

地球流体力学 (GFD)*

林 祥 介**

1. GFDの生まれ

大気や海洋に見られる流れの特徴が、回転や密度成層が働く系での流体運動の一般的な特性として同じ枠組の下に整理統合でき、従ってコップやタライ（回転水層）の中の流体運動にその特徴を見出すこともできるのである、というのが地球流体力学（GFD=Geophysical Fluid Dynamics）のステートメントである。自然現象を抽象単純化しそこに数学的な構造を発見しこれを体系化することにより、翻ってさまざまな現象を統一的に記述し理解することを可能にするという古き良き理論物理学の戦略を、地球や惑星や天体の流体現象に対して体现するものが地球流体力学である。

地球流体力学という枠組で考えよう、という機運が現れるのは1950年代後半であったようである¹⁾。その背景には、電子計算機の登場のもとに、数値天気予報や大循環モデルを実現しようとする人々の熱意と政府による投資とがあった²⁾。一方、流体の運動に対する理解は当時まだ極めて未熟であり、天気予報を可能にすることは、流体力学そのものを発展させ流れの構造に関する基本的な理解をすすめる（たとえば渦の生成を司る不安定論を作る）ことにほかならなかった。流体の運動構造を抽出理解するために、気象学や海洋学などの個別の知見を融合整理して、より単純で包括的な流体力学としての枠組を作る必要があった。この動きは、物理学の体系の上に自然認識を統合構築しようという20世紀科学の流れ（「物理帝国主義」）の自然な反映でもある¹⁾。

地球流体力学という枠組を形作っていったグループは、第二次大戦後台頭した米国にあって数値予報への流れを背景にした、ウッズホール海洋研究所（WHOI）とマサチューセッツ工科大学（MIT）を中心とする人々である。ストンメルやペロニスによって

WHOI-MIT 地球流体力学セミナーが企画され、1950年代には、チャーニー、フィリップス、ローレンツ、といった面々の参加を得て活発に活動が行われるようになった⁴⁾。同時にこれらの人々と歴史的に関係が深い流体力学の老舗、英国ケンブリッジ大学の応用数学および理論物理学（DAMTP）を中心とする人々も深く関与して行った。DAMTPの存在は特異である。その流体力学分野での成功の秘訣は、DAMTPが物理学の部局とも純粋数学の部局とも別に存在できたからだ、と聞いたことがある。伝統的流体力学が物性物理学に駆逐されずに済み、かつ、純粋数学に過度に「汚染」¹²⁾されずに済んだ。かと言って日本の応用数学や応用物理学の部局のように工学的でもない。流体実験（したがって流体の現象論）を軽んじなかったことも特色である。いずれにせよDAMTPは、流体力学の上に天気予報を構築するという動きの中で、その老舗の自然な流れとして、地球流体力学の諸概念を熟成、地球惑星科学・天文学諸分野に発信提供する場として機能した。

2. GFDの体系化

地球流体力学を流体力学の一分野として確立し、発展定着させしめ、これを布教した特筆すべき活動は、WHOI「夏の地球流体力学プログラム」⁶⁾である。このプログラムは1959年に始まり今日に至るまで続けられているもので、毎夏設定されるテーマは気象・海洋は言うにおよばず、気候や氷床、マントル・地球中心

* Geophysical fluid dynamics (GFD).

** Yoshi-Yuki HAYASHI, 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻。

© 2007 日本気象学会

¹⁾ 1955年にスマゴリンスキーを長にして米国気象局に設立された組織が、1963年、大循環研究所（The General Circulation Research Laboratory）から地球流体力学研究所（The Geophysical Fluid Dynamics Laboratory）にわざわざ改名されたことは、このような時代的雰囲気象徴している³⁾。

¹²⁾ たとえば、Arnoldによれば「流体力学は基礎数学の一分野」であるのだそうだ³⁾。ちなみに本稿ではヨーロッパ非英語圏は言うに及ばず旧ソ連圏での地球流体力学の展開に全く言及できていない。

核やダイナモ、天文までに及び、まさに、地球流体力学とは何であるのかを世に発信し続けてきた活動と言える。地球流体力学という枠組を形作ることと並ぶプログラムの大きな目的は、周辺諸分野から当該分野に人材を呼び込み、あるいは、人材を育成することである。プログラムは、東海岸の伝統の地であり別荘地でもあるケープコッドの先端にある WHOI 内の一角、Walsh Cottage と称される古い家を会場として、夏の10週間集うという潤沢なものである。滞在費を支給されるフェローと呼ばれる博士課程院生～PD クラスの奨学生8～10人に対して、その年のテーマに呼応した主任講師陣(1人～3人ぐらい)と(常連)研究者が付き、入れ替わり現れる客人(研究者)がセミナーのシャワーを浴びせる。最初の2週間は主任講師陣によるその年のテーマに即した集中講義が行われ、フェローはこれをノートにまとめる。のこりの8週間でフェローは、滞在研究者から適宜指導者を選んでちょっとした研究をまとめあげ夏の終りに発表を行う。プログラムが毎年発行する報告書=レクチャーノートとセミナーアブストラクト集は、当該領域の時々々の先端をまとめた貴重な資源となってきた。

「夏の地球流体力学プログラム」と日本の人々との結合は、海洋学の吉田耕造、天文学の海野和三郎らによるところが大きい。木村龍治は吉田から地球流体力学というものの存在を知り、吉田の紹介により1973年のフェロー¹³として参加したと言う。他にも、加藤正二 1963年、斎藤正徳 1975年、山形俊男 1976年、増田 章 1977年などの名前が70年代のフェローリストには見られる。このような潤沢なプログラムが今日においてもなお維持されていることは、予算の確保に費す時間のみならず、コアスタッフとなっている研究者が現場で過ごす時間を考えるに驚嘆に値するし、そのような時間を割いてでもこれを続けようとする情熱には頭がさがる¹⁴。

そのような活動を経て地球流体力学の大枠が整理体系化されたのは1970年代である。教科書で言えば、チャーニーの「惑星流体力学」⁷⁾が登場したのは1973年、地球流体力学という名を冠したペドロスキーの教科書⁸⁾が登場したのは1979年である。摂動展開を駆使した定式化による、地衡流、エクマン層、ロスビー波、西岸強化流、不安定などの一貫した解説が手に取りやすい形で提供されることとなった。大気海洋の力学をまとめて語ろうとした教科書にはさらにギル

(1982)⁹⁾があるが、これも地球流体力学としての体系化を行おうとした時代の雰囲気の上に生まれたのだろう。そして日本では木村(1983)¹⁰⁾へと続く。

筆者として残念なのは、地球流体力学の教科書は結局、大気海洋の力学を統合して語るところぐらいで終わってしまっているところである。WHOIの夏の地球流体力学プログラムが扱ってきた世界の全体を俯瞰するような真の地球流体力学の教科書は(たぶん)存在しない。

3. 日本での普及

70年代後半、地球流体力学の基本的な枠組が整備されて行ったのに伴い、日本でも地球流体力学という名称を冠した講義あるいはそのような枠組からなる講義が行われるようになった。たとえば、東大の地球物理学科(当時)では木村が海洋研助教授に着任した1977年、地球流体力学という題名を冠した授業が開始された。

日本において地球流体力学という枠組が普及したのは瓜生道也と木村によるところが大きいだろう。瓜生は、1970年代にロスビー波に伴う運動量をラグランジュ的視点から議論する先駆的な仕事を行ったが、そもそも1960年代に回転水層実験を楽しんだ地球流体力学の先駆者であり、数多くの後進が彼の地球流体力学的発想に刺激触発された。また、木村による数々の地球流体実験とその可視化は、世界の業界人を魅了するレベルにあったが、したがって当然周辺分野を含む国内の人々を引き付けるに十二分な役割を担った。

1980年代に入ると、木村や瓜生の周辺にあり WHOI 夏の地球流体力学プログラム経験者でもある、増田と山形の発案により、地球流体夏のセミナーが開催された(1980年7月久住高原)¹¹⁾。特定のテーマを設置し合宿型研究会を行うことによって、時間的制約に縛られること無くその問題に関する十分な討論を行うというのが趣旨であった。本家 WHOI 夏の地球流体力学プログラムの潤沢さとは比べるべくも無いが、とにかく地球流体力学をキーにして分野横断的な集まりが開かれるようになったのである。木村の尽力もあって地球流体夏のセミナーはその後も回を重ねられ、臨界層(第二回1981年大槌)、解の分岐と多重性(第三回1982年野辺山)、二次元乱流(第四回1983年新潟塩沢町)、波動と渦(第五回1984年京都)、対流(第六回1985年阿蘇)といった具合に続けられ、流体力学本流の人々から、気象力学、海洋物理学、そして、固体地球や天文の人々までがクロスオーバーする場として機能していた。80年代前半はそれほど地球流体力学はブームとなっていたのである。

¹³ 彼のウォルシュコッテージのスケッチは GFD T-シャツの定番デザインとなっている。

¹⁴ 実際、米国の予算当局からの指示により、以前のような数の非米国人フェローを採用することは難しくなっているのだそうだ。

4. GFDの成功

数値計算が一般的に用いられるようになる以前の地球流体力学の主要な武器は、関数展開、摂動展開、振幅展開などさまざまな展開を駆使した伝統的数理解析手法による近似方程式系と近似解の発見定式化、ならびに、流体実験である。

流体実験は、考える種やヒントとして、また、数理解析を検証するツールとして、そして、現象の理解を例示するための可視化装置として機能した。流体実験室は、地球流体力学の象徴でもあり、DAMTPでもウォルシュコッチェージでも研究教育活動の重要な要素として位置付けられてきている。実験で使われる流体は作業流体と呼ばれ、運動構造（数学的構造）を抽出するための媒体に過ぎず、食塩水とか水飴とかどちらかというとお手軽な物質がこれに用いられた。実験の道具立ても、重厚長大あるいは緻密精密な20世紀物理本流の検証実験と違って、ともすれば水遊びに見えるような身近な道具を使って行われる。そのようなセットアップ¹⁵で、例えば、プラムとマッキバン¹²⁾や酒井¹³⁾は成層圏の準二年振動の抽象モデルを円環状水層の食塩水の振舞に射影した。

摂動展開や振幅展開などを用いた数理解析は、対流のパターン形成、波と平均流の相互作用、コヒーレント構造（孤立的な渦）の形成、などなどにおいて絶大な威力を発揮した。形式的な展開で得られた孤立解が、乱流状態を初期値とする時間発展により自然に形成されることは1980年代中ごろになって数値的に確かめられ、乱流理論の展開に大きな影響を与えた。波と平均流の相互作用に関する理解は、60年代から70年代にかけての地球流体力学の大きな成果の1つである。その結果、渦位に関する理解が深化し、80年代には流体の解析力学的構造に関する研究を活性化させた。いわゆるシア不安定の成因が、波と平均流との相互作用という見地から理解整理されたのはこのような考察を経た80年代後半になってからである。

カオスに代表される力学系的な考察が活性化するのは西側では歴史が新しく、ローレンツ後の70年代、少数自由度に（人為的に）限定しての非線形考察に端を発し、80年代に流行となった。これを後押ししたのが、FGGE以降に可能となったデータ利用と数値処理であり、EOF（経験的直交関数）解析による少数自由度への射影表現が果たした役割は大きい。

数値計算環境の急速な発達にともない、80年代後半には数値流体力学 (CFD) という呼び名が一般的になり、大規模数値計算による流体運動解析が進められるようになった。90年代後半にはあまたの領域でこれ

が実際に行われるようになり、マンテル対流、液体中心核、恒星大気などの3次元対流計算が次々と実現し、懸案であったダイナモ作用の数値的実現を得た。線形・弱非線形理論を駆使して行われた、70年代から80年代にかけてのブッセらによる回転球殻対流に関する理論的予想が、数値的に確かめられたのである。

5. GFDの「衰退」

地球流体力学に魅力と威力があったのは、先に書いたように古き良き理論物理学の特質、共通言語の創設とそれによる普遍的な理解、を持っていたからである。したがって、逆に、研究正面の高度化専門分化による普遍性の喪失により、地球流体力学も「物理の終焉」に遭遇することとなった。

この傾向を加速したのは数値計算の急速な発展である。数値計算は、考察可能な対象の範囲を飛躍的に広げたが、その結果をトレースすることは手計算による数式変形に比べはるかに困難であり、理論物理学が真骨頂とする心地よい理解の共有を達成しにくい。計算結果も容易に大容量化してしまい処理するのがひと苦勞という状況に陥る。いわゆるソフトウェアの危機やデータの嵐問題に地球流体力学も例外なく巻き込まれたわけである。

数値計算の成功によるさらなる重要な帰結は、研究正面における方向性が、現象に内在する流体力学的構造の大枠を抽出することから、現象の定量的で詳細な記述や予言へと急速にシフトしたことである。地球流体力学に集った人々は現象の力学的なイメージを一通り理解し数値計算を実現すると、対象に特化したより現実的で複雑な数値計算の実現に邁進し、地球流体力学の研究正面から離れていった。1980年代中ごろになると、気象海洋の分野では、地球流体力学は流体力学的構造の詳細を理解することに拘りを持った専門家が行えば良いものに急速に変質して行った。

一方、地球流体力学の前線は、固体地球惑星科学や天文学の領域に広がっていたわけであるが、日本では、地球流体力学が流行した時代にこれらの分野の研究者へ地球流体力学の架橋をうまく作ることが出来なかった。地球流体力学としての歴史が浅く、DAMTPやMITの応用数学のような、対象分野から一步引いた地球流体力学の主体となる専門家集団を擁することができなかったからである。気象学海洋学の「普通」の人々が地球流体力学の研究正面から離れていくとともに、地球流体夏のセミナーはこれを積極的に駆動する主体を失い、第六回をもって終了した¹⁶。地球惑星科学や天文学の領域での1990年代以降の数値計算による急速な展開は、気象学海洋学の場合と同様、もはやこれを普遍化一般化する動機づけを人々に

¹⁵ 茶化して台所実験 (kitchen experiment) とよぶ。

与えないので、そのような分野の人々が地球流体力学の主体をとって代わるような状況には至っていない。

6. やっぱり GFD

たしかに、3次元流体計算はある程度実現できるようになった。しかし、そのことの地球流体力学的な意味は、3次元な流れ場を数値的に考察できる地点によりやく到達できた、ということに過ぎない。いわば、回転水層実験やりました、と言ったところであろうか。流れ場の構造を解析し、解の堅さを掌握するといった、計算結果を理解することの数値計算に立脚した本格的な議論はこれから展開されるべき状況にある。

そのような展開を可能とするためにはソフトウェアの危機やデータの嵐を乗り越えるためのソフトウェア資源の整備が必須である。しかも、そのようなソフトウェア資源は、理論科学としての自由な考察や理解の共有を保障するべく、著作権や使用料にあまり煩わされることなく数式と同じように自由に利用・変形・配布できるものでなければならない。「地球流体電脳倶楽部」¹⁷⁾は、今から20年前の1988年、そのような問題意識のもと有志が集まって立ち上げた仮想組織である¹⁸⁾。様々な所属立場の個人々が連携し組織横断的に活動してきた結果、一般ユーザーが極めて自由に使える大きなソフトウェアパッケージを生み出してきた。たとえば、近年の試みとしては、階層的地球流体スペクトルモデル集 SPMODEL¹⁹⁾や地球流体データのデータベース・解析・可視化のためのデスクトップツール兼サーバー gfdnavi²⁰⁾などがある²¹⁾。大学法人化を経て組織間生き残り競争が激烈化している今日、各大学等による知的財産の囲い込み競争の影響を排除し、利用形態が特定組織の意向に左右されることのない公共基盤財たるソフトウェア資源を開発提供することは、ソフトウェアを用いた自由な考察を保障する上でますます重要になっている。

数値計算時代の地球流体力学を展開して行くことは、惑星大気の循環構造を探求したり、あるいは、惑星の歴史上の姿やまだ見ぬ系外惑星の姿を想像するといった、観測が困難な対象の考察を行っていく上で特に重要である²²⁾。地球流体力学はそのような世界での

唯一の武器であり、天文学や固体地球科学などを含む様々な領域での経験を利用集積し、これを鍛える努力を行っておく必要性がそこに存在する。この認識は、その昔 GFDL を立ち上げたスマゴリンスキーらが抱いていたものに他ならない。わが国では、今日の地球流体力学の展開にふさわしい優れた計算環境が利用可能であるにもかかわらず、抽象レベルが一段深い地球流体力学の研究者集団を擁していくことが難しくなっているのは非常に残念なことである。

謝辞

木村龍治先生には、東大地球物理での地球流体力学講義ならびに初期の地球流体夏のセミナー開びやく時の様子などを教えていただきました。他の数々のトピックに関してもインタビュー取材を進めたかったのですが、いたりませんでした。またの機会に。

参考文献

- 1) Cushman-Roisin, B., 1994: Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Prentice-Hall, 320pp.
- 2) Smagorinsky, J., 1983: Adv. Geophys., 25, 3-37.
- 3) Edwards, P. N., 2000: A brief history of atmospheric general circulation modeling, in Randall, D. A. ed. General Circulation Development Past, Present and Future, Academic Press, 67-90.
- 4) Veronis, G., 1981: A theoretical model of Henry Stommel, in Evolution of Physical Oceanography, Stommel, H. M., B. A. Warren, C. Wunsch eds., MIT press, xix-xxiii.
- 5) Arnold, V. I. and B. A. Khesin, 1998: Topological Methods in Hydrodynamics, Springer-Verlag, 376pp.
- 6) <http://www.whoi.edu/education/gfd/>
- 7) Charney, J. G., 1973: Planetary fluid dynamics, in Morel, P. ed., Dynamic Meteorology, Reidel, 97-352.
- 8) Pedlosky, J., 1979: Geophysical Fluid Dynamics, Springer-Verlag, 728pp.
- 9) Gill, A. E., 1982: Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, 662pp.
- 10) 木村龍治, 1983: 地球流体力学入門, 東京堂出版, 247pp.
- 11) 田中 浩ほか, 1981: 天気, 28, 739-750.
- 12) Plumb, R. A. and A. D. McEwan, 1978: J. Atmos. Sci., 35, 1827-1839.
- 13) http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/
- 14) <http://gfd.riam.kyushu-u.ac.jp/~gfd/gfdhp.html>
- 15) <http://www.gfd-dennou.org/seminars/gfdsemi/>
- 16) <http://www.gfd-dennou.org/seminars/fdeps/>
- 17) <http://www.gfd-dennou.org/>
- 18) 林 祥介, 1995: 天気, 42, 545-558.
- 19) Takehiro, S. et al., 2006: <http://www.nagare.or.jp/mm/2006/spmodel/>
- 20) <http://www.gfd-dennou.org/library/davis/gfdnavi/>
- 21) 堀之内 武ほか, 2007: <http://www.ieice.org/~de/DEWS/DEWS2007/pdf/d2-8.pdf>
- 22) 林 祥介, 2002: 天気, 49, 7-12.

¹⁶⁾ 持ち回り開催の形骸化を感じてこれを塩漬けしたのは筆者である。しかし、後述のように、90年代にはいつて地球流体力学の知見を集積・継承するための必要は認識され、研究集会やセミナーなどはその後復活する。例えば、地球惑星科学連合大会での「地球流体力学」セッション、新野・和方による「地球流体力学研究集会」¹⁴⁾、「地球流体セミナー」¹⁵⁾、「FDEPS 地球惑星科学のための流体力学」¹⁶⁾、など。