

第8章 氷結晶成長実験の成功に至るまで

宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究本部
ISS 科学プロジェクト室
吉崎 泉

The way towards the success of Ice Crystal Experiment

Japan Aerospace Exploration Agency
Institute of Space and Astronautical Science
ISS Science Project Office
Izumi Yoshizaki

Ice Crystal experiment was successfully carried out in the Japanese Experiment Module “KIBO”. It took 15 years after this experiment was selected. The events during these 15 years, and the final preparation and experiment operation are described.

1. はじめに

北海道大学低温研究所 古川義純教授が国際宇宙ステーションで実施する科学実験として氷の結晶成長実験を提案し、実施候補として選定されたのは1993年のことでした。その後、ステーション計画の遅れに起因するさまざまな紆余曲折を経て、15年。

ついに待ちに待った実験が開始しました。2009年2月現在、100以上の実験を行うことができおり、対流のない理想的な環境で得られる重要なデータを着実に蓄積しています。ここでは、実験テーマの取りまとめ担当の立場から、実験成功に至るまでの15年の軌跡を述べたいと思います。



国際宇宙ステーション(ISS)

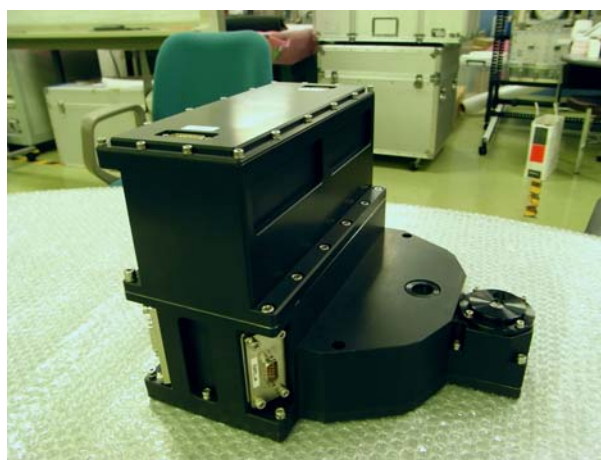
「きぼう」も取り付けられている。

(写真提供：NASA)

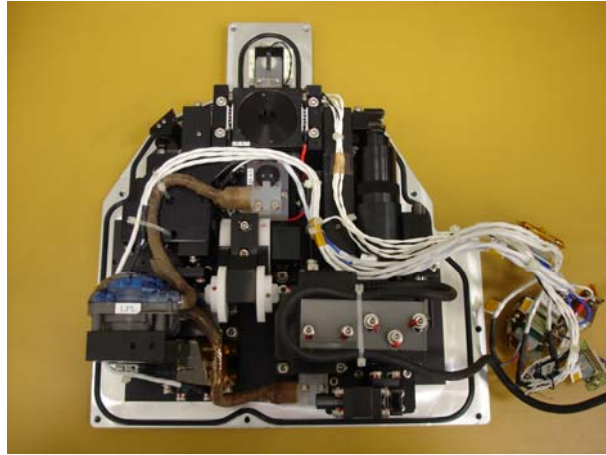
2. 選定後の紆余曲折

1993年に実施候補テーマとして選定された本実験ですが、当時は1999年に実施できる計画でした。しかし、国際宇宙ステーション計画は遅れに遅れ、1年経つごとに、実施予定も1年延びるという状況が数年間続きました。宇宙実験の実施がいつになるか見えない状況の中、古川先生は待ち時間を利用して着々と予備実験を重ね、小型ロケット実験や落下塔実験、航空機実験を実施しました。この過程でいくつかの新たな知見が得られ、その結果を受けて実験目的も詳細化されました。

1999年、国際宇宙ステーション計画の遅れに対応するために、打ち上げ準備の整っている実験はスペースシャトルを使って先行実施するという計画が持ち上がりました。STS-R2ミッションです。このミッションでは、米スペースハブ社の保有する実験モジュール内にJAXA（当時NASDA）の開発する実験装置を搭載することになりました。実験としては、本実験を含む結晶成長実験3つが選ばれ、スペースハブ用の溶液結晶化観察装置（後述）および実験供試体（各実験専用の小型実験装置）の開発に着手しました。しかし、NASAの予算事情により、STS-R2ミッション継続が不透明となり、2002年にはJAXA（NASDA）としてプロジェクトを一部中断せざるを得ませんでした。さらに2003年、スペースシャトルコロンビア号の痛ましい事故がありました。スペースシャトルの打ち上げは凍結され、本実験の実施は全く見通しが立たない状態におかれまして。検討の結果、本実験はやはり国際宇宙ステーションで実施することになりました。供試体は途中まで完成した状態で中断されていましたが、開発再開は、スペースシャトルの再開と歩調を合わせて2006年まで待たざるを得ませんでした。その後、供試体開発メーカーであるアイ・エイチ・アイ エアロスペースにて供試体の詳細設計、フライト品の製作が行われ、機能試験や環境試験、安全審査、そして出荷前審査などを経て、2008年春にやっと完成品がJAXAに納入されたのです。



完成した氷結晶成長実験用供試体（Ice Crystal Cell）外観



氷結晶成長実験用供試体（Ice Crystal Cell）内部

3. 実験概要

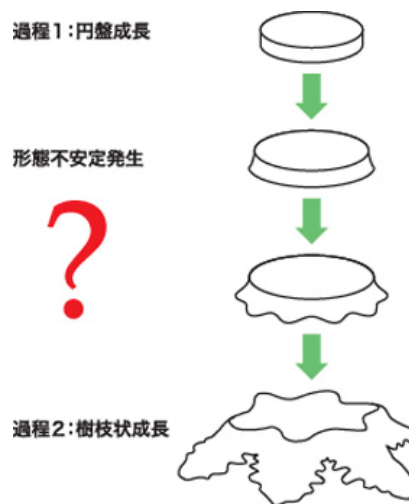
ここで、本実験テーマ「氷結晶成長におけるパターン形成」についてご紹介します。

この実験では、「溶液結晶化観察装置（以下 SCOF: Solution Crystallization Observation Facility）」と「氷結晶成長実験用供試体（以下 Ice Crystal Cell）」を用いて、氷結晶の形態観察、結晶周囲の温度拡散場計測を行います。SCOF は 2008 年 3 月に土井宇宙飛行士の乗ったスペースシャトルで国際宇宙ステーションに運ばれた共通実験装置です。結晶成長の様子を詳しく調べるための観察機能を備えた結晶成長装置であり、氷の実験以外にも使われます。Ice Crystal Cell には、本実験のための実験試料、温度制御機能、観察装置等が入っており、SCOF に接続して使います。2008 年 11 月にスペースシャトルで宇宙ステーションに運ばれました。



実際の「きぼう」内部。矢印で示した部分が溶液結晶化観察装置（SCOF）
（写真提供：NASA）

結晶の成長に伴うパターン形成（形の変化）は、これまで、サクシノニトリルなどのモデル物質を用いて詳しく調べられてきました。Mullins-Sekerka 不安定と呼ばれる理論により、樹枝状に成長するサクシノニトリル結晶のパターン形成についてよく説明することができます。しかし、氷結晶のパターン形成についてはこの理論では必ずしもよく説明できないことがわかりました。サクシノニトリル結晶は異方性が極めて小さいのに対し、氷の結晶には大きな異方性があるからです。氷結晶は、成長初期には円盤状であり、やがて円盤のふちで凹凸が生じ、最終的には雪結晶と同様な6回対称の薄い樹枝状結晶になります。円盤状結晶は分子的に平坦な面である円盤の面と、分子的に荒れた面である円盤のふちの面（外周部）との組み合わせからなっており、それぞれ層成長とラフニング成長という代表的な2種類の結晶成長様式で成長するため、円盤状結晶が不安定化して樹枝状に変化していく過程を説明するためには、この異方性を考慮した新しいモデルが必要です。今回の実験目的は、モデルの検証を行うために、対流などの擾乱を完全に排除できる長時間微小重力環境において、結晶成長その場観察実験を繰り返し行うことにあります。核生成から成長、融解にいたるまでの全過程を実施した結晶成長実験は宇宙実験として初めてとなります。



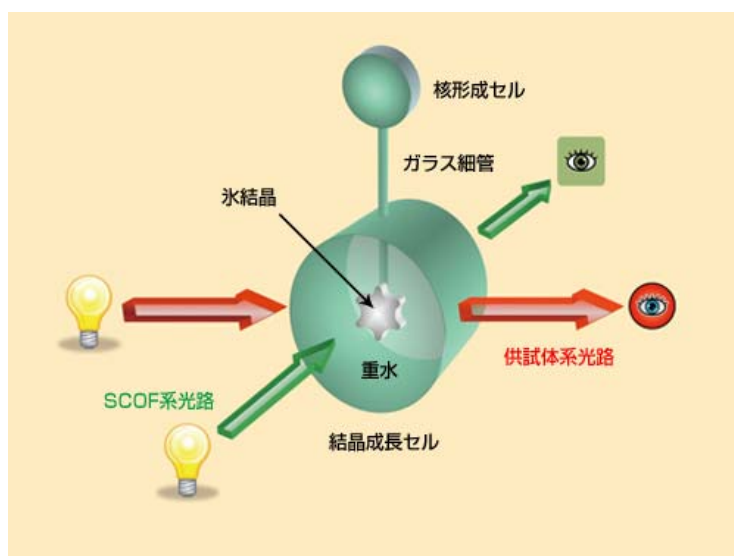
氷の結晶成長過程

水という身近な物質が凍る過程を正確に知ることは、たとえば、今や私たちの生活に欠かせない冷凍食品の品質保持や、生きた臓器の保存などに役立つものと考えられます。また、自然界には氷点下でも凍らない生き物が存在しますが、彼らは、不凍タンパク質と呼ばれるものを体内にもつことで、体内にできる氷結晶の成長を抑えることを実現しています。凍る過程を知ることは、これらの生き物たちの生体反応を理解し、その活用方法を探

ることにもなります。また、氷の結晶は、地球表面に最も大量に存在する結晶体です。その地球表面で起こる様々な自然現象は、氷の結晶が成長したり、融けたりすることを通して起こります。氷の結晶成長のしくみを理解することは、このような自然現象の起こるしくみを解明することにも結びつくのです。

実験方法を簡単にご説明しましょう。

Ice Crystal Cell 内の結晶成長セルと核形成セルはキャピラリー（ガラス細管）でつながっており、中は全部試料（重水）で満たされています。核形成セルを冷やすと氷ができます。その氷はキャピラリーを通して結晶成長セルへ導かれます。温度制御された結晶成長セルの中で氷が成長する様子、とくに円盤状の結晶が不安定な状態になるときの様子を、SCOF と Ice Crystal Cell の両方の観察系を用いて詳細に観察し、その厚みや直径、成長速度を計測します。また、結晶周辺の局所的な温度を、マッハツエンダー型干渉計を用いて詳細に調べます。十分に観察したら、成長セルの温度を上昇させ、氷を融かせば、また次の実験を行うことができるわけです。また、この Ice Crystal Cell は、最初の取り付けと最後の取り外し以外はクレー操作の必要がなく、すべて地上からの指示によって遠隔操作が可能で、稼働部がないため故障の確率が低いことが優れた点として挙げられます。

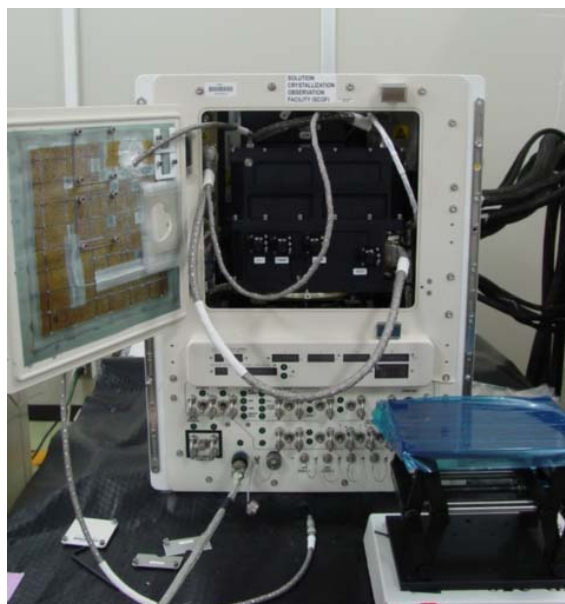


Ice Crystal Cell セル部模式図

4. 打ち上げ準備

さて、2008年春に供試体が納入されましたが、その後数カ月かけて「適合性試験」を実施しました。これは、Ice Crystal Cell に実試料を入れ、SCOF のエンジニアリングモデルと組み合わせて実際に氷の結晶を作る試験です。過冷却度をさまざまに変更し、この供試体を使った場合、「核形成後何分で結晶が出現するか」「結晶成長速度はどうか」「温度が安定化するまでの時間は」などを詳しく調べます。これが地上実験のデータとなるのです。

試験の過程でいくつか改善すべき点や運用上注意すべき点なども判明し、実験運用時までに対応することができました。試験は主に有人宇宙システムと日本宇宙フォーラムの担当者によって行われました。



SCOF エンジニアリングモデルに Ice Crystal Cell を搭載したところ

この時期、Ice Crystal Cell の SCOF への取り付けを担当するマグナス宇宙飛行士と、取り外しを担当する若田宇宙飛行士への実験内容の講義と訓練も実施されました。また、10月に実施予定であった射場での最終調整作業で使う NASA ケネディ宇宙センターの施設を借りるための打ち合わせや下見のために渡米したりもしました。

9月、宇宙飛行士によるチェック等を受けるため、Ice Crystal Cell を NASA ジョンソン宇宙センターに発送しました。尖った部分や操作しにくい部分がないか、宇宙飛行士や担当者によるチェックが行われるのです。これをベンチレビューといいます。打ち上げ時に Ice Crystal Cell を包むクッション材も製作してもらい、最終梱包状態の確認も問題なく行われました。

10月にはいよいよケネディ宇宙センターで射場作業が行われました。主な作業は、試料（重水）を結晶成長セルと核形成セルに泡が入らないように充填すること、その後の機能試験で結晶ができるのを確認すること、Ice Crystal Cell 内の干渉計の最終調整を行うこと、そしてセルを冷やしたときに結露しないように、Ice Crystal Cell 中の空気を乾燥窒素に置換することです。まず、NASA から借りた部屋に、日本から輸送した機材をセッティングすることから始まり、2週間でそれらの作業を行いました。作業内容は事前に JAXA、NASA による安全審査を受けており、関係者によりサインアップされた手順書に基づいて、

ミスがないように進めました。ケネディ宇宙センターの中では、通称「ホワイトバッジ」を取得していない人は単独行動ができないため、食事や休憩なども時間を決めて全員でとり、規律正しい生活を送りました。10月30日、最後にNASAによる最終チェックを受け、Ice Crystal Cellの記録写真の撮影などが行われました。Ice Crystal Cellがクッション材に包まれて、シャトルのミッドデッキに搭載されるロッカーの中に詰められました。これが、私たちがIce Crystal Cellに触れる最後の機会となりました。

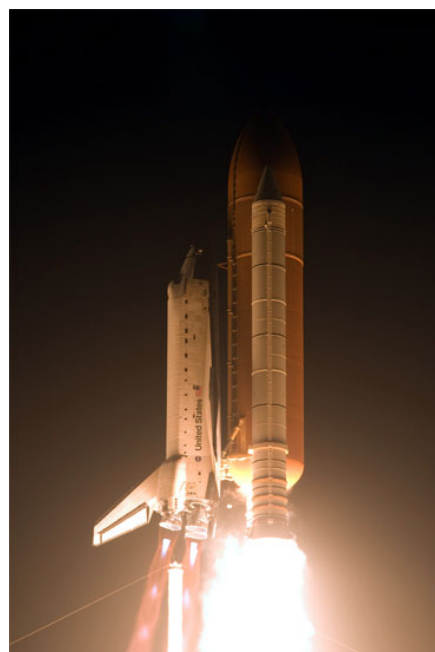


射場作業の様子

5. 実験運用

2008年11月14日（米東部時間）、Ice Crystal Cellを載せたスペースシャトルエンデバー号が国際宇宙ステーションに向けて打ち上げられました。自費で打ち上げを見に行かれた古川先生は、感動した、と仰っていました。シャトルは2日後に国際宇宙ステーションにドッキングし、供試体は日本の実験室「きぼう」に移設されました。

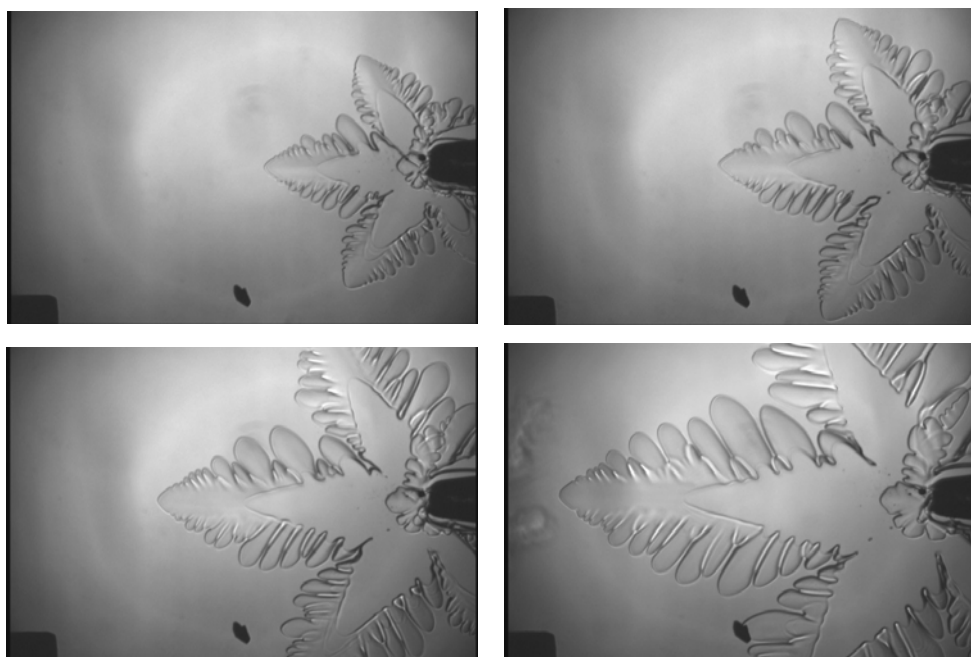
11月27日にサンドラ・マグナス宇宙飛行士によって供試体がSCOFに取り付けられました。翌28日には地上からのコマンド操作により、装置の立ち上げと光学調整を行いました。最初の画像を確認するまでは「まず装置は立ち上がるのか」「打ち上げの振動でキャピラリーは折れていないだろうか（振動試験を実施し確認したので大丈夫なはずなのですが）」「コマンドは問題なく通るだろうか」と次々に不安が襲ってき



エンデバー号の打ち上げ
(写真提供：NASA)

ましたが、ダウンリンクされてきた画像にはキャピラリーがくっきりと映っています。「あ、いた！」喜びに浸る間もなく、地上からのコマンドによる SCOF の光学調整を開始します。有人宇宙システムの優秀な新人職員が、適合性試験で確認したパラメータをオペレータに伝え、ほんの数コマンドで干渉縞をきれいに設定することに成功しました。また、供試体側の光学調整も、クルーによる再調整の必要がないことがわかり、ほっと一安心です。従来宇宙実験のたびに問題となっていた泡もなく、射場での試料充填がうまくいったことを確認できました。ちなみに、画像には小さなゴミも映っていましたが、これが微動だにしないことから、微小重力を実感することにもなりました。

12月2日、いよいよ最初の実験を行うことになりました。マスコミも各社、つくばの「きぼう」運用管制室に隣接した「ユーザー運用エリア（以下 UOA: User Operations Area）」に集まってくださり、あつい熱気が漂ってきます。古川先生の表情も若干かたくなっているようです。温度制御が問題なくできるのか、核はちゃんとできるのか、いったいどんな結晶ができるのか、とまたドキドキしますが、やるしかありません。温度を安定化させたあと、核形成セルの温度を一気に-10度に低下させます。温度降下の途中でセンサーが温度上昇を検知し、潜熱がでたことがわかります。つまり、核形成セルの中で結晶核が生成したということです。あとは、キャピラリーの中を結晶が進んでくるのを待つだけです。地上実験では10分前後で結晶が出てきましたが、宇宙ではどうでしょうか。緊張で張り詰めた空気の中、11分後に結晶がキャピラリーの先端から出て、見事な樹枝状結晶が成長をはじめました。宇宙で、待ちに待った氷の華が咲いた瞬間です。古川先生が思わず立ち上がって拍手し、私たちと次々に握手をしてくださり、感無量です。



宇宙での樹枝状結晶成長の様子

結晶は、Ice Crystal Cell の観察系に対して真正面を向いた方向でした。真正面ですと、結晶の対称性が一目でよくわかり、解析がしやすいばかりか、見栄えのよい画像になります。その後も何度も実験を行っていますが、結晶が出てくる向きの制御はとても難しいので、真正面が出てくる確率は高いわけではありません。新聞などでもこの第 1 回実験のきれいな写真をとりあげていただきましたので、運に恵まれたと思っています。

さて、実際に実験を始めますと、常に気にするのは「AOS」「LOS」です。AOS とは Acquisition of Signal の略、LOS は Loss of Signal の略で、衛星が可視に入ること、可視から出ることをいいます。つまり、AOS のときはデータ中継衛星を介して国際宇宙ステーションと通信ができますが、LOS のときは通信ができません。すなわち、セルの温度制御を行うためのコマンド送信や結晶成長画像の確認などは、すべて AOS で行う必要があります。AOS、LOS は日によって状況は異なりますが、AOS が 1 時間も続くことはなく、長くて 45 分程度で、間に数分~30 分程度の LOS が入ることが多いようです。限られた実験時間の中でできるだけ効率よく AOS を使うために、「この長い LOS は、観察する必要のないセル温度の安定化時間として使おう」「今日は長い AOS が続いているから、低過冷却度で時間のかかる実験を計画しよう」などの検討をします。結晶成長セルの窓は石英ガラスなのですが、結晶が成長したまま放置すると、氷による体積膨張のために、最後はセルの窓が割れてしまいます。そうならないように、結晶がある程度成長したら、成長セルの温度を上昇させ、氷を融かします。特に、成長速度の速い、過冷却度の大きな条件の時には、AOS の間に実験を終えるように注意しています。「LOS に入ったため、温度制御コマンドが打てずにセルが割れてしまうかもしれない」というリスクを避けるためです。しかし、AOS、LOS の予定表に明示されていない、予期せぬ LOS が突然入ることもあり、肝を冷やしたこともありました。

温度制御コマンドや画像の録画コマンドなどはすべて、FISICS (Fluid Science and Crystallization Science Ops Lead) と呼ばれる運用担当者が、UOA から送信します。FISICS の担当者は、溶液結晶化観察装置が入っている「流体ラック」の仕様を把握しており、流体ラックに搭載される実験機器の状態を、軌道上からリアルタイムで送られるデータによって監視するとともに、それらの機器に対する制御を地上から実施します。ミスオペレーションなどが発生しないよう、これらの制御操作はすべて手順書 (ODF: Operations Data File) に記載されていなければなりません。こうした手順書を作成するのも、運用担当者の大事な仕事です。

本実験では、AOS のときの画像はすべてリアルタイムダウンリンクしています。せいぜい数秒遅れの画像を地上に伝送できます。また、LOS 中の実験画像は画像取得処理装置のハードディスクレコーダーに録画されており、実験終了後に地上にダウンリンクします。ダウンリンクが終了した画像はどんどん上書きしていきますので、地上にダウンリンクされた画像が命ということになります。この画像のデータ量は膨大なもので、現在までに、1 テラバイトのハードディスクが何個も消費されています。解析を主に担当される共同研究

者で学習院大学の横山悦郎先生はうれしい悲鳴をあげる毎日です。

6. 終りに

実験を実施してみて強く思うことは、やっと国際宇宙ステーションを存分に活用できる時代がきた、ということです。科学において再現性をとることは非常に重要ですが、今までのシャトル実験や小型ロケット実験では実験時間が限られており、繰り返し実験を何度も行うことは不可能でした。また、前日に行った実験結果に基づいて翌日の実験条件を検討し反映することも可能であり、まさに地上で行う実験と遜色のない実験を行うことができます。ISS 外部に設置されたカメラがあり、このカメラがとらえる地球の映像を見ることができるのですが、それを見るときにだけ、「ああ、そういえば宇宙実験をやっているんだ」と気づくほどです。ついに「宇宙実験室」が完成したのだという深い感慨をおぼえます。これから、できるだけ長く国際宇宙ステーションが運用され、地上では行うことのできない科学実験を継続できることを願ってやみません。

7. 謝辞

15年という長い年月を忍耐強く待ってくださった古川先生と横山先生に感謝します。本実験の実施までには、JEM 利用一次選定テーマの調整に関わってくださった皆様、STS-R2 ミッションの調整に関わってくださった皆様、訓練・運用・射場作業を担当してくださった多くの皆様のご尽力がありました。お一人お一人のお名前をあげることができませんが、深く感謝申し上げます。特にプロジェクト開始当初から本実験を担当し、常に実験最優先の立場で調整や予備検討を行ってくださった日本宇宙フォーラムの島岡太郎氏、不具合のないすばらしい供試体の製作を指揮してくださったアイ・エイチ・アイ エアロスペースの友部俊之氏、適合性試験・射場作業・実運用で大活躍してくださった有人宇宙システムの曾根武彦氏に深く御礼申し上げます。

