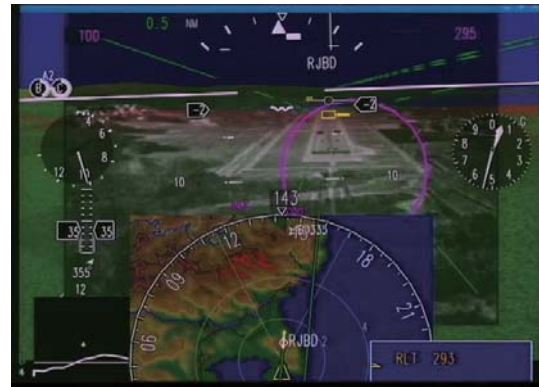


図7 HDD表示の例

3.2 FLIR

図8に可視カメラ、図9にFLIRカメラの映像を示す。これらの映像は夜間、上空から同時に集落を撮影したものであるが、可視カメラの映像では自動車等の灯りしか視認できないのに対し、FLIRカメラの映像では道路や木立、建物を明確に認識することができる。パイロットに道路に沿った追従飛行のタスクを与え、装着したHMDにFLIRカメラ映像を表示した場合と、FLIRカメラ映像を表示しない場合とで実際の飛行軌跡を比較すると、カメラ映像のある方が追従度が高くなっており(図10)、FLIRカメラ映像が飛行にとって有効であることが確かめられた^[6]。

2009年までのシステムではFLIRカメラは機

首に固定されていたが、2010年にヨー方向とアジマス方向に可動化された。可動部の最大動作速度はパイロットの頭の動きに追従するには十分でないものの、任意の方向の赤外線映像を取得できる他、HMDに連動させることで仮想的に全周の映像をパイロットに呈示できるようになった。また、赤外線映像を取得した瞬間の角度を用いて、その角度に合わせたHMD上の位置に映像を表示することで、窓外視界とのずれを実用的に問題の無い範囲に最小化することに成功している。



図8 可視カメラの映像



図9 FLIRカメラの映像

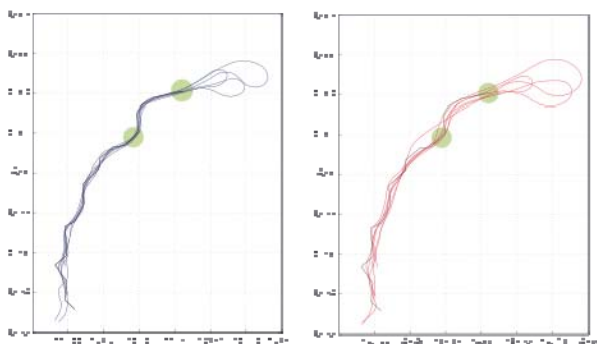


図10 飛行軌跡(左: FLIR映像あり、右: なし)

3.3 合成地形表示

合成地形表示は、地形データベースを元に生成した地形表示であり、パイロットの対地認識を向上させることを意図している。図11に合成地形表示の例を示す。窓外視界が見える昼間の飛行実験では有効性の評価が困難である一方、夜間に低空を飛行することには実験の安全性の確保の観点から問題があった。そこでHMDのバイザー部分を覆い、夜間を模擬することで評価を実施した。その結果、合成地形表示から航法に有効な情報を取得できることが示された一方で、実視界に相当する距離感が得られないことが課題として分かった。

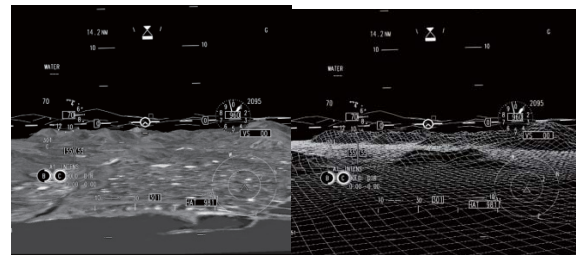


図11 合成地形表示例

3.4 HMDを用いた座標位置検出

頭部姿勢を検出するHMDの機能を用いて、装着者の視線方向にある地物の座標を検出するシステムを構築した。これは島津製作所らが開発した遭難者を検索するシステムを元に地形データベースを組み合わせ、山岳地形に対応させたものである。HMDの装着者は頭を動かして、表示されたクロスヘアを地表の目標に一致させ、手元のスイッチを操作する。この時の視線方向と地形データベースの地表が交差する点を算出して記録、あるいは地図上に表示させる。図12に飛行中に実施した座標検出の結果例を示す。本来の目標を赤の○で、実際に記録された座標を緑の△で示している。急峻な地形の場合でも、誤差は画角換算で 0.5° 以下に抑えられることがわかった。

2010年のFLIRカメラの可動化に伴い、前方以外の目標でもFLIR画像に重畳して目標を捕捉することが可能になった。また、座標捕捉時にはFLIRカメラを目標に自動追従させる機能を設けており、飛行実験によって有効性を確認した。図13には目標捕捉中の表示例を示す。図14では捕捉した目標に接近して上空を通過中の表示例を示す。

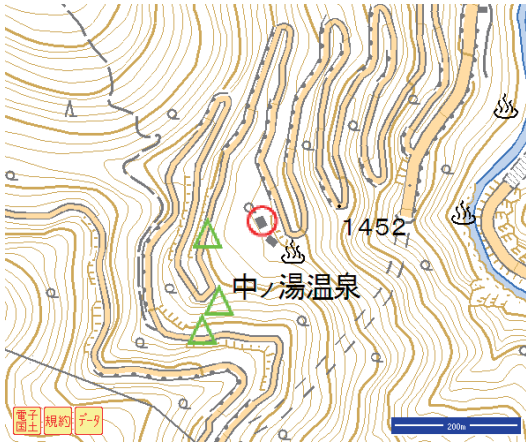


図 12 座標検出の結果例

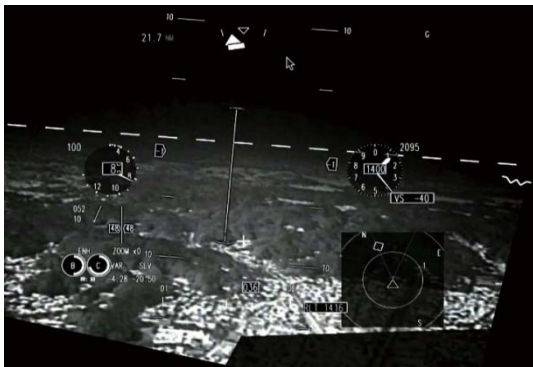


図 13 遠方より目標を補足中の画面



図 14 補足された目標

4. まとめ

これまでの今回の実験の結果、HMD、FLIRカメラ、表示方式のいずれについても基本的な動作と有効性や特長の確認ならびに問題点の抽出を行うことができた。

その一方で、個々の表示方式や単独のセンサのみでは、想定するような環境条件や運用形態に対応できないことも分かってきた。今後の研究では、個々の表示技術や機器の性能の向上に加えて、これらの組み合わせによる有効性の評価を進めてゆく予定である。

参考文献

- [1] Funabiki,K., Tsuda,H., Iijima,T., Nojima,T., Tawada,K. and Yoshida,T.; Flight experiment of pilot display for search-and-rescue helicopter, Proc. SPIE, 2009.
- [2] Funabiki,K. ;Design of Tunnel-in-the- Sky Display and Curved approach, Proc. 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.
- [3] Okuno,Y. and Matayoshi,N. ; Development and Flight Tests of a New Research Helicopter MuPAL-ε , Proc. American Helicopter Society 57th Annual Forum, 2001.
- [4] Tawada,K. and Okamoto,M.; In-flight evaluation of an Optical Head Motion Tracker III, Proc.SPIE 2011.
- [5] 飯島朋子、舩引浩平、津田宏果; HMD のトンネル表示に関する評価実験、第 48 回飛行機シンポジウム、2010.
- [6] Tsuda,H., Funabiki,K., Iijima,T., Tawada,K. and Yoshida,T.; Flight Tests with Enhanced/Synthetic Vision System for Rescue Helicopter, Proc.SPIE 2011.
- [7] 津田宏果、舩引浩平、白水博文、飯島朋子; HMD のトンネル表示に関する評価実験、第 47 回飛行機シンポジウム、2009.

月・惑星探査ロボット技術の展開

月・惑星探査プログラムグループ 研究開発室
西田信一郎

1. はじめに

月周回探査機「かぐや」は、月の周回軌道上から月を詳細に観測し、多くの科学的成果を挙げ、お茶の間にも息を飲むほどの精細なハイビジョン映像を届けた。月は、その形成過程などに未知の部分が多く、それを解き明かすことは太陽系全体の形成過程の解明にも繋がると考えられている。月は、人間が足跡を残した地球以外の唯一の天体であるが、惑星や小惑星に比べてひじょうに近いので、地球以外の人間の活動場所として優位な地位が揺るぐことは無い。「かぐや」に続く月面探査については、宇宙開発戦略本部の月探査懇談会で議論が行われ、2020年頃までに月の南極周辺にロボットにより無人の観測拠点を構築するというプランが示された。

国際協働での月・惑星探査の検討が進められており、将来の火星有人探査を目標として、国際協働で準備を進めることについてのロードマップにつき、本年の京都でのISECG会合において各国宇宙機関の局長級により合意が得られた。

無人探査や有人探査の準備段階には、天体の表面を移動して広く探査活動や拠点構築活動を行うロボットが必須である。探査ロボットの技術は、地上の不整地や災害被災地で活動するロボットと共通の技術要素が多い。本稿では、月・惑星探査ミッションへの適用を目指した探査ロボットの技術と、その展開につき述べる。

2. 月・惑星探査ロボットのミッション概要

2.1 月探査の方向性

月までの距離は、平均で約38万kmであり、惑星と比べて二桁～三桁も近く、短時間で到達できる。月は、地球の約1/4の直径があり、他の惑星とその衛星のスケール比に比べて極端に大きな衛星である。このため、その生成過程がまず謎である。火星サイズの惑星が地球に衝突して、それによって生じた破片が集積して月が出来たとするジャイアント・インパクト説が有

力と考えられているが、未だ確証が得られていない。このため、月に核があるか、マンツルの構成はどの様になっているかなど、内部構成もひじょうに興味深い対象である。

宇宙開発戦略本部の月探査に関する懇談会（議長：白井前早大学長）で、今後の我が国の月探査戦略が検討・議論され、2010年7月に戦略が纏められた^[1]。ここでは、月探査の目的として以下の3つが重要とされている。

- ①太陽系探査のための宇宙技術を自ら確立
- ②世界トップレベルの月の科学を一層発展
- ③国際的プレゼンスの確立

即ち、地球に最も近い重力天体である月の探査を軟着陸技術、帰還技術、探査ロボット技術などの太陽系探査技術の実証の場としても活用しつつ、「かぐや」で我が国が世界に先行している月の科学探査を進め、併せて大規模な宇宙探査に不可欠な国際協働探査におけるリーダーシップの発揮や外交力の発揮を可能とすることが重要としている。また、2020年頃に月の南極域に世界で初めてロボットにより探査基地を構築し、地震計等の観測機器を設置して1年以上の内部構造探査、表面移動ロボットによる数ヶ月間の周辺探査、これまでに人類が手にしたことのない岩石の採取とサンプルリターンを行うことを目標として設定している（図1：拠点の概念図）。

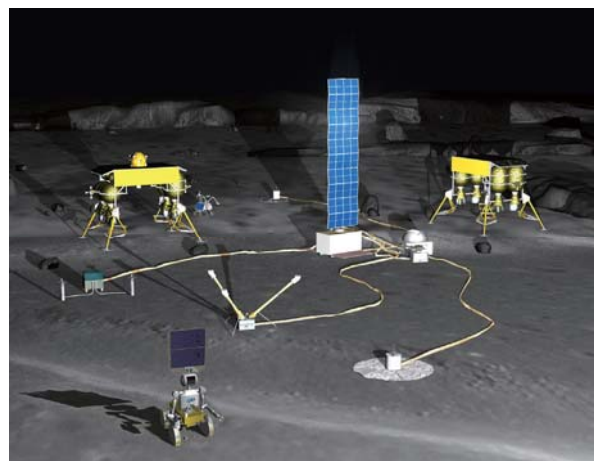


図1 月の南極の観測拠点の概念図

2.2 火星表面探査

火星は、表面が地球と同様な岩石質の地球型惑星であり、大きさも地球に近い。このため、火星は、他の地球型惑星とともに地球と同様の過程で生成されたと考えられ、探査によって、その構成と進化が明らかになれば、地球の進化を探る上でも有効な知見が得られる。火星には、火山や地割れ、流水地形が見られ、地殻変動の歴史や過去に表層にあったと思われる水が何処へいったのかなど、解き明かさねばならない謎も多い。また、火星に生命の痕跡が見つけれられる可能性もある。この様に火星探査では、水が関与した堆積岩や地層の探査が重要な対象となり、これらの採取や掘削が重要なミッションとなる。

3. 探査ロボットのミッションの詳細

前章で月・惑星の探査ロボットのミッションとして、拠点の構築や表面移動探査が挙げられた。主要な作業要素を含む典型的な作業例として、次の3種の作業が挙げられる^[2]。

- ① 岩石採取
- ② 土壌の掘削・コアリング (図 2)
- ③ 観測機器の組立・設置 (図 3)

移動ロボットに観測装置を搭載し、表面移動手段や岩石採取、掘削装置を適用することにより、観測域が二次元～三次元的に広がり飛躍的に多くの科学的成果を得ることができる。また、観測機器を設置し、電源システムや通信システムとの間の電力、信号ラインの敷設を行い、観測拠点として構築することにより、長期間の観測を行うことが可能となる。

アポロ計画では、月のおもて面の低緯度地域の主に海と呼ばれる平坦な溶岩平原地域から岩石が持ち帰られ、詳細な分析が進められている。一方、月の裏側の岩石は未だ持ち帰られていない。採取した岩石や表土、掘削コアなどのサンプルを地球に持ち帰ることにより、大掛りな設備により組成などの詳細な分析を行うことが出来、ごく微量であっても多くの科学的知見を得ることが可能となる。

4. 月・惑星探査ロボットの要素技術

探査ロボットには、地球周回の人衛星とは異なる様々な技術が必要である^[3]。以下では、これらの技術につき、その概要を述べる。

4.1 遠距離通信

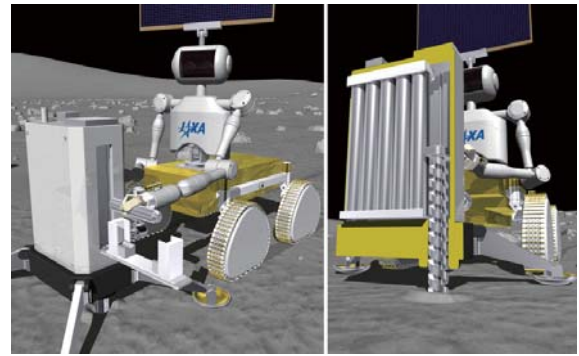


図 2 月面ロボットによる掘削作業概念

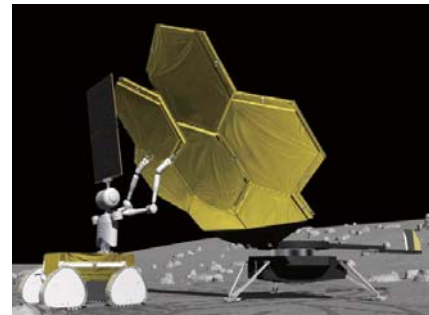


図 3 月面ロボットによる機器組立概念

惑星探査では、何億 km もの遠方にある探査機と通信を行わねばならない。このため、空間損失が大きく、探査機側に搭載できる送信機のパワーやアンテナの利得は限られているため、通信回線の利得を確保するためには、大きな径の地上局アンテナが必須である。通信周波数帯としては、Sバンド、Xバンドがよく用いられるが、画像情報など的高密度伝送のニーズは高まっているため、近年はKバンドの適用なども進められている。しかし、Kバンド通信では降雨損失が大きく、これを考慮すると、Kバンド通信の適用のためには、地上局を離れた場所に冗長的に配置する必要が生じる。遠距離通信であるため、通信伝送の所要時間も大きく、例えば、火星までの平均距離(約 2.4 億 km)の探査機との通信には、往復で約 1600 秒(約 27 分)を要する。

4.2 表面移動技術

天体の表面を移動する方法として、様々な方法が考えられる。例えば、「はやぶさ」に搭載された移動式カメラロボット「ミネルバ」は、内部でウェイトが移動する反動によって微小な重力の小惑星の表面を転動して移動する方式である。一方、月や火星などの地球の数割の重力がある天体の表面移動には、車輪等による走行ロボットが有効である。以下では、月の表面移動を例として、表面移動ロボット技術について述べる。

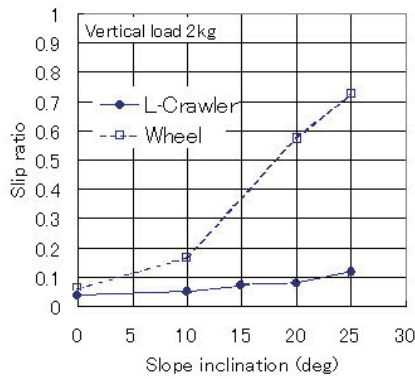


図4 ライトクローラと剛体車輪の登板性能比較

(1) 走行機構

月の表面は、微粒子の多い表土であるレゴリスが数m以上積もっており、起伏の多い地形や傾斜地の移動に於いては滑りや埋もれを生じるため、移動ロボットの走行は容易ではない。特にレゴリスの積もった斜面の走行は、これまでの火星探査ローバで用いられている剛体の車輪では最下点の高い接地面圧の箇所にてレゴリスを掘り込む状態に陥りやすく、スタックし走行不能に陥る恐れが大きい。このような状況は、重力斜面下方および斜面法線方向への成分比率と地盤保持力の関係により生じる現象であり、地形の母線に沿った登坂に限らず、どのような経路を設定しても斜面下方への滑りや埋まりとして生じる現象である。このようなレゴリスが柔らかく積った天体表面の移動には、走行系の接地面圧を低い一定レベルに設定し走行機構によるレゴリス地盤を適度に締め固めつつ走行することが有効である。JAXAでは、弾性車輪機構と無限軌道（クローラ）方式の中間的な位置付けの方式であるライトクローラ機構や弾性車輪が開発され、試験・評価が進められている^[4]。ライトクローラ機構は、シンプルな構成で低圧の接地面圧および土壌の締め固め効果を有し、小石の噛み込みを生じない機構であり、レゴリス模擬砂斜面の登坂性能試験でも良い試験結果が得られている（図4）。

レゴリスには微細な粒子も含まれており、粒子がレゴリス特有の角張った外形であるため、研磨材のように作用する。このため、レゴリスに触れる走行系部材の磨耗対策や摺動部へのシールなどの防塵対策を十分に施す必要があり、防塵シール機構などの開発が進められている^[5]。

(2) 自己位置同定

月面では、地球周回GPS衛星電波による自己位置の割り出しは困難である。走行系のアクチュエータの回転情報に基づくデッド・レコニングは、レゴリス上走行では滑りによる誤差を生じるため、それだけでは十分でない。そこで、ローバから月面地形を計測し、常に地形を基準として自己位置の変化を求めることが必須である。ローバに対する地形計測のセンサとしては、レーザレンジファインダとステレオ画像センサが有望である。

(3) 操縦・制御

日本から月が見える時間帯と見えない時間帯で変動があるが、月面までのコマンド・テレメトリの往復には空間伝送時間と地上局計算機内の処理時間などにより約3秒の時間を要する。このため、走行制御などは、ローバが自動・自律的に行う必要がある。限られた通信伝送容量の下ながら、ローバから一定周期で前方の月面画像を取得し、この情報やランダから計測した情報を基に地上では詳細な月面3次元マップを構成し、時々刻々更新する必要がある。このような処理を地上系で行い、これを基に地上から移動ロボットへ走行経路の指令を送る形態が有

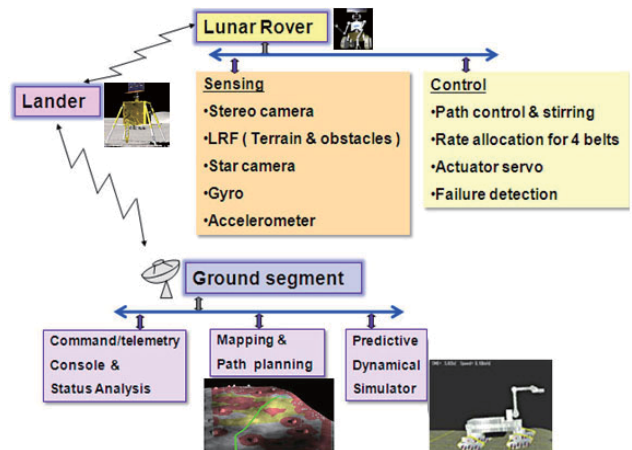


図5 月探査ロボット地上系の基本構成

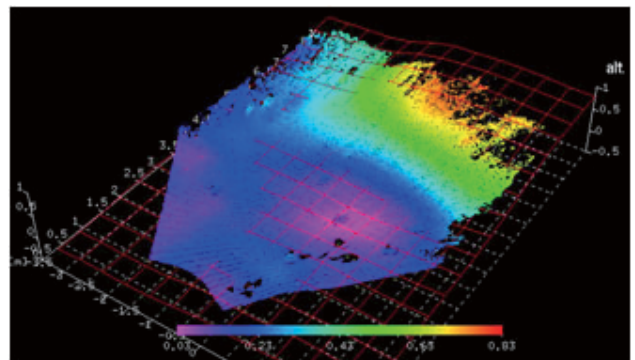


図6 経路自動生成系の地図照合出力例

望である。

地上系の基本構成を図5に示す。ローバ経路の自動生成系の出力例を図6に示す^{[6][7]}。

4.3 アーム作業技術

月・惑星探査ロボットは、そのロボットアームで岩石の採取や機器の組立・設置などを行なう。このため、ロボットアームには汎用性が求められる。この様なロボットアームには、ETS-VII や JEMRMS で培われた機構や操作・制御技術^[8]やその後の研究成果(図7)が有効に活用できる。特に遠隔操作や自動制御、力制御、画像フィードバック制御などの技術が有効に活用できる。

4.4 越夜技術

月面では、日照が得られず太陽電池が利用できない夜間は、ひどい低温であることから、限られたエネルギーリソースでいかに越夜するかが最大の課題である。探査ロボットが夜間の低温にさらされても不具合を生じず、再度日照が得られた時に再起動することが可能なら、活動時間を昼間に限定してミッションをかなり長期間遂行することが可能である。そのためには、探査ロボットの構成部品やコンポーネントが夜間の温度環境、すなわち低温に長期間耐えることができなければならない。このため、JAXA では月面での越夜技術の基礎データを得るために、各種部品やコンポーネントの耐月面温度環境試験を実施している^[8]。また、併行して高性能なリチウムイオン電池や再生型燃料電池の研究・開発が進められている^[9]。

4.5 有人探査技術

人間が実際に現地に到達するという人類のフロンティア拡大の観点でも有人探査の意義は大きいと考えられている。現在、ISECG の枠組みで世界の13の宇宙機関が参加して、火星の有人

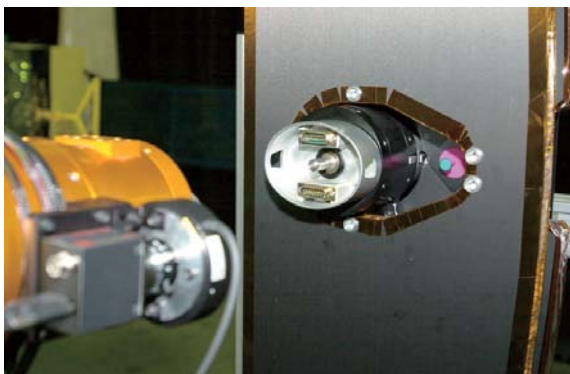


図7 カラーマーカを用いた自動組立作業

探査を将来の目標に置いて国際協働で計画を検討している。

5. 表面移動探査ロボット技術の展開

月や火星などの表面移動探査ロボットは、遠隔操作や自動で不整地を走行し、周辺地形を計測し、アームで各種作業を行なう。このため、探査ロボットの技術は、農林業ロボットや災害対策ロボット、原子炉点検ロボット、海洋ロボットなどと多くの共通技術で構成される。従って、探査ロボット技術の発展・展開により、これらの地上ロボットに寄与することが可能と考えられる。

6. おわりに

月・惑星探査ロボットのミッションや必要な技術の概要および展開について述べた。宇宙探査は、科学だけでなく、国民の意識高揚や国際的プレゼンスの確立にも有効と考えられ、戦略的に注力していくことが期待される。

参考文献

- [1]宇宙開発戦略本部「月探査に関する懇談会」
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/kaisai.html>
- [2]西田：「月面ロボットのミッションと作業シナリオ」, 日本機械学会年次大会(2011), J192011
- [3]西田, 星野, 松本：「JAXAの月探査技術の研究開発状況」, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 1C06, (2009) pp.156-160
- [4]西田, 若林：「月表面移動探査ロボットのシステム検討」, 第52回宇宙科学技術連合講演会, (2008)3A14
- [5]鈴木, 松本, 西田, 若林, 星野：「月面粉塵用のブラシ型シールの大気中および真空中での実験」, 第53回宇宙科学技術連合講演会(2009)
- [6]黒川, 西田：「月惑星ローバのLRFによる障害物検知及び地形計測」, 第52回宇宙科学技術連合講演会, (2008), 2I07
- [7]西田, 若林：「月面ローバの操作制御システム」, 第55回宇宙科学技術連合講演会(2011)
- [8]西田, 林, 小田：「ETS-VII ロボットアームへの力覚制御の適用」, 日本機械学会論文集C編69巻677号(2003), pp.187-194
- [8]星野：「宇宙用部品の耐月面環境試験」, 第53回宇宙科学技術連合講演会, (2009)
- [9]曾根, 星野他：「月環境への対応を目指した電源系技術」, 第52回宇宙科学技術連合講演会, (2008)

1. はじめに

原発事故を契機として、「想定外」に対する安全な対応が注目されるようになった。

例えば、見込みの10倍の荷重に耐えるように設計すれば、おそらく想定外にも耐えられるが、重量オーバーが成立性も危うくする航空宇宙分野では、この選択はできない。そこで、最小限の余裕を見込んで設計する他ない。例えば旅客機は巡航条件の3.75倍の荷重で設計される。^[1]

しかし、運用条件予測が間違っていれば、実際には余裕がないこともあり得る。そこで、運用条件の正確な予測と設計への適用が安心な設計のために重要である。

急速に発展するIT（情報技術）の利用は安心な設計のための信頼性の向上にも有効活用できる。情報・計算工学（JEDI:Jaxa's Engineering Digital Innovation）センターではITによる開発の信頼性・効率性を向上することを目標とする情報化事業に取り組んでいる。本稿では、信頼性向上に関する、我々の取り組みのいくつかをご紹介します。

2. JEDI センターでの取り組み例について

2.1 数値シミュレーションの利用

宇宙機は、宇宙空間において地球上では再現困難な環境に遭遇する。また発射時に用いられる液体ロケットエンジンでは内部が100気圧、3000℃に達するなど過酷な条件で運用される。高信頼性のためには、このような条件での物理現象を正確に予測したうえで設計に反映する必要があるが、どのような現象が発生しているかを実験的に観察することは非常に難しい。

そこで、物理方程式を出来るだけ忠実に模擬し、数値解を求める数値シミュレーションは、このような設計に有用な手段であり、コンピュ

ータの発展と共に能力も増大している。

JEDI では、この技術を活用し、JAXA プロジェクトにおける技術課題を解決することを目的とした業務に取り組んでいる。

(1) ロケットエンジン設計解析技術の研究

世界トップレベルの液体ロケットエンジン開発を目指して、宇宙輸送ミッション本部と協力して、液体ロケットエンジンの設計解析技術の高度化に取り組んでいる。図1の例では、世界に先駆けたエンジン全体の高精度コンピュータシミュレーションにより、数年後に予定されているエンジン試験に先立ってエンジン性能確認を実施した。



図1 エンジン全体の温度分布（青は温度が低く、緑、オレンジ、赤の順に高くなる）

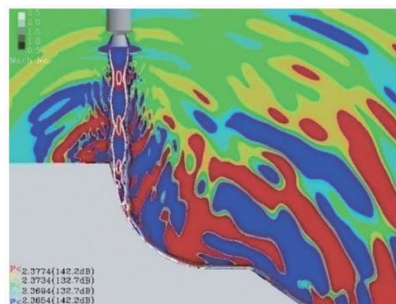


図2 次期固体ロケット射点の低騒音化設計 音響伝搬が圧力変化として可視化されている

(2) プルーム音響の予測・低減技術

ロケット打上げ時の、プルーム（エンジン排気）から発生する音響は、衛星等の不具合の原因ともなり、音響環境予測は重要である。しか

¹ 航空宇宙における、このような設計基準は、長年にわたる、時には犠牲を伴う経験を通じて、確立されてきたことを、航空宇宙関係者として自戒しなければならないと思う。

し今までの経験的な手法は、十分ではなかった。そこで、プルームでの流体现象の解明や、音響場の高精度予測を可能とする数値シミュレーションツールの開発に取り組み騒音レベルの推定だけでなく騒音発生物理現象を明らかにしている。この技術はH-II Bやイプシロンロケットの射場設計(図2)に既に用いられている。

2.2 ソフトウェアエンジニアリングの利用

宇宙機に搭載される電子機器には、様々なソフトウェアが組み込まれている。JEDIでは、間違いのない、より良い宇宙機ソフトウェアの「つくり方」と「確認する方法」についての研究を行っている。また、このような電子機器の開発段階において、設計の最適化や設計期間の短縮、品質向上を図るため、ソフトウェア技術の活用を推進している。

(1) ソフトウェア IV&V

搭載ソフトウェアは宇宙機と同様、ひとたび宇宙空間に出ると、修理・修正は困難であり、その誤動作は、宇宙機にとって致命的な故障につながる場合もあるため、宇宙機ソフトウェアは、常に、高い信頼性を求められている。この取り組みのひとつとして、「ソフトウェア独立検証及び有効性確認(IV&V)」を実施している。IV&Vとは、開発部門とは資金的、組織的に独立した部門が、独立した視点と技術によって、課題や問題を洗い出し、潜在するリスクを軽減する活動である。

(2) ソフトウェア開発のプロセス改善

ここでのプロセスとは、要求分析、設計、製作、試験といった、ソフトウェアの「作り方」のことである。JEDIでは、宇宙機ソフトウェア開発に特有のプロセス改善サイクルの確立を通じて、信頼性の高いソフトウェアの開発技術を構築することを目指している。

(3) RTOS の高信頼性検証プロセスの構築

ソフトウェアの大規模化、高機能化に伴い、基本ソフトウェアであるRTOS(Real Time Operating System)についても、その重要性が増している。

その取り組みの一つとして、ソフトウェア業界にさきがけて、RTOSの検証方法に関する研究を行い、その信頼性を確保するプロセスの構築を行っている。

本研究では、まず、宇宙機以外(たとえば、

航空機、鉄道、医療機器など)にも対象を広げ、開発標準やガイドラインを調査し、検証要求にはどのようなものがあるのかを整理し、RTOSに特化した検証要求をまとめた。次に、この検証要求を満足させるテストの進め方を検討し、仕様や機能を漏れなく検証する考え方(網羅テスト)と、問題が発生しそうなところを抑えていく考え方(ピンポイントテスト)を上手く組み合わせさせたプロセスを考案した。

また、新たなRTOSの開発も行っている。このRTOSは、ひとつのソフトウェアに障害があっても、ほかのソフトウェアに影響が波及しないようにする仕組みを持つなど、宇宙機システム全体の信頼性向上に寄与できる機能を持っている。このRTOSは、上述のプロセスで検証することにより、高い信頼性を確保している。この国産RTOSは、実際の宇宙機に搭載することが計画されている。

(4) モデルベース開発技術の調査・研究

機能要求や設計仕様は、人が読み書きする曖昧さを含みうる文書で記述されてきた。モデルベース開発では、定められた規則や表記法に従って記述されたモデルで表現することにより、一部の設計確認作業などは、コンピュータ処理により効率化できると期待される。また、一度作成したモデルを別のシステムに再利用することも可能で、開発作業の効率化にも繋がる。モデルベース開発は、海外の航空機や宇宙機の開発で、すでに一部実用化されているが、まだ新しい技術であり、日本では自動車産業等で採用されはじめたところである。

JEDIでは、宇宙開発へのモデルベース開発技術の導入を目指し、開発の各過程で必要とされるモデル及びそのモデル化の規則・表記法、開発プロセスなどの検討を行っている。

3. 結言

安心な設計を実現する、信頼性の高い宇宙開発のための、

- ・数値シミュレーション
- ・ソフトウェアエンジニアリング

に関する、情報・計算工学センターの活動を紹介した。今後も、情報技術を核として、高信頼化を通じた安心な設計に結びつく研究開発に邁進してゆく所存である。

宇宙輸送における安全信頼性技術の革新

宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系システム／推進技術研究開発センター

沖田耕一、小林悌宇

1. はじめに

我が国の宇宙輸送の歴史は、半世紀を超えようとしているものの、未だに信頼性や品質管理には多大に注力し、維持向上を図っていかなければならない状況にある。これは、世界のロケットをみても同様な状況にあり、図1に示す通り、失敗確率は概ね 20 回に1回失敗するというレベルにある。

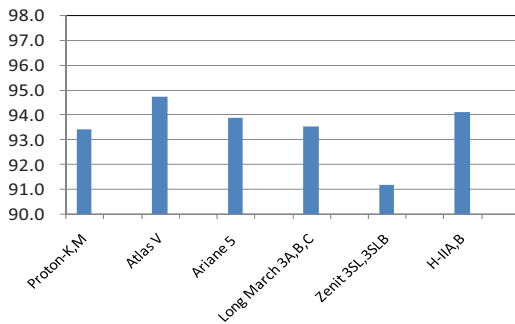


図1 世界の主要ロケットの成功確率

今年も中国やロシアで相次ぐ衛星や補給物資の打上げ失敗があり、宇宙利用活動を行うには、宇宙輸送システムの信頼性・品質維持が重要であることは言うまでもないところである。

宇宙輸送ミッション本部では、高い信頼性品質を確保し、国際競争力が高い宇宙輸送システムを実現すべく、それらを実現する上で重要技術である高信頼性を実現する開発プロセスへの革新を目指しているところである。本稿では、これらのシステムの概要と、その実現に向けた現状及び計画について紹介する。

2. 現状認識

2.1 これまでの信頼性評価

一般に宇宙分野においては、一般産業と比べ、以下の点において信頼性評価が困難な点が存在している。

① 認定試験供試体が高価なために、開発試験における供試体数が少なく、一定期間で製作されたものを用いるため、製造や検査のばらつきに対する

確認が十分でない部分がある

- ② 破壊限界試験を実施すると設備までも破壊する可能性があり、十分なレベルの限界試験が困難な部分がある
- ③ 飛行時の複合的な実環境を模擬できない部分がある
- ④ 複雑な機器と組合せで構成され、その不具合モードも多種にわたっており、地上設備やシステム、サブシステム間の相互影響について十分な把握が困難な部分がある
- ⑤ 加速試験方法など定義されたものは少なく、十分な評価を行うには費用や時間が多大に要する

これらの課題に対して、これまでの信頼性評価手法では費用などのみならず技術的な限界がある。このため、打上げ運用の機会を捉えた製造データ、特性データ、環境データなどの蓄積とその評価及び必要に応じた設計反映とともに、蓄積したデータやシミュレーション等に基づいた新たな設計手法(いわゆるロバスト設計手法からの評価)やモデルの構築を実施し、潜在的な適合ポテンシャルの識別のための活動を実施しているところである。今後、再使用、有人輸送システムを目指していくためには、その安全性に係るリスクを定量的に示していく必要があるが、従前の手法では、リスクを低減し信頼性を確保する場合、多大な試験や開発期間が必要となり、実現する上で非常に大きな課題となる。

2.2 新たな信頼性評価手法

現在実施している LE-X エンジンの研究開発では、従来、開発期間・開発コストの増大を招いてきた図 2 に示すテスト-フェイル-フィックス型の開発(実証信頼度型)からの脱却を目標としている。図 3 に現在推し進めている設計信頼性評価及び開発リスク評価プロセスについて示す。これまでの知見をデータベース化し、こうした Lessons Learned などに基づく故障モードライブラリ、イベントツリーアナリシスにより、故障モードの抜けを可能な限り防止した詳細 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)を構築し、品質特性のばら

つきなどに対し品質工学に基づくシミュレーション及び、システムの運用を想定した不具合シナリオ等により、更に詳細 FMEA の充実を図る。併せて品質機能展開(QFD)を用いたコンポーネントの機能・機構要求に基づき、より不具合などに耐性の強いシステムに向けた機能配分をシステム設計で行うことで、設計の初期段階から高信頼性をあらかじめ作り込む。この設計においては、確率論的設計等の品質工学手法や、要素試験に裏打ちされた物理モデルに基づく CFD 等の高 FIDELITY 解析モデルを構築を目指すとともに、高度な検査技術を活用し、高精度/効率化を図ることが必要不可欠となっている。最終的に、図 4 に示す通り、これまでの信頼性評価に対して、開発初期段階で徹底的に現象の把握、リスクの抽出及び不適合モードの洗い出し、不具合シナリオに基づく連鎖事象や複合事象の把握などを実施し、これらを基に設計の信頼度を定量化していくこととしている。

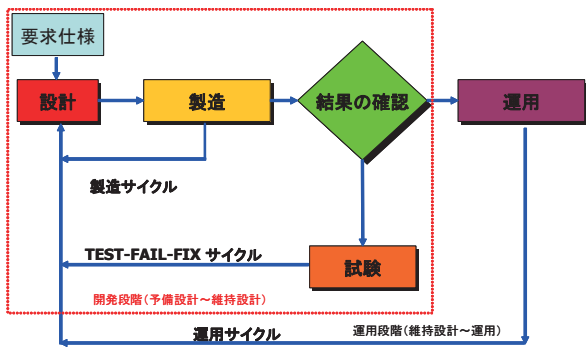


図 2 従来型開発手法

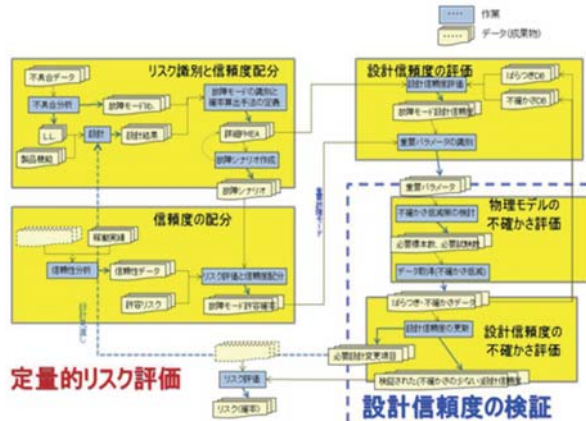


図 3 新たな設計評価プロセス

これは、不具合により発生する最終事象と詳細 FMEA により抽出されている不具合モード毎に定量的な信頼度を評価することによって、これまでのエンジンシステム試験による実証信頼度の評価ではなく、要素試験やサブスケール、コンポーネント試験などから信頼度を評価できるよう開発手法そのものの変革を

試行している。

3. 今後の計画

次期基幹ロケットなどの開発に当たっては、過去事例(H-II/IIA ロケット、GX ロケット)にある通り、最重要要素である推進システム(LE-Xエンジン)を先行的に研究開発(フロントローディング)することにより、技術的な見通しを得ることが、システム開発上のリスクを低減することに直結する。また、エンジンの開発には多大な経費がかかることもあり、LE-Xエンジンの技術実証をフロントローディングで実施することは必要不可欠である。この中で図 3 に示すとおり、多面的に網羅された故障モードを図 4 に示すように様々な要素試験や非破壊検査技術により信頼度の定量的評価を行い設計信頼度を効率的に実証することも計画している。

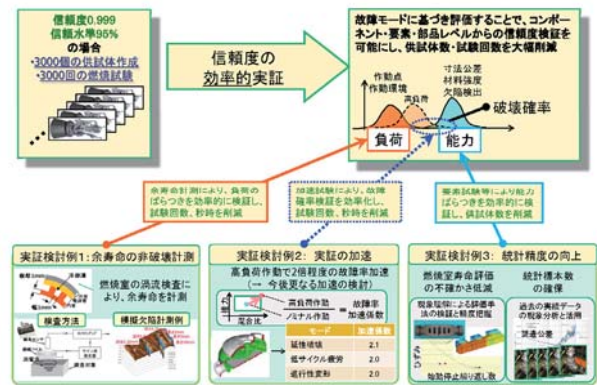


図 4 設計信頼度の効率的検証例

併せて、図 5 に示す通り、開発期間の短縮や開発コストの低減、高い信頼性・安全性を実現するために、効率的な部分試験、高い精度のシミュレーション技術を活用し、リスクの定量化等を行い、情報技術を活用した高信頼性開発基盤の構築を実施しているところである。

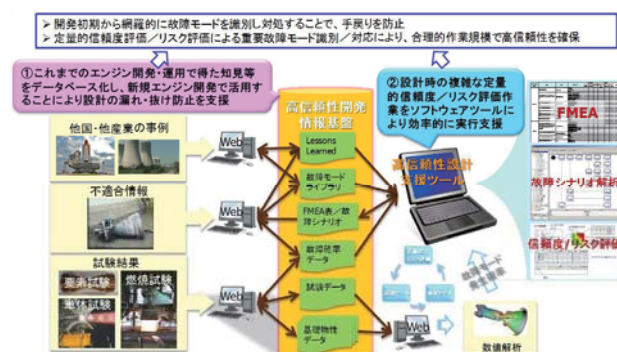


図 5 高信頼性開発マネジメントシステム

大震災発生時の「きぼう」及び「こうのとりの2号機」の運用について

～復旧作業及び今後への教訓～

有人宇宙環境利用ミッション本部 JEM運用技術センター
上杉正人

1. 概要

平成23年3月11日に発生した東日本大震災のため、「きぼう」日本実験棟（以下「きぼう」という。）及び「こうのとりの2号機」（以下「こうのとりの2」という。）の運用が11日間に渡り日本の地上設備から不可または制約を受ける事態となった。この教訓から地上設備を宇宙ステーションプログラムにおいて標準的に使用されているハザード解析評価の手法を用いて再評価を行った。この再評価により識別された課題及びその対策をまとめた結果を報告する。

2. 「きぼう」及び「こうのとりの2」の運用の概要

「きぼう」は米国、ロシア、欧州、カナダ及び日本の15ヶ国が参加する国際宇宙ステーション(ISS)の実験棟の1つであり、「こうのとりの2」はこのISSへ物資を運ぶ補給船である。図1に「きぼう」及び「こうのとりの2」の運用の概念図を示す。

「きぼう」の運用管制は筑波宇宙センター(TKSC)に設置された「きぼう」運用管制システム(JEMOCS)から米国ヒューストンにある米国航

空宇宙局(NASA)ジョンソン宇宙センター(JSC)内のISSミッション管制センター(MCC-H)、ホワイトサンズ地上局及び中継衛星(TDRS)、ISS本体を経由(ISSリンク)して行われる。JEMOCSが不測の事態で使用できない場合は、NASAとの取決めに従い、必要最低限の運用をMCC-Hが代行することになっている。

「こうのとりの2」も同様にTKSCに設置された「こうのとりの2」運用管制システム(HTVOCS)で運用管制が行われる。ISS取付中(係留中)はISSリンク経由で運用管制が行われ、飛行中はISS本体を経由せずにTDRSリンク経由でMCC-Hを通過して「こうのとりの2」と直接通信リンクで運用管制を行う。

尚、MCC-Hがハリケーン等で被害を受けて、ISSの運用ができなかった場合に備えて、NASAはマーシャル宇宙飛行センター(MSFC)にMCC-Hのバックアップ管制機能(BCC-HOSC)を整備している。このため、MCC-Hが使用できない場合、「きぼう」及び係留中の「こうのとりの2」の運用はMSFCにあるBCC-HOSC経由で実施される。

3. 震災による影響

3.1 震災による設備の被害状況

平成23年3月11日宮城県沖を震源とする地震及び茨城県沖を震源とする余震により、JEMOCS及びHTVOCSが整備されているTKSC内の宇宙ステーション運用棟に4階廊下の天井が崩落する等の被害を受けた(図2)。

このため、5日間に渡り、建屋への立ち入りが規制されることとなった。

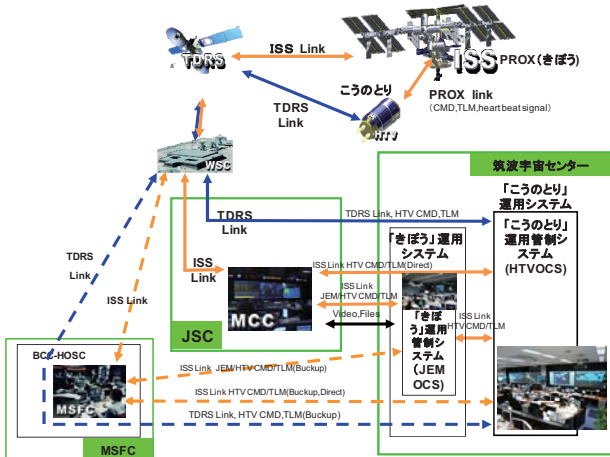


図1 「きぼう」及び「こうのとりの2」運用概念



図2 宇宙ステーション運用棟4階の天井崩落の様子

また、震災発生翌日に国際回線の中で、Asynchronous Transfer Mode (ATM)方式を使用しているJSC向けの国際回線が主従両系とも断となった。Internet Protocol(IP)方式を使用しているMSFC回線に影響はなかった。人的被害、電源設備、空調及び運用管制システムサーバ等の心臓部に被害がなかったこと、「このとり2」については飛行中ではなく、ISSに結合中であつたことが幸いした(表1)。

3.2 運用に向けた復旧作業

震災当日、無停電電源設備で警報が発出され、JEMOCS及びHTVOCSの電源停止の恐れがあつたため、両システムの遮断を行うと同時に、NASAとの「筑波が運用困難の場合はMCC-Hにて運用を実施する。」との取り決めに従い、「きぼう」及び「このとり」の最低限のテレメトリモニタとコマンド運用を依頼した。

2日後の14日に電源設備が健全であることを

表1 被害状況

機器他	状況
建屋(構造)	4階廊下天井の崩落、ケーブルラックの崩落
建屋(設備)	被害なし
コンピュータ設備	1階の運用管制室(きぼう、このとり)は被害なし。 4階の第2運用管制室のコンピュータディスプレイ多数落下
通信	JSC向国際回線(ATM)主従断 MSFC向国際回線(IP)被害なし。



図3 震災直後の「きぼう」運用管制室の様子

確認し、システムの再起動を行った(図3)。この時、既にJSC向け国際回線の主従が断となつていたため、MCC-Hのバックアップセンターであり、かつTKSCとの国際回線が健全であつたMSFC経由で、テレメトリモニタのみ行い、必要な音声回線を接続した。ただし、建屋への入館が規制されたため、TKSCは1日3シフトのうち日勤の1シフトを担当することとし、残る2シフトは、ヒューストン在住者及び筑波から派遣した人員によるMCC-Hからの運用管制で対応した。

JSC向け国際回線が早期に復旧しない場合、筑波からのコマンド運用ができないため、「このとり2」の離脱スケジュールに影響し、ひいてはその後のISS全体の物資補給打上げ計画へ影響を与えることになってしまふところであつた。しかし、「このとり2」の打上げ前に国際回線会社へ回線断の場合には即座に代替え回線へ切り替えられるように準備を要請していたことが功を奏し、震災後6日後の3月17日に香港経由のJSC向け回線を確保することができた。

その後、電源ケーブルの点検と崩落したケーブルラックの仮補修のために2回に渡り、運用管制システムの遮断を行った。この時、TKSC内の別の建屋に急遽整備したパーソナルコンピュータ(PC)を使用し、NASAのWebベースのテレメトリモニタサーバと音声モニタの臨時のアカウントを用いて運用した。そして震災から11日後の3月22日に定常運用に移行することができ、これにより、3月30日に「このとり2」を大気圏再突入させてミッションを完遂することができた(図4)。

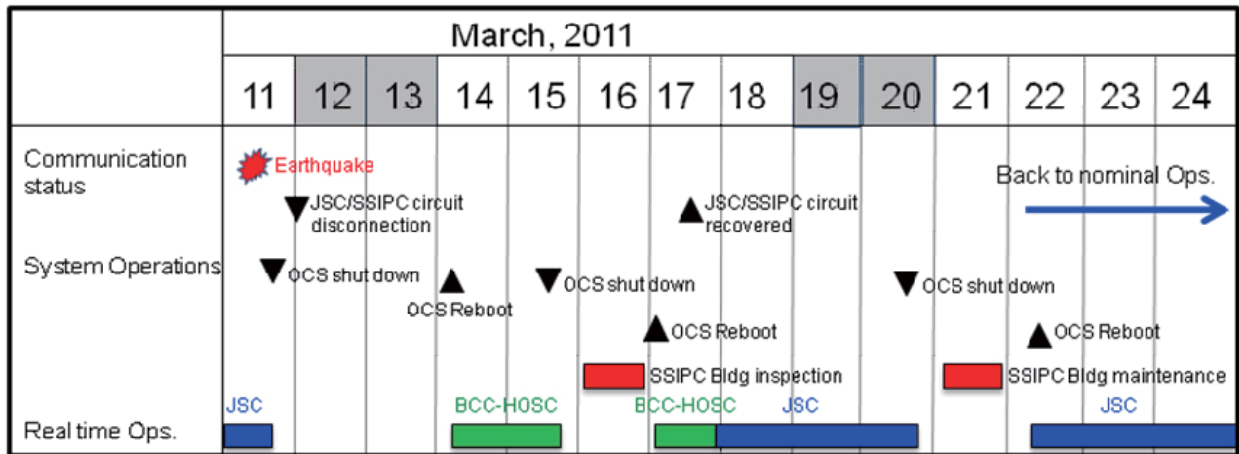


図4 震災から復旧までの作業履歴

3.3 短期間復旧の要因

今回、震災にも関わらず、数々の幸運に恵まれて11日という短期間に復旧できた要因として以下が挙げられる。

- (1) 人的被害がなかった。
- (2) 建屋の1次構造は健全で入館が可能であった。
- (3) 商用電源からの受電ができ、計画停電の非対象であった。
- (4) 空調が健全であった。
- (5) 電源系統が健全であった。
- (6) 運用システムのサーバが健全であった
- (7) 国際回線の代替ルートが6日で確保できた。
- (8) MSFC 向け国際回線がIP化されていたため、太平洋海底ケーブルが切断の影響を受けなかったため、MSFC 経由でテレメトリのモニタができた。

4. 運用管制システムの再評価

4.1 ミッション喪失の要因分析

3章の経験を踏まえて、震度6強の地震等の災害を想定し、運用管制システムの堅牢性の再評価を行うこととなった。この再評価には宇宙ステーションプログラムの安全解析に標準的に使用されているハザード解析の手法が有用である。「きぼう」の場合は2週間を超えてテレメトリコマンド機能及びMCC-Hと音声通話機能が失われると軌道上実験成果の喪失となる。「このとり」については一定期間に復旧しないとミッションの喪失もしくは安全上問題となる。

これらをハザードとして、この要因を故障の木解析(FTA: Fault Tree Analysis)を使用して細分化する。こうして識別された要因それぞれについて制御方法が存在し、それが有効で少なくとも1 Fault Tolerance (1FT)が確保されているか否かを確認する。そして、Zero Fault Tolerance (0FT)となっている要因については対策を施すこととした。

4.2 ミッション喪失のFTA

まず「きぼう」及び「このとり」の運用不可となる要因をFTAを用いて抽出した。その結果以下の要因が識別された。

- (1) 運用棟建屋への立ち入りが2週間以上にわたって制限され、運用継続が困難となるケース(人員確保困難)
- (2) 建屋内の電源ラインの断
- (3) 運用管制システムサーバ自身の故障
- (4) 音声設備の故障
- (5) 国際通信回線断

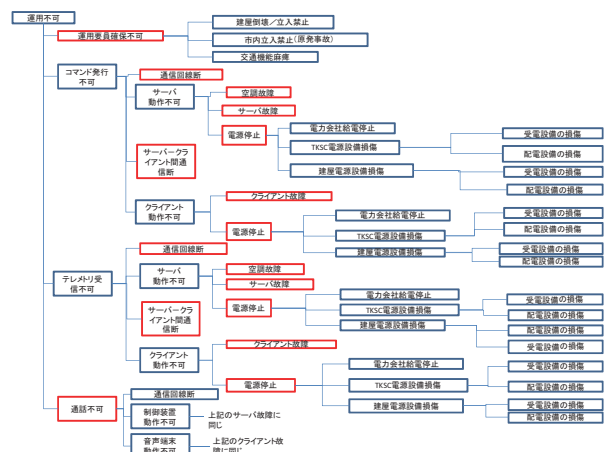


図5 FTAにより識別した要因

- (6) サーバ/クライアント間通信断
- (7) 空調故障
- (8) 東電管内の計画停電または広域停電

4.3 現状の課題の識別と対策

4.2 節の要因について現状を再確認し、少なくとも 1FT が確保されているか確認を行った。その結果、建屋から配電設備やサーバ/クライアント間通信ケーブル等がルート冗長になっておらず(0FT)、これらの冗長化を実施することとした。また、これに加えて、サーバや運用管制室がある建屋は構造上揺れやすいため、機器は正常でも運用者の立入が規制される場合がある。このため、構造が鉄筋コンクリートで揺れが小さい別の建屋へ運用端末を整備することとした。その内容を次章に述べる。

5. バックアップセンター (BCC) の検討

一定期限内にテレメトリ・コマンド機能及び音声通話機能の運用が開始できない場合、「きぼう」の実験成果や「こうのとりの」ミッションが失われる。その対策として 4.3 節で識別された冗長化対策によりサーバや通信装置などの堅牢性を確保した上で BCC を整備することとした。整備規模についてはトレードオフを実施し、テレメトリ監視/コマンド運用の端末と音声端末のみを整備することとした (図 6)。そして、コンピュータ室内火災や東京電力管内の計画停電等で筑波の運用管制システムが使用できない場合に備えて、MCC-H のコマンド認証を JAXA が取得し、備えることとした。

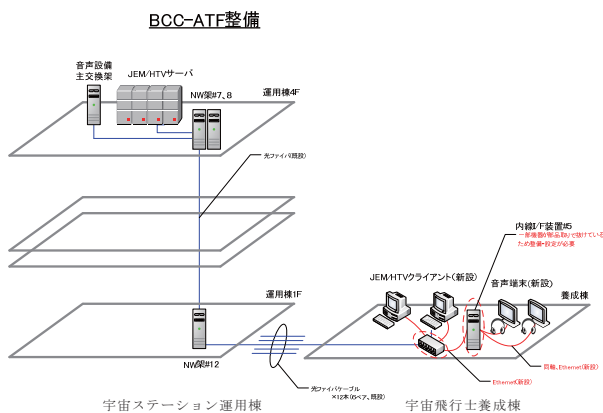


図 6 バックアップセンター

6. 今後の計画

4.3 節で述べた対策を図 7 に示す通り、平成 23 年度に「こうのとりの」関連、平成 24 年度前半にかけて「きぼう」の関連作業を実施する。

	平成23年度					平成24年度							
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
電源、通信の冗長化		←「こうのとりの」関連→						←「きぼう」関連→					
BCC整備		←「こうのとりの」関連→						←「きぼう」関連→					
MCC-H コマンド発行のための認証				訓練			▼認証取得						

図 7 整備スケジュール

7. まとめ

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の教訓から、システムの再評価を行った。この評価には宇宙ステーションプログラムにおいて標準的に使用されているハザード解析評価の手法を用いて実施することが非常に有効であった。今後、この評価によって識別された課題の対策を平成 24 年度前半までに実施していく予定である。

参考文献

- [1] 中原潤二郎、日本実験モジュールきぼうの運用と運用システム、日本航空宇宙学会誌、51、pp170-178
- [2] 手川浩二他、HTV 運用管制システムの開発、MSS 技報、21、pp8-16

「はやぶさ」が持ち帰った「イトカワ」サンプルのキュレーション

宇宙科学研究所 基盤技術グループ
藤村彰夫

1. はじめに

2010年6月13日、小惑星探査機「はやぶさ」は「イトカワ」で採取した微粒子サンプルを携えて無事地球に帰還した。「はやぶさ」ミッションで幾多の困難を乗り越え、始原天体に着陸して採取し、持ち帰った世界初の小惑星表面のサンプルは、46億年前の太陽系形成時の状態を記録した生の物質であり、惑星科学的に極めて貴重な全人類の財産である。

今までに人類が取得した始原的物質は隕石や惑星間塵などであり、これらが46億年前の太陽系形成時の状況を我々に教えてくれている。しかしながら、これらは地球突入時に高温や衝撃を体験しているし地表では酸素や水などによって変成を受けている。これらの物質が何時、何処から来たのか、地球到達までの途中経緯はどうであったかも不明である。

一方、「イトカワ」サンプルは採取された時刻も場所も分かっており、宇宙空間でコンテナ中に真空封入されて帰還カプセルに収められ、地球突入時の温度や衝撃に晒されることなく帰還している。更に、このサンプルを入れた密封容器が大気圏突入してから1週間で地球大気を遮断した雰囲気制御したクリーンチャンバーに入れて、サンプルを地球環境に晒さずに酸素や水などによる変成や、大気中のヘリウム、アルゴン、ネオン、クリプトン、キセノンといった希ガス成分の混入も最小限のものとしている。サンプルは組成が判っている高純度窒素環境に置かれ、地球物質による化学的(同位体化学的)汚染も極力少なくなる扱いとしている。

本稿では、JAXAの惑星物質受入設備(キュレーション設備)において実施した、(1)帰還カプセルの受入れ、(2)サンプルを入れた容器の開封、(3)サンプルの回収、(4)それらの初期分析の結果概要、(5)今後の展望について簡単に述べる。

2. 惑星物質受入設備(キュレーション設備)

「はやぶさ」ミッションによる帰還サンプルの具体化と今後のわが国のサンプルリターンミッションへの継続性を踏まえ、キュレーション設備が2005年度末から製作が開始され、2007年度末にJAXAに完成した。2008年度の機能試験、2009年度のリハーサル運用試験を経て2010年6月の「はやぶさ」帰還に備えた。

キュレーション設備では、帰還してきたカプセルを受け入れ、その内部から紛失することなく、汚染することなく、全てのサンプルを回収し、その特徴を記載して安全に保管し、必要に応じて全世界の研究者に配分することを目的とする。わが国のキュレーション設備は、総量数100kgに及ぶ月サンプルなど扱うNASAジョンソンスペースセンターのものとは違って、少量で微細な惑星物質サンプルを汚染することなく扱うために特化された技術を導入している。

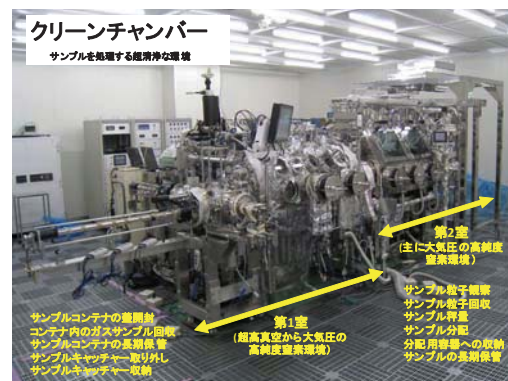


図1 クリーンチャンバー

キュレーション設備は、クラス10,000の加工洗浄室を下流として、クラス1,000の試料準備室、電子顕微鏡室と最上流の試料処理室の中央部はクラス100でこの部分に超高真空から大気圧高純度窒素環境までの任意の中間圧を実現できる第1室と主として大気圧高純度窒素環境でのグローブ作業を行う第2室で構成されたクリーンチャンバー(図1)が置かれている。第1室では内部のガス圧が不明な状態で帰還してくるサンプルコンテナを安全に開封し、残留ガス

ボンベに採取し、コンテナの一部を長期保管のため搬送する。その後の処理では大気圧窒素ガスのグローブボックスとして機能し、サンプル容器の中身（キャッチャー）を特殊容器に納め第2室に移送する。このため真空状態でコンテナを搬送できる機構、サンプルコンテナ内部のガス圧を推定し、制御して開封する機構、ゲート弁で遮蔽したテフロンゴム（バイトン）製グローブなどを備えている。一方、第2室は高純度窒素環境下でグローブ操作により固体微粒子サンプルをハンドリングするマイクロマニピュレータシステム、秤量システム、封止システムを備えている。「イトカワ」サンプルが極めて微小粒子であったため、このマイクロマニピュレータシステムが粒子ハンドリングの主体である。

高純度窒素ガスはキュレーション設備で液体窒素から製造し、2段の純化器を経由してクリーンチャンバーなどに供給している。チャンバー入り口で、この窒素ガス中の高濃度の汚染物質は H_2O で1.25ppb、酸素で0.24ppbである。その他メタン、炭酸ガスで、水素で数10ppt以下である（大気圧励起質量分析計（API-MS、UG-510P）で計測）。液体窒素製造時の分留工程で決まる希ガス濃度もHe、Ne、 ^{36}Ar 、 ^{40}Ar 、Kr、Xeで大気の3~4桁下で十分に低濃度であることが確かめられている。

キュレーション設備のクリーンチャンバーは停電等に対しても液体窒素供給が行われれば内部のサンプル粒子を保全する仕組みとしてあり、2011年3月の震災以降の計画停電実施時においてもサンプル粒子回収やSEM観察・分析等は実施不能となったが、サンプルは清浄な環境で安全に保管された。

3. 「はやぶさ」帰還カプセルの受入れ

帰還したカプセルは調布飛行場分室の複合材グループの大型X線CT装置で撮像を実施し、サンプルコンテナのカプセルからの取り出しを想定通り行なえることを確認し、キュレーション設備にて機械工作を実施して取り出した。このコンテナについて再度、調布にてマイクロX線CT及び透過X線撮像を行い、シールが正常であり、サンプルを収めたキャッチャー内機構部が正規の停止位置であることを確認した。

サンプルコンテナはその後、キュレーション

設備内で超小型真空掃除機、布による拭き取り、ドライアイスブラスト装置、大気圧プラズマ洗浄装置により外表面を洗浄した。可視光と紫外線による目視検査、光学顕微鏡観察、FT-IR分光スペクトル分析、表面の接触角測定により外表面が清浄であることを確認した。

サンプルコンテナの蓋は2重であり、外側蓋には内蓋を保持するための様々な機構が組み込まれている。内蓋によるシールを保持したまま外蓋を取り外し、制御して内蓋を開けるための特殊な開封機構装置にコンテナを組み込んだ。この開封機構を高純度窒素で満たされたクリーンチャンバーに組みつけ、サンプルコンテナは6月13日に大気圏へ突入後1週間で制御された環境に置くことができた。6月17日深夜羽田到着後からここまでの作業はコンテナをシールしている2重のフッ素系ゴム（バイトン）のシールを透過する大気成分量の増加との競争のため、連続作業であったが当初予定通り終了できた。

4. サンプルコンテナの開封

サンプルコンテナ内のガス圧は不明であり、大きな差圧で蓋を開けると粒子状のサンプルが飛散喪失する可能性があるため、内外等圧での開封が望ましい。このためプロトモデルのコンテナを使って事前に様々な条件で試験を実施した。帰還してきたサンプルコンテナは開封にまでは至らない範囲で内蓋のシール面を押す荷重と蓋の変位を計測して、事前試験結果と比較して内圧を推定した。その結果を反映してクリーンチャンバーを真空条件とし、内蓋を押す荷重と変位を制御しながら開封を行った。開封タイミングは荷重や変位の力学的データのほか、真空計、圧力計、質量分析計でも検知できた。

開封前後でガスサンプルをボンベに採取した。開封後、コンテナ内部に多数の白色粒子（～mmサイズ）が認められ、シール面にも存在した。2011年11月の段階までではサンプルを収めた容器内からは白色粒子は見つかっておらず、「イトカワ」サンプルとは別起源で探査機内で生じたものと推定され現在も検討中である。

5. サンプルコンテナからのサンプル回収

5.1 残留ガス回収

開封前後で雰囲気ガスサンプルを行ない、初

期分析の一環としてのコンテナ内の残留ガスの分析用とした。ポンベは速やかに初期分析チームにより搬送され分析が実施された。コンテナ内圧は 1/20 気圧以下で、その成分は地球大気成分と解釈できるものであった。

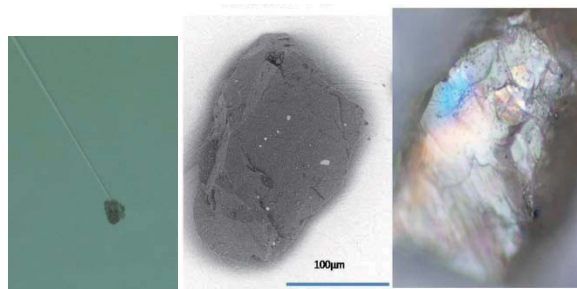
5.2 固体微粒子回収

第 2 室に移動したサンプルキャッチャーの一方 (2 回目採取サンプルを収めた A 室) の開口部からの観察では裸眼で識別できるものは無かった。キャッチャー容器をマイクロマニピュレータのステージにセットし、光学顕微鏡観察を実施するとともに、電極を内包した合成石英ガラス製のプローブをキャッチャー内部に入れ、静電状態を制御しつつ粒子サンプルのピックアップを行った。今回のサンプル粒子の静電的ハンドリングは容認される。それは探査機が大電流を流すイオンエンジン駆動のため、帰還サンプルは電磁気的には小惑星表層の状態を保持できていないからである。キャッチャー内部表面の純アルミコート面の一部が剥がれ、粒子サンプルとの区別は困難であり、また、表面の凹凸スケールはサンプル粒子サイズに近く、サンプル粒子の識別は困難であったが、この直接法でアルミ片を含め数十個の粒子回収を行なった。

テフロン製ヘラに静電気で粒子を貼り付け採取してそこから粒子をマイクロマニピュレータで間接回収する方法も試みたが、サンプル回収効率は向上しなかった。事前に準備したこのヘラはそのまま走査電子顕微鏡 (SEM) 観察できない仕様であったため、新規にヘラを作成し、キャッチャー内部の数%の面積に数回接触させて極微粒子を採取し、ヘラ表面を低倍率で SEM 観察を行った。ヘラ片側で殆どが $10\mu\text{m}$ 以下の約 3300 個の粒子が識別され、X 線 (EDX) 分析の結果、その内の 1800 個が人工のアルミ片であり、残り 1500 個が岩石質粒子であった。岩石質粒子の元素組成、鉱物組み合わせ、存在比率、更に宇宙物質特有の鉱物とそれらの組み合わせから、イトカワ起源と判断された。

サンプルキャッチャー B 室の観察に先立って、A 室の開口部に合成石英ガラス製蓋をして、容器を反転して振動を与え落下採取を試みた。顕微鏡観察で、石英ガラス板上に約千個の粒子が付着していた。後に B 室側でも同様の処理を行い石英ガラス板上に 500 個程度の粒子を採取し

た。この石英ガラス板をサンプルステージに設置し、マイクロマニピュレータによる回収を実施した。ガラス板上のサンプル粒子の視認性が良いことと、マイクロマニピュレータのサンプルステージとプローブは独立に極性や電圧を変えて電位が制御できるので、適切な条件を設定して効率的に回収作業を進めた (図 2)。なお粒子の帯電除去用にアルファ線源も備えており、キュレーション設備には放射線管理区域がある。



左：石英ガラス板から静電制御されたマイクロ・マニピュレータのプローブで持ち上げられた大きな粒子を示す。
中央：同じ粒子についての走査電子顕微鏡 (FE-SEM) の反射電子像 (BSE)
右：同じ粒子 (異なる方位) の光学顕微鏡写真

図 2 石英ガラス板上から回収された粒子の例

ピックアップされた粒子は最初に観察・分析のために SEM ホルダ上の定められた場所に置かれる。SEM ホルダはクリーンチャンバー第 2 室内の清浄室素環境で密封され、エアロックを介してクリーンルームに出され、電子顕微鏡室に移動し、SEM のエアロックを通して SEM 試料室に移動する。SEM のエアロックは高純度窒素で置換でき、サンプルを高純度窒素雰囲気の高真空環境で観察・分析ができる機能を持つ FE-SEM であるので、サンプル粒子は蒸着金属等で汚染されることなく高分解能で観察ができる。この FE-SEM にはサブミクロンスケールの粒子をピックアップして移動するため新開発のウルトラマイクロマニピュレータ装置も付加してある。

FE-SEM での観察・分析の後、逆手順で SEM ホルダは第 2 室に戻され、サンプル粒子は合成石英ガラス製のマトリックスプレート上に移動され、番号付けされて保管される。サンプル粒子が A 室か B 室か、採取方法、ピックアップやリリースの状況の写真、SEM の観察と分析データ、マトリックスプレートの番号とその中での座標は基礎データとしてアーカイブされ、以降の分析結果も付加されてデータベースとして保管されている。外部配布時は、保管プレートからマイクロマニピュレータで移送容器等に移しクリ

ーンチャンパー外に取り出している。

6. 初期分析結果概要

初期分析の内容とそれを実施する国内の研究者・研究機関は国内外の研究者の事前評価を受けて予め決められていたが、「イトカワ」でのサンプル採取状況からサンプル量が少量であると推定されたので分析技術の向上が精力的に実施された。帰還サンプルは予想通り少量であったが、微粒子のためハンドリングも困難で、その回収に長期に渡る作業が必要なことも判明した。そのため、ある時点までに回収されたサンプル粒子のうち適切と思われる数を初期分析に割り振った。初期分析用サンプルは2011年1月にキャッチャーA室サンプルを、9月にB室サンプルの配布を開始している。初期分析に供されたサンプル粒子サイズは数十 μm と相対的に大きなものであり、普通コンドライト（石質隕石）の鉱物組成に似た組成のサンプル粒子について実施され、分析内容も予め決められたものである。

初期分析は記載の一環として実施され、その結果は今後国際公募研究等で実施される詳細分析のための資料として公開する。現時点での初期分析結果の概要は、(1) 帰還サンプルはイトカワ起源であることの確証と、(2) S型小惑星であるイトカワが LL コンドライトの母天体である事、(3) 小惑星表層でも宇宙風化が起こっており、また(4) 表層が比較的短いタイムスケールで更新されていること、始原的天体ではあるが、(5) 数十キロのサイズであったことがあり、数百度まで加熱された証拠がある一方、

(6) あまり過熱されていない部分も共存していること、(7) 方向によって非晶質化やマイクロレータリングの頻度の違いなども粒子によってはあるなど多くのことが判明した。一方、(8) 有機炭素やアミノ酸は今までのところ検出されていない。これらの結果は「イトカワ」サンプル粒子が隕石や惑星間塵には見られないユニークな特徴を持ち、元素組成は似ていても1粒ずつの粒子が夫々違う特長を持つことを示した。

7. 今後の予定と展望

「いとかわ」サンプル粒子の回収作業は、サンプルを地球環境で汚染しない条件のもとで、

優先的に実施しているが、その処理速度は平均1粒子/作業日である。このペースをオーダーで加速することは不可能であり、回収作業には数年間以上を要すると想定される。「はやぶさ」打ち上げ前から決められている NASA への分配も2011年中に第1回を実施し、その後可及的速やかに国際公募研究の募集、採択、サンプルの配布を実施する必要がある。しかしサンプル回収作業中であり、総量が不明なため、初期分析の場合と同様、今後も回収されたサンプル粒子から適切な個数の粒子を適切なタイミングで配布することが現実的である。このため NASA への配分や国際公募研究は複数回実施することとなる。

今までは、帰還サンプルが「イトカワ」起源であることの確認、初期分析、そしてサンプル粒子回収を優先したため、現行のサンプル記載は不十分である。従来、大きな岩石試料を記載する場合、肉眼や実体顕微鏡観察で形や色を識別するが、「イトカワ」サンプルは微粒子状なので SEM 観察で代替えている。岩石試料の記載では偏光顕微鏡観察情報や元素組成情報が主たるものであるが、これの代替情報を取得する装置類は無く、その整備計画も立っていないため、最低でも今後3年間は、形状と若干の元素組成を記載情報とするだけで全世界の科学者に「イトカワ」粒子サンプルを配布せざるを得ない。

今回の「イトカワ」サンプルは今後未来永劫に追加入手できないものであるという認識を持つべきであり、限られたサンプルを有効利用して将来の人類の科学に貢献できるように考慮する必要がある、熟慮することなくサンプルを悪戯に消費し尽くすことには戒める必要がある。一方、「イトカワ」サンプルは太陽系物質科学の進歩に大いに貢献するので、これを有効に使う必要がある。帰還サンプルの持つ特質を把握し、従来の研究視野に縛られない、新しい惑星物質科学を打ち立てることになれば幸いである。限られた個数で実施された初期分析の結果から、夫々の粒子が全く違った情報を持つことも分かった。これはサンプル粒子を配布する前に実施された記載情報では識別できなかった。「イトカワ」サンプルの一粒は小さくとも従来の岩石試料1個にも匹敵し、更に従来とは違った特徴を持つ新たな惑星物質であるとの意識を持って分析等に供する心構えが必要とされる。

宇宙飛行士支援ロボットの開発

研究開発本部 ロボティクス研究グループ

小田光茂

1. はじめに（軌道上作業の現状）

国際宇宙ステーションがほぼ完成し、今後は国際宇宙ステーションをどう活用していくかが課題となる。しかしながら、国際宇宙ステーションは大変な人手不足である。国際宇宙ステーションには米国、ロシア、欧州、日本が製作した実験室がある。一方、国際宇宙ステーションに滞在している宇宙飛行士は最大で6人である。しかしながら宇宙飛行士と言えども人間であり、毎日24時間働けるわけではない。宇宙飛行士の労働時間は一日8時間で、残りの16時間は睡眠、食事、運動、自由時間等として使うこととなっている。即ち、国際宇宙ステーションにおいて働いているのは常時2人であり、無人となっている実験室があるということである。

また、これまでの宇宙飛行士の船外活動により様々な成果があげられているが、宇宙飛行士の安全やコストの観点からすると宇宙飛行士がすべき仕事であったかどうか疑問である作業も多々あった。例えば、静止トランスファー軌道への投入に失敗した静止通信衛星を宇宙飛行士が捕獲して修理した上で本来の軌道に投入したことがあったが、安全性や経済性の観点からは疑問である。宇宙飛行士が捕獲した衛星は数トン以上の質量があり、宇宙飛行士が捕獲しようとしている衛星と宇宙飛行士が搭乗してきた宇宙船との間に挟まれると非常に危険である。また、作業には数名の宇宙飛行士が必要となり、経済性の観点からみてもこのような作業は宇宙飛行士がすべき仕事ではないと考えられる。

同様のことは、今後、軌道上に建設されるであろう太陽発電衛星の建設についても言える。国際宇宙ステーションは概略100m×100mの大きさで、宇宙飛行士、及び宇宙飛行士により操縦されたロボットアーム

(宇宙用クレーン)を使って10年以上かかって建設されたが、数km四方はある太陽発電衛星を国際宇宙ステーションと同じように宇宙飛行士により建設したのでは、何十年、何百年もかかるか、あるいは何万人の宇宙飛行士を軌道上に滞在させる必要があり現実的ではない。

一方、これまでに開発された宇宙ロボットは宇宙用クレーンとも呼ばれるように、宇宙ステーションの構成要素を操作するには向いているが、立ち往生した衛星の捕獲、点検、修理、あるいは太陽発電衛星の組立、点検、補修等を行えるロボットが必要となってくる。



図1 宇宙飛行士による衛星の捕獲回収（左）



図2 ハブル宇宙望遠鏡の修理（右）

2. 宇宙飛行士とロボットの役割分担

軌道上の衛星の点検修理、大型衛星の組立保守等、軌道上には様々な作業があるが、これらの全てを宇宙飛行士が行うのは安全性や経済性の観点から問題がある。一方、宇宙ロボットの機能性能はまだまだ開発途中であり、ロボットが行える作業は限られている。これらの制約条件を考慮すると、宇宙飛行士とロボットの役割分担は当面は以下になると考えるべきである。

(1) 宇宙ロボットがすべき作業

比較的簡単だが長時間を要する作業

(作業例) 宇宙ステーションの外壁の点検保守、太陽発電衛星の組立保守等)

(2) 宇宙飛行士がすべき作業

比較的短時間で出来るものの十分な技量を必要とする作業(長時間を要する作業はロボットが行う)

(作業例) 故障した搭載機器の修理

3. 宇宙飛行士支援ロボット

宇宙飛行士支援ロボット(Astrobot = Astronaut + robot)は、例えば船外活動する宇宙飛行士に対して、作業に必要な資材や工具を運搬し、宇宙飛行士に手渡ししたり、使い終わった工具を所定の場所に片付ける等、宇宙飛行士の作業を支援したり、あるいは宇宙飛行士がすべきではない仕事を宇宙飛行士に代わって行う等の作業が期待されている。

3.1 宇宙飛行士支援ロボットに必要な機能

宇宙飛行士支援ロボットは宇宙飛行士と同様に、各種の作業を行うことが求められているため、船外活動する宇宙飛行士用に作られている種々の工具が使えることが必要である。

そのため、宇宙飛行士支援ロボットには、以下の機能が必要である。

- (1) 作業場所まで自律的に移動できること。障害物があっても目的場所に移動できること。
- (2) EVA 用工具を利用して作業が行えること。

3.2 宇宙飛行士支援ロボットの移動機能

宇宙飛行士支援ロボットが目的とする場所(作業現場等)に移動するためには、飛行方式、ロボットの手足でステーションの外壁に一定間隔で取り付けられているハンドレールを把持しながら移動する等が考えられるが、飛行方式では、重い物資を輸送する際に労働力として呼び出されることを覚悟しておく必要がある。また、両手両足でハンドレールを把持しながら空間移動するためには、各手足が完全に動作する必要があるため、1関節の機能が動作しなくなった時点で機能を失ったこととなる)

4. EVA 支援ロボット実証実験 (REX-J)

JAXA は船外活動(EVA)する宇宙飛行士を支援するロボットの実現のために必要な以下の機能について、

EVA 支援ロボット実証実験(REX-J)を行う。

(1) 把持機能

伸展式ロボットアームの先端に取り付けられたロボットハンドにより、テザーの先端に取り付けられたフック機構を把持操作する。伸展機構には衛星の伸展式アンテナ等に多用されているSTEM機構を利用する。

(2) 移動機能

伸展式ロボットアームを伸展させ、ロボットハンドで把持されたフックをハンドレールに取り付け、テザーの長さを制御することによりロボットの位置・姿勢を制御する。

5. 軌道上実験

伸展式ロボットアームとテザーを利用して宇宙飛行士支援ロボットが宇宙ステーション等の軌道上構造物の上を空間移動できることを示すため、REX-J ミッションを行う。本実験に使用する REX-J 搭載実験装置を図3に、テザーによる移動原理を図4に示す。本実験装置はポート共有実験装置(MCE)の内部に取り付けられ、HTV-3号機で宇宙ステーションに運ばれ、宇宙ステーション日本実験棟の船外実験プラットフォームに取付けられる。REX-Jの実験運用は地上からの遠隔制御で行われる。

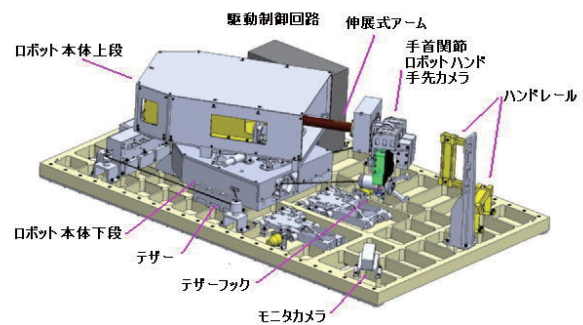


図3 REX-J 搭載実験装置

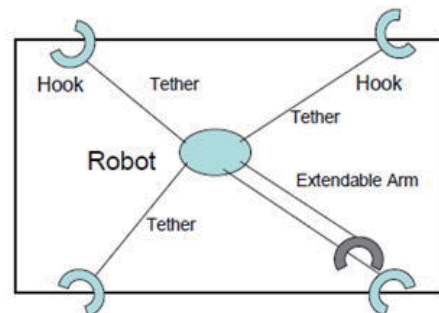


図4 REX-J ロボットの移動原理