

# 微小重力実験の思い出 — その細く長い道のり —



随 筆

岡野泰則\*

Memories of Microgravity experiments - A narrow and long road -

Key Words: Microgravity

先日テレビを見ていたところ、火星居住の話題が取り上げられており、何と火星居住100年後を描いたドラマまで放映されていた。ついにここまで来たか、という感慨を覚えた。私自身も長く、そして細く宇宙実験に関わってきた一人であり、ここではその思い出を、自身の忘備録も兼ねて記してみたいと思う。少々専門的な話も含まれるが、ご容赦いただきたい。

私たちより前の世代にとって、宇宙といえば火星にはタコのような形状の生物がいて、今にも地球に攻め込んでくるのではないか、という印象が強かったように思う。一方、私たちの世代では、月や宇宙は次第に現実的なものとして捉えられるようになってきた。私が初めて「現実の宇宙」を意識したのは、エンジニアであった父が、ある日「今日はペンシルロケットの糸川先生とお会いした」と話してくれたときである。当時小学生であった私はその意味をよく理解していなかったが、アポロが月に着陸する映像を父と夜中に白黒テレビで見た際には、「自分が大人になる頃には宇宙に行けるようになるのだろうか？」などと思ったことを今でも覚えている。しかしその後の受験や、高校・大学での怠惰ではあるが楽しい日々を追われ、宇宙と真剣に向き合うことはなかった。

## 微小重力実験前夜(長い前置き)

大学4年で研究室に配属され、卒業研究ではマランゴニ対流に取り組んだ。これは表面張力勾配によって誘起される現象で、化学工学における抽出操作などにおいて重要な役割を果たす。しかし実験結果が条件に大きく左右されるため、まずは理論計算から始めることにした。修士課程に進学した頃から大学でも容易にコンピュータが使えるようになり、従来の理論では踏み込めなかった領域に挑戦できるようになったことで、研究の楽しさを知ることとなった。研究を続けたいと考え、指導教授であった平田先生に博士課程への進学希望をお伝えしたところ、大変喜んでくださった。同時に、博士修了後の進路を考えるなら、単なる現象解明にとどまらず、マランゴニの「活用」に踏み込んだ攻めのテーマが必要であるのご助言をいただいた。また、「修士論文のテーマは博士論文のテーマ探した。これまで化学工学で誰も手を付けていないマランゴニ関連のテーマを探しなさい」と言われた。

インターネットのない時代であり、文献調査はケミカル・アブストラクツ (Chemical Abstracts<sup>1)</sup>) に頼るほかなかった。毎日午前中は図書館に通い、最新号から過去へと膨大な文献を遡る作業を続けていた。そんな中、同期のO君が「こんな論文があるぞ」と教えてくれたのが、富山大学の小林先生による、FZ (Floating Zone) 法内でのマランゴニ対流に関する数値解析論文<sup>2)</sup>であった。これは、まさに私のその後の人生を決定づける論文であった。

この論文は応用物理分野の雑誌に掲載されており、化学工学や化学分野の論文誌しか探していなかった私には、自力では見つけれなかったものである。O君には今でも感謝している。情報が限られていた当時は、テーマとの出会いが偶然に左右される面も大きかったが、情報過多の現代であったなら、この



\* Yasunori OKANO

1960年2月生まれ  
早稲田大学大学院 理工学研究科 応用科学  
専攻博士後期課程 (1989年)  
現在、大阪大学名誉教授 工学博士  
E-mail: okano.yasunori.es@osaka-u.ac.jp

テーマに飛びついたかどうかは分からない。いずれにせよ、日本の化学工学分野では誰も手を付けていないことが確認でき、平田先生に報告したところ「ぜひやってみなさい」と背中を押していただいた。

しかし、周囲にはほとんど情報がなく、どこから手を付ければよいのか分からない旨相談したところ、平田先生はすぐに小林先生へ手紙を書きくださり、驚くことに、小林先生が早稲田までお越しくださることになった。小林先生は当時、米国から帰国されたばかりの若手の第一線の研究者であり、結晶成長分野における数値解析の草分け的存在であった。数多くの国際会議で若くして招待講演を務めておられ、その姿はとにかく格好良く、「自分も将来このようになりたい」と強く感じたことを今でも覚えている。

小林先生は、同じ分野に関心を持つ後輩である私を温かく励ましてくださり、多くの研究者を紹介してくださった。それをきっかけに、一気に情報が集まるようになり、多くの研究者の方々と知り合うことができた。その中で得た重要な知見は、今後の半導体結晶作製の主流は、小林先生の論文に示されたFZ法ではなく、CZ(引き上げ)法であるということであった。

ちょうどその頃、後に私が助手として採用されることになる東北大学金属材料研究所において、装置の共同利用制度の一環として、CZ融液表面の観察実験が採択された。融液表面に現れる網状の複雑な流れを目の当たりにし、これは完全にマランゴニ対流によるものだと確信した。小林先生と同じテーマに取り組んでも到底かなわないと感じていた私は、「これだ」と直感し、当時この分野で著名であった企業や研究機関の研究者の方々に、CZ法におけるマランゴニ対流の重要性について話を聞いていただいた。

しかし、私の期待とは裏腹に反応は冷やかで、否定的な意見が大半を占めていた。一方で、微小重力環境を扱う研究者の方々からは一定の関心を示していただいた。というのも、地上では支配的な自然対流が、微小重力環境下では抑制され、マランゴニ対流が顕在化することが、アポロ計画を利用したMITの実験によってすでに明らかにされていたからである。しかしながら、残念なことに(あるいは、むしろ幸運なことに)、私は学位を無事取得して早稲田を離れることとなり、微小重力を用いたマラン

ゴニの研究は後輩たちへと引き継がれていった。

## 細く長い道のり

その後、母校では後輩たちの尽力により、落下塔実験などを実施するための予算が獲得され、研究は順調な進展を見せていた。一方、その頃の私は職場が変わり、次第に微小重力研究から遠ざかっていった。そんなある日、平田先生から連絡をいただき、「今度、名古屋で航空機実験を行うので、君も搭乗してみないか」とお誘いを受けた。

当時はまだ中部国際空港(セントレア)は存在せず、自衛隊小牧基地に隣接する施設で航空機実験が実施されていた。パイロットは元戦闘機乗りの熟練者で、急上昇後にエンジンを絞り、機体を自由落下させることで、約10秒間の微小重力状態を得るというものであった。微小重力の質は決して高いものではなかったが、落下塔実験に比べて長時間の微小重力を得られる点が魅力であった。

私を含む搭乗実験者の操作内容は、体をシートにしっかりと固定された状態で、微小重力状態に移行した後、指先をわずかに動かしてスイッチを入れるという極めて単純な操作を、数回繰り返すというものであった。実験は二日間にわたって行われ、私は二日目から合流したのだが、初日に搭乗した後輩から「一回目はきっと失敗するよ」と言われた。

これほど簡単な操作を失敗するはずがないと思っていたが、その予言は的中した。上昇時の過重力は日常では経験したことのないほど強烈で、まったく身動きが取れず、微小重力に転じた瞬間に体がふっと軽くなったものの、頭で意識した動作を体に伝えることができなかったのである。しかし、二回目以降は問題なく操作できるようになった。

このフライトには遊び心もあり、密閉した金魚鉢に数匹の金魚を入れた実験も行われていた。後で映像を確認すると、上昇時には金魚は鉢の底に沈み、微小重力状態になると、上部にあった空気が大きな気泡となって内部に潜り込み、それに伴って金魚も上下の感覚を失い、まるでパニック状態に陥っているようであった。しかし実験回数を重ねるにつれ次第に慣れ、最後には逆さまの状態でも何事もなかったかのように、優雅に泳ぐ姿を見せていた。この様子は、私自身が体験した感覚とも重なり、生物というものは環境の変化に対して驚くほど順応するもの

なのだと強く実感した。

ちょうどその頃、化学工学会ではマランゴニ対流で著名な先生が、CZ法におけるマランゴニ対流に関する研究を発表されていた。その発表の共同研究者の中に、かつて私の提案を全否定した研究者の名前を見つけ、研究の世界の複雑さをあらためて感じ、何とも言えない気持ちになった。

このほかにも、私はいくつかの宇宙関連会議に参加させていただいた。当時、特に印象に残っている話題の一つが、宇宙空間での魚類養殖である。ある大学の先生が、あまり一般には知られていない種類の鯛を、微小重力環境で養殖するという研究を進めておられた。なぜその魚を選んだのかと質問したところ、意外にも返ってきた答えは「美味しいからだよ」というものであった。「宇宙で食べるのだから、美味しくなければ意味がないでしょう」と続けられ、私は初めて「宇宙居住」という概念を具体的に意識させられた。

私自身、宇宙利用というと科学技術の発展という視点から捉えがちであったが、以前出席した宇宙居住に関する会議では、科学者だけでなく、芸術家、心理学者、社会学者など、実に多様な分野の参加者が集っており、大きな衝撃を受けたことを覚えている。

また、化学工学会において宇宙飛行士の古川聡氏をお招きして講演いただいた際の質疑応答も強く印象に残っている。学会の重鎮の先生から、「宇宙に行く目的は何ですか。技術の構築には適していないように感じますが」という質問が投げかけられた。それに対し古川氏は、「人類が本来持っている冒険心という本能です」と即座に答えられ、その言葉が深く心に残った。

航空機実験の後、私は静岡大学に異動することとなり、電子工学研究所の熊川先生、早川先生から宇宙実験へのお誘いをいただいた。先生方は化合物半導体混晶研究の第一人者であり、すでに宇宙実験の提案が採択され、実施に向けた準備が進められている段階であった。私自身は実験装置を有していなかったため、数値解析による協力という形で研究に参画することになった。

この間、中国で回収ロケットやアメリカのスペースシャトルを用いた実験が行われ、私も中国を訪れる機会を得た。当時の中国は現在とは全く異なり、

とても衝撃的であった。また、国際微小重力実験プロジェクトを通じて知り合ったカナダ・ヴィクトリア大学のDost教授の研究室に、在外研究員として滞在する機会も得た。Dost教授とはその後、生涯にわたるお付き合いとなった。

実際に宇宙実験に関わってみて痛感したのは、とにかく時間がかかり、制約が非常に多いということであった。安全面への配慮は言うまでもなく、莫大な費用が投じられている以上、操作上のミスは許されず、そのためには膨大な予備実験や事前検討が必要となる。

しかし、それら一つ一つの作業は極めて地味で、必ずしもアカデミックな成果に直結するものではなかった。大学で実際にこれらを担うのは研究室の学生諸氏であり、卒業論文や修士論文の一部として進めなければならず、指導教員である私自身も成果を論文にする必要があった。この点が、常に最大の懸念事項であった。

さらに、実験実施のスケジュールには多くの不確定要素が含まれていた。リーマン・ショックの際には、「これほど多くの国民が苦しんでいる中で、今、宇宙実験を実施する積極的な理由はあるのか」といった問いが投げかけられた。研究者はつい自分の研究の重要性を強調しがちであるが、研究や教育もまた、社会の一部として優先順位の中に位置付けられるべきものであることを、あらためて認識させられた。

その後、東日本大震災が発生した。実験の社会的意義が厳しく問われたのはもちろんのこと、つくばにある管制施設が被災し、その復旧に長い時間を要したため、実験の実施は大幅に遅れることとなった。その際に担当していた学生の論文執筆は、まさに綱渡りの状態であり、本人はもとより、指導教員である私自身も大変な苦勞を強いられた。

一方で、その期間を数値解析技術の深化に充てることができ、その後の実験への応用という観点から振り返れば、必ずしも悪い時間ではなかったとも感じている。

こうした一連の経験を経て、国際宇宙ステーション(ISS)を用いた実験が採択された。これは極めて光栄な出来事であると同時に、二度と巡ってこないかもしれない貴重な機会であり、関係者一同が歓喜した瞬間であった。

しかし、実施に向けては、それまで以上に多くの課題を克服する必要があった。とりわけ、使用可能な実験装置が限られている点は、私たちがこれまで進めてきた研究の進め方とは、ある意味で正反対であった。通常は「このような実験を行いたい」という目的が先にあり、それに適した装置やシステムを開発するという流れが一般的である。しかし宇宙ステーションでは、設置場所や操作条件に大きな制約があり、しかも目的の異なる多数の実験が共通の装置を使用しなければならない。

その一方で、地上では実現できない長時間の微小重力実験が可能である点は、非常に大きな魅力であった。2007年に実験計画を申請し、2008年に採択、当初の実施予定は2011年頃であった。しかし前述の震災の影響に加え、実験設備の不具合、さらには私自身が静岡大学から大阪大学へ異動するなど、個人的状況や社会情勢の変化が重なった。その中で、科学技術としての「鮮度」をいかに保つかという葛藤を抱えながら、最終的に2013年、ようやく実験結果の回収に成功した。

回収されたサンプルとの再会は、実に感動的なものであった。そこから得られた知見は、いくつかの論文としてまとめ、公表した<sup>3)</sup>。しかし、論文として表に出ることのない地道なデータの取得・蓄積に尽力してくれた学生諸氏の存在があってこそ、これらの成果が得られたものであり、ここに深く感謝の意を表したい。

さらに、2007年当時には想像もしていなかったAI技術などがその後急速に発展し、申請時には予期し得なかった解析や結果を得ることもできた。実験サンプル回収後も、本テーマに関連する研究を通じて、複数の博士が誕生したことは、大きな喜びであった。

## 実験を終えて

回収サンプルから得られた知見を地上の産業へと還元することが重要であり、それを目指して地上実験を計画していた最中に、世界は新型コロナウイルス感染症の流行に見舞われた。その間、数値解析<sup>4)</sup>によって研究を継続し、地上で良質な結晶を作製するための条件検討を進めた。

コロナ禍収束後には地上実験を再開する予定であったが、状況は大きく変化していた。NASAの火星

居住計画の進展に伴い、日本における宇宙環境利用も、科学技術に関する基礎研究から居住技術へと大きく舵を切り始めていた。さらにJAXA特有の事情も重なり、地上実験の実施は断念せざるを得なかった。

本プロジェクトのPIであった早川先生は数年前に定年退職され、私自身も2025年3月をもって定年退職した。マランゴニ対流を研究したいという思いから始めた微小重力(宇宙)実験は、最終的には「いかにマランゴニ対流を発生させず、純粋な無対流状態を実現するか」という部分で活用されることとなった。

あらためて「微小重力実験を研究人生の中心に据えてきたか?」と問われれば、私の場合、前述のとおり、論文を継続的に発表し続ける必要のある立場上、必ずしもそうであったとは言えない。そんな私を見限らず、仲間として常に暖かく迎え入れて下さった先生方に感謝したい。おかげで細い道を一步一步、粛々と歩んで来ることができた。そんな中、本分野に携わらなければ決してお会いすることのできなかった多くの方々と出会えたことは、何よりの喜びであった。宇宙飛行士の毛利衛氏や古川聡氏と直接お話しする機会を得ただけでなく、学生たちも両氏と直接言葉を交わす貴重な経験を得た。ある博士課程の学生は、NASAの現役宇宙飛行士と電子メールでやり取りを交わすまでに至った。

現在は、宇宙居住に関する研究が活発に進められており、水や空気を含むあらゆる物質の循環および再利用が極めて重要な課題となっている。これらの技術においては、私が長年にわたり携わってきた化学工学の知見が大いに寄与しており、今後ますますその重要性は高まると予測される。若い方々が本分野に興味を持ち、乗り出していただけることを期待する。

最後に、通常では経験することのできない貴重な機会を与えてくださった静岡大学の早川先生、ならびにJAXAの稲富先生に、心より感謝申し上げます。また、本プロジェクトに関わってくださった静岡大学および大阪大学の学生諸氏に、この場を借りて深く御礼申し上げます。最後になりますが、本稿執筆をお勧めくださった大阪大学大学院基礎工学研究科の平井先生に、厚く御礼申し上げます。

(追)本稿をほぼ書き終えた年初、Dost教授の突然の訃報が届いた。長年の共同研究者であり友人でもあったDost教授に対し、深い感謝の意を表するとともに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。

#### 引用文献

- 1) [https://www.jaici.or.jp/cas-scifinder-discovery-platform/column/column\\_003/](https://www.jaici.or.jp/cas-scifinder-discovery-platform/column/column_003/)
- 2) N. Kobayashi and W. R.. Wilcox, *J. Cryst. Growth*, **59** (1982) 616.
- 3) Y. Inatomi et al., *npj Microgravity*, **1** (2015) 15011.
- 4) R. Ghritli et al., *J. Cryst. Growth*, **573** (2021) 126280.

