

アメリカ地球物理学連合「大気重力波とその大循環及び気候への影響」に関するチャップマン会議の参加報告*

土屋主税^{*1}・佐藤 薫^{*2}

1. はじめに

2011年2月28日から3月4日にかけてアメリカ地球物理学連合の「大気重力波とその大循環及び気候への影響」に関するチャップマン会議 (AGU Chapman Conference on Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate) がハワイ大学マノア校の East-West Center Keoni Auditorium で開かれた。コンピーナは M. Joan Alexander (米・NWRA), Kevin Hamilton (米・IPRC), 佐藤 薫 (東大) であった。これは2004年に行われたチャップマン会議以来7年ぶりの重力波の国際ワークショップである。高解像の大気大循環モデル (GCM) による重力波の直接計算や高解像度衛星観測による重力波の検出が可能となり、これらを用いた知見が蓄積してきたことを背景に開催された。およそ80名が参加し (第1図), このうち日本からの参加者は12名であった。大気大循環における重力波の役割, 重力波を陽に含む高解像全球モデル, 重力波の励起に関する観測的研究, 地球流体力学的な理論研究, 重力波パラメタリゼーションの改善, いくつかの新しい大型観測プロジェクトなど多岐に亘る大気重力波に関する最先端の研究発表が行われた。以下, 現在の重力波研究の全体像をわかりやすく示すため, 発表順序によらずテーマに分けて紹介する。講演プログラム及びプレ

ゼンテーションファイルはウェブ上に公開されているので, 各講演の詳細はそちらを参照されたい (http://iprc.soest.hawaii.edu/meetings/workshops/11_02_Chapman_Conference/, 2012年2月13日閲覧)。参加者の所属機関の一部及び衛星や大型計画等に関する略語は末尾にまとめた。

2. 大気大循環における重力波の役割

重力波は多くの気候モデルではサブグリッドスケールの波であるため, パラメタリゼーションの形で組み込まれている。パラメタリゼーションが適切かどうかを調べるためには, まず, GCM で再現された大規模場の現実性の確認により行うことになる。このような視点から, GCM において今後取り組むべき課題としては, 準二年周期振動 (QBO), 成層圏突然昇温 (SSW) 及び南極オゾンホール of the 再現を挙げることができる (Garcia (米・NCAR))。現状ではどれかを現実的にすると他が現実的でなくなるといった問題がある。

QBO の主要な駆動源は, 赤道ケルビン波 (赤道波) と重力波 (赤道波及び内部波) とされているが, どの種類の波が QBO のどの位相で効くのかという問題は現在進行中の研究課題である。現在のモデルにおいても長波長・長周期の重力波は解像可能なはずであるが, 現実的な QBO を再現するためにはその重力波のフラックスもパラメタリゼーションとして組み込む必要があること (Garcia), 短波長・短周期重力波のパラメタリゼーションでも QBO は再現できるが, 現実的な再現のためにはソースフラックスに工夫がいること (Bushell (英・Met Office)) が報告された。Krismer (独・MPI-M), 河谷 芳雄 (JAMSTEC) は, 高解像 GCM を用いれば重力波パラメタリゼーションなしでも QBO の再現ができることを示した。

* Report on the AGU Chapman Conference on Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate.

*1 Chikara TSUCHIYA, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻。

*2 Kaoru SATO, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻。

© 2012 日本気象学会



第1図 会議参加者の集合写真 (Gisela Speidel 氏提供).

しかし、これらの複数の研究グループによる再現実験の結果をまとめると、QBOに寄与する波の種類についてはまだ統一の見解を得るには至っておらず、検証のためには今後も観測の蓄積が重要である。

気候変化や気候変動に対する重力波の応答や重力波がもたらす影響についての議論もあった。柴田清孝(気象研)は、将来(温暖化後)のQBOの特性は重力波パラメタリゼーションに大きく依存することを示した。河谷の高解像GCMを用いた数値実験によれば、将来(温暖化後)、熱帯におけるブリュワー・ドブソン循環(BDC)の上昇流が強化されるため、QBOの周期がより長くなるという結果であったが、Butchart(英・Met Office Hadley Centre)は、温暖化後、熱帯の上昇流は強化するものの、QBOの周期は短くなるという対照的な結果を示していた。田口正和(愛教大)は、エルニーニョ・南方振動によりQBOが変調を受けることを示し、またその変調をもたらす波の種類に関する議論を行った。

成層圏突然昇温に対する重力波の役割についての研究発表も多くなされた。重力波パラメタリゼーションを調整してSSWの出現頻度を改善すると、極域の地上気圧及び海水の再現性は低下することが報告された(Garcia)。SSWが起こった後、成層圏界面が急激に70km以上の高度に持ち上がり、その後徐々に中間圏が降りてくる様子がしばしば観測されている。この現象を取り上げた研究も数多くなされていた(Hitchcock

(カナダ・U. Toronto), Zulicke(独・IAP), Orsolini(ノルウェー・NILU), Chandran(米・U. Alaska), 山下千穂子(米・Colorado U.), Limpasuvan(米・CCU), Zhang(米・Penn. State U.))。

成層圏の主要な物質循環であるBDCは、将来(温暖化後)加速することが、多くのモデル研究により予想されている。BDCそのものは主にロスビー波と総観規模波により駆動されているが、この予想されている将来加速には重力波、特に山岳波(地形性重力波)の寄与が大きいことが最近の研究で指摘されている。Gerber(米・CIMS/New York U.)は山岳波の経度分布に注目し、大規模な波との相互作用によりBDCへの重力波効果が弱まっていることを示した。過去40年間の気球観測によると、大気年齢(対流圏界面から成層圏に流入してから経過した時間)に、統計的有意性はほとんどないが僅かな上昇トレンドがあることが知られていて、BDCが加速されるというモデルの予想とは異なっている。このパラドックスを説明する一つの要因として、成層圏における緯度高度断面における空気塊の経路変化が指摘された(佐藤 薫)。

3. 高分解能重力波解像全球モデル

ここで述べる高解像モデルは、気候モデルや天気予報のための数値予報に使われるモデルとは、少々異なる以下のような特徴を持つ。単に高解像化するという

だけでなく、重力波発生源がモデルの中で適切に表現されている必要がある。また、重力波はその伝播において鉛直波長が10kmのオーダーから100mのオーダーまで大きく変化する上、QBOなどの加速をもたらす砕波は極めて短波長になった時に起こるので、鉛直分解能は十分高くとる必要がある。また、BDCや中間圏の物質循環の理解のためには、モデルトップを十分に上げる必要がある。これらの条件を同時に満たすことは難しいので、研究目的に合わせて何らかの妥協をすることになる。渡邊真吾 (JAMSTEC) はこのような視点で高解像 GCM の研究利用についてまとめ、現状を整理した。熱帯については特に QBO の再現においてそのような視点からモデル設計が重要である (Evan (Colorado U.), Zagar (スロヴェニア・U. Ljubljana), 河谷芳雄)。宮崎和幸 (オランダ・KNMI, JAMSTEC) は、中緯度においても特に逆転層を含む対流圏界面の構造の再現やそこでの混合を適切に表現するためには高い鉛直分解能が必要であると述べた。Hamilton は対流圏に着目し、高解像化に伴い地形回りの複雑な循環が再現されること、これにより山岳波特性を見直す必要があることを議論し、土屋主税 (東大) は、非静力雲システム解像全球モデル (NICAM) のシミュレーションデータを用いた短周期周波数スペクトルの全球特性について議論し、観測とよく一致することを示した。

4. 観測的研究

新しい技術を含む様々な観測データを用いた研究発表が多くなされた。特に、新しい観測データを用いて、重力波の発生源を理解するための重力波の場の空間分布に焦点を当てた研究が目立った (Hertzog (仏・LMD), Grimsdell (NWRA), J. Alexander, Wright (NCAR), Yue (米・HAO/NCAR), Nath (インド・NARL), Vincent (オーストラリア・Adelaide U.), J.-E. Kim (NWRA), Gong (米・JPL/NASA), Narayanan (インド・EGRL))。また、現在までのラジオゾンデ、ライダー、レーダー、衛星観測の蓄積に基づく重力波のクライマトロジーも充実してきていて、季節進行、地理分布、高度分布に関する講演も多かった (Ern (独・FZJ), S. Alexander (オーストラリア・AAD), Gong, John (インド・VSSC), Li (米・U. Illinois), Demissie (ノルウェー・NTNU), Swenson (U. Illinois), Narayanan, Guharay (米・NRL), Chu (Colorado

U.), Baumgarten (IAP), B. Williams (NWRA))。大気の小規模擾乱が観測可能な衛星搭載測器には、天底観測のAIRS, 周縁観測のCRISTA, HIRDLS, SABER, GRACE, CHAMP, COSMIC などがあるが、これらの衛星同士の結果を比較する講演もあった (Ern, S. Alexander, Gong)。

新しい観測手法としては密閉気球であるスーパーブレッシャーバルーンによる長期水平浮遊観測が興味深かった。これは流れに乗って見たときの周波数が直接検出可能なため理論的解釈が行いやすい利点がある (Plougonven (LMD), Hertzog)。

一般に、大気の小規模擾乱の観測は、観測できる波数域・周波数帯域や時間・空間領域に限られるという観測フィルタリングの問題をはらんでいるが、これを部分的に克服して重力波の性質を抽出するような新しい解析手法を模索する講演も興味深かった。堀之内武 (北大) は連続する GPS 掩蔽観測を用いた重力波の水平鉛直構造を検出し、Haser (独・GFZ) は隣接した三つの GPS 掩蔽観測を用いることによる衛星の軌道方向に依存しない水平波数ベクトルの抽出を行い、Gong, Soria (アルゼンチン・Universidad Austral) は観測フィルターを逆に利用した運動量フラックスの方向や擾乱の振幅の推定を行っていた。

5. 地球流体力学的な理論研究

重力波の力学についての講演も多数あった。重力波が担う運動量輸送以外の役割として、雲や大気微量成分の生成や輸送過程、及びその気候への影響や (Noel (LMD), Pfister (NASA Ames)), 中間圏において重要となる重力波の熱フラックス (Becker (IAP), Yigit (米・U. Michigan)), 重力波の砕波過程における平均場との相互作用 (Lelong (NWRA), Buhler (CIMS/New York U.)) などの発表があった。対流と重力波の運動量輸送の分離に関する研究 (Shaw (米・LDEO/U. Columbia)), 波と波の相互作用 (Durrán (米・U. Washington), Vanderhoff (米・BYU), Hills (U. Washington), Sutherland (カナダ・U. Alberta), Reeder (オーストラリア・Monash U.)), 三次元波活動度フラックス (宮原三郎 (九大)) など地球流体力学的研究も紹介された。重力波励起源としては、ジェットや前線、傾圧不安定波などからの自発的な重力波放射 (Wang (Columbia U.), 杉本憲彦 (慶應大), P. Williams (英・U. Reading), 山下千穂子, Zhang), 台風

(S.-Y. Kim (韓国・Yonsei U.)), 二次的励起 (Plougonven, Chun (Yonsei U.)) に関する研究発表があった。中間圏, 下部熱圏の潮汐と重力波の相互作用 (Ortland (NWRA), Lu (U. Illinois)) や相対的に速い伝播速度をもつ Ultra-fast Kelvin 波の発生源 (Yingwen Chen (九大)) の研究発表もあった。

6. 重力波パラメタリゼーションの改善

重力波パラメタリゼーションの改善の視点からは, 重力波の間欠性や水平伝播の重要性が議論された。とくに中間圏やそれよりも上層で平均場の再現性が改善されることが指摘された (Preusse (FZJ), Ern, Love (米・Stony Brook U.), Chun, Choi (Yonsei U.), Y.-H. Kim (Yonsei U.))。また, 計算コストが高いため敬遠されがちであった重力波ソーススペクトルに基づくパラメタリゼーションが確率的な手法によって改善されることが示された (Eckermann (NRL), Sassi (NRL))。

7. 新しい大型観測プロジェクト

大型観測プロジェクトについては, 南極における初の大型大気レーダー観測プロジェクトである PANSY (佐藤 薫), 南アンデス及び南極半島における航空機と地上における重点観測の提案である SAANGRIA (Fritts (NWRA)), CAWSES-India プログラムの一環の対流に伴う重力波の超高層における観測のためのレーダー・ライダー・ゾンデ強化観測である SAFER (Ratnam (NARL)), 赤外・マイクロ波周縁観測のイメージング向上を目指した欧州宇宙機関の衛星計画である PREMIER (Preusse, Ern) の計画や現状の報告が行われた。

8. おわりに

1980年代初めに松野と Lindzen, Holton が中間圏界面弱風層の形成における重力波の役割を提唱してから約30年経過する。80年代後半から90年代にかけての MU レーダーや高分解能ラジオゾンデ観測による重力波研究の目覚ましい進展, 天気予報の大きな精度向上をもたらした地形性重力波パラメタリゼーションの開発, 90年代における QBO や中間圏東風の形成など大規模循環や振動現象における重力波の役割の定量化, これらを気候モデルで再現するための非地形性重力波パラメタリゼーションの開発というように, 重力波研究においては次々と新たな課題が生まれ解決され

てきた。21世紀に入ると衛星観測も GCM も高解像度化して, それまで単に気候モデルによる現実大気の再現に必要な運動量を補う役割だけが強調されがちであった重力波も, 三次元空間を自由に伝播し豊かな個性を持つ波として認識されるようになってきた。化学気候モデルによる将来予測によれば, 温室効果気体の増加による対流圏の温暖化に伴い, 成層圏物質循環が強化されるという共通した結果が得られているが, その主な要因は重力波ドラッグの変化であるという最新の研究結果もある。重力波は小さく, その分布はより大きなスケールの流れに影響されるので, 波活動度フラックスや残差循環も3次的に調べていく必要があり, その枠組みを提供する純粋な理論的研究が進んでいる。また, 重力波は鉛直風成分が大きいため地球自転の角速度の水平成分に起因するコリオリ力の影響も大きいといった地球流体力学的な問題も最近盛んに扱われている。観測の空白域であった南極や北極での大型大気レーダー計画は, 日本の PANSY を含めアメリカ, ドイツ, スウェーデンでほぼ同時に進められている。重力波は対流圏と中間圏・熱圏・電離圏をつなぐ波としても重要である。特に南北両半球の気象(たとえば冬の極成層圏雲と夏の極中間圏雲)が中間圏を介して同期するという興味深い研究報告もある。これからの重力波研究の進展はとても楽しみであり, これからも筆者達は貢献していきたいと考えている。

筆者(土屋)にとってははじめての海外における国際学会の参加であった。国内の狭い研究者コミュニティにいて, 大学院生であるうちはまだ一人の研究者としての責任を持たずに済むかのような錯覚に陥りがちであった。しかし, この会議に参加していた博士課程の院生たちの姿は一流の研究者であったので, 解析についてもコミュニケーションについても研鑽を更に積む必要を感じている。この会議参加にあたり旅費の補助をいただいた日本気象学会国際学術交流委員会に感謝いたします。また, この原稿に目を通して有意義なコメントを下された宮崎和幸博士, 杉本憲彦博士, 渡邊真吾博士に感謝いたします。

略語一覧

AAD: Australian Antarctic Division オーストラリア南極局
 AIRS: Atmospheric Infrared Sounder 大気赤外サウンド
 BDC: Brewer-Dobson Circulation ブリュウワー・ドブ

ソーン循環

- BYU : Brigham Young University ブリガムヤング大学
 CAWSES : Climate And Weather of the Sun-Earth System 太陽-地球システムにおける気候と天気に関する研究計画
 CCU : Coastal Carolina University コースタルカロライナ大学
 CHAMP : CHALLENGING Mini-satellite Payload ドイツの地球科学・大気科学用小型衛星ミッション
 CIMS : Courant Institute of Mathematical Sciences ニューヨーク大学クーラント数理科学研究所
 COSMIC : Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate 気象/電離層/気候のための衛星群観測システム
 CRISTA : CRYogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere 大気用極低温赤外分光計・望遠鏡
 EGRL : Equatorial Geophysical Research Laboratory インド地磁気研究所の赤道域地球物理研究室
 FZJ : Forschungszentrum Jülich チューリッヒ研究センター
 GCM : General Circulation Model 大気大循環モデル
 GFZ : German Research Centre for Geosciences ドイツ地球科学研究所
 GRACE : Gravity Recovery and Climate Experiment アメリカ航空宇宙局とGFZが共同して実施された、人工衛星による重力場測定計画
 HAO : High Altitude Observatory アメリカ大気科学研究所センターの高高度観測所
 HIRDLS : High Resolution Dynamics Limb Sounder 高分解能力学リムサウンダ
 IAP : Leibniz-Institute of Atmospheric Physics ライプニッツ大気物理研究所
 IPRC : International Pacific Research Center 国際太平洋研究センター
 JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構
 JPL : Jet Propulsion Laboratory ジェット推進研究所
 KNMI : Royal Netherlands Meteorological Institute オランダ国立気象研究所
 LDEO : Lamont-Doherty Earth Observatory コロンビア大学ラモント・ドハティー地球観測所
 LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique フランス気象力学研究所
 MPI-M : Max Planck Institute for Meteorology マックス・プランク気象研究所
 NARL : National Atmospheric Research Laboratory インド国立大気科学研究所
 NASA Ames : National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center アメリカ航空宇宙局エイムズ研究センター
 NCAR : National Center for Atmospheric Research アメリカ大気研究センター
 NICAM : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 正20面体格子を用いた全球雲解像非静力学大気モデル
 NILU : Norwegian Institute for Air Research ノルウェー大気研究所
 NRL : United States Naval Research Laboratory アメリカ海軍研究所
 NTNU : Norwegian University of Science and Technology ノルウェー工科大学
 NWRA : NorthWest Research Associates ノースウェスト研究所
 PANSY : Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar 南極における大型大気レーダー観測プロジェクト
 PREMIER : Process Exploration through Measurements of Infrared and millimetre-wave Emitted Radiation 欧州宇宙機関による、赤外イメージング分光計とミリ波サウンダを用いた大気環境観測計画
 QBO : Quasi-Biennial Oscillation 準二年周期振動
 SAANGRIA : Southern Andes - ANtarctic GRavity-wave Initiative 南アンデス・南極地域での重力波観測計画
 SABER : Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry ブロードバンド放射測定を用いた大気サウンディング
 SAFER : Study of Atmospheric Forcing and Responses (CAWSESの一環としての) レーダー・ライダー・ゾンデを用いた対流に伴う超高層重力波の観測計画
 SSW : Stratospheric Sudden Warming 成層圏突然昇温
 VSSC : Vikram Sarabhai Space Centre ヴィクラム・サラバイ宇宙センター