

地球流体力学における理論・実験・自然

東京大学 海洋研究所 木村龍治 (Kimura Ryuji)

要旨

地球流体力学は、波動、対流、乱流などの中間概念の理論を基礎にして、自然界の流体现象を理解しようとする学問である。中間概念は、自然界ばかりでなく、実験室内の流体现象にも及ぶから、理論、実験、自然が三位一体となって地球流体力学の体系が形成される。

1. はじめに

私が地球流体力学に興味をもった 30 年前は、まだ、日本に「地球流体力学」という言葉が定着していなかった。Geophysical Fluid Dynamics(GFD)という英語を「地球物理流体力学」と訳すのがよいか「地球流体力学」と訳すのがよいか、迷った記憶がある。自然に「地球流体力学」という訳語が使われるようになったが、30 年程度の歴史しかない。そのためかどうか、自分の研究姿勢を決めるに当たって、GFD の理念をあれこれ考えてきた。個人的なことで恐縮であるが、地球流体力学研究集会を始めるに当たって、パーソナルな地球流体力学像を述べてみたい。

2. 学問の再編成

私は学部で地球物理学を専攻した。理学部に進学した 1963 年当時、東大の地球物理学教室は、物理学科の一部であった。すなわち、理学部物理学科は、物理コース、地球物理コース、天文コースに分かれていて、私は地球物理学コースに進学したのである。しかし、地球物理学を専攻するためには物理学が必要である、という当時の教育方針で、3 年生の講義はほとんど物理学科の学生と共通であった。そのため、量子力学や相対論など、よく理解できない科目に苦しめられた。4 年になって、初めて地球物理学の講義に接した。一学年は 14 名ほどで、大学院には 8 名が進学した。

その後、大学院の定員が増え、地球物理コースは物理学科から独立して、地球物理学科になった。理学部の中には、地球の自然を扱う学科として、地質学科、鉱物学科、地理学科が存在したが、それらと並列関係になったわけである。ところが、今年 4 月から、地球関連の 4 学科が合体して「地球惑星科学科」が設立されることになった。

この一連の学科再編成の変遷を見ると、学科の再編成が学問の理念に基づいて行われているのか疑問をもたざるを得ない。最初は、物理学の応用として地球を見る理念があった。そこでは、物理学の体系が学科をまとめる力であった。それが変質して、研究対象である地球が学科のまとめ役になってしまったのである。

確かに、研究対象はまとめ役になりやすい。気象学会にしろ、海洋学会であるにしろ、学会の多くは研究対象でまとまっている。私の勤めている海洋研究所では、物理学、化学、生物学、水産学が、「海洋」というキーワードで束ねられて組織を形成している。しかし、それぞれの分野の研究者のバックグラウンドは異なっている。海洋物理の土台に物理学の体系があるように、海洋生物研究の土台には生物学の体系があり、海洋化学研究の土台には化学の体系がある。現在、海洋研究所では、大学院に海洋学専攻を作ろうという発想があるが、それは、東大理学部における地球物理コースから地球惑星科学科への再編成と共通の問題を内包しているような気がする。

3. 研究者の興味と価値観

私が地球流体力学の道に踏み込んだのは、海洋物理学の吉田耕造先生のお陰である。吉田先生に出会わなければ、気象学の研究分野で一生を送ることになったと思う。ところが、吉田先生の勧めで別の人生をたどることになった。吉田先生は、米国のウズホール海洋研究所で地球流体力学セミナーという催しが、毎年、夏に開催されているから、参加してみてはどうか、といわれた。その勧めに従って応募したところ、運良く合格して、1973年に渡米した。私の最初の外国旅行であった。

このセミナーでは、流体力学の原理を中心に置いて、自然界の流動現象を説明しようという理念が支配していた。指導陣のスタッフの中心は応用数学者であった。数学を巧みに操って自然界の流動現象の理論的なモデルを作ることを面白がる人々である。その補助手段として、流体を使う実験も好まれていた。そこでは、理論、実験、自然が、同じ程度に研究者の興味の対象になっていたように思われた。

ウズホール (Woods Hole) は避暑地である。軽井沢を海岸にもってきたような雰囲気、立派な別荘が緑の中に点在していた。セミナーの指導陣は避暑を兼ねてセミナーに参加している様子で、いかにも楽しそうに議論の花を咲かせていた。

偶然の成りゆきで、それから10年後、20年後に、同じGFDセミナーに参加した。なんと73年と同じメンバーの指導陣が、歳はとっても精神は変わらず、桃源郷のように、10年度も20年後も楽しそうに議論していた。その様子を見てみると、GFDは、個人的な楽しみのためにあるように思えてくる。研究の中には、社会的貢献という使命感が推進力になっているものもあるが、GFDはそのような研究と異質であるような気がした。

このセミナーが縁で、英国ケンブリッジ大学の応用数学理論物理学科 (DAMTP) に約1年間滞在する機会があった。この学科の雰囲気も、やや、GFDセミナーのそれに似ていた。応用数学といいながら、地下に大きな実験室があり、大学院生が5、6人、学位論文をまとめるために流体実験を行っていた。工学部にあるような大規模な実験装置はないが、その実験から何か重要な発見が得られるに違いないという意欲に燃えて、実に熱心に実験をしているのが印象的であった。

翻って日本の大学や研究所を見ると、同じような興味で研究を行っているグループは少ないように思う。日本流体力学会と可視化情報学会を通して、多くの流体力学者と知り合いになったが、理学部の物理学科で行われている流体力学の興味と工学部で行われている流体力学の興味には大きな違いがあることを知った。

物理学の興味は、究極には物理法則を見つけることである。物理法則とは、自然を支配するという点で現実の自然と関わっている。しかし、一方で、物理法則に従ってはいるが、自然に実現していないものは限りなく存在可能である。例えば、雪の結晶の形で同じものは2つとない。ということは、これから降ってくるかも知れない雪の結晶の形は無限にある。物理学者が興味をもつのは、具体的な雪の結晶の形ではなく、そのような形を生む一般的な条件である。その意味で、既に降った雪の結晶と、これから降ってくる雪の結晶は、物理学者にとっては同等の価値をもっている。一方、地球など、わずか46億年前に発生して、あと100億年もたたないうちにこの世から完全に消滅してしまうわけだから、時間の長短を問題にしなければ、雪の結晶のひとつの形と同様のはかない存在なのである(そういえば、世の中を水に浮かぶ泡と比較した人もいた)。そのような具体的ではかない存在は、物理学者の興味を引かない。

一方、工学の興味は、(やや暴論かも知れないが) 自然にないものを作り出すことである。作り出す主体は人間であるから、工学の中心には人間がいる。作りだすものは具体的なものであるから、抽象的な一般論など、工学的には興味がない。機械工学の一般論は、あくまでも、具体的な機械を製作するための教育手段なのである。

それでは、地球科学者の興味はどこにあるのか。自然の作成した具体的な作品（地球）にこだわって、もっぱら、その仕組み（または歴史）を解明しようということである。研究対象が具体的であるという点で物理学の興味と異なり、地球は人工物でないという点で工学の興味と異なっている。

4. 理論・実験・自然

気象学者（海洋物理学者でも同じであるが）にとって、実際の地球と自転速度が2倍になった場合の地球では、意味が異なる。前者はこの世に実在する地球であり、後者は仮想的な地球である。気象学の目的は、実際の地球を調べることである。気象学者の中には、このような仮想的な気象を研究している人がいるかも知れないが、その目的は、実際の地球を理解するためである。仮想的な地球は、その道具としての意味しかない。気象学で流体を使った実験も行われているが、やはり気象研究の補助手段である。だから、数値実験の発達によって、水槽実験よりも現実の大気に近いモデルができるようになると、水槽実験は衰退する。

地理学や気候学では、観察で得られた知識が学問の中核を占めているので、仮想的な地球の入り込む余地がない。気象学では、物理法則に基づいて自然を理解しようとするものだから、（物理法則のもつ一般性の影響で）仮想的な問題も視野に入ってくる。しかし、気象学の目的は、実際の気象を物理的なモデルも用いて再構築することにあるので、モデルは実際の自然と似ている方がよい、という信念がある。

どんな気象現象でも回転する球面上で生じるわけだが、現象によっては、球面の効果が小さい場合もあるし、自転効果が重要でないこともある。しかし、気象学的な発想では、できるだけ自然と同じ状態の気象のモデルを構築しようとする。それで、気象学者に「球面よりも平面で扱ったほうが楽ではないか」と質問すると、「しかし、地球は球面でしょう」とか、「この問題では、 f はきかないのでは」と質問すると、「地球は自転しているでしょう」という答えが返ってくることもある。気象は小規模な現象から大規模な現象まで、すべて力学的に結びついているから、結局、GCMのように、すべての現象を再現するモデルを理想とするのである。これに対して、物理の問題では、定式化の方が具体的な計算より重要視される。具体的な結果は機械的な計算で求まるわけだから、頭よりは腕力の問題である、という意識があるからだろう。

定式化とは、ある現象のメカニズムを数式で表現することである。GFDの興味は、気象学と物理学の中間のようなもので、自然界の流体現象をより広い範囲の物理法則の中に位置付けることである。より広い範囲とは、流れの不安定、対流、渦、波動、乱流、カオスというような流体現象の概念のことである。頭の中に、これらの概念の一般的なイメージをインストールしておけば、そのイメージを拠り所にして自然現象が理解できたような気分になる。「分かった気分」とは脳の仕組みと関係があるだろう。計算機の場合は、基礎方程式と初期条件を与えれば、中間概念など関係なく大気現象を再現する（総合的な自然の再構築）。しかし、人間の場合は、基礎方程式と答の間に、中間概念（理論といってもよい）が必要なのである（要素還元的な自然の再構築）。その中間概念は十分一般性がある、かつ、その中に自然の再現を含んでいるようなものである。GFDは、まさに、基礎方程式（一般的な物理法則）と自然現象の間をつなぐ中間概念の構築の他ならない。中間概念から構成される理論のシステムは、脳のなかで、あたかも、コンピュータの中にインストールされた解析プログラムのような役割を演じる。観測データが与えられると、自然現象のイメージを頭の中で再現してみせるのである。

その中間概念は、自然現象を含むと同時に実験室で再現できるような現象も含むことが多い。そこで、流体実験が意味をもってくる。流体実験は、野外の自然にない現象を実現させるという意味で人工物である。新しい実験を工夫する作業は、自然にないものを自分の手で作り出す喜びがある。

一方、実験は理論と対極をなすものである。理論（数学）は人間の創造物であるが、実験は（人工的条件下での）自然の応答である。

実験のもつ二面性（自然と人工）は、理論の構築に大変役に立つ。野外の自然よりも単純で、しかもパラメーターを系統的に制御できるのであるから、扱い易い自然である。と同時に、基礎方程式のアナログ計算機のような道具の側面をもつ。例えば、線形近似の範囲でしか求まらない解があったとして、流体実験を行うと、容易に非線形の解の振る舞いに対する見通しが得られる。これに対し、数値実験は、道具としての機能はあるが、誰も計算結果が自然現象であるとは思わない。

5. おわりに

私は、文字を覚え始めた子供の頃、自分が覚えたことを、全部、紙にアウトプットしてみようと思ったことがある。そこで、ノートを一冊用意し、頭の中にあるすべての記憶を書き出そうと試みた。しかし、確かに覚えたはずの言葉がどうしても思い出せないで、この試みは、一週間もしないうちに挫折してしまった。そこで、発想を変えた。頭の中に入ったことが取り出せないのなら、逆に、頭の外にあるものをすべて頭の中に取り入れてみようと思ったのである。その作業は、半世紀たってもまだ続けているが、GFD は、その夢を、ある程度、かなえてくれたような気がする。