

IIIIII まえがき IIIIII

## MEIS 実験レビューについて

TF 座長 今石宣之



2013年11月に、日本マイクロ重力応用学会の石川正道会長および編集委員会の石川毅彦編集委員長から、ISSにおけるMEIS実験(Marangoni Experiment In Space)に関する総合レビューの企画があり、そのタスクフォースの座長役として参加するよう要請がありました。私自身はNASDAおよびJAXAにおけるマランゴニ研究会のメンバーではありましたが、MEIS実験に参画した経験も無いので、この役は重過ぎるとお断りしたのですが、MEIS実験に参画した研究者の方々は引き続きISSにおけるマランゴニ対流の実験に携わっているため、担当部分の原稿を書く時間を捻出するのが精いっぱい、全体を纏める時間はないとの現状説明があり、微力ながらお手伝いをするにいたしました。実際、現在Dynamic Surfaceの宇宙実験が進行中で、しばしば、週に数回、早朝から筑波宇宙センターに出かけてダウンリンクされてくる画像やデータを見て、データ整理をしながら、適切な条件設定を行う生活が続いている横浜国大の西野先生、東京理科大の上野先生、両研究室のスタッフや学生さんたち、オペレーションに関わっているJAXAや関連機関の方々の状況を見ていると、このレビューの原稿の準備をお願いすることにもためらいを感じる状況でした。その中で本レビューの原稿を準備して下さった著者の皆様に感謝いたします。JASMAの当初の企画では、MEIS実験全般の詳細なレビューのみならず、ワークショップを開催してマランゴニ対流に関する宇宙実験の学問的な意義、その波及効果などについても議論し、その内容も含めたいとの依頼でしたが、今回与えられた時間内にはワークショップを開催するゆとりはなく、また、5つのフェーズを持つMEISプロジェクトの膨大な実験結果の解析は完全には終了していないため、本企画においては、主にMEIS-1とMEIS-2に関する部分のレビューに留めることとしました。今後公表が進むとともに記事を追加し、MEISプロジェクト全体の総合的なレビューとして完成させていければと考えています。

ISSにおいて大型液柱内のマランゴニ対流の不安定化に関する諸現象を総合的に実験解析しようとするMEIS実験プロジェクトに向けての、我が国における研究テ

マの選定、研究組織の構築、実験手法開発、実験装置開発、宇宙実験の運用状況、さらには並行して地上で行われた低プラントル流体の液柱内でのマランゴニ対流の不安定化現象に関する研究、などについては以下の各章に詳しく記述されていますので、ご理解いただければ幸いです。

なお、ここでは簡単に、ISS実験に至るまでの様々な事情について“宇宙にかける「きぼう」国際宇宙ステーション計画参加活動史”(JAXA特別資料、2011年)から関連のあるごく一部を抜粋してみます。

米国は1982年に国際宇宙ステーション(ISS)の構想を打ち出し、欧州および日本に対して参加を呼びかけた。日本はこれに参画することを想定し、関連省庁、ISAS、NAL、NASDA、大学、企業などから宇宙ステーションでの研究提案を募り、多数の分野からの提案を得た1984年にはJEM及び実験機器類を独自開発する方針が定まり、1987年にJEM本体の基本コンフィギュレーションを示すとともに正式にISSに参画することを表明した(この時点でのJEM打ち上げ想定時期は1994年頃)。

その後、1986年1月のスペースシャトルチャレンジャー号の事故により2年8か月間スペースシャトルの運用が停止され、また、米国の予算削減、ロシアの参加などの影響で、ISSの構造や規模の変更などがあり、組み立て開始時期は大幅に遅れた。1998年にロシアのザリャモジュールが打ち上げられ、軌道上でのISSの組立て作業が開始され、2000年から常時宇宙飛行士の滞在が可能となった。しかし、2003年2月のスペースシャトルコロンビア号の空中分解のためにシャトルの運用が2005年7月まで2年5か月にわたって停止され、その間組み立ては停止し、ISS完成はさらに遅れ、人員の輸送はロシアのソユーズが担当した。2008年、2009年からはESAのATV、日本のHTVがそれぞれ物資輸送に従事し始めた。JEMに関しては、ISSの設計変更に合わせて1991年に変更したデザインがほぼ継承されたが、当初の予定より14年遅れて2008~9年にスペースシャトルで打ち上げられ、2010年から本格運用が始まった。

スペースシャトルの運用は、JEM打ち上げの後、2009年11月で終了し、現在に至るまで人員の輸送はソユーズが担当するのみとなっている。

ISS計画への参画が決まるまでは宇宙実験の経験に乏しかった国内の研究者に対して微小重力環境での実験機

九州大学名誉教授  
imaishi@cm.kyushu-u.ac.jp

会を与え、微小重力環境利用を推進するために、短時間微小重力実験施設が国内にも設置された。研究者の実験機会ニーズを補い、実験技術の開発を目的として、1989～99年の間に6回の小型ロケット (TR1-A) による約6分間の微小重力実験、1991～93年に3回のシャトル利用の宇宙実験が実施された。また、通産省指導下で北海道空知郡砂川町に10秒間にわたって $10^{-5}G$ の微小重力状態を実現できる落下塔施設 JAMIC が1989年3月に完成した (2003年廃止)。また、1990年2月からは名古屋空港を拠点とするダイヤモンドエアーサービス社による小型航空機による約20秒間の微小重力実験 ( $10^{-2}G$ 程度) が可能になった。さらに、1995年2月には、科学技術庁の指導で岐阜県土岐市に4.5秒間にわたる $10^{-5}G$ の微小重力状態を実現できる落下塔施設 MGLAB が完成した (2010年廃止)。これらの短時間微小重力実験設備は、短時間ではあったが、比較的手軽に微小重力環境下での流体の挙動や熱物性測定、燃焼実験など広い分野での実験技術の開発に重要な役割を果たした。マランゴニ対流の研究がこれらの実験機会を利用した基礎実験・技術開発の概要は本レビューの第3章に記述されている。

一方、1992年には“宇宙ステーション取り付け型実験モジュール (JEM) の利用に関する基本方針”が取りまとめられ、①主な利用分野として、材料、ライフサイエンス、理工学・通信分野の研究、天体・太陽系観測および地球観測並びに宇宙インフラ整備のための基盤的・先端的な技術開発とされ、②利用計画の策定は、長期的展望に立ち、基礎研究、応用研究等バランスのとれた利用を図り、宇宙開発委員会が国全体の利用取りまとめを行う、③NASDAを中心に、利用者のニーズを踏まえて、共通実験装置の一元的な開発・整備を行う、④国としての総合的な利用推進を進める、などのJEM利用の基本的な考えが示された。また、利用計画策定の基本方針として、利用テーマの公募、JEM及び共通実験装置の検証・実証の段階的实施、運用・利用技術の実証に重点を置き、利用計画の柔軟性を確保すべきことが示され、利用テーマ選定に当たっては、大きな科学技術上の意義、基盤的共通技術の開発への寄与、提案者の研究遂行能力、実験の実現性等を考慮すべきこと、利用テーマの公募は、7年前から公募し、3年前までに選定すること、当面は毎年公募・選定を実施することなどが示された。

この基本方針に基づき、JEM 与圧部で実施可能な材料分野、ライフサイエンス分野を対象とした「第1回 JEM 利用募集案内」が1992年にNASDAから発出され、1993年に宇宙開発委員会で50テーマが“1次選定テーマ”として選ばれた。その中に、流体物理実験装置 (FPEF) を利用するマランゴニ対流に関する下記の3件が含まれていた。

- 1) マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程：研究代表者 河村 洋
- 2) マランゴニ対流の定常流からカオス流への遷移過程

と流れの内部構造の観察：研究代表者 大西 充

- 3) マランゴニ対流における時空間構造 (Marangoni UVP)：研究代表者 武田 靖

1995年11月の“科学技術基本法”の成立を受けて、1996年1月に「宇宙開発政策大綱」の第3次見直しが行われ、独創的な科学研究と技術開発の推進、経済的な宇宙活動の実現、宇宙環境保全を基本方針に謳い、宇宙環境利用活動の充実を重点活動に掲げ、JEMを“軌道上実験室”と位置づけた。また、1996年の宇宙開発委員会において、それまでは宇宙開発・利用に関する技術開発を主目的としてきたNASDAに、宇宙利用に関する研究組織を設置することが決められ、宇宙環境利用システム、宇宙環境利用研究センターが開設された。

流体分野においては、課題研究「マランゴニ対流現象モデル化研究」においてマランゴニ研究会が組織され、高プラントル流体のみならず中、低プラントル流体の液柱の挙動まで含む広範な課題に総合的に取り組む研究グループが形成された。宇宙実験の装置の必要条件の設定、地上実験や数値解析による検証、などを行ってJEMでの実験に備えた活動を継続した。

その後、微小重力科学関連の国内公募は実施されず、2000年に第1回JEM利用微小重力科学分野国際公募が実施され、国内からの応募テーマとして5件、海外テーマに参加する日本からの研究者のテーマ3件が選定され、その中にFPEFを利用するテーマとして下記の2件が含まれた。

- 4) 高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における液柱界面の動的変形効果の実験的評価 (Dynamic Surf)：研究代表者 鴨谷 康弘
- 5) Dynamics of suspended particles in periodic vortex flows (PAS)：研究代表者 H. Kuhlmann, 共同研究者 河村 洋, D. Schwabe, E. Meiburg

4)はマランゴニ研究会における提案であり、2013年にJEMでの実験が開始された。5)はJEMでの実験に先立ち、ESAプロジェクトとして実験用小型ロケットMUXUS6による宇宙実験が2004年に実施された。その後、本テーマの内容は1)で実施され、さらに、下記の6)においてもPAS形成メカニズム解明を目指す実験が計画されている。

2007年に「きぼう」船内実験室第2期利用に向けた候補テーマ募集が行われ、FPEFを利用するテーマとして下記が選定された。

- 6) 温度差表面張力流における不安定性の界面鋭敏性と制御 (JEREMI)：代表研究者 松本 聡

本テーマは、ESAの公募で候補テーマとして選定された内容と日本のマランゴニ対流研究者が、国際トピカルチーム (ITT, International Topical Team) を形成し、様々な議論を重ね研究内容を具体化し宇宙実験を提案した国際共同テーマである。

JEM の完成が大幅に遅れる間、研究者の所属変化等のため、研究体制の変更も避けられなかった。上記の 5 件の選定テーマのうち、2)は 1)と統合して“マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程 (Marangoni Exp./MEIS) (研究代表者 河村 洋) として実施することとなった。また、3) は研究代表者が継続不可能になったため、体制を変更し依田教授が代表者として引き継ぐこととなった。そのため、MEIS は MEIS-1～ MEIS-5 までの 5 フェーズに分割して、2008 年 8 月から 2013 年 2 月 25 日の間に実施された。また、河村洋教授が 2010 年 4 月から諏訪東京理科大学学長に就任したため、MEIS の研究代表者は横浜国大の西野耕一教授が引継いでいる。

MEIS によるマランゴニ対流研究の準備状況、及び MEIS-1, MEIS-2 の詳細および MEIS-3～5 の公表済みの成果は本レビューの 3 章および 4 章に詳しく述べられており、今後公表次第詳細な解説を加える予定である。また、現在も実験が進行中の Dynamic Surf および Marangoni UVP の研究成果に関しても、成果公表後にできるだけ速やかにレビューを追加掲載する予定である。その折には、関連の研究者を集めたワークショップの内容も含めて、宇宙環境下でのマランゴニ対流に関する総合レビューとして完成させたいと考えている。

1990 年代から宇宙関連研究の育成・推進のための支援プロジェクトが設置されたことにも触れておく必要がある。NEDO による微小重力環境利用の研究プロジェクト支援も多数実施され JAMIC の落下塔も盛んに利用された。一方、NASDA は国内の関連機関、大学、企業の研

究者による宇宙利用に関する共同研究活動の推進を目的とした「宇宙環境利用フロンティア共同研究」プロジェクト (1992～97 年) を実施し、大学などの研究者が微小重力環境利用に対する関心を高め、新規の研究テーマを生み出すことに貢献した。1997 年から 2006 年の間には、ISS 等で実施される宇宙実験に先立つ、地上での準備研究を支援する目的での「宇宙環境利用に関する地上研究公募」が実施され、宇宙実験を目指す産官学の研究者に対して短時間微小重力実験の機会提供、要素試作実験や新規アイデアの提案などに対する支援を通して、我が国の微小重力科学研究の展開と裾野の拡大に大きく寄与した。しかし、これらのプロジェクトの規模は、ISS 利用科学への予算配分が厳しくなるとともに縮小し、研究者の減少も引き起こしており、将来の我が国の微小重力科学研究の研究活動の低迷化が危惧されるに至っている。

また、我が国の大学の抱える構造上の課題である「大学院博士課程の学生数が少なく、ポスドクの数も少ない」ことが、このような長期的な大規模な実験研究を効率的に進展する上で大きな障害となっていると強く感じる。

しかしながら、ISS「きぼう」で継続的に実施されている一連のマランゴニ対流実験は、流れの駆動力が局在化している流動現象のモデル流動として、特に流体力学の対流不安定性問題への多大なる貢献を果たす成果を挙げつつあることを今回のレビューを通じ実感できた。これから実施される宇宙実験においても、常に科学的な議論を重ね、最大限の成果を目指すことを強く要望したい。