

第9回中層大気に関する会議の報告*

神 沢 博*¹・佐 藤 薫*²・塩 谷 雅 人*³・余 田 成 男*⁴

1. はじめに

米国気象学会主催の「第9回中層大気に関する会議」が1994年6月6日から10日までの4日半にわたりカリフォルニア州モントレーで開催された。参加者は150人程度で、カナダ、英国、日本、韓国などからの参加もある国際的な集会となった。次の7つのセッションに分かれて講演と熱心な討論とが行なわれた。(1)気候と放射、(2)大気組成の観測、(3)赤道域の力学、(4)成層圏中間圏の気象、(5)大規模循環/モデル、(6)対流圏成層圏相互作用、(7)混合/モデルと観測。また、同時に開催された「第7回衛星気象学海洋学に関する会議」とのジョイントセッションで、(J1)下部成層圏の気象、(J2)中層大気への応用のための衛星リトリーバル、があった。以下の節では我々が興味を持った話題や世界の流れの中で重要と思われる話題をそれぞれ紹介し、また、会議を通して得た印象やこれからの中層大気科学に我々がどう関わっていくか議論したことについて報告する。

2. 「気候と放射」と「大気組成の観測」の話題を中心として

成層圏オゾンの減少、特に南極オゾンホールが気候、特に、温度場に与える影響を評価する研究が、J. D. Mahlman, V. Ramaswamy を初めとする GFDL SKYHI GCM グループによって発表された。1989年10月に亡くなった S. Fels の切り開いた光化学-放射-力学相互作用を取り入れた GCM を用いた研究を進展さ

せたものである。やはり Fels が創ったアイデア、radiatively determined temperature, FDH (fixed dynamical heating) 等、を駆使していた。オゾン減少に関連した放射-力学相互作用が全球平均下部成層圏温度の冷却をもたらすこと、その冷却は温室効果ガスの増加による冷却よりも大きいこと、温室効果ガスによる対流圏の昇温と成層圏の冷却の境目がオゾン減少によって低くなること、等を論じた。

気候の年々変動を議論するため、長年のオリジナルデータを使って同じ方法で気象の客観解析を再解析し直すプロジェクトが、NMC および ECMWF によって現在進められているが、成層圏についての再解析データによって、気温のトレンドを出す試みが NMC のグループによって発表された。

私は、南極成層圏を1991年に5日間浮遊させた気球 (Polar Patrol Balloon) で観測したオゾンおよびエアロゾルの観測結果とその解釈を発表した。

私は現在、1996年2月に打ち上げ予定の NASDA の人工衛星 ADEOS に搭載される高緯度オゾン層観測センサー ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) のプロジェクトに、中心メンバーの1人としてかかわっている。注目に値する発表のいくつか、特に、UARS の新しい観測結果およびその解析方法の発表を聴きながら、また、それらの発表に使われているトランスペアレンシーの図をみながら、私がその開発の中心の一人となっている「ILAS データ処理運用システム」で、「ああいうデータを基本として用意しなければならないな」、「あのデータをあのように解析したデータを用意しておかなければいけないな」、「そうやって用意したデータをどういう方法で ILAS サイエンスチームメンバーに流そうかしら」等、諸々のことが頭に浮かんだ。例えば、ILAS データ解析を行って科学成果を得るためには、客観解析気象データを使った様々な解析が背景情報として必要であること

* Report on the 9th Conference on Middle Atmosphere.

¹ Hiroshi Kanzawa, 国立環境研究所.

² Kaoru Sato, 東京大学気候システム研究センター.

³ Masato Shiotani, 京都大学理学部地球物理学教室.

⁴ Shigeo Yoden, 京都大学理学部地球物理学教室.

© 1994 日本気象学会

をこれまでも認識してはいたが、今回の会議を聴いて、よりいっそうその感を深くした。また、ポテンシャル渦度やトラジェクリー解析については既に想定していたが、コンターダイナミクス (Contour Dynamics) 解析も必要だな、と感じた。また、ILAS プロジェクトについて、データ利用の可能性がある数名の研究者に対し、この機会に説明することができた。

(神沢 博)

3. UARS の話題を中心として

今回の中層大気に関する会議の目玉は、1991年9月米国において打ち上げられた UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) と呼ばれる地球大気探査衛星データにもとづく一連の研究発表であったといえる。約100件の口頭発表のうち、なんと3分の1を越える38件のアブストラクトに UARS に関連するキーワードを見出すことができた。UARS に関しては、Earth Ecology and Climate*1, Vol. 6 に筆者自身による簡単な解説文がある。最新の研究成果については Geophysical Research Letters, 1993, Vol. 20, No. 12 を参照されたい。また、近いうちに Journal of the Atmospheric Sciences にも UARS に関連した Special Issue が予定されていると聞いている。

UARS に搭載された測器のうち、4つの大気組成観測センサー (以下略称のみ記す—MLS, CLAES, HALOE, ISAMS—詳しくは上記解説文等を参照されたい) は、成層圏から下部中間圏における気温、オゾン、水蒸気、メタン、その他いくつかの窒素および塩素化合物の測定をおこなった。とくに、MLS は塩素酸化物 (ClO) の観測をおこない、極渦内において ClO の多い領域が存在することを見出した。南半球の晩冬から春にかけて観測されている極域下部成層圏におけるオゾン量の減少傾向はフロンから生ずる塩素酸化物の増加に原因があると考えられているが、MLS の測定からこの説が裏付けられたといえる。また、成層圏における水蒸気の起源はメタンの酸化による (1個の CH_4 が2個の H_2O を作り出す) ものと考えられているが、実際 HALOE の水蒸気、メタンの観測から、成層圏の広い領域にわたって $2 \cdot \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ が一定となっていることが示されている。これら組成の観測は、

光化学的な興味にとどまらず、光化学的寿命の長いものについてはトレーサーとして力学的な興味の対象としても用いられている。たとえば、CLAES の CH_4 , N_2O などの観測から、南半球における極渦の発達・崩壊の過程が見事なまでに描き出されている。

さらに UARS の大きな研究成果の一つに、衛星からの観測としては世界初の試みとして、2つの測器 (HRDI, WINDII) が全球的な風速場の測定を試みたことがあげられる。主として、HRDI は成層圏から中間圏にかけての領域を、WINDII は熱圏領域をターゲットとしている。どちらも基本的には酸素原子などによる特徴的な射出あるいは吸収線のドップラーシフトから空気塊の視線速度を求める。これまでは主に中間圏から下部熱圏にかけてのデータ処理が進み、大気潮汐の時空間構造に関する報告がなされていたが、今回の会議ではさらに成層圏領域における風速場の解析結果も示された。これらの風速場の直接測定は、とりわけ地衡風近似の成り立たない赤道域における風速変動を描き出すのに威力を発揮するものと思われる。

このように、UARS は、温度、風、組成の観測を通して、成層圏から中間圏におよぶ総合的な地球大気像を我々に示しつつあるといえる。その一つ一つの観測事実は新たな驚きであることはいうまでもない。今回の会議で特に印象深かったことは、こういった観測結果を踏まえながら、それを解釈するための道具としていろいろな階層のモデルが開発され有機的に用いられていたことである。とくにイギリスのグループは UARS 計画にも参加しており、研究者集団全体が観測・モデル・理論各側面で活躍していたのが印象的であった。

今回の会議では、最新の UARS データに限らず、PMR, SBUV, SAGE などの衛星観測データにもとづいた発表も多く、これらの古典となりつつあるデータにもまだまだ面白い大気現象が埋まっていることを改めて感じさせた。また、研究テーマについても、Holton (ワシントン大) が Stratosphere-Troposphere Exchange に関するレビュー的な講演をおこなったり、成層圏まで含めたデータの蓄積の上立ってアリューシャン高気圧のクライマトロジや、対流圏と成層圏をひとつくりにして大気大循環の年々変動を論ずるものなど、一見古い研究テーマを今日的な観点から見直そうとする動きがあるように感じた。

(塩谷 雅人)

*1文部省「新プログラム」方式に基づくグループ研究「アジア太平洋地域を中心とする地球環境変動」の研究グループが発行するニューズレター。

4. 中小規模現象の話題を中心として

重力波・乱流の発表は大規模現象に比べて件数は少なかったが、興味深い研究がいくつもあった。中層大気重力波の研究は、大循環モデルにおけるパラメタリゼーションを除いては、これまで観測が主導であったのに対し、今回は重力波の数値シミュレーションの研究発表も多く行なわれた。

一つは、M. J. Alexander らの、2次元スコールラインのモデルを用いた、深い対流から発生した成層圏重力波の研究である。周波数・水平波数空間でのパワースペクトルとその解釈は面白かった。スペクトルは一樣でなく、位相速度一定、又は、周波数一定の分布が見られた。これらはそれぞれ、ストームに伴う気圧の歪みの山岳効果によって発生するストームに位相が固定した重力波群、周波数一定で強制振動させた時にできる重力波群（いわゆる St Andrew's Cross）に対応するとの解釈であった。

もう一つは、D. O'Sullivan and T. Dunkerton の研究で T124、鉛直分解能 700 m の全球3次元モデルを用いた、傾圧不安定波動に伴う慣性重力波の話であった。初期に東西波数6の微小擾乱を与えて傾圧不安定波を発生させ、各々の発達段階に現れる重力波を解析した。重力波は傾圧不安定波によって変形された亜熱帯西風ジェットの出口のラグランジアンロスビー数の小さなところで発生していることなどが明らかになった。

赤道域に関しては、M. L. Salby の発表が印象的であった。彼らは6つの衛星同時観測で得た、全球高分解能雲イメージデータ (Synoptic Global Cloud Imagery) を基に、熱源の水平分布を推定し、それを線形プリミティブモデルに入れて、発生する波動の解析を行なった。Hough モードに展開して時空間スペクトルを求め、EP フラックスの計算を行なって、重力波が東向きフラックスの70%を、西向きフラックスのほとんどを占めることを示した。

筆者 (K. Sato) は、最近注目される wavelet 解析法を用いて、温度・水平風に見られる普遍鉛直波数 (m) スペクトル (m^{-3} に比例) に関する考察を行なった。ラジオゾンデによる温度データの wavelet スペクトル解析の結果、 m スペクトルは高度方向に一樣でなく、その分布はクリティカルレベルに近づきつつある一つの慣性重力波で説明できること、逆にそのような慣性重力波が作る m スペクトルを理論的に求めると、観測スペクトルとよく一致することを示した。

また、別の話題で、MU レーダー・境界層レーダーの観測に基づき、積雲対流に伴い、短周期（数分～数時間）重力波が発生していること、そのうち周期の長いものは成層圏下層で砕波してしまい、短いものだけが上方に伝播していることを発表した。対流の盛んな熱帯域の成層圏対流圏物質交換においてはこのような短周期重力波が重要であると考えられる。

今後は、重力波の分野では観測とモデルをつき合わせていくフェーズになることと思う。MU レーダー等を用いた日本の一連の重力波の研究は評価が高く、お蔭でこの夏休みにシアトルに遊びにいけることになった。バリバリの理論家の Dunkerton や wavelet 解析にも興味を持っている Alexander と色々議論してくる予定である。
(佐藤 薫)

5. 数値モデル・理論の話題を中心として

この研究集会で特に目を引いたのは、力学過程と化学過程を結び付けた数値モデルによる研究である。それらの多くは UARS などの衛星観測結果に動機付けられたものであり、いくつかの階層に分けられる。両過程の完全な結合を目指す輸送-化学 GCM、他の過程へのフィードバックは考えない「オフライン」の3次元モデル、トレーサー物質の輸送と混合に焦点を当てた3次元および2次元の輸送モデル等々である。最も大がかりなモデルとしては、SKYHI GCM をベースにした完全結合モデルが GFDL で開発中である。すでに結果が出始めているのは「オフライン」型モデルで、GFDL のグループは1980年代の成層圏オゾンの減少を与えて、その力学過程へのインパクトを調べていた。一方、英国の UGAMP (Universities Global Atmospheric Modelling Programme) や NASA の Goddard Space Flight Center では3次元輸送-化学モデルが動いており、風速場・温度場の解析値を与えて化学モデルを走らせ、UARS の観測結果と比較するような研究が進行中である。トレーサー物質の輸送モデルは、次の3種類に大別できる：(1) スペクトル法またはセミラグランジュ法によるパッシブスカラー移流モデル、(2) 多粒子群のラグランジュ追跡、(3) 「手術」付きコンター移流 (CAS: Contour Advection with Surgery)。3次元モデルは解析された風速場を用いたものが多く、極渦の変動に伴う移流・混合や亜熱帯域の「バリア」に注目した研究となっている。それぞれの手段を Chen and Holton (1), Sutton (UGAMP) や Eluszkiewicz and Plumb (2), Schoeberl ら (3)

などが用いていた。また、2次元モデルでは当温位面上での水平混合に焦点を当てたものが多く、余田・石岡(4)、Bowman(2)、Plumbのグループ(3)などが、理想化されたモデル実験や解析された風速場をもとに混合の素過程を詳細に調べていた。

このような大規模輸送過程と関連する観測計画として興味深かったのは、Mechosoが紹介したフランスCNRSによるSTRATEOLE計画である。南半球下部成層圏にたくさんのバルーンを放ち、化学観測と衛星による軌跡追跡を同時に行なおうというものである。彼の発表自体は3次元モデルを用いた予備実験の話であったが、大規模な循環場における粒子(風船)群の分散特性が観測できるはずである。話は飛ぶが、いまNASAの高高度観測用飛行機ER2による南半球極渦域のオゾンを中心とする大気組成観測(ASHOE)が行なわれている。1987年のオゾンホール観測や1989年と1991年~92年の北半球極渦飛行機観測の発展であるが、力学理論家のPlumbとWaughがその観測に参加し、飛行機基地であるクライストチャーチ(ニュージーランド)からこの研究集會に駆けつけたのには驚いた。

中層大気循環の季節変化と年々変動に関する数値実験も進展している。私自身も興味を持ち続けているテーマであるが、1980年代の計算機環境では単純化した鉛直準1次元モデルを用いた研究(「天気」40(1993年)、145-160参照)が精いっぱいであった。しかし、今回の発表では、完全3次元中層大気モデルを用いたパラメータ実験がいくつか報告された。UCLAのFarraraらは、完全に周期的な季節変化をする外部条件でも非周期的な年々変動を含む応答を得た。単純化したモデルでは周期的な応答しか得られなかったが、ちゃんと3次元で計算すれば、中層大気で閉じた内部力学だけで有意な年々変動をつくることができたわけで、中層大気の間々変動に関する基本的枠組を考えるうえで重要な結果である。しかし、現実には、対流圏や赤道域の状態が年々変動しており、中層大気の間々変動はその影響を大きく受けている。O'Sullivan and Dunkertonは、秋からの季節進行が赤道域帯状流の準2年振動(QBO)によってどう影響されるかを詳細に調べていた。その冬に突然昇温が起るかどうかは対流圏からのロスビー波強制に敏感に依存している(彼らは“bifurcation”と呼んでいる)が、その臨界値がまたQBOに依存していて、東風期には小さな強制波振幅で“bifurcation”が起る。このような認識が得られてく

ると現実大気の振舞いが気になるわけで、Dunkertonのグループは、長年のデータを解析することにより、このような年々変動の対流圏とのつながりや赤道域との関連を精力的に調べている。(余田 成男)

6. 所感

ホテルに缶詰になるこのような国際学会のいい点に、新しい結果を知ること、研究の流れを知ることもあることながら、同じ分野の日本人研究者と長時間にわたって深い議論をできることがあげられる。少なくとも私は、他の3人から教わるが多かった。

我々4名で話し合っただけ意見が一致したのは、英米の研究者、研究グループが中層大気科学研究のための基盤整備、道具立ての開発にきちんとこれまで力を入れてきたこと、その上に立った目覚ましい成果が出てきたことである。例えば、(1)UARSサイエンスチームの活発な活動、UARSデータ解析に必要な気象データおよび気象データ解析方法(ポテンシャル渦度解析、トラジェクトリー解析、コンターダイナミクス解析)の共通基盤化；(2)米国および英国においてオゾン等の微量成分をも四次元同化サイクルに入れて、観測とモデルを組み合わせたデータセット作りが活発に行われていること、その上に立った成果が出ていること；(3)英国の中層大気大循環モデルの開発体制が有効に機能していること、その開発に中層大気研究の主だった全ての優秀な研究者が参加していること、そのモデルを有効に利用した成果が出てきたこと、等々である。

大気力学の理論家、Alan Plumbが航空機観測実験に自ら参加指揮し、自らの理論解析を観測データで確かめる仕事をしていることも非常に印象深かった。自然現象を理解しようという探究過程の中で、ある手段および道具等が必要になったら、それをマスターして使う。それが創造的・開拓的な仕事の仕方であろう(天体物理学の林忠四郎氏の研究のやり方を思い起こす)。

英米のよき部分を、これからの研究および研究プロジェクトの推進に生かしていこうという決心をした。

(神沢 博)

これまで何度か国際的な会議に出席して、そのたびに「我々日本の中層大気に関する研究者集団もそれなりに頑張っているよな」と自負していたつもりである。ところが、今回の会議では言い知れぬ敗北感を感じてしまった。科学的な視点という意味ではまだまだ

負けていないと思う。しかし、一步抜き出した研究をしようとしたとき、そのための基本的な道具立てを何も持っていないことに愕然とするのである。そして、そういった基礎を軽視し、作り上げてこようとしなかったことがなんだか情けなくなってくるのである。

この状況は、UARS という素晴らしいデータソースを目の前にしたとき明らかな差となって現れる。神沢氏も書いているが、敢えてもう一度書かせてもらえば：英米の科学者はこの UARS データを料理するにあたって、気候値データ、同化データ、客観解析データなどの基本データを実に有効に活用している。また、現象を理解するために、明確な理論的概念に支えられた各種階層を持つ数値モデル(余田氏担当の5節参照)を縦横に駆使している。このような一見なんでもない道具立てがあってはじめて UARS データは命を吹き込まれ、科学的な面白さを我々に見せてくれているのである。

気候値データの整備、同化データのルーチ的な提供、モデルの開発等々、直接的には「成果」と結び付かないような部分に対して我々は正当な評価をしてきたであろうか、このような基盤を作ることに我々は努力を惜しむことはなかったであろうか、と自問自答してしまうのである。道具作りに溺れてしまって、最終的な成果と結び付かないのではもちろん困る。しかし、特にイギリスから参加していた研究者が、これら基本道具を通して観測・モデル・理論をうまく結び付け素晴らしい成果を出しているのを見ると、このような基礎作りの重要性を認識せざるを得ない。なによりも素敵だと思ったのは、こういった研究成果にもとづいて、イギリスの若い研究者が目を輝かせながら発表していたことであつた。

私自身これまで UARS の validation meeting や science meeting に参加する機会が何度かあつたが、私の目から見た UARS 計画について少し述べておきたい。UARS のような衛星プロジェクトを外から見ていると、その計画立案から打ち上げ、そして科学者集団へデータが流れ出すまでの部分は、最終的に出てくる科学的な成果の影にかくれてあまり見えてこない。しかし、「準備」、「実行」、「後始末」の3つの過程がそれなりに重要で、UARS 計画の場合これらがバランスよくこなされている。日本の場合、衛星計画に限らず、最後の「後始末」(データをちゃんと解析して科学的な成果を出す)部分が往々にして軽視されがちであるように思う。しかし、すべての過程を同一の人間がこな

せるわけでもなく、比較的技術者主導の「準備」、「実行」のあとの「後始末」はまさに科学者集団の責務である。

また、今回の会議も含め予想を上回る UARS の成果を見るにつけて、こういった息の長いプロジェクトに対する理解の必要性を痛切に実感する。特に今回の UARS 計画はスペースシャトルの事故によって大幅に打ち上げが遅れ、計画から実施まで10年をゆうに越えている。その間、いわゆる「成果」のでないまま、打ち上げの日を待っていた関係者の人達の忍耐、そして同時にそれを見守ってきた科学者集団の寛容さには頭の下がる思いがする。その中でもとくに、純粋科学者のように考えられている Holton が、その間ずっと UARS の(おそらくは科学者としてはつまらない)会議にもちゃんと顔を出していたことは、UARS 計画の大きな求心力の一つになっていたように思う。

(塩谷 雅人)

今回の会議で衝撃を受けたのは英国の UGAMP である。1970年代より Hoskins を中心にすすめられてきた大学連合大気モデル開発プログラムが中層大気分野でもどんどん成果を出している。レディング大学の O'Neill をディレクターに McIntyre, Pyle (ケンブリッジ大学), Andrews (オックスフォード大学), Harwood (エジンバラ大学)などが中心となつて、簡単なボックスモデルから化学-力学結合3次元モデルまでのさまざまな階層の中層大気モデル群を開発・整備し、素過程の理論的研究から毎日の全球データアシミレーションまで総合的に利用している。リーダー達は姿を見せなかったけれど十分に存在感があり、若者達が生き生きと彼らの研究をアピールしていた。Hoskins 達の何十年に及ぶ明確な目的意識とそれを実現させてきた実行力には脱帽せざるを得ない。個々人として優れた研究者達が実質的に協力しあつて圧倒的な成果をあげている様子を目の当たりにして、ここ五年近くわが国の「気候モデル開発」プロジェクトに参加してきた一人として感慨深いものがあつた。確かに、我々の研究発表はそれなりの水準以上であつたし、これまでの成果として長々とした論文リストを見せることもできる。しかし、今後の学問的展開に資する研究基盤をどこまで整備できたであろうか?余りに「消費型」の研究ばかりに偏ってはいなかったであろうか?反省すべきことが多くある。

もう一つ書き留めておきたいのは、最近米国科学ア

ガデミー会員に選ばれた Holton の中層大気に対する「愛情」である。5日間を通して熱心に講演を聞き、要所を押えたコメントを行ない、まさに重鎮の役割を果たしていた。1980年代に Middle Atmosphere Program が終ると中層大気を離れていった研究者もいる中で、Dunkerton, Boville から Mote, Rosenlof まで多くの学生を中層大気研究者に育て上げ、また、多くのポストドク達の中層大気研究に積極的に関わってきた。時代の流行に流されることなく、中層大気における物質輸送と成層圏-対流圏結合過程の研究をライフワークとして邁進する真摯な姿を見て、いろいろ考えさせられた。

住さんが何年か前の「天気」のインタビュー記事で「闘将 Hoskins」「成層圏の守護神 Holton」と呼んでいたが、私は「Hoskins の計画・実行力」と「Holton の愛情」を目指して、彼らに一步でも近づくべく汗を流したいと思う。

(余田 成男)

これまで筆者は、IAMAP と IUGG、それから MST レーダーワークショップなどの会議に機会ある毎にでて、それなりに国際的な場での宣伝業も頑張ってきたつもりだった。ところが、博覧会的な IAMAP, IUGG の会議と比べて、今回出席したアメリカ気象学会の中層大気会議はとて性格が異なるものであった。日本に比べてアメリカは層が厚いというのを実感してしまった。日本の気象学会では半日の半分くらいの短い中層大気のセッションの中、モデルも観測もそれぞれのテーマで1つあるかないか程度で、あまりまとまりがあるとはいえないのだが、この会議ではどの分野もレベルの高い研究が複数あり、つまり、良く似た問題

意識をもった研究者が複数いるので、「面白い研究だね」だけでは済まされない。まさに専門家にしか思い浮かばないような鋭い質問やコメントが次々飛び出し、中身の濃い議論ができた。特に午前と午後30分ずつある休憩は貴重な時間であった。

重力波以外の分野でも、UARS による観測の最近の結果や、トランスポートの問題でも多くの発表があった。特に後者の詳細は良くわからないにしても、何が問題とされているのか世の中の動きをしっかりと感じとることができたと思う。一緒に出席した神沢さん、余田さん、塩谷さんとその日の研究発表の印象などを毎日話しながら過ごしたのも、私にはとても勉強になった。

同じポストドクくらいの世代の研究者（こういう人たちは IAMAP, IUGG などの国際会議には滅多に出てこない）も多く出席していて、近い分野の何人かと友達になれたのもよかった。電子メールで何度か交流のあった人とも実際に話をして、食事を一緒にしたりすると、印象が随分違って来る。その人の研究に対する見方まで変わってきてしまう。今後もこういう人たちと連絡をとりあって、彼らに負けずに頑張っていきたいと思う。

(佐藤 薫)

謝 辞

今回の会議参加については、神沢は科学技術庁国際研究集会派遣の援助を受けた。また、塩谷・余田は文部省科学研究費補助金(創成的基礎研究費)「気候モデルの開発および気候変化の数値実験」(代表松野太郎東大教授)の補助を受けた。