

ニュートン研究所での輸送と混合に関する ワークショップに参加して*

余 田 成 男**

1. はじめに

ケンブリッジ大学ニュートン研究所の招きにより、1996年11月11日から5日間開催された「輸送と混合に関するワークショップ」に参加した。ニュートン研究所はかつてケンブリッジ大学ルーカス記念講座教授であったアイザック・ニュートンの生誕350年を記念して1992年に創設された数理学のための研究所である(研究所のURLは、<http://www.newton.cam.ac.uk/>)。1年に4つ程のプログラムがあり、それぞれに6か月の研究期間が割り当てられている。プログラムの主な内容は、長期・短期滞在のフェローによる研究活動とセミナーおよび1週間規模のワークショップである。今回参加したワークショップは、7月に始まった「大気・海洋力学に関わる数学」というプログラムに含まれるもので、他にも「力学系」「非保存過程」「海洋力学」「データ同化」「気象力学」「低次モデル」「渦の統計学」「新しいモデル」などのワークショップが月に1~2度のペースで開かれている。このプログラムは、ケンブリッジ大学応用数学理論物理学教室(Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics: DAMTP)のM. McIntyre教授らによって企画されたもので、8月の記者会見資料によると、世界中から数学・気象学・海洋物理学の専門家を60人以上集めて、新たな数値予報方法を模索する、とある。また、パンフレットには第1図に示すようなAppenzeller *et al.* (1996)によるポテンシャル渦度のコンター移流結果(通称「スパゲッティ図」)が載っていて、このプログラムが何をを目指しているかを象徴している。

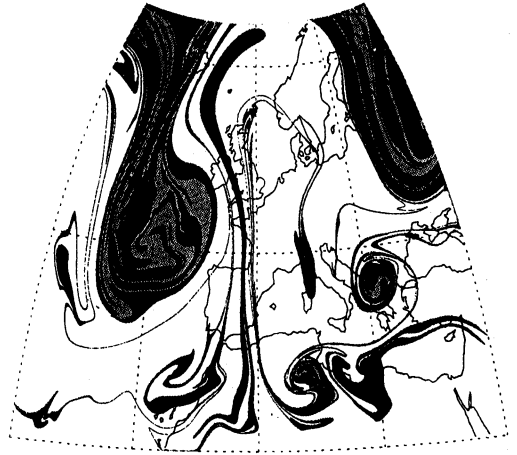
このワークショップ自体は、フェローの1人S.

* Report on the Workshop on Transport and Mixing at the Isaac Newton Institute.

** Shigeo Yoden, 京都大学大学院理学研究科.

© 1997 日本気象学会

DAY 92051412



第1図 温帯低気圧の発達に伴う320 K等温面上の力学的トレーサー(ポテンシャル渦度, PV)の分布(Appenzeller *et al.*, 1996より)。4日前のPV分布を初期値として、ECMWF解析の水平風を用いて4日間PVコンターを移流させた結果である。大西洋上の低気圧渦に対応する高PV値の塊や、ストリーマー(寒冷前線)の2次不安定の結果としての低気圧性渦(バルカン半島付近とチュニジア付近)が特徴的であり、この時の水蒸気分布の衛星画像ともよく対応している。

GravelとDAMTPのP. Haynesによって企画・実行されたものである。5日間で1時間(または30分)の講演が20件あり、1~2時間の全体討論も何度かもたれた。参加者は30~50人程度で、毎日活発な議論が交された。ワークショップの主旨をまとめると次の通りである。輸送と混合の定性的・定量的な記述は大気や海洋の理解に不可欠であるが、多くの点が不明のままに残されている。近年の観測によると、物質輸送過程は単なる拡散型ではなく、極度に非均質な構造をもつものであることが判ってきた。例えば、大気中の水蒸

気やオゾン、海洋中のプランクトンなどの空間分布と時間変動に、そのような特徴を認めることができる。近年、カオスの混合をはじめとする力学系理論や複雑な幾何形状を特徴づける数学的道具立てが整えられてきており、このような研究を進展させる好機となっている。大気・海洋の数値モデルを新たなものにしていくためにも、輸送や混合の過程の理論的基盤が求められている。

2. おもな講演より

ワークショップでは、まず、大気中におけるカオスの混合の研究の第一人者である R. Pierrehumbert (シカゴ大学) が、2 時間以上をかけてレビューと現状報告を行った。我々の主な興味は、空間的になめらかなほぼ水平 2 次元的な流れである。そこには卓越する構造を認めることができるが、それは空間的に大きく攪乱されており、時間的には不規則に変動している。水蒸気やオゾンをはじめとする大気微量成分の変動は、このような流れによる「移流」とより小さな規模のランダムな乱れによる「拡散」、および、凝結・昇華や化学反応などによる「生成・消滅」とによって決まっている。そこでまず、彼は、「移流」による流体粒子混合の運動学的モデルとして 2 次元の周期変化する流れをとりあげて、混合により均質化の起る領域とそうでない領域に分れること、ジェット流が輸送の障壁 (バリア) となること、これらの定量的評価には有限期間リアプノフ指数が有効であること、などを示した。また、このような認識が現実大気データの解析でも有効であることを示した。さらに、彼が現在研究中のテーマである、移流・拡散方程式の格子モデルについても新たな試みを紹介した。実際の化学モデルを念頭に置きながら、物質濃度の計算格子内での平均値のみならずその分布関数が重要であることを強調していた。

今回の講演を大別すると、まず、対象とする領域によって大気 (主に成層圏) か海洋かに分けられ、さらに、概念化や解析の手法によって、運動学 (kinematics) 的か力学 (dynamics) 的に分けられる。これらのうち、成層圏の移流混合過程に関連する講演は、観測された風で多くの粒子を流して両極渦内の孤立を際立たせた K. Bowman (テキサス A&M 大学)、コンター移流で同様の議論をした W. Norton (オックスフォード大学)、衛星観測で得られた微量成分データをもとに混合のバリアをきれいに見出した N. Nakamura (シカゴ大学)、分解能を 15 km にまで

高めた水平 2 次元化学・輸送モデルの B. Legras (ENS)、ロスビー波の臨界層を題材にあくまで理論的に迫った K. Ngan (トロント大学)、M. Shoeberl グループを代表してきた L. Sparling (NASA)、などである。

P. Haynes (DAMTP) はもっと先を見ているようだ。水平 2 次元の移流混合過程はパッシブスカラー量の小さな空間スケールへのカスケードであるが、その結果としての水平変形場の効果と鉛直シアーによる分散とでは、どちらが最終的な分子拡散に至る過程として重要であるかを、ランダム変形モデルにより理論的に評価しようとしている。中緯度下部成層圏観測データに基づく見積もりでは、鉛直シアーによる効果が圧倒的である。あとで彼と議論したが、空高くたなびく巻雲の形状を見れば、これはまったくもったもな話の気がする。すなわち、あのように薄くほぼ水平に広がる水蒸気に富む空気層も、数日前に積雲活動か何かにより等方的な塊として与えられて、その後おもに鉛直シアーにより引伸ばされた結果ではないだろうか？

カオス理論の教科書 (1990, 1992) でも有名な S. Wiggins (カリフォルニア工科大学) が講演した折には 100 人以上の聴衆となった。(超有名人としては、同時に行われていた量子場の理論のワークショップに参加していた S. Hawking 教授を見かけた。10 年前に DAMTP で見かけて以来のことである。) Wiggins は、これまでの 2 次元空間の準周期的な運動学をさらに非周期的な運動をする系へと拡張を試みていた。Pierrehumbert も指摘していたが、非周期的とはいうもののヘテロクリニック点 (流れの淀み点) が明瞭な場合の解析であり、本当に現実大気のような不規則な流れ場にまで拡張できるのか、理論と現実の相当な距離感を感じた。海洋力学分野の講演は、このような運動学アプローチの研究が多かった。湾流の蛇行をモデル化した話や、亜熱帯循環系が周期変化する場合などである。

私は、ここ 5 年間における我々のグループの成果をまとめて発表した。カオスの混合の概念 (実空間での有限期間リアプノフ解析) を初めて知ったのは、Yoden and Nomura (1993) の大気予測可能性の変動に関する論文の査読段階であった (この研究の流れは、Yamane and Yoden (1997) に発展している)。当時手元にあった回転水槽実験の 3 次元モデルの定常波解に應用して、低圧渦の内部がジェット流域から隔絶されていることを見出した (Sugata and Yoden, 1994)。

低圧渦の縁のバリアや高圧渦まわりの構造は, Tajima *et al.* (1995) の室内実験とその発展により検証されている。今は, より現実的な温帯低気圧のライフサイクル (Akahori and Yoden, 1997) に伴う物質輸送過程を調べようとしているところである。次に, 球面上の2次元渦力学の話題に移り, 順圧安定な周極渦の有限振幅攪乱実験 (Yoden and Ishioka, 1993) と順圧不安定な周極渦の非線形時間発展実験 (Ishioka and Yoden, 1994) について, 簡単にビデオで紹介した。本題は, 順圧不安定な周極渦強制と散逸のある非保存系での流れ解析とパッシブトレーサーの移流実験 (Ishioka and Yoden, 1995) で, 準周期的変動流におけるカオスの混合の力学的な実例を紹介した。また, 冬季南半球の上部成層圏にみられる不規則変動に相当する流れの再現とトレーサー実験についてもビデオで紹介した。完全に不規則な変動となっているが, ジェット流軸にあたる周極渦の縁が水平輸送の障壁となっていること, 間欠的に周極渦の縁が破れて中緯度大気の流れがあることを指摘した。最後に, 同じモデルを用いた回転球面上の強制2次元乱流におけるパターン形成 (Nozawa and Yoden, 1996) のビデオも紹介した。発表を終えて席に戻ると, 隣の B. Hoskins 教授から「ビデオの3本立ては初めてだったが, 良い学生をそろえているね」と声をかけて頂いた。(堀之内君の簡略化 GCM による QBO シミュレーション (Horinouchi and Yoden, 1997) には触れられなかったが, DAMTP でのセミナーを頼んでおいたので, 自分で宣伝してきてほしい。)

3. おわりに

今回のような小規模のワークショップの利点は, 講演中や後の質疑応答に充分の時間がとれることである。また, コーヒーブレイクや昼食の間にも, ロビーに何枚もある黒板の前でいくつもの議論が盛んに繰り広げられていた。この研究所にはトイレの内にも黒板があるが, さすがに議論の形跡はなかった。全体討論では, Haynes, Shepherd, Dritschel の McIntyre 一派や Pierrehumbert, Legras などが積極的にリードしていく。賢い人々の議論を聞いているだけで, こちらまで賢くなったような気になってしまう。このような厳しい議論を経て初めて学問の発展というものがあるのだろう。何世紀も続く「学問の伝統」の重みを感じざるを得なかった。

ケンブリッジは今でも, 私の大好きな映画「炎のラ

ンナー」の世界である。どんよりした曇り空の下, 美しい芝の上で子供たちがラグビーに興じている。1986年にこの地を訪れて (余田, 1987) 以来10年になる。研究者仲間の顔馴染みが増え, 私の研究内容・スタイルもそれなりに知られるようになり, ようやくこのような集まりでも気楽に参加できるようになった。つくづく「継続は力なり」だと思う。これまで自由に研究を進めてこられたのも, ひとえに廣田勇京都大学教授のご理解と激励があつてのことである。あらためて感謝の気持ちを表わしたい。今回の出張にあたり, 日本学術振興会の京都大学数理解析研究所-ニュートン研究所重点研究国際協力事業の援助を受けた。日本側の宮岡洋一教授に感謝する。

参考文献

- Akahori, K. and S. Yoden, 1997: Zonal flow vacillation and bimodality of baroclinic-eddy life-cycles in a simple global circulation model, *J. Atmos. Sci.*, accepted.
- Appenzeller, C., H. C. Davies and W. A. Norton, 1996: Fragmentation of stratospheric intrusions, *J. Geophys. Res.*, **101**, 1435-1456.
- Horinouchi, T. and S. Yoden, 1997: Wave-mean flow interaction associated with a QBO like oscillation in a simplified GCM, *J. Atmos. Sci.*, accepted.
- Ishioka, K. and S. Yoden, 1994: Nonlinear evolution of a barotropically unstable circumpolar vortex, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 63-80.
- Ishioka, K. and S. Yoden, 1995: Non-linear aspects of a barotropically unstable polar vortex in a forced-dissipative system: Flow regimes and tracer transport, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 201-212.
- Nozawa, T. and S. Yoden, 1996: Formation of zonal band structure in forced two-dimensional turbulence on a rotating sphere, *Phys. Fluids*, submitted.
- Sugata, S. and S. Yoden, 1994: Chaotic Lagrangian motion and heat transport in a steady, baroclinic annulus wave, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 569-587.
- Tajima, T., T. Nakamura and T. Kuroda, 1995: Laboratory experiments of Lagrangian motions in a steady baroclinic wave—internal structures of vortices—, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 37-46.
- Wiggins, S., 1990: Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos. Springer-Verlag, 672 pp.
- Wiggins, S., 1992: Chaotic Transport in Dynamical Systems. Springer-Verlag, 301 pp.

Yamane, S. and S. Yoden, 1997: Predictability variation and quasi-stationary states in simple nonlinear systems, *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 印刷中.

余田成男, 1987: ヨーロッパでの国際会議と大学・研究所訪問, *天気*, 34, 59-62.

Yoden, S. and K. Ishioka, 1993: A numerical experiment on the breakdown of a polar vortex due to

forced Rossby waves, *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 59-72.

Yoden, S. and M. Nomura, 1993: Finite-time Lyapunov stability analysis and its application to atmospheric predictability, *J. Atmos. Sci.*, 50, 1531-1543.

1997年地球化学研究協会学術賞「三宅賞」の受賞候補者 および研究助成候補者の推薦依頼について

三宅泰雄教授退官記念事業として1972年に設立された地球化学研究協会は、その翌年から、地球化学に顕著な業績をおさめた科学者に、毎年、地球化学研究協会学術賞「三宅賞」を贈呈しています。

さらに1983年からは、海外シンポジウムに出席・論文を発表し、または海外の学術研究調査等に参加する地球化学の若手研究者に対し、助成を行なっています。

なお、賞金および助成金は本協会を母体として、1983年に創設された公益信託「地球化学研究基金」(受託者東洋信託銀行株式会社)から贈られます。

つきましては、下記の要領により、受賞候補者および研究助成候補者のご推薦をお願いします。

学術調査研究などに参加する者、ならびに海外のシンポジウム等に出席し論文を発表する者に対して行われます。

2. 助成金は1件10万円とし、年に数件とします。
3. 規定の用紙に推薦候補者(各締切日において満40歳迄とする)の海外調査に関しては、略歴、研究業績、調査地(国名、地域名)、調査目的・計画、推薦理由、同行者などを記入し、海外のシンポジウム出席については、略歴、研究業績、国際会議名(主催団体、開催場所、開催年月日)、論文題目、推薦理由等を記入して、協会事務所までお送りください。

記

三宅賞

1. 本賞は地球化学に顕著な研究業績をおさめた科学者に贈呈します。
2. 本賞は賞状とし、副賞として賞牌および賞金(30万円)をそえます。
3. 本賞の贈呈は、1年1件(1名)とします。
4. 規定の用紙に受賞候補者の推薦対象となる研究題目、推薦理由(400字程度)主な論文10編程度に略歴をそえて、協会事務所までお送り下さい。

研究助成

1. 研究助成は地球化学の研究者で、海外における

三宅賞の贈呈および研究助成者の発表は、1997年12月6日(土)、東京で行います。

申込締切日は、三宅賞は、1997年8月31日

研究助成は、第1回締切 1997年8月31日

第2回締切 1998年1月15日

学会への推薦申請の締切日は、それぞれ上記の1ヶ月前とします。

地球化学研究協会

〒166 東京都杉並区高円寺北4-29-2-217

TEL 03-3330-2455 (FAX 兼用)