

〔回顧録〕

## 私の流体研究の追跡 — 1986年から遡る

東京農工大学 工学部 (名誉教授)

高木 隆 司

## Pursuit of My Fluid Studies Going Back from the Year 1986

Ryuji Takaki, Tokyo University of Agriculture and Engineering (emeritus professor)

E-mail: jr.takaki@iris.ocn.ne.jp

## 1 はじめに

私にとって、日本流体力学会に関する思い出のなかで最も鮮やかに残っているのは、1986年に東京で開催された第3回アジア流体力学会議である。そこで、私の回想はそれから始め、過去に遡ることにしたい。なお、登場する人名には当時の所属をなるべくつけ、同年輩には「君」、目上の人には「先生」の敬称をつける。それ以外の敬語はなるべく使わないことにする。

## 2 第3回アジア流体力学会議

この国際会議は、アジア流体力学委員会の会長であった宇宙航空研究所の佐藤 浩先生のもとで、岐阜大学の松井辰弥先生を実施委員長として開催された。私は、幹事長として下働きをする役目を仰せつかった。国際会議に参加したことはそれ以前にもあったが、その準備に関わったことがなかったので、いきなり下働きのトップに立たされて強いプレッシャーを感じたことを覚えている。しかし、幹事のグループには、九州大学の神部 勉君、京都大学の久保昇三君、航空技術研究所の伊藤信毅君や高木正平君を含む有能な面々がいて、私は十分助けられた。

私にとって最もきつかった仕事は、万博記念財団に会議のための資金援助を申請するときの事務的作業であった。とにかく、役人に馬鹿にされないようにきちんと書類をそろえ、文章もかなり気をつけて書いた。幸い、300万円程度の援助をもらうことができた(記録を残していないので正確な金額は忘れた。この程度だったと思う)。会議が終わっても、事後の報告書を出す義務があり、これも厳しくチェックされるそうなので、やはり緊張した。松井辰弥先生が報告書を万博記念財団に提出したとき、よくできていて褒められたとのこと。私はそれを聞いて

安心するとともに、疲れがどっと出たのであった。

もう一つ緊張した仕事は、中国から大勢の参加があり、他国も含めて30名くらいの入国許可の書類を作成して外務省に届けたことであつた。その中には、第2回アジア流体力学会議(北京)の実施委員長、中国科学院副院長の周培源先生もいて、実は彼が偉い人だということを後で知った。バンケットの時、ビザ取得について先生から礼を言われ、大変恐縮したことを覚えている。

バンケットで乾杯をした木製マスを、今でも持っている。それには、周培源、佐藤 浩、巽 友正、松井辰弥、R. ナラシムハ(インド、バンガロールの国立航空宇宙研究所)の署名が残っている。ナラシムハ先生の署名はサンスクリット文字のようだが、残念ながらそこに酒がかかっていたにじんでしまった。

この会議で私も講演をしたはずであるが、どんなテーマの発表をしたか、まったく記憶がない。会議の運営の方に神経を使いすぎたために、自分の講演のことは記憶の隅から弾き飛ばされたのであろう。

今思えば、この時期は、日本流体力学会が盛り上がっていたと思う。1986年には英文誌 *Fluid Dynamics Research* が創刊され、翌年の1987年には本学会編として東京工業大学の日野幹雄先生監修の「流体力学ハンドブック」が出版されている。

ただし、その後に流体力学が衰退したというわけではない。数値流体力学、可視化流体力学、気象や宇宙分野への進出、物理学の物性基礎論分野との連携など、研究分野が広がり大きな進展があつたが、一体感は希薄になったという意味である。

## 3 海外留学に向けて

私は、海外渡航については奥手であり、1978年(当時

37歳)が初めてである。その少し前から、流体の実験をしていた宇宙航空研究所の大島耕一先生や佐藤 浩先生のゼミに時々顔を出していた。大島先生のゼミには、当時在日していたアメリカのジョンズ・ホプキンス大学 L. コヴァスナイ先生も参加していて、英語で議論する練習ができた。

私が東京大学物理学科の今井 功先生のもとで提出した博士論文は理論流体力学であったが、その後就職した職場(東京農工大学工学部、一般教育担当)では、何かの実験を行うよう要請されていた。そのためか、流れに関わる実験にも魅力を感じたし、同じ現象に対して異なる視点をもつことも有益だと思ったのである。それを察してか、実験方面の先生方も、ゼミへの参加を歓迎してくれた。当時、調布の航空技術研究所所属の谷 一郎先生を訪ねたときは、深大寺の蕎麦屋で昼食をご馳走してくれて感激したものである。ただし、実験関係の研究室に出入りはしても、理論について話題を提供せよという依頼はなかった。理論研究にあまり期待しなかったのかもしれない。

そのころ、Cal-Tech のロシュコらによる混合層内の渦列の実験が、「乱流の秩序構造」という名前でもはやされていた。コヴァスナイ先生にけしかけられて、その挙動を理論的に解析することを始め、これは、幸いにもコヴァスナイとの共著で *Physics of Fluids* に掲載された。この縁で1978年の5月初めから7月末まで、アメリカ、ボルチモア市に滞在し、ジョンズ・ホプキンス大学に顔を出すことになった。

その際の渡航費と滞在費は、実はアメリカの国防省から出ていた。その経緯は、5月初旬に国防省主催の乱流の制御に関する国際会議が開かれるのに合わせて、私がそこで講演をし、しばらくアメリカに滞在できるようコヴァスナイ先生が取り計らってくれたということである。国際会議での講演は初めての経験であり、かなり緊張したので、その後はのんびりと滞在することにした。コヴァスナイ先生もそれを察して遊びに付き合ってくれた。彼は、こんなときしばしば色っぽい冗談を言う人であった。ただし、遊んでばかりでは申し訳ないので、一つ理論解析を始めた(これは後に論文にしている)。

帰国後に真剣に海外留学を考え始め、フンボルト財団の奨学生の申請をすることにした。ドイツの研究者にコネがあると有利だと聞き、コヴァスナイ先生に相談したところ、ベルリン工科大学の教授で数人のスタッフと実験室を運営している H. フィードラー先生を紹介してくれた。そこでは、混合層や噴流で発生する渦の挙動を実験

的に研究しており、私も興味をもったので、心理的な抵抗がなく応募することができた。幸い、2年間の奨学金を受けることになった(なお、1年後に再審査があった)。

ドイツには、1979年2月から1981年1月まで滞在した。当時のベルリンは東ドイツ内にあり、陸の孤島であった。ただし、私がそこで体験したことを述べていくと切りがないので、それは別の機会にゆずりたい。なお、ベルリンに滞在中に、コヴァスナイ先生の訃報を聞いた。そのとき彼は60歳くらいでまだ若かったし、それまで大変お世話になっていたので非常に残念な気持であった。しかし、彼のような美食家で運動嫌いには、避けられない運命かもしれない。

帰国後に、日本物理学会1981年秋の分科会で招待講演を依頼され、「乱流の秩序構造」という表題の講演をおこなった。このときは、流体力学にかぎらず、物性物理学、プラズマ物理学など、多くの分野の聴講者に来てもらった。それは、1977年にノーベル化学賞を受賞した I. プリゴジンの影響で、熱力学の第2法則が支配する系でも巨視的な構造が現れる、いわゆる「散逸構造」と命名された現象が多く科学者を魅了していたからであろう。「乱流の秩序構造」という言葉は、それと似ているという印象を与えたと思う。

ところで、私自身、乱流という概念を現在でもしっかりと把握しているわけではない。なぜそこに秩序構造が現れるのかという難しい問題もある。その前に、「秩序構造」という用語をしばしば使いながら、それをはっきりと定義するのが難しい。「散逸構造」と同じか、どこが違うのかということもはっきりしない。

京都大学の巽 友正先生とは以前から親しかったので、このような問題で教えを乞いたいと願っていたが、その前に自分の考えをまとめなければならないと思いながら今日まで至ってしまった。

帰国後まもなく、「形の科学」の構築という動きが日本で現れた。そのきっかけは、空間に多数の要素を充填したときの幾何学的な特徴を把握したいという希望が、医学(細胞の充填)や土木工学(粉や砂利の充填)などの分野で高まったことであった。海外では、それ以前からこの動きが出ていたが、日本では、その国民性のためか「形の科学」として一般化しようという思いがあったと思う。私もこの動きに興味をもち、1985年の「形の科学会」創設時から関与した。そのために、私の活動の半分はその方に向けることになり、日本流体力学会への貢献は従来の半分になった。これについては、いまでも申し訳ないという気持ちをもっている。しかしながら、異な

る学問分野も底辺のどこかでつながっていると考え、悩まないことにしている。

#### 4 血液のレオロジー研究グループ

1974～1976年の期間で、東京都立大学の岡 小天先生を代表者とする科研費特定研究「血液循環のレオロジー」が採択され、私も分担者としてそれに加わった。ほかに、慶応大学日吉の松信八十男先生や、医学、熱工学などの研究者も参加していた。

私がこれに関係しておこなった研究は、凝集しやすい粒子（赤血球を想定している）が分散している流体の挙動であった。まず手始めにおこなったことは、血流を実験室で観察することであった。当時の勤務先（東京農工大学）には付属の牧場があり、そこで牛の血液を1リットルくらいもらうことができた。恒温室という狭い閉鎖空間でこの血液をつかって流れの基礎的な特性を調べているうちに、自分がドラキュラになったような錯覚をもち、突然気分が悪くなった。そこで、やむなく実験を中断した。こんな経験は、後にも先にもこの時だけである。

そこで、血液と同じように凝集する可能性をもつ液体として、合成ゴムの原料であるラテックス分散液を使うことにした。これだと腐敗しないので、実験がやりやすい。幸い、同僚の近久芳昭先生の実験分野が高分子物理学で、その関係で近所のブリジストン株式会社の基礎研究所でラテックス分散液をもらうことができた。これは、直径約0.3  $\mu\text{m}$ の球形粒子が、弱アルカリ性溶液に分散しているもので、酸性にするとすぐ凝固する。

このラテックス分散液を顕微鏡のスライドガラスに1滴置き、その上にカバーガラスをのせて軽くおさえると、分散液は広がって円形の薄い液体層になる。その中に、しばしば小さな泡が入り込んでいる。この分散系は空気に触れた部分が徐々に凝固するので、この液体層の側面は凝固して固体境界になり、泡の部分は内部に置かれた固体円柱になる。そこで、カバーガラスの上面を軽くつつくと、カバーガラスがわずかに変形し、それに応じて液体層内の流れが生じる（いわゆるヘレシヨウ流である）。しかも、泡の周囲は、ヘレシヨウ流中に置かれた円柱のまわりの流れになっている。顕微鏡の視野内で粒子が移動するのを、しばらく見惚れていた。

そのうちに、粒子がバラバラに動くのではなく、集団を形成して運動していることに気がついた。凝固はしていないはずなので、壊れやすい凝集体を作りながら流れていたのだろう。さらに、泡による固体壁の後流側に、

粒子を含まない三角形の領域ができ、粒子の凝集体がその両側を流れ去っているのが見えた。仮に、凝集体の中心点がヘレシヨウ流で予測される流線に沿って移動するならば、この三角形領域ができるはず。そのサイズから凝集体のサイズがわかるのではないかと考えた。

この流れを8 mm フィルムのカメラで動画にしたものを、当時訪日していた（1982年頃か?）ケンブリッジ大学のJ. ライトヒル先生に見せたところ、大変興味をもったようだった。数日後、彼を日本に招いていた日本大学のある先生から連絡があり、ライトヒル先生が私に渡したいものがあるとのこと。そこで日本大学に行き、京都から帰ったばかりの先生から2, 3ページの手書きメモを受け取った。なんとそれは、ヘレシヨウ流の中に置かれた円柱のまわりの流れを、理論的に求めたものだった。京都に向かう新幹線車内で解析計算をしたとのこと。しかも、著作権を主張せず、その結果を私にそっくりくれたのである！ そのとき私は、大変感謝するとともに仕事の早さに驚き、さらに「カッコいい！」と思った。自分も、こんなことを一回はしたいと思ったものである。

後に、この実験結果を、密に詰まった粒子を含む流れから凝集体のサイズを推定する方法として *Biorheology* という雑誌に公表し、彼の解析結果は *private communication* として取り入れた。

かなり後になって（2011年頃）、ライトヒル先生と類似のことを1回だけやった。それは、横浜国立大学の渡邊慎介君（物理学、専門はソリトンの解析など）の学生であった大塚一路君が突然私を訪ねてきて、博士論文のテーマについて相談を受けたことが始まりであった。そのとき、同じ向きに回転する2本の平行な渦糸が、1回だけ局所的に絡まって、その場所がソリトンのように移動する現象の解析を勧めた。

実は、この現象の解析結果は、1983年に北京で開催された第2回アジア流体力学会議で発表していたが、会議のプロシーディング原稿には含まれていない。なぜなら、その解析はプロシーディング原稿の締め切り（6か月前）より後に始め、講演内容に追加したからである。したがって、形式上は未公表であった。そこで、その結果を彼に渡し、これを発展させたらどうかと勧めたのである。彼は、渦糸が複数回からまる場合もふくめて見事にその仕事をこなし、博士論文を完成させた（後に、大塚、高木、渡辺の共著で2003年 *Physics of Fluids* に掲載された）。これは私の自慢話なのでいままで控えていたが、本稿が回想録であることから、あえてここで公表する。

## 5 流体力学への転向 - 私の原風景

私が今井 功先生の研究室に入ったのは、博士課程からである。修士課程では、東京大学物理学科の素粒子研究室で宮沢弘成先生の指導を受けた。素粒子の相互作用の解析に複素解析関数の手法を導入するという、当時流行した方法を応用して、とにかく修士論文を書き上げ修士号を取得した。しかし、「素粒子のことがわかった」という実感がもてなかった。

どうも私は、視覚情報によってものごとを理解する人間のように、形をもたないもの、あるいは点と見なされるものの本質は直感的に把握できないのである。その意味では、流体现象はわかりやすいし（解析は容易ではないが、何が起きているのかはわかる）、前述の形の科学に傾倒したのもそのためである。同じような経歴をもつ友人に、東京電機大学の福湯章夫君がいた。彼も、東京大学駒場の素粒子研究室から流体力学へ転向している。素粒子論に不満をもっていたようだが、詳しい話は聞いていない（冥界に行ったので確かめようもない）。

話が飛躍するが、私は1940年に広島市で生まれ、終戦時は、市内から10 km くらい離れた熊野町に疎開していた。原子爆弾が上空200 mの高さで爆発したとき、熊野町でも大きな音がして、民家の窓ガラスが割れたという噂もあった。しかし、不思議なことに私には音の記憶がない。その代り、広島市との間の山の上にはしばらく留まっていた原爆の丸い雲を鮮やかに記憶している。実はこの「山の上の雲」が私にとっての原風景なのである。それ以前のはっきりしたイメージ記憶がないからである。

古いイメージ記憶は後に無意識に作り上げられる場合がある、ということを知ったことがある。そこで、いまから10年以上前に、熊野町を訪ねてそのことを確認しようとした。私の記憶では、熊野町には白い土の道の両側に田畑が広がり、ため池があり、ワラ屋根の民家が散在していた。ところが、現在の熊野町は広島市の通勤圏内であり、ビルが立ち並んでいて、当たり前のことかもしれないがその変わりように非常に驚いた。元の居場所もしばらくは見つからなかったが、近くにあった墓場がすぐ見つかり、そこから逆にたどって元の居場所を確認することができた。その場所から広島市の方向を見ると、私の記憶に近い形の山が確かにある。そこで、私の「山の上の雲」は正しい記憶であると結論することにした。

この雲は、爆発の際に放出された熱のために急激な上昇気流が発生し、それによって形成された一種の渦輪である。その中心部には上向きの流れがあり、全体が上方

に移動していたはずである。しかし、記憶の中の雲は、静止していて動きがない。古い記憶からは、動きが除去されるのだろうか？

この雲の映像を、アメリカのスミソニアン博物館で見たとある（たぶん、1995年）。原爆に関する展示をアメリカでおこなう企画があり、アメリカ国民、特に退役軍人の組織が反対したために当初の企画を縮小して実施された。私はその時期にたまたまアメリカの東海岸を旅行していたので、この展示を見ることができた。縮小された規模とはいえ、被爆後の風景や被爆患者の写真もあり、原爆の悲惨さはある程度表現されていたと思う。その中に、原爆を搭載していた戦闘機から撮影された映像もあった。自分が地上から見た雲が、手前に向かって立ち上ってくる雲の映像として示されているのを見て、強い衝撃を受けたものである。

## 6 あとがき

この回想録を、素粒子物理学から流体力学への転向、および私の原風景の紹介で締めくくった。それは、この原稿を書いているうちに、これら2つのできごとの間に共通点があることに気がついたからである。

第1に、原爆の雲は私が興味をもって研究した渦運動であること。第2に、原子核反応の後に流体现象が形成されたというプロセスが、素粒子から流体へという私の履歴と一致していることである。もちろん、これらは偶然の一致に過ぎないし、いままで考えたこともなかった。しかしながら、今はこの偶然の一致に、宿命のようなものをわずかながら感じているのである。

回想録を書く際には、過去のいろいろな記憶を同時に取り出して前に並べることになる。かけ離れた時期の出来事を突き合わせて関連づけることも、無意識にやってしまう。そのために、原風景がその後の人生に影響するという錯覚が生まれ、宿命というアイデアにはまっているのであろう。

それはさておいて、回想録の執筆は自分の過去を振り返る良い機会になった。その意味で、「ながれ」編集委員会には大変感謝している。今後も、「ながれ」がますます発展することを祈って筆をおくことにする。