

## 第 10 章 クルーインターフェース技術

### 1. 序論

「きぼう」は、日本初の有人宇宙実験施設であるが、特に宇宙飛行士（以下「クルー」という）による軌道上運用は有人宇宙システムの中でも最も特徴的な有人要素の一つである。

「きぼう」は軌道上のクルーによって直接操作されるため、NASA が規定するクルーとのマン・マシン・インターフェース（以下「クルーインターフェース」という）の要求を満足するように開発されなければならない。

本章では「きぼう」の設計、製作及び地上検証（開発試験、FCIT、CEIT、訓練等）並びに実際の軌道上運用を通じて獲得したクルーインターフェース技術を用いて開発した「きぼう」について、これまでのレッスンズ・ラウンドと成果及び将来展望等について適用例を交え解説する。

### 2. クルーインターフェースの定義

国際宇宙ステーション（以下「ISS」という）は ISS に滞在しているクルー及び地上の管制要員により運用されているが、ISS（「きぼう」含む）内外で行う作業（以下「タスク」という）は、あらかじめ地上において安全に作業が遂行可能か、タスクの実現性が確認される。これは ISS で使用される機器や装置が実際に軌道上でも稼働するか試行すると共に、それらを ISS で操作するエンドユーザー（クルー）にとって、安全且つ、

作業に適した扱い易い設計、製作・艤装がなされているかを確認する必要があるためである。ISS/NASA が定義している ISS で作業するクルーの身長は男性 169.7cm～190.1cm（女性 148.9cm～165.1cm）の範囲となっており、身長だけでなく、座高、腕の長さ、頭部、手のひらの大きさ、四肢関節の動き等、軌道上で作業を行う全てのクルーの身体的、機能的情報や能力に基づき、人と機械を人間工学的な知見から組み合わせ、全てのサイズのクルーが作業し易い環境を実現させていくことを ISS におけるクルーインターフェースという。また、この技術は単に機器のようなハードウェア面だけでなく、使用されるソフトウェア、手順、技術情報等、全てに適用していかなくてはならない。

「きぼう」を通じて獲得したクルーインターフェース技術の代表例を第 2 表に示す。


第 2(1/2)表 「きぼう」を通じて獲得した代表的なクルーインターフェース技術

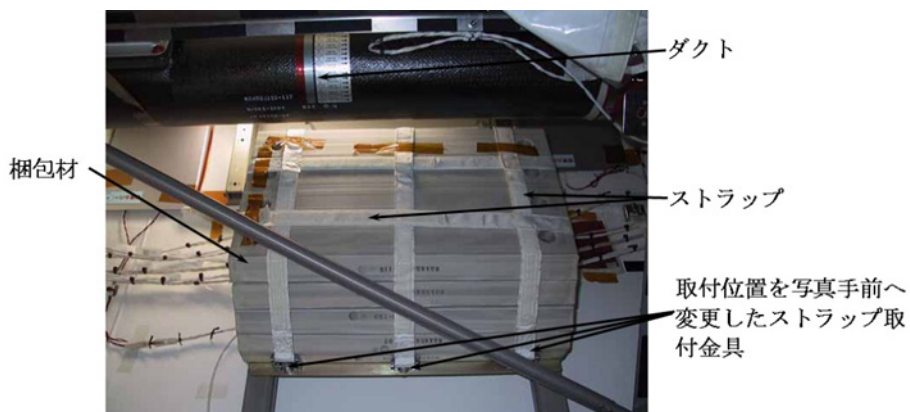
項 目		概 要
宇宙服を着用したクルーによる宇宙船外活動 (EVA)	移動ルート	EV クルー (EVA を行っているクルー) の移動時は周辺に邪魔になるような構造物や突起物がないように機器を設計する必要がある。(クルーを中心に直径 1.1m の移動空間確保) 設計上、止むを得ない場合は識別管理を行い、手順や機器に対して、警告表示する等クルーへのリスクは最大限になくすこと。また、緊急時の対処として、ISS の様々な場所で活動している EV クルーが安全に且つ 30 分以内に ISS のエアロックへ帰還できるように設計を行わなくてはならない。
	作業支援及び ISS 帰還用のラベル・マーキングの貼付	EV クルーの作業を容易にさせるため及び緊急時でも安全に、速やかに ISS 内へ帰還できるようにクルーの移動ルート上に、上下左右どの位置でも識別可能な活字の大きさとわかりやすいラベルやマーキングを貼付する必要がある。なお、このラベルに用いる機器等の名称は全て ISS で統一されている。
	接触温度	偶発的な接触 (許容範囲: $-82^{\circ}\text{C} \sim 113^{\circ}\text{C}$ ) と連続的な接触 (許容範囲: $-7.2^{\circ}\text{C} \sim 62.7^{\circ}\text{C}$ ) のケースとそれぞれ温度規定が定めてある。これは EVA で使用しているグローブの耐熱温度の規定に基づき算定されている。
宇宙船内活動 (IVA)	機器、クルー接触部位への接触温度	<p>【高温】</p> <p>素手による 30 秒以下の偶発的な接触 (許容範囲: <math>45^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}</math>) の可能性がある機器や部位等は警告ラベルを貼付すること。但し、<math>50^{\circ}\text{C}</math> 以上はクルー接触防止のための防護または断熱を行う。また、連続的な接触 (<math>45^{\circ}\text{C}</math> 以上) の可能性のある機器や部位には、クルー接触の防止をするための防護または断熱を行うこと。</p> <p>【低温】</p> <p>素手による <math>3.8^{\circ}\text{C}</math> 以下の機器や部位への接触については、偶発的短時間、連続的共に当該機器や部位には、クルー接触防止のための防護及び警告ラベルを貼付すること。</p>
	照明照度	通路や保管庫など船内でクルーが活動する用途に応じて、必要な照度が決められている (尚、実運用上は、軌道上クルーが好みによって必要照度を判断しており、照明のメンテナンスはこれに左右されることがある)。

第 2(2/2)表 「きぼう」を通じて獲得した代表的なクルーインターフェース技術

宇宙船内活動 (IVA)	シャープエッジ、バリの除去または保護	機器の製作、加工過程で機器の表面等に鋭いエッジやコーナーが出来る可能性があり、このエッジやバリで ISS クルーが負傷しないように十分に配慮するとともに、事前にエッジやバリの除去若しくは保護を行うこと。ISS/NASA で要求が定義されている。
構造及び艙装 (EVA / IVA 共通)	ピンチポイントの軽減	クルーの移動ルートや作業場所にある機器若しくは稼動部はクルーの身体や装着物が容易に挟み込まれたりして、負傷しないように設計しなくてはならない。また、必要に応じて接触防止の保護やクルーが立ち入らないように手順や警告ラベル・マーキング等で注意喚起しなくてはならない。
	操作レバーや機器の操作性要求	ラッチ、ロック、ハンドルやノブ等の操作レバー類もクルーの手や指の大きさを考慮して、ISS で統一化され、全てのパーツがハンドリングしやすく設計されている。ハッチやドア等開閉操作する場合に必要な力は 22N 以下で設計・製作しなくてはならない。また、ボタン一つとっても押す力（抵抗値 3~24N 以下）が決められている。
	不燃・無毒物材料の使用	船内で火災や悪臭（毒ガス等）が発生しないよう ISS 内で使用する材料には特に注意を要する。地上試験等で事前に確認を行う。
	キックロード	船内外で活動するクルーはその作業中に誤ってモジュール表面や機器等を蹴飛ばしてしまう可能性がある。その荷重（以下「キックロード」という）にモジュールや機器が耐えられるように、破損しないように構造設計を施す必要がある。キックロード対策は IVA や EVA で作業される（クルーが触れる若しくは可能性のある機器等）全ての構造物が対象となる。
	コネクタや流体配管類	原則片手で作業でき、簡単に着脱（クイック・ディスコネク）できるように設計しなくてはならない。また、他のコネクタや機器を外さなくても済むようにコネクタ単体が独立した設計であること。
	ファスナ、ボルト類	安全上重要な役割を果たすファスナ類は予期せず緩みを生じる可能性があるが、緩みにくいボルトを使用すること。また、ボルト等を外しても空間に浮遊して、紛失しないような設計を行っている。（ボルトヘッドにテザーポイントを設ける等。第 5 図参照）

第3表 クルーインターフェース技術を用いて改善を行った代表例

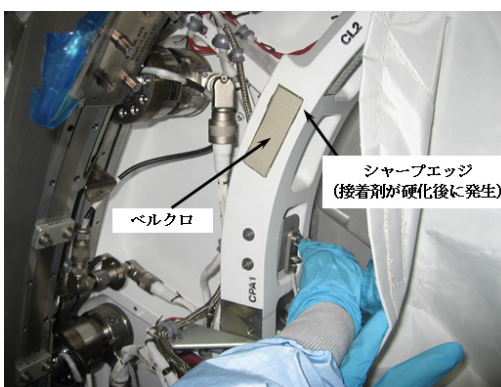
事例	事象	対策（改修事例）
クルーのアクセス性、作業性及び視認性不良（搭載品を固定するストラップの取付け/取外し不良）	機器単体での確認では問題が発見できなかったが、他の機器が当該部位周辺に艸装され、クルーに実機確認を受けた際に、当該機器へのアクセス（手指が入らない等）不良、ツールの使用が困難、作業するにあたり視認性が悪いため等作業は困難であるとの指摘を受けた。	ストラップを留める金具の取付け位置をクルーの作業し易い位置に変更した。各機器担当も異なり、軌道上で活動するクルー作業の全体をイメージしきれなかったことが原因である。また、地上では容易に作業できれば、軌道上でも容易であるとは限らない（第1図参照）。
クルーが作業する部位にシャープエッジ（鋭利な部分）が存在する。	ファスナー受け側のリテイナーナットやワイヤーやケーブルを固縛するタイラップの切り口等、さらには、ベルクロを抗体に接着させるために使用する接着剤が硬化して、エッジが立つことがある。	該当する全てのシャープエッジを除去若しくは保護カバーの追加等を行った（第2図、第3図参照）。製造過程で発生してしまうことが多いが、軽微なものが多いため気が付かないことが多い。また、シャープエッジに対しての認識が甘かった。宇宙船外活動（EVA）では、エッジによって、宇宙服が損傷し、命取りとなる。
誤操作防止用ラベルの追加	大きな保護カバーはハンドリングを容易にするため、大抵分割されているが、再装着する場合は右舷用、左舷用のカバーなのか一目で把握できるようにする必要があった。	右舷用、左舷用の保護カバーが容易に識別できるようにクルー視野を考慮して、カバー中心部にラベルを追加した。誤装着の防止（第4図参照）。
テザーポイントの追加	無重量/微小重力下では取り外した機器やカバーは浮遊してしまう。浮遊しないように全ての ORU（交換部品）やクルー操作を要する機器にはテザー（固定）するためのポイント（ループ）を設ける必要があるが、このポイントの設計していないケースが多々あった。なお、テザーポイント（ループ）の外径等の寸法も要求の通りに製作しなくてはならない。	以下写真にあるように、該当する全ての箇所にテザーポイントを追加し、クルーにより確認が行われた（第5図参照）。 <div data-bbox="814 1441 1214 1705" style="text-align: right;">  <p>テザーポイントにテザーする様子</p> <p>テザーポイント</p> </div>



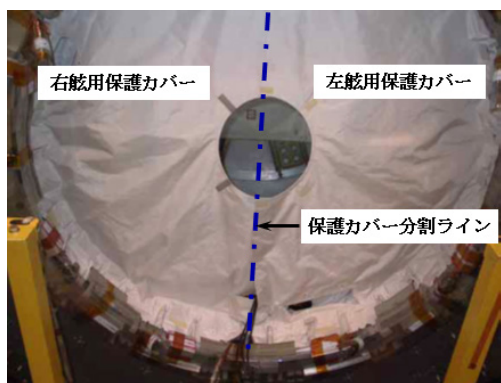
第1図 梱包材の搭載（打上時の振動等から機器を保護するための梱包材）  
ダクトが邪魔で反対側の（梱包材を固定するための）ストラップ留め具まで  
アクセスできなかった為、留め具の位置を手前側に変更した



第2図 シャープエッジ例



第3図 機器のシャープエッジ例



第4図 JLP PCB Thermal Blanket  
右舷用左舷用は類似品のため識別しにくい



第5図 GPS アンテナ取付位置の  
保護カバーとテザーポイント

### 3. 「きぼう」における設計・製造及び地上検証について

第 2 表で示したクルーインターフェース技術を用いて「きぼう」は開発に着手したが、当初は軌道上作業をイメージしきれず、FCIT [注記 1](#) や巨大な水槽（水の浮力）を利用して軌道上を模擬して実施する EVA 設計検証、EVA 手順開発試験、クルー訓練 [注記 2](#) 等の場で、複数のクルーや NASA 技術チームから多種多様な指摘や設計変更要求があった。これらを受けて機器の改善を行った代表例を第 3 表に示す。

このように「きぼう」は多くの設計変更や製造要求仕様等の見直しや有人宇宙機としての安全性、操作性、整備性、快適性等を確保しつつ、ベストな状態になるまで機器の製作及び確認試験を繰り返したため、開発スケジュールの遅延を繰り返したが、システムとして完成度を著しく向上させることで関係各国の信用・信頼を確保した。その結果、ケネディ宇宙センター（以下「KSC」という）において、フライトクルー（ミッションに参加する飛行士）による CEIT [注記 3](#) を受けることができるまでに開発は進み、同試験においても、大きな変更要求もなく「きぼう」におけるクルーインターフェースの精度として、非常に高い評価を得ることができた。

その後も様々な機能試験や訓練を経て、2008 年 3 月に船内保管室が、同年 6 月に船内実験室そして、2009 年 7 月に船外実験プラットフォームが KSC から無事に打上げられ、ISS における「きぼう」の組立は完了し、現在も安全且つ順調に飛行を続けている。

[注記 1](#) : FCIT (Flight Crew Interface Test) とは、軌道上でクルーが操作・接触する箇所の安全性や操作性についてクルーをはじめ

NASA 地上支援要員で確認を行い、不備のある箇所は設計・製作変更や改修を行う活動である。FCIT 作業状況を第 6 図、第 7 図に示す。



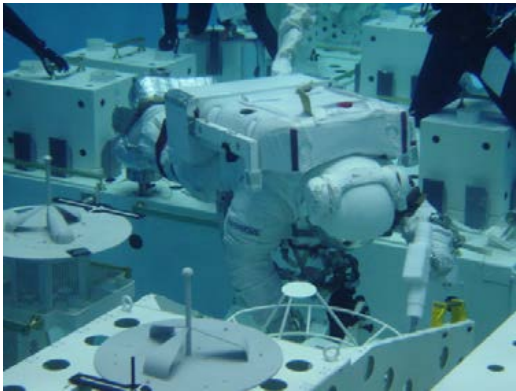
第 6 図 IVA 作業（操作する箇所に対し、容易に、障害なくアクセスできるかを確認する）



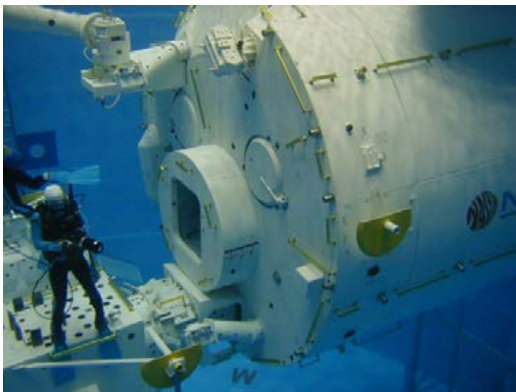
第 7 図 IVA 作業（使用する工具について、適切な工具が選択されているか、周囲と干渉することなく使用できるかなどを確認する）

[注記 2](#) : EVA 設計検証・EVA 手順開発試験及び EVA 訓練とは、NASA (NBL) 及び JAXA 筑波宇宙センター (WETS) にある巨大な水槽と実機大の「きぼう」水中モックアップを

利用して、「きぼう」の EVA 設計や EVA 作業手順の妥当性を評価・確認する試験である。水の浮力を利用して、宇宙空間を模擬。また、ここでは EV クルー（EVA を実際に行うクルー）に対して、軌道上で行われる「きぼう」の EVA 作業全ての訓練を行った。作業状況を第 8 図、第 9 図に示す。



第 8 図 ICS-EF へのアクセス確認  
(アンテナの展開)



第 9 図 JPM と JEF の結合状況

注記 3：CEIT（Crew Equipment Interface Test）とは、FCIT と同様な確認がなされる

が、大きな違いは、そのミッションに参画するクルー自身が機器の安全性や操作性、運用性等を確認する最終活動の場である。「きぼう」についてはこれまでの努力が報われ、設計変更を伴う大きな改修要請もなく、試験は無事に終了した。

#### 4. 「きぼう」開発における成果とレッス ンズ・ラーンド

「きぼう」は我が国において、前例のない初の有人宇宙施設である。開発当初はすべてが手探りで始まったが、JAXA を中心に、メーカー各社や運用支援会社の怯まぬ努力と技術課題を一つひとつ克服したことにより、全ての仕様要求を満たした国産の有人宇宙機が誕生したと言える。また、実際にその有人宇宙機の軌道上運用を通じて、新たな知見も得られてきている。以下に「きぼう」で獲得したクルーインターフェース技術における主な成果・知見を述べる。

- ① 運用を見据えた開発の必要性：有人宇宙機の開発は、それを扱うクルーや地上要員（フライトコントローラーや技術チーム）等、実運用を見据えた設計、製造、システム構築、要員支援体制の充実を図る必要がある。開発担当、運用担当という壁を作ることなく、計画・設計段階から実運用へ即時反映可能な一環したシステムを構築することにより、運用に根ざした開発を心がけ、より迅速に、正確に開発を進めることが可能となる。
- ② 安全最優先：有人ゆへの安全を第一に考慮した船内外クルー支援手法の確立。（緊急時対応及び冗長設備の構

築等)

- ③ 企業間の国内連携の重要性：「きぼう」の開発は、我が国の国家プロジェクトであり、「きぼう」は複数社にまたがり、各モジュール毎の開発を行った。そのため、全体をインテグレーションするための高度な能力・手法が求められ、この経験は今後の有人宇宙開発に十分に生かせる成果である。
- ④ クルー活動時間の制約：軌道上のクルー活動は1分、1秒、全て時間で管理され、1日の活動には制限がある（無駄な時間はない）。
- ⑤ ヒューマンファクターの理解：人間はミスをするものであり、クルーとして例外ではない。一例として、クルーが「きぼう」船内実験室内のエクस्प्रेसラック#5 下部のドロワの操作を行った際に、付近に取り付けられていた水サンプリングアダプタと接触しバルブを開けてしまい、「きぼう」の低温熱制御系ループの冷却水が約110ccほどリークしたことがある。クルーはバルブ開に気付かず、テレモニターによって地上管制要員がリークに気付いた。再発防止のため、当該アダプタはバルブ閉状態で固縛することとしたが、開発時には想定し辛かったケースである。クルーに限らず、運用上ミスオペが生じた場合はヒューマンファクター分析を行い、対策を手順や訓練に反映している。有人技術として有用な知見が多く蓄積されてきており、今後の新規開発への応用が重要である。
- ⑥ 国際間協力の重要性：世界における今後の宇宙開発の動向は月や火星等

他の惑星を目指していくと言われていた。これには莫大な費用が掛かるため、他国が優れている点や自国が勝っている点を包括し、一つの技術として、各国が協力して活動を続けていく必要がある。また、ISS・「きぼう」を通じて得た国際間協力の手法を今後の有人宇宙開発に繋げていく。

## 5. まとめ ～ 将来展望

クルーインターフェース技術以外に「きぼう」の開発を通じて、構造系、機構系、熱制御系や軌道上での異常時対処技術等、種々様々な有人宇宙技術特有の基幹技術を獲得できたと考える。これら技術を用いて、漸く始まった無重量環境下での過酷な「きぼう」の運用を今後10年以上にわたり確実に続けていくと共に、これまで得た経験と技術を糧にして、有人往来機や月面基地をはじめ他の惑星開発でも絶やさず生かし続け、さらに発展させていくことが最も重要だと考える。また、我々がこれまでに得た技術は、余すことなく将来宇宙機や民間機関へスピンオフしていくことが我々の責務である。