

SPARC 重力波国際ワークショップの報告*

廣 田 勇**・佐 藤 薫***

1. 会議の概要

去る1996年4月1～5日の1週間、アメリカ、ニューメキシコ州の首都サンタフェで、大気重力波に関する国際研究会が開催され、日本からは標記の2名が参加した。

この会の目的は、WCRP (世界気候研究計画) の一環である SPARC (成層圏過程と気候影響) の中に設けられた重力波研究グループ (世話人: K. Hamilton, R. Vincent) が主催して、大気重力波に関する諸問題を純粋に学問的立場から議論することであった。昨夏の Boulder での IUGG (国際測地学地球物理学連合) 総会期間中にその準備の為の相談が行なわれ、筆者 (廣田) もグループメンバーとして参加し、今回のワークショップの骨格を定めた。はじめは「大循環・気候モデルにおける重力波のパラメタリゼーション」に話題を限定しようとの案もあったが、筆者が強く反対し、重力波の物理過程の理解が現在なお観測理論両面で不十分であることにかんがみ、まず未解決の問題点の整理と現在進行中の個別的議論に重点の大半を置くこととなった。数値モデルにおけるパラメタリゼーションの技術的側面と計算結果の相互比較は後半の2日間に集約した。次節の研究紹介 (佐藤) に見られるとおり、このバランスの取り方は結果的に成功であったと思われる。

会議の構成・進行に当っては、IUGG のときのシンポジウムやワークショップのように大勢が15分位ずつのコマ切りの発表を羅列することは避け、参加者とテーマを予め指定した。参加者36人で5日間を費した

ため、ひとり当りの持時間は45分とゆとりがあり、学会講演というよりは研究室セミナーの雰囲気活発な討論を詳細にわたって行なうことができた。参加者の国別も、日米加豪英独仏伊諾露と多彩であった。

顔ぶれは、この道の大御所ハインズ博士を筆頭に、ホルトン、マッキンタイア等の理論家、ヴィンセント、ガードナー等の観測解析のトッププロ、更には数多い中堅どころの数値実験家達に加え、今回特に数名の有望な若手研究者を指名で招待した。筆者は左うちわ高みの見物の立場であったが、ジム・ホルトンらの強い推薦で日本から佐藤薫博士が選ばれ、期待に応じてその発表が大へん好評であったのは嬉しいかぎりであった。優れた論文を着実に印刷公表していれば国際的に必ず認められる、という意味で、若手研究者達の励みとなる好例と言えよう。長年にわたる研究の歴史を背景とした問題提起が、次世代の人々に正しく受け継がれ発展させられてゆくのは、学問の健全な姿である。

なお、この会議の運営は、NATO 科学財団の基金援助によりまかなわれ、成果は NATO 出版物として年内にも発刊される予定である。これら様々な世話に尽力してくれた GFDL のハミルトン博士に心から感謝の意を表したい。(廣田 勇)

2. 研究紹介

5日間の会議にでて今一番感じているのは、重力波の研究層が随分厚くなってきたことだ。Hines, Holton, Hirota といった1950～1960年代の自分の論文の引用から話を始める大家を始め、Boville, Pawson, Manzini などの GCM を扱うモデラー、McIntyre とその弟子達などのピュアな理論家、Gardner, Pfister などの観測屋、そして Vincent (や私) のようなデータ解析屋がそろった形である。重力波研究の中心人物の一人である Fritts は後から来てさっさと帰ってしまった。忙しいからということであったがどうやら他

* Report on the SPARC Workshop "Gravity wave processes and their parameterization in global climate models", April 1996 Santa Fe, USA.

** Isamu Hirota, 京都大学理学研究科地球物理学教室.

*** Kaoru Sato, 京都大学理学研究科地球物理学教室.

© 1996 日本気象学会

にも理由がありそうである。ただ、重力波の分野では今も最先端の研究を続けている Dunkerton や、この会議でも議論の中心のひとつだった重力波のスペクトルに多大な貢献をした MST レーダーグループが招かれていないのは、少々問題ではないかとの声もあった。しかしともかく、会議はかなり盛り上がった。

前半は観測とデータ解析の話であった。観測では、技術には不可能ということがないのだろうかと思わせるような発表があった。フランスの Chanin がライダーで温度だけでなく風も測れることを示したのは1990年頃のことだが、精度が悪くて重力波のような小さい現象の検出はとても無理と考えられていた。しかし、Gardner は3.5 m もの直径の望遠鏡を使うことで、精度を1桁あげること成功した。ロケットの falling-sphere 観測ではサンプリング時間を短くすることで、中間圏界面付近で分解能 5 m (!) のプロファイルが得られていた (Lubken)。飛行機観測では、Pfister のマイクロ波スキャンによる緯度高度 2 次元断面の観測が新鮮であった。中層大気観測衛星 UARS の結果としては、Wu and Waters の MLS (Microwave Limb Sounder) を用いた温度擾乱の振幅の緯度経度分布図が興味深かった。ただし、MLS のオリジナルの鉛直分解能は 10 km 程度なので、20 km 以上の波長を持つ重力波だけを捉えていることになる。したがって、この分布図で重力波の活動度を議論することはできない。Wu and Waters の図に現れた擾乱強度が、赤道域で小さく中緯度で大きいのは、単に中間圏ジェットによって重力波が大きくドップラーシフトを受けている (つまり鉛直波長が長い) 様子を見ているだけ (Alexander) なのかもしれない。

データ解析では、Vincent が高い鉛直分解能 (50 m) のオーストラリアの気象庁によるラジオゾンデ観測データを基に、運動量フラックスの推定を行っていた。彼は、先に温度データだけで重力波の活動度の緯度分布を議論した論文を書いている (Allen and Vincent, 1995)。今回は、2 地点に限ったものではあるがオメガゾンデによる水平風の高分解能データもあわせて用いることで、単色波の仮定なしに運動量フラックスを間接的に推定した。京大超高層の MU レーダーデータを用いた直接推定値 (たとえば、Sato 1994) と同じ程度であり、信頼度の高い推定ができているのではないかと思われた。高分解能ラジオゾンデ観測データの保存・管理、及びその研究利用については、アメリカ、フランス、イギリスでも動きがあり、日本の気象

庁でも気象業務支援センターを通じて高分解能データの提供が1995年度分から始まる。このような高分解能データを用いて重力波特性のグローバルな比較を行なおうということになった。筆者も、日本のデータを用いて重力波特性を解析し、南北両半球の比較をする Vincent との共同研究を行なうことになった。筆者自身の発表もここで紹介しておきたい。テーマは対流に伴う重力波の観測的研究で、ポイントはやはり運動量フラックスの推定である。QBO (準2年周期振動) など背景風に鉛直シアがあると、重力波の東西風成分と温度成分の共分散がゼロでなくなり、その符号は波の伝播方向によらず鉛直シアの符号だけで決まるといふ、最近のデータ解析結果 (Sato *et al.*, 1994) を説明した Dunkerton (1995) の理論を逆に用いて、シングルポールラジオゾンデデータより、周期1~3日の赤道波に伴う、(ネットでなく)正と負の運動量フラックスをわけて推定した。結論は、長周期ケルビン波の運動量フラックスの少なくとも3倍以上大きいということである。最後に MU レーダー観測データによるこれまでの研究結果を基に、台風や積雲は発生がまばらであるが、一度に発生する短周期 (1時間以下) 重力波の運動量フラックスは赤道波よりも1桁以上大きいことを強調した。

純粋な理論としては、McIntyre が、時間変化するシア一流と重力波の相互作用の例として慣性波と小スケール重力波との相互作用について様々なパターンを論じた。これは後で述べる Hines の重力波パラメタリゼーションの基礎となる重力波スペクトル理論を意識した発表である。Vanneste and Vial は、鉛直シア一流中の3波共鳴に関する理論を展開した。数値モデルを用いた計算としては、中間圏まで含めた (といっても背景風一様) 非定常山岳波の計算 (Garcia), フロントシステムに伴う慣性重力波の発生 (Reeder), VanZandt らの普遍重力波スペクトルモデルの鉛直伝播の計算 (Warner and McIntyre) があつた。

後半は、重力波のパラメタリゼーションで盛り上がった。山岳波 (地形性重力波) については Palmer *et al.* (1986), McFarlane (1987) らのパラメタリゼーションがありその有効性は広く認められている。山岳波パラメタリゼーションについてもより現実的なモデルが提案されたが (Lott), この会議でもっぱら議論されたのは、対流などが起源の非定在 (対地位相速度が0でない) 重力波のパラメタリゼーションであつた。様々なパラメタリゼーションが提案されたが、注目さ

れるのは観測される鉛直波数スペクトル（高波数側で m^{-3} に比例）を意識した次の3つである。1つは、1981年の Lindzen によってモデル化された重力波「飽和」による運動量フラックス収束を計算したもの。重力波は複数考えるが互いに相互作用なしというパラメタリゼーションである (Alexander, Norton)。2つ目は、Fritts and Lu (1993) によるもので、各高度で全エネルギーをあらかじめ観測に合うよう与える。このパラメタリゼーションでもスペクトルを構成する波同士の非線型相互作用は無視している。3つ目は Hines による 彼独自のスペクトル理論 (1991) を基にしたパラメタリゼーションである。鉛直波数の tail 部分の m^{-3} のスペクトルは強い非線型相互作用によって作られるタービュレンス（乱流）ならぬ「ウェイビュレンス」によるものであり、低波数の卓越波と平均風によるフィルター作用によりウェイビュレンス部分の運動量フラックス収束が起きる、というものである。Hines のこのパラメタリゼーションの論文はまだ出版されていないが幾つかの GCM に適用され、Lindzen 型、Fritts and Lu のパラメタリゼーションと比較されていた。

比較するポイントは、重力波ドラッグによって、現実的な東西平均東西風分布が得られているか、潮汐波の振幅が現実的に押さえられるかである。特に、前者については、夏の中間圏東風ジェットを「加速する」センスに重力波ドラッグが効いているか (Alexander and Rosenlof) がポイントである。結果として良かったのは Hines のパラメタリゼーションであった。Alexander の改良版 Lindzen 型パラメタリゼーションでも GCM でテストされる段階までいっていなかったが、妥当な重力波ドラッグが得られているとのことである。Fritts and Lu のは、いずれの視点で見ても与えられる重力波ドラッグが強すぎる傾向にあった (Manzini, Boville, McLandress, Lawrence, Geller)。理由は、観測されるスペクトルの振幅にこだわったために、個々の重力波の運動量フラックスの保存が成り立っていないためではないかとの指摘があった (Boville)。

興味深かったのは Mayer の発表である。彼は東西一様 GCM (つまり2次元) に Hines のパラメタリゼーションを入れて得られた中緯度及び赤道域大循環を示した。中緯度においても重力波ドラッグを含め現実的な循環場が得られていたが、特に赤道域においては、プラネタリースケールの赤道波を入れなくても下部成層圏 QBO、成層圏・中間圏 SAO (Semi Annual Oscil-

lation)、さらには最近発見された中間圏界面付近の QBO (Burrage *et al.*, 1996) までシミュレートされたとのことである。ただ、振幅に関しては、与える重力波スペクトルの強さをどう変えても QBO, SAO ともに現実的なものを得ることはできないということであった。この結果は、プラネタリー波の必要性を示唆しているものと思われる。Norton は、複数の非定在重力波と、Palmer らによる地形性重力波を GCM に与え、現実的な循環場を示したあと、夏の中間圏における2日波、南半球冬の成層圏中間圏における4日波の維持における重力波ドラッグの重要性を議論した。他の研究に比べ、一步先んでた研究といえるかもしれない。会議の最後に、この会議で発表された様々な重力波パラメタリゼーションを様々な GCM に適用し比較実験を行なおうとの提案がなされた (McFarlane)。

重力波パラメタリゼーションにおける次なる課題は、ソースをどう与えるか、である。この会議で発表のあった研究では、いずれも重力波ソースは対流圏界面付近に適当に与えられていた。強さは、緯度方向に一樣だったり (Mayer *et al.*)、降水量に比例させたり (Manzini *et al.*) していたが、中間圏については大きな違いはないものの、ジェットの形や強さに若干の差異は出てくるようである。Hirota や Vincent が強調していたように、これまでケーススタディ的にあるいは地点別に行なわれることが多かった。重力波の非等方性、間欠性、卓越波長に関する観測的研究を、今後は総合的に行なっていく必要があろう。

最後に、本会議参加にあたり、旅費の援助を頂いた気象学会に感謝致します。(佐藤 薫)

参 考 文 献

- Allen, S. J., and R. A. Vincent, 1995: Gravity wave activity in the lower atmosphere: seasonal and latitudinal variations, *J. Geophys. Res.*, **100**, 1327-1350.
- Sato, K., 1994: A statistical study on structure, saturation and sources of inertigravity waves in the lower stratosphere observed with the MU radar, *J. Atmos. Terr. Phys.* **56**, 755-774.
- Sato, K., F. Hasegawa, and I. Hirota, 1994: Short-period disturbances in the equatorial lower stratosphere, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **72**, 423-432.
- Dunkerton, T. J., 1995: Horizontal buoyancy flux of internal gravity waves in vertical shear, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 747-755.

Palmer, T. N., G. J. Shutts, and R. Swinbank, 1986 :
Alleviation of a systematic westerly bias in general
circulation and numerical weather prediction
models through an orographic gravity wave drag
parameterization, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**,
1001-1040.

Mcfarlane, N. A., 1987 : The effect of orographically
excited gravity wave drag on the general circula-
tion of the lower stratosphere and troposphere, *J.*
Atmos. Sci., **44**, 1775-1880.

Hines, C. O. 1991 : The saturation of gravity waves in

the middle atmosphere. Part II : Development of
Doppler-spread Theory, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1360
-1379.

Fritts and Lu, 1993 : Spectral estimates of gravity
wave energy and momentum fluxes. Part II : Pa-
rameterization of wave forcing and variability, *J.*
Atmos. Sci., **50**, 3695-3713.

Burrage *et al.*, 1996 : Long-term variability in the
equatorial middle atmosphere zonal wind, *J. Geo-
phys. Res.*, in press.

日本気象学会および関連学会行事予定

行事名	開催年月日	主催団体等	場所	備考
水文・水資源学会 1996年度総会・研究発表会	1996年 8月 3日 ～ 5日	水文・水資源学会	イズミティ21 (仙台 市泉文化創造セン ター) (仙台市)	東北大学工学部土木工学科 澤本正樹 Tel.及びFax. 022-217-7457
第8回日本気象学会夏期特 別セミナー (若手会夏の学 校)	1996年 8月 3日 ～ 5日	気象学会若手有志	京都府立ゼミナール ハウス (京都府北桑田郡京 北町)	京都大学理学部地球物理学 教室 堀之内 武 Tel. 075-753-3934 Fax. 075-721-9249
第19回国際理論・応用力学 会議	1996年 8月25日 ～31日	International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM)	国立京都国際会館 (京都市)	事務局 渡邊英一 Tel. 075-753-5079
1996年度日本雪氷学会全国 大会	1996年 9月24日 ～28日	日本雪氷学会	北見市民会館(24日) 北見工業大学 (25～28日) (北海道北見市)	日本雪氷学会事務局 Tel. 03-3261-2339 Fax. 03-3262-1923
月例会「長期予報と大気大 循環」	1996年 9月26日	日本気象学会	気象庁第一会議室 (東京都千代田区)	気象庁気候情報課 LF グ ループ事務局 藤川典久 Tel. 03-3212-8341 (内3158) Fax. 03-3201-0682 (気象庁総務課)
日本気象学会 1996年度秋季大会	1996年11月 6日 ～ 8日	日本気象学会	名古屋国際会議場 (白鳥センチュリー プラザ) (名古屋市)	日本気象学会中部支部 Tel. 052-751-5123 Fax. 052-762-1242
第14回風工学シンポジウム	1996年12月 4日 ～ 6日	日本学術会議 災害工学研究連絡委員会	日本学術会議講堂 (東京都港区)	第14回風工学シンポジウム 運営委員会事務局 (社団法人電気学会内) Tel. 03-3201-0983 Fax. 03-3201-1983
第2回アジア数値流体力学 会議	1996年12月15日 ～18日	東京大学工学系研究科 日本数値流体力学学会	東京大学山上会館	東京大学工学系研究科航空 宇宙工学専攻 鈴木宏二郎 Tel. 03-3812-2111 (内6600, 6575) Fax. 03-3818-7493