

## 第4章 流体物理実験用供試体の打上準備作業報告

宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究本部 松本 聡

### Report of Launch Site Preparation of Experiment Cell of Fluid Physics for 1J/A Flight Item

Japan Aerospace Exploration Agency  
Institute of Space and Astronautical Science Satoshi Matsumoto

ABSTRACT This article describes the launch site preparation which was performed at Kennedy Space Center for the experiment unique hardware of Marangoni experiment. Marangoni experiment, which will be performed in Kibo pressurized module as a first scientific experiment, is explained briefly. The launch site preparation of an experiment cell of fluid physics is reported.

#### 1. はじめに

2008年3月11日は、日本の宇宙開発にとって記念すべき一日となりました。この日は、日本実験棟「きぼう」のエレメント（船内保管室）が1J/Aフライトにより打ち上げられました（図1）。その後、国際宇宙ステーション（ISS）にドッキングし、宇宙空間に日本が管理する施設を初めて有することになりました。我が国も初めて人間が活動する宇宙施設を空間に浮かべることになり、長年の夢と希望が現実のものとなるわけです。ISSは、約400 km上空の宇宙空間を約90分で地球を周回しています。完成後の大きさは108.5 m × 72 mで、サッカー場とほぼ同等の大きさになります。「きぼう」には船内実験室と船外プラットフォームの2つの実験スペースがあり、船内実験室はちょうど大型バスが円筒形になったくらいの大きさです。その中には、実験ラックと呼ばれる規格化された枠組みに各種実験装置が組込まれ、科学実験が行われる予定です。また、船内保管室には実験用機器や実験試料なども保管され、実験を行う段になると保管室から必要となる機材を取り出し、船内実験室にて実験が実施されます。



図1 「きぼう」船内保管室および1J/Aミッションロゴ

きぼうの打ち上げは3便に分けて軌道上へと輸送され、ISSに組み付けられ、「きぼう」としての最終形態となります。第1便は、上記に述べた船内保管室、第2便が船内実験室とロボットアーム、第3便が船外実験プラットフォームと船外パレットです。第2便が打ち上がると、国際宇宙ステーションへの組み付け、システムの起動・検証、実験ラックの検証が行われ、それぞれが正常に動作することが確認された後に、「きぼう」を活用するフェーズへと移行し、科学研究テーマが順次実施されます。先陣を切る実験がマランゴニ対流に関する実験です。ここでは、マランゴニ対流実験について簡単に紹介した後、マランゴニ対流実験を行うための実験固有装置（我々は実験供試体と呼んでいます）を打ち上げるための準備作業としてNASAケネディ宇宙センターにて実施した射場準備作業の一端を述べたいと思います。

## 2. マランゴニ対流実験

マランゴニ対流とは、気-液界面における温度差や濃度差によって生ずる表面張力勾配によって駆動される流れです。温度差によるマランゴニ対流では、一般的に温度が低い側の表面張力が高く、表面の流体が温度の高い方から低い方へと引っ張られ表面流が生じ、それに伴って内部の流動が発生します（図2）。そもそも、マランゴニ現象は古くから知られており、樟腦の船などとしても我々の身近に観察することができます。その現象については17世紀位から積極的な観察が始まりましたが、科学的な取扱いは19世紀の後半からであり、トムソン（Thomson）やマランゴニ（Marangoni）らが研究の先駆けとなりました。それにちなんでマランゴニ効果などと呼ばれるようになりました。しかし、現象の複雑さからこの問題が物理学として本格的に深く研究されることはありませんでした。20世紀半ばになって初めて理論的に正しく認識されるようになり、1950年代から60年代にその実験的・理論的研究が進められ、70年代に微小重力環境での実験を契機に「微小重力場における現象」として新たな観点から注目されるようになったわけです。それに伴い、多くの宇宙実験が行われてきました。また、近年のコンピュータの発達により、界面と内部流動を同時に取り扱うことが可能となり、数値解析による現象解明も行われるようになりました。

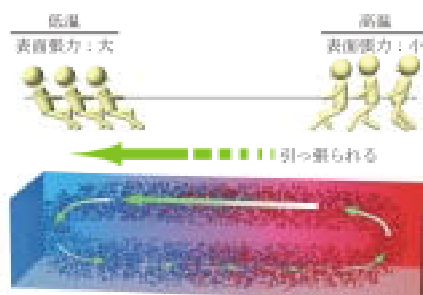


図2 マランゴニ対流発生時の原理図

マランゴニ対流は、半導体や合金、酸化物結晶の製造法であるフローティングゾーン法で育成した結晶の品質に大きく影響を及ぼすことが知られており、高品質化の観点からマランゴニ対流の基礎的知見が求められてきました。そのことから、フローティングゾーン法を模した液柱に温度差を印加しそこに発生するマランゴニ対流の観察が多く行われています。これまでの研究を通じ、様々な流れのパターンを有することが明らかにされてきました。対流の駆動力が小さい場合には定常流れであるが、駆動力が大きくなると流体力学的な不安定性が発達し、振動流に遷移することや、振動流の中にも様々な様相が観察されました。特に現在までの20年間において多くの研究が行われてきましたが、振動流に遷移するメカニズムは未だ明らかにされておらず、振動流に遷移する条件が統一的に理解されていないのが現状です。

「きぼう」を利用したマランゴニ対流の宇宙実験として4つのテーマが計画されています。先陣を切る実験テーマがMEIS (Marangoni Experiment In Space) と呼ばれる実験です(図3)。この実験では、直径30 mmの円筒状の液体柱を形成し、その両端に温度差をつけることで表面張力差によって駆動される対流(マランゴニ対流)を、3次元粒子追跡流速計(3D-PTV)やフォトクロミック表面流速計、赤外放射温度計などにより流れ場と温度場を詳細に計測・観察します(図4)。特に駆動力を徐々に大きくした場合に見られる流れの様相変化を捉え、振動流、カオス流、乱流への遷移を詳細に研究し、振動流に遷移する条件や遷移後の過程を解き明かします。

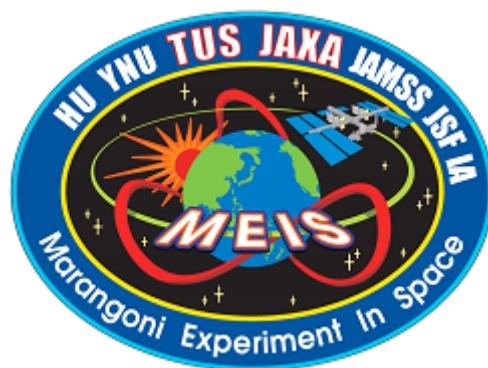


図3 MEISのデカル

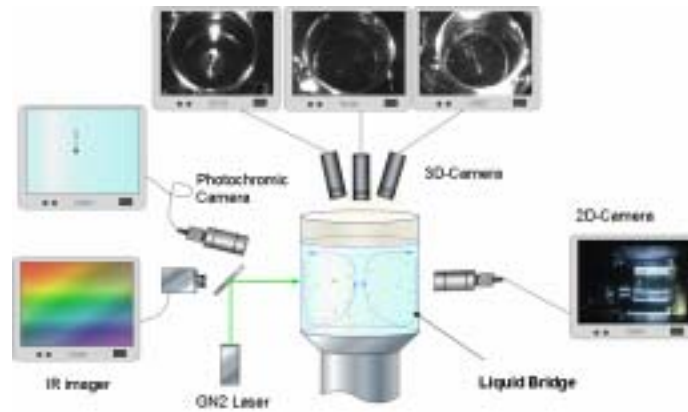


図4 液柱、観察系の概略図

### 3. 打上準備作業

#### 3.1 打上準備作業とは

微小重力環境を利用した宇宙実験を行うテーマ固有実験装置（図5、実験供試体と呼んでいます）も「きぼう」船内保管庫のペイロードラックに収納され、土井宇宙飛行士が搭乗したスペースシャトル・エンデバー号（1J/Aフライト、STS-123）で打上げられました。実験供試体は、打上の10ヵ月前からフライトの準備として、NASA ケネディ宇宙センター（KSC: Kennedy Space Center）で打上前作業を行いました。この準備作業は、実験供試体の機能の最終確認を実施し打上げられる状態に整備すること、宇宙飛行士らによるインターフェースレビューを受け承認を得ることなど、まさに打ち上げ前の最終作業です。

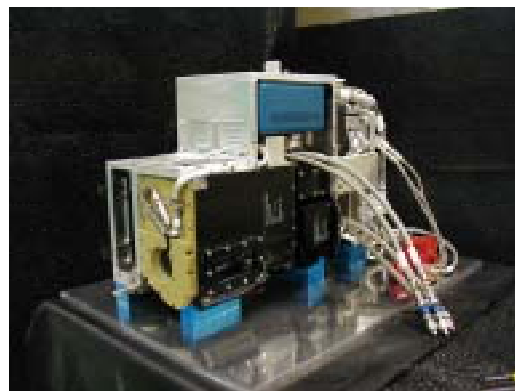


図5 実験供試体

NASAの施設であるSSPF（Space Station Processing Facility）が作業の現場です。SSPFには非常に広く天井の高い巨大なクリーンルーム（High Bay）があり、「きぼう」モジュール（図6）だけでなく、ESAのコロンバス、各モジュールのハブとなる「ハーモニー」、ロボットアーム等が射場作業を同時に行っていました。我々の実験供試体は、それらから比べると超小型ペイロードであり、且つ実験試料であるシリコンオイルを使うことから

オフラインラボ（Off Line Laboratory）と呼ばれる小部屋を借用しました。実験試料であるシリコンオイルが他のフライト品に付着することを NASA から警戒されたこともあり、仕切られた部屋を与えられた経緯もありました。実はこのオフラインラボは様々な面から非常に使い勝手がよかったように思います。High Bay は管理の関係から定時になると作業を切り上げ、High Bay から退室しなくてはなりません。一方、オフラインラボでは、基本的に使用者が責任を持って管理し、事前に申請することにより、極端な話 24 時間作業が可能です。作業を区切りの良いところまでやっってしまうとする日本人の作業感覚からすると、ズルズルと長時間作業をしてしまいがちでしたが、スケジュールが遅れがちになってくると時間制約無く使用できることで度々助けられました。



図 6 High Bay 内で打上げ準備作業中の船内保管室

### 3.2 射場作業の内容

流体物理実験供試体に関する打上準備作業のフローを図 7 に示します。ここからは、順を追って概要を説明したいと思います。

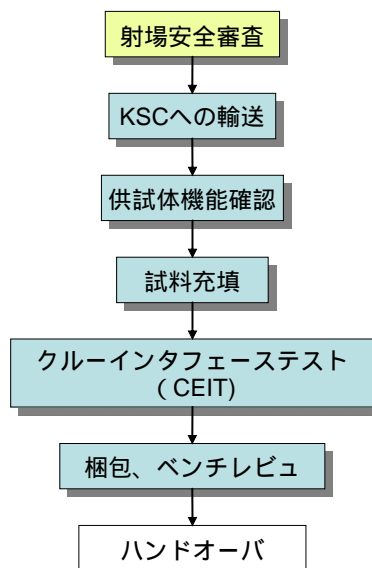


図 7 打上準備作業の流れ

## (1) 射場安全審査

NASA の施設を使った作業のため、射場作業に対する安全性は非常に厳しく審査されます。KSC で行う作業は、全て NASA 文書で規定される安全要求を満たしている必要があります。安全審査は、2 段階に分けての受審となりました。最初は、フェーズ 0/I/II と呼ばれる段階で、フライト品、地上で使用する支援機器、それらを使った具体的な作業内容を記述・説明した上で、危険の識別、その危険が引き起こされる要因、その要因を排除するための対策、対策の検証方法を明示します。それが、承認されると次はフェーズ III となります。フェーズ III では、安全対策の検証方法に基づいて実施した検証内容をチェックします。検証は、解析的に行うもの、実際に試験を行って立証するもの、書類確認によるものなど、内容に応じて様々な方法が採られます。それぞれの段階で、宇宙航空研究開発機構(JAXA)内の審査を実施した後に、NASA の射場安全審査パネル(GSRP, Ground Safety Review Panel)での審査に臨みました。

エンジニアリング的な感覚で全く問題ないと考えている作業でも、エビデンスを持って安全性を証明しようとするると大変に手間が掛かり、苦労しました。NASA はこれまでに経験したことであれば比較的理解を示しますが、そうでないものに関しては徹底して疑って掛かります。その疑いを一つ一つ晴らすことを繰り返しました。時には、市販品コンポーネントのモータや配管のスペックまで調べ耐圧性の証明を提示したこともありました。

## (2) ケネディ宇宙センターへの輸送

射場安全審査が承認されると、いよいよ射場での打上げ準備作業を始めることが出来ます。射場作業に先立ち、まず物品の輸送を行います。海外への輸送ですから輸出貿易管理令に則った輸出の手続きが必要となり、該非判定書の準備を行い、規制対象品が含まれていないことを確認しました。宇宙実験供試体関連物品の輸送のために、筑波宇宙センターに輸送品を集め、輸送品の識別 ID を割り振り物品に ID シールを貼りました。その ID 毎に写真を撮影し、輸送品の写真集を作成しました。この写真集は、出国の際の税関の検査時の内容物の説明時に必要になります。供試体関連物品は、ID 識別点数で 72 点となり、その内 20 点がフライト品、残り 52 点が射場作業を行うための機器・備品類でした。

集められた輸送品は平成 19 年 4 月 18 日に筑波宇宙センターからトラックに載せられて、成田空港に輸送し、輸出手続を行い、4 月 25 日の航空便でアメリカまで飛び、空港からは再度トラックにてケネディ宇宙センター(KSC)まで届けられました。KSC 到着は、4 月 30 日となりました。我々は、トラックから降ろされた物品を引き取り、インスペクションエリアに移動します。インスペクションエリアは、クリーンルームの前室であり、外部ともシャッターで仕切られています。ここからクリーンルーム(High Bay)内を通り、作業場所であるオフラインラボまで移動させるわけですが、その前に NASA のチェックを受けます。輸送してきたものを開梱し、一品毎にクリーンルーム内に持ち込んでよいものかを検査します。クリーンルームですから汚染するようなものは持ち込めません。輸送のため

に気泡緩衝材を多用しますが、この緩衝材も気泡内に入っている空気の清浄度が分からないことから持ち込めませんので、インスペクションエリアで全て外しました。これら、検査を無事通過し、オフラインラボに搬入しました。搬入後、清浄作業区域をオフラインラボ内に設定します。この区域内では、クリーンウェアを着ての作業となります。ただし、区域外では、同じ部屋内でも通常の衣服で構いません。清浄作業区域は、チェーン等で仕切ります。この区域は、フライト品から 3 フィート（約 90cm）以上は離れている必要があります。

### (3) 供試体機能確認

遥々アメリカまで輸送してきましたので、その輸送によって破損がないか、機能が失われていないかを確認します。まずは、外観検査を行いました。特に、本供試体は観察のためにガラス窓やレンズなどを多く持っていますので、これらを入念に確認しました。その後、モータ等の可動部や熱電対等のセンサ類の機能健全性を順次確認しました。機能確認は、全く問題なく順調に進められました。

輸送後のチェックが終わると、次は光学調整に移りました。観察機能の一つとして、紫外線を液柱に照射し、液柱に混ぜた微量の染料を発色させ、発色スポットの移動から表面の流速を計測する手法が採用されています。紫外線を照射するために、窒素ガスレーザー（GN2 レーザー）を供試体に搭載しています。宇宙実験用機器は、コンパクトに作られていますので、レーザーから照射された紫外光は何度も折り返され、液柱表面に到達します。途中の光学系がずれていると、所定の位置に当たりませんので、レーザーを照射し光路を丹念に確認しながら途中のミラー、レンズ類を微調整していきました。

このレーザーはクラス 3B に区分され、比較的発光強度が高いため、レーザーの照射は危険作業に識別され、NASA の立会い監視のもとで作業を行いました。米国規格協会（ANSI）の定めるレーザーの安全使用基準を満たすよう、作業者は適切なゴーグルを着用し、不意の入出者にレーザーが当たらないようパーティションを設け、照射中は部屋の入り口に警告灯を点灯しました。NASA の監視下での作業ですので何となくやりにくいですが、日本人ですからきちんとルールを守り作業を行い光学調整を終了しました。

前半の作業は、時間に追われながらも何とかスケジュールをキープしながら順調にこなしました。

### (4) 試料充填

実験の試料としてシリコンオイルを使用します。また、流れの観察のために粒子を少量混入させます。オイルは、試料カセットと呼ばれる容器内に、約 130cc 程度気泡が混入しないよう脱気しながら充填しました。ここで、問題発生です。あれは夜遅く午後 10 時ごろだったでしょうか、実験試料を入れるカセットの先端から、実験試料であるオイルが滴っているではありませんか。作業を即座に中断し、対策会議を行った結果、処置には試

料カセットを日本に返送して修理する必要があることも分かりました。試料充填作業はそこで中断となりました。

原因究明のために日本側に連絡を取り、設計情報を得て翌日には考えうる原因が分かってきました。その後一度帰国し、怒涛の勢いで試料カセットを改修し、7月上旬に再度 KSC にて試料充填作業を行い、今回は漏れも無く作業を終了することが出来ました。

#### (5) クルーインターフェーステスト

上記の作業により、供試体がフライト状態に整えられましたので、宇宙飛行士によるインターフェーステスト (CEIT, Crew Equipment Interface Test) を行います。供試体は、事前にクルーインターフェースとなる部分の操作性のテスト (FCIT, Flight Crew Interface Test) を行っていますが、一部が完全なフライト状態では無かったため、KSC では、FCIT で実施できなかった部分のテストとなります。この審査で重い課題を受けるわけにはいきませんので、我々は前日にリハーサルを行い万全を期し、指摘事項なしで審査を無事終了することができました (図 8 )



図 8 クルーインターフェーステスト後の集合写真

#### (6) 梱包・ベンチレビュー

いよいよ、最終作業となります。これが終わると、荷物のハンドオーバで搭載チームへの引渡しとなります。

供試体は、CTB (Cargo Transfer Bag) と呼ばれるバッグにクッション材で包まれ梱包されます。クッション材は、日本でフィティングを行い供試体の形状に上手く合うように調整されています。しかし、供試体側が完全なフライト状態でないため一部は微調整を行い、打上げ振動を極力軽減するよう工夫しました。ここで、供試体関連物品 (20 点ほど) を 5 つの CTB に分散して梱包します。

1 J/A フライトで打ち上げられる CTB 類が、一つの大きな部屋に集められ、ベンチレビ



ユを受審します。ベンチレビューとは、梱包状態を宇宙飛行士が様々な視点でチェックします（図9）。私が気付いたチェック項目は以下です。

- ・軌道上を想定しての梱包品の取り出しやすさ
- ・ジップロックバック等の封入されている場合にはバッグが適切であるか
- ・軌道上のゴミを増やさないよう過剰包装になっていないか
- ・クルーの怪我につながるような鋭利な突起は無いか
- ・ラベルは見やすく適切な位置に貼付されているか
- ・クッション材は、軌道上で開封後保管あるいは廃棄が明示されているか
- ・非打上げ品の外し忘れはないか

など、多くの項目を宇宙飛行士とサポートする技術者で非常にテンポ良く確認します。このレビューも重い課題を背負ってしまうと打上げできなくなりますので、クルーからの質問・疑問にはその場ですばやく適切に回答し、必要があればその場で処置するなど審査をクリアしました。

ベンチレビューの部屋には、“Our goal is 100% real time close out at Bench Review.”の垂れ幕が掲げられていました。この言葉は胸に突き刺さりました。問題を先送りせず、その場でなるべく解決を図るといった意識を持つべきと受け取りました。

ベンチレビューが終わると最終梱包です。梱包状態を一枚一枚写真に収め、軌道上での物品管理の情報とします。NASAでも写真撮影専従者が撮影を行いデータベースに登録することです。最終梱包をする段になって、この供試体も宇宙に旅立つのかと思ったら感慨も一入でした。

これらのCTBは、きぼう船内保管庫搭載型補給ラック（PSRR）のロッカーに入れられ（図10）、保管庫の中に固定され、打上げを待ちました。



図9 ベンチレビューの様子



図10 PSRRに搭載されたCTB

#### 4. おわりに

KSCでの射場作業の一端をご紹介しました。ここで、書ききれなかったこともまだ山のように有り、色々とトラブルもあったものの、最終的には我々の実験供試体を打上げ貨物に間に合わせることができました。実験供試体はスモールペイロードであるにもかかわらず、射場作業はJAXA 有人宇宙環境利用プログラム、開発メーカー、関連支援メーカー、NASAなど数百人を超える方々のチームプレーです。この場を借りて、射場チームの面々にお礼申し上げたいと思います。

今年夏からは、いよいよ軌道上実験が行われます。現在は、実験運用に向けた準備を鋭意進めています。運用についても、数百人を超える方々の連携・協力なくしては成り立ちません。もう一度気を引き締めて運用の準備を進めると同時に、夢と「きぼう」に向けて関係各位のご協力をお願いする次第です。