

## 英国王立気象学会150周年記念会議「千年紀における気象学」報告\*

榎本 剛\*\*

## 1. はじめに

2000年7月10～14日に、上記の国際会議が英国ケンブリッジで行われた。この会議は、王立気象学会の150周年を記念して開催されたものである。

会議の目的は、この節目の年にあたって、気象学が現代科学の最前線にあることをアピールすることにある。例えば、現代科学を代表するカオス研究は、天気予報がきっかけとなって開花した分野である。他方、他の分野からの知見を取り込むことにより、気象学は大気科学としての広がりを見るに至った。また、宇宙科学、計算機科学、レーダーや衛星などの観測技術は、大気科学とともに発展しながら、大気科学の発展に大きく寄与した。このような認識のもとに、この会議は気象学と関連分野との交流について概観し、そのあり方について考察するものであった。同時に、気象学が社会の発展に与える広範な影響についても議論された。実際、他の分野への気象学の知見の応用を紹介した講演、今世紀の気象学の発展を振り返るもの、モデルや観測機器の最近の進歩から来世紀の気象学を展望するもの、気象学の突破口を見出すために必要な観測やモデルの改良について論じたもの、モデルや観測技術の社会に与える影響について論じたものなど、講演者は各自工夫してテーマに沿った発表を行った。この会議では、21世紀の大気科学を担う若手研究者の育成が重視され、参加が奨励されたため、ポスターを中心に博士課程の学生やポスドク（博士号取得済の若手研究者）の発表が多く見られた。

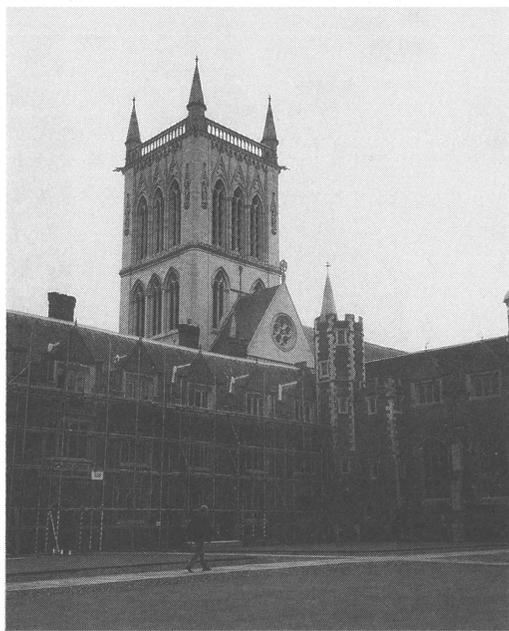
会議は、

- ・気象学的な理解

\* Report on the 150th Anniversary conference of Royal Meteorological Society "Meteorology at the Millennium"

\*\* Takeshi Enomoto, 東京大学大学院理学系研究科.

© 2001 日本気象学会



第1図 会場となったセント・ジョンズ・コレッジ。

- ・生物地球科学系
- ・観測技術の与える影響
- ・気候の変動と変化
- ・他の惑星、他の時代
- ・千年紀の天気予測

の6つのテーマに分けられていたが、同時平行で開催されたセッションはなく、参加者が一同に会して専門以外の発表も聴くという形式だった。

招待講演には、会議の目的に従い、英国の内外から、気象学及び関連分野の第一人者約25名が招聘された。通常の口頭発表は約60件、ポスター発表は約85件あった。参加者は約260名で、日本からは報告者の他に気象庁気象研究所から直江寛明氏が参加した。

会場は、観光名所ともなっている学寮の1つ、セン

ト・ジョンズ・コレッジであった(第1図)。このコレッジには、「ため息の橋」、スコットによる16世紀建立の食堂や礼拝堂、16~17世紀の中庭がある。食堂は、会議の昼食や夕食、晩餐会に利用された。コレッジには、歴史的な建物だけではなく、講堂や学生の寝室を備えた近代的な建物もある。こちらは、講演、ポスター発表や参加者の宿舎として利用された。

以下、上記テーマごとに招待講演を中心に主な議論を紹介し、報告者が参加したポスター発表の様子について報告したい。

## 2. 口頭発表

### 2.1 気象学的な理解

M. E. McIntyre (ケンブリッジ大学, 招待講演) は、古典的な3次元乱流の理論は気象には全くあてはまらない (hopelessly wrong) と述べ、大気中の乱流は非一様性が強く、波の効果が重要であることを強調した。続いて、波の効果による Brewer-Dobson 循環の駆動メカニズムを解説したのち、同様な考え方は太陽の差分回転、子午面循環、太陽内部のヘリウムの分布等を説明し、太陽の変動に強い示唆を与えるものであると述べた (Gough and McIntyre, 1998)。後者は、気象学で得られた洞察が天体物理学の問題の解明に寄与した例であると語った。

C. Schär (スイス連邦工科大学, 招待講演) は、孤立した山の流れに対する効果と、メソスケールと総観スケールとの相互作用について、理論的、数値的及び観測的な研究のレビューを行った。気流が山のまわりを回るときのウエイクによって渦が生じる。この渦が移流され、もともとある偏差と相互作用する。この様子について、地形効果による渦位などの観点から解説し、アルプスの風下側で低気圧が発達する例を示した。アルプス山脈のスケールが100 km 程度でも、風下側に行ける波のスケールは1,000 km 程度にもなるという。

K. Emmanuel (マサチューセッツ工科大学, 招待講演) は、気象における水の役割について講演を行った。水蒸気の効果は、乾燥大気の力学を補正する程度のものだという考え方は、水の相変化が重要な役割を果たす熱帯でもある程度信じられている。今日でもこのような考え方は根強いが、水蒸気の影響が本質的な現象もある。そのような例として、前線形成の理論において水蒸気の影響を考慮すると、発達率が乾燥の場合の倍になることや、対流セルの上昇域が局在化することを挙げた。さらに、気候において、水は温室効果気体

や雲として、重要な役割を果たすことを強調した。またモデルの解像度が上がると、雲物理のモデルに敏感になることを指摘した。

A. Slingo (イギリス気象局, 招待講演) は、放射収支研究のレビューを行った。大気による短波吸収は、地球の太陽光吸収の1/5を占めている。Slingo は、このことを重視し、大気は「太陽光を吸収した地表面により加熱される」という描像は、かなり粗い近似であると指摘した。これに関連して、雲やエアロゾルによる吸収がモデルで過少評価されている問題を取り上げた。また、雲は格子の作る直方体ではなく凹凸のある三次元であるから、雲の放射に対する効果を調べるには、雲解像モデルが必要であろうと述べた。

W. R. Peltier (トロント大学, 招待講演) は、地衡性乱流に関連した話題をいくつか取り上げた。まず、2次元的な流れが地形を越えるときに不安定化し、3次元乱流が発生する現象の力学的特性について発表した (Afanachev and Peltier, 1998)。次に、エネルギーのアップワード・カスケードによる傾圧不安定波の発生の可能性について議論した。このような総観規模より短いスケールの不安定は、太平洋ジェットの入付付近で生じやすいと述べた。また、浅水モデルを用いた減衰性乱流の実験で、赤道上の東西平均風が西向きになってしまう問題点を取り上げた。Peltier の解釈は次のとおりである。浅水モデルは、縞状構造をよく表現するが、赤道域では不適當である。外惑星のような条件では、テイラー柱が赤道の両側で表面の渦位を攪拌するので西風ができる。浅水モデルではこの深い対流は表現されず、赤道域で渦位の攪拌が生じるために一様化された渦位に対応して東風ができる。

### 2.2 大気と海洋

C. Wunsch (マサチューセッツ工科大学, 招待講演) は、海洋は定常で、単純で、層流であるという誤解は、海洋観測の不足によるものであると指摘した。例として、北太平洋や南極付近に風応力の変動への応答であると思われる高周波の変動成分がモデルに見られることを挙げた。また、小スケールの地形の上では鉛直粘性が通常使われる値の20倍もあることや、解像度を2/10度から1/10度へと2倍にただけで、変形半径程度の現象がよく表現されるようになり、ラブラドル沖の熱流束の収支に変化が見られたことを例に挙げて、海洋大循環モデルの妥当性を吟味し、改善するための海洋観測の必要性を訴えた。

M. Latif (マックスプランク気象学研究所, 招待

講演)は、大気海洋相互作用による十年スケール変動のメカニズムとその予測可能性について講演した。大気海洋相互作用は、十年スケール変動を引き起こす一方、大洋間の変動を同期する作用もある。後者の例として、太平洋赤道域の変動が、大気のテレコネクションとそれに伴う大西洋に流入する真水の収支の変動を通じて、大西洋の塩分濃度を変化に寄与するというメカニズムを挙げた。

P. J. Webster (コロラド大学)は、大気海洋相互作用を重視した新しいインド・モンスーンのとらえ方を提唱した。夏季のインド・モンスーンが熱源に対する受動的な応答であるとするならば、インド・モンスーンはENSOやユーラシアの積雪等の外力に対して因果関係を持つはずである。しかし、明瞭な関係は見られないことが多く、むしろ外力に対して安定であると述べた。その理由は、インド洋のダイポール構造に伴って負のフィードバックが働くためであると説明した。そして、インド・モンスーンは、大気海洋相互作用を伴う内部の力学により安定していると結論した。

### 2.3 生物地球科学系

J. Pyle (ケンブリッジ大)は、3次元化学輸送モデルを用いて、90年代後半の成層圏オゾンの大幅な減少について調べた。その結果、オゾンの減少は、塩素の量の増加といった化学的要因ではなく、極渦が平年に比べて強かったという力学的要因が重要であることが分かった。強い極渦内に、低温の空気が閉じ込められてオゾンの減少の過程が進行したのだと説明した。また、オゾンの減少には、エアロゾルの影響も無視できないと述べた。

P. S. Liss (イースト・アングリア大学、招待講演)は、地球の大気の組成が他の惑星と異なっている原因が生命の存在にあると指摘し、その大気及び海洋に対する影響について述べた。とくに、海洋生物が地球の放射に重要である二酸化炭素などの大気の成分を調節する作用を持つことを強調した。

P. Cox (イギリス気象局、招待講演)は、植生と炭素循環を結合した気候モデルについて発表した。まず、二酸化炭素が気候変動に重要な放射に影響を与える大気成分であることから、二酸化炭素と相互作用する植生や炭素循環が気候変動に与える影響は重要であると述べた。そして、気候変動を正しく再現するために、植生や炭素循環を気候モデルに結合させる必要性を説いた。次に、植生と炭素循環を含むモデルの構造について解説した。従来のモデルでは、植生が変化する

ことなく、二酸化炭素の量は外部から与えていたのに対し、今回開発したこのモデルでは、植生及び炭素循環が変化しうるモデルの要素として結合されている。

### 2.4 観測技術の与える影響

I. Zawadzki (マギル大学、招待講演)は、新しい遠隔観測の技術を紹介し、その科学的及び社会的な影響について述べた。まず、科学的な影響を3点挙げた。ひとつは、近年データ同化の技術が進歩し、観測されない変数の推算が行なわれるようになったことである。2つ目は、センサーの種類が豊富になってきていることである。様々な水蒸気量の観測方法の例として、差分ライダー、GPSの信号の水蒸気による屈折・遅延の利用、レーダーの反射波と屈折波との併用を紹介した。3つ目は、電子情報技術の進歩により、信号処理が高度化し、データのやりとりやプロダクトの配信が容易になったことである。次に、観測技術等の進歩が社会に与える影響として、航空気象が観測技術の進歩の恩恵を直接受けていること、大気の状態の可視化が容易になったことで、テレビの天気予報や教育の場で画像を用いた直感的な解説ができることを挙げた。

J. E. Harries (インペリアル・コレッジ、招待講演)は、地球の長波放射のスペクトル観測による気候変動の検出について講演した。気候変動の研究において通常指標とされる気温は、長期間の記録があるが、データの代表性に問題があり誤差を伴い、人間起源の強制以外の様々な過程の影響を受けやすいと指摘した。これに対し、衛星観測は地球を一様にとらえることができ、外向き放射のスペクトルを分析することにより、気候変動の要因の特定が可能であるという利点がある。IRIS観測(1970)とIMG観測(1997)とを比較して、従来から指摘されている地表気温の上昇、二酸化炭素、水蒸気、メタンの増加と矛盾しない結果を得たことを報告した。

A. Hollingworth (ECMWF)は、衛星データを数値予報で利用するための変分法の発展を振り返り、近年取り入れられた四次元同化法(4D Var)について解説した。また、現在利用されている様々な衛星観測や計画されている新世代の衛星観測のもたらす進歩について展望した。

### 2.5 気候の変動と変化

P. Jones (イースト・アングリア大学、招待講演)は、1861年から1998年までの気温の観測とそれ以前の古気候学的なデータから、地球の温暖化について議論した。気温の観測のある1861年から1998年までの期間

を通じた昇温は0.6度であったが、顕著な昇温は1920年代前半から1940年代半ばと1970年代以降の2つの時期に起きていると指摘した。また温暖化のシグナルは、一部の年代を除き冬季に振幅が大きいことを指摘した。また、古気候学的データの信頼性に関し、木の年輪から推定した気温と観測された気温とは最大+0.6の相関があると述べた。また、17世紀と19世紀とが比較的寒冷で、現在がこの千年間でもっとも温暖であると述べた。

M. Collins (イギリス気象局ハドレー・センター) は、2つの結合モデルを用いて、気候変動に伴うエル・ニーニョの変化について調べた。一方のモデル(HadCM2)では、温暖化が進んだ際に、エル・ニーニョは振幅が20%ほど増加し、周期が2~3年に短縮し頻発するようになった。もう一方のモデル(HadCM3)では、物理過程が改良され、海洋の解像度を高くなり、流束調節(flux adjustment)の必要がなくなっている。このモデルのエル・ニーニョは、温暖化に鈍感であり、上述のような変化は見られなかったと報告した。2つのモデルの差異は、熱流束の違いであると考え、HadCM2にHadCM3の熱流束を与えて再び実験を行ったところ、HadCM3の結果がほぼ再現されたと述べた。

N. Gillet (オクスフォード大学) は、HadCM3を用いて、オゾンの減少及び二酸化炭素の増加に対する北極振動(AO: Arctic Oscillation)の変化について調べた。この30年間にAOのインデックスは増大する一方であった。HadCM3は、AOの空間分布をよく表現するが、観測されたインデックスの大幅な変化はモデルに見られるインデックスの変動の幅を逸脱していた。このことから、観測されたインデックスの変化は外力によるものであると考え、オゾン量や二酸化炭素量等を変えた実験を行なった。二酸化炭素の増加に対しては、北極振動に変化が見られたが、オゾンの減少に対しては、顕著な変化が見られなかった。二酸化炭素の増加が北極振動に影響したのは、圏界面付近で見ると、極渦の外側の対流圏上部で温室効果気体により気温が上昇し、内側の成層圏下部で気温が低下したために、気温の南北傾度が大きくなり極渦が強まったためであるという見方を示した。また、極渦が強まると、極渦を弱める作用のある惑星波が赤道向きに屈折するため、成層圏突然昇温が起きにくくなると述べた。北極振動の温室効果気体に対する感度は、低解像度のモデルでは低く見積られるようである。高解像度モデルでは極渦の境界がより性格に表現されたことに加

え、惑星波の臨界層における砕波を正しく表現し、偽りの反射をなくすことが上述の過程をモデルで再現する鍵となったのではないかと思う(Enomoto and Matsuda, 2000)。

## 2.6 他の惑星、他の時代

A. P. Ingersoll (カリフォルニア工科大学、招待講演) は、外惑星の大気現象について講演した。まず、木星型惑星の共通の特徴である縞状構造を取り上げた。自転軸が公転面に対して98度傾いて横倒しになっていて、極一赤道間の温度差がほとんどない天王星にも縞状構造が見られる。このことは、縞状構造は内部熱源により形成されていることを示唆すると述べた。次に、海王星のスーパーローテーションに話題を移した。単位面積当たりのエネルギーが木星の1/20しかない海王星で、西風の風速は木星の3倍になっていることは驚きであると述べた。木星の大赤斑や海王星に見られる同様な定常渦における併合やフィラメント化などについて、衛星の写真とモデルの結果から作成された動画を並べて上映し、観測事実がモデルでよく再現されていると主張した。雲層において、定常渦の90%は高気圧性シャーの中の高気圧渦であることを指摘し、低気圧性シャーの場合において、寿命が数日以下のメソスケールの渦が存在し、雷を伴うことが多いと述べた。この雷は、湿潤対流からエネルギーを得ていることを示唆するものだと述べた。木星では渦運動エネルギーから帯状流の運動エネルギーへの変換率は、単位面積当たりのエネルギーの10%で地球より1桁大きいことなどから、雲層上端での風は内部熱源による深い対流が表面に現れたものだと主張した。

P. J. Valdes (レディング大学、招待講演) は、古気候学研究の有力な手段としての新世代の地球系モデル(Earth System Model)を紹介した。地球系モデルでは、各種境界条件を与えるのではなく、大気、海洋、植生、氷床等からなるモデルの要素が相互作用する。大気、簡素な海洋と植生を結合させた地球系モデルの成果の一例として、21,000年間のシミュレーションの結果を示した。この実験では、海洋の大きな変動を伴わなくても、気候の急激な変化があることが分かった。具体例の紹介を通じて、21世紀には地球系モデルにより古気候学研究が大きく進展するだろうという見方を示した。

## 2.7 千年紀における天気予測

T. Palmer (ECMWF) は、確率予報とその社会経済分野への応用について講演した。まず、不確定性は



方の天幕に懇談ができる場が用意された。もう一方の天幕には、官民の気象事業の展示があった。ステージでは、様々な出し物があった。例えば、レディング大学の学生有志は、お天気ジョーク満載の寸劇を上演した(第2図)。寸劇は、クリスマスに毎年恒例となっていて、彼等の十八番である。彼等は、日本でいうと気象大学の学生のような雰囲気を持っている。その他、P. H. Haynes は、KH 不安定の実験を見せた。彼のような理論家であっても、一般の人に分かりやすくデモンストレーションをするというのは、クリスマス・レクチャーの続いている英国ならではのよき伝統だと感じた。

#### 4.2 欧州気象学会と予報士制度の導入

2000年に、欧州気象学会は、設立一周年を迎えたそうである。現在の重要な課題のひとつに、予報士制度の導入があるとのことである。欧州統合により、欧州市民は欧州連合内のどの国に移動することも、労働することも自由になった。その際に、予報士の知識や技術がバラバラでは、気象事業者は高品質な予報を作成できないという懸念がある。そこで、共通の認定基準として制度の導入を検討することになった。朝食のときに、欧州気象学会の理事で、この件を担当されている方と偶然テーブルが一緒になり、この話を伺った。日本では、先に導入され6年間の実績があることや、人気のある資格であることなどとお伝えしたところ、日本に気象予報士制度があることは御存知でなかった様子だった。ぜひ合会に出席して日本での事情について話してくれと言われたが、気象庁にも支援センターにも無断でいいかげんなことを話すわけにはいかないと思い、丁重にお断りした。

#### 4.3 王立気象学会による電子雑誌の創刊

王立気象学会では、学術論文の出版までにかかる時間を短縮し、最先端の研究の成果の速やかな伝達共有に資すべく、Atmospheric Science Lettersという電子雑誌(e-journal)を発刊することとなった。興味のある方は、<http://www.academicpress.com/asl>を参照していただきたい。

### 5. 所感

気象学は裾野が広く、なかなか他の分野の話を聞く機会は少ない。上述のようにこの会議は、1セッションであったので、気象学全体を通観することができたのである。また、他の学問との関わり、歴史展望や社会の中の位置付けを議論するものであったために、こ

れから気象学で何ができるか、気象学を通して社会とどのように関わったらいいのか、よく考えなくてはならないと思った。イソップ童話に空を見上げていて井戸に落ちてしまった天文学者の話があるが、足下もまわりもよく見て歩きたいものである。

基本的に同じところに泊まり、3食を共にしたので、イギリス滞在中に世話になったレディング大学の学生やポスドクをはじめ、参加者と十分なコミュニケーションがとれた。日本からの参加者は、2名のみで、日本気象学会からの祝辞もなく、心細い思いをした。アメリカ、欧州各国はもちろん、中国、韓国、イラン、エジプトの研究者の姿もあり、イギリスの気象学はさまざまな国・地域との連携が進んでいることを象徴していた。

イギリスの気象学は、関連分野とともに、方向性を持って、国際協調しながら、リソースをうまく活用して、よく機能していると感じた。

### 謝 辞

参加費用の一部について、東京大学学術奨励金の補助を受けました。この報告に目を通して下さった中村尚助教授に感謝します。また、本稿のレビューをして下さった気象研究所の山本 哲編集委員ほか「天気」編集委員会の皆様には大変お世話になりました。なお、文中に誤りがあれば、それは報告者の不勉強によるものです。写真は、気象研究所の直江寛明氏が撮影したものです。

### 参 考 文 献

- Afanachev, Ya. D., W. R. Peltier, 1998: The three-dimensionalization of stratified flow over two-dimensional topography, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 19-39.
- Dethloff K., A. Weisheimer, A. Rinke, D. Handorf, M. V. Kurgansky, W. Jansen, P. Maaß and P. Hupfer, 1998: Climate variability in a nonlinear atmosphere-like dynamical system, *J. Geophys. Res.*, **103**, 25957-25966.
- Enomoto, T. and Y. Matsuda, 2000: Numerical experiments on the behaviour of Rossby waves in the critical layer, *Fluid Dyn. Res.*, **26**, 257-279.
- Gough, D. O. and M. E. McIntyre 1998, : Inevitability of a magnetic field in the Sun's radiative interior, *Nature*, **394**, 755-757.
- 小倉義光, 2000: 活躍する予報官—英国気象局の事例, *天気*, **47**, 527-531.

Webster, P. J., A. M. Moore, J. P. Loshnigg and R. R. Leben, 1999: Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98, *Nature*, **401**, 356-360.

Weisheimer, A., M. V. Kurgansky, K. Dethloff and D. Handorf, 2000: Long-term climate variability in a three-level quasi-geostrophic atmospheric model, *Tellus*, submitted.

### 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
ウェザーワールド2001	2001年2月23日 ～24日	(共催)気象業務支援センター, 日本ウェザーキャスター協議会 (後援)日本気象学会	大森ベルポート (アトリウム)	
第2回大気放射セミナー「地球・大気系の中の雲とエアロゾル」	2001年2月26日 ～28日	セミナー実行委員会 (後援)日本気象学会	定山溪温泉 ホテル 鹿の湯 (札幌市南区定山溪温泉)	「天気」48巻1月号
平成12年度日本気象学会九州支部講演会	2001年3月3日	日本気象学会九州支部	TNC放送会館 (福岡県福岡市早良区百道浜2-3-2)	「天気」47巻12月号
極気候変動に関する第2回和達国際会議	2001年3月7日 ～9日	第2回和達国際会議実行委員会	つくば国際会議場 (エポカルつくば) (茨城県つくば市竹園2-20-3)	「天気」47巻5月号
第47回風に関するシンポジウム	2001年3月16日	(共催)日本海洋学会, 日本風工学会, 日本気象学会, 日本建築学会, 日本航空宇宙学会, 日本地震学会, 日本地理学会, 日本農業気象学会, 日本流体力学会, 日本林学会, 土木学会	東京大学工学部11号館講堂	「天気」47巻12月号
The 3rd International Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities	2001年3月28日 ～30日	(財)高度情報科学技術研究機構	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区駒場4-6-1)	<a href="http://www.tokyo.rist.or.jp">http://www.tokyo.rist.or.jp</a>
第17回メソ気象研究会	2001年5月7日	日本気象学会メソ気象研究会	東京大学山上会館	「天気」48巻1月号
日本気象学会2001年度春季大会	2001年5月8日 ～10日	日本気象学会	東京大学本郷キャンパス (安田講堂, 山上会館)	<a href="http://wwwsoc.naccis.ac.jp/msj/others/meeting.html">http://wwwsoc.naccis.ac.jp/msj/others/meeting.html</a>
地球惑星科学関連学会2001年合同大会	2001年6月4日 ～8日	地球惑星科学関連学会合同大会運営機構 共催学会/協賛学会: 日本気象学会ほか地球惑星科学関連17学会	国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区代々木神園町3-1)	「天気」48巻1月号 <a href="http://mc-net.jtbcom.co.jp/earth2001/">http://mc-net.jtbcom.co.jp/earth2001/</a>