

第3回 NCAS 気候モデルに関するサマースクール参加報告*

小玉 知 央*¹・山崎 弘 恵*²

1. はじめに

2011年9月11日から23日に英国ケンブリッジ大学で開催された気候モデルに関するサマースクールに参加した。このサマースクールはNCASが主催して2年に一度開催されているもので、今回は3回目にあたる。第1回、第2回の様子はそれぞれ堀ほか(2008)、中野(2010)が報告している。本サマースクールに参加することで、気候を構成する各要素と相互作用、それらの気候モデルにおける実装、モデルの出力結果の解析方法、さらには政策決定との関わりなどについて、2週間という短期間で学ぶことができる。

今回の参加者が所属する大学・機関の国別内訳は、イギリスが全体の3分の2、その他のヨーロッパ諸国(ドイツ、フランス、スイス、スペイン)が3分の1弱、ブラジル・日本(小玉)が1名ずつであった。また、ケンブリッジ大学滞在中の山崎が聴講生として参加した。参加者の母国はさらに多様で、上記以外に韓国やメキシコ、米国、ルーマニアなど、国際色が豊かであった。身分は大学院生かポスドクのどちらかであった。参加者と世話役の講師はケンブリッジ大学 Selwyn College (第1図)の学寮に寝泊まりし、主にDAMTPで講義や実習に参加した。第2図はDAMTPで撮影した参加者の集合写真である。

本報告ではサマースクールのスケジュールと講義・



第1図 ケンブリッジ大学 Selwyn College.

セミナー・実習の内容について簡単に紹介する。最後の2章では現地での生活と著者らの個人的な感想を述べる。

2. スケジュール

2週間にわたるサマースクール期間中の平日のスケジュールは第1表の通りである。基本的に午前中は講義、午後から夕方までは実習、夕方以降はセミナーが行われた。これらの公式スケジュールだけで朝9時から夜9時頃までであり、密度の濃い2週間であった。

3. 講義・セミナー

参加者の様々な背景に配慮し、講義は基礎的内容から最新の話題までバランスよく取り入れられていた。講義・セミナーともに、内容は講師の個性を強く反映したものが多かった。

3.1 気候の各要素

1週目は地球の気候を構成する様々な要素について講義が行われた。

大気力学を担当したレディング大学の J. Methven

* A report of the Third NCAS Summer School on Climate Modelling 2011.

*¹ Chihiro KODAMA, 海洋研究開発機構地球環境変動領域. kodamac@jamstec.go.jp

*² Hiroe YAMAZAKI, 京都大学大学院理学研究科, 現:ケンブリッジ大学物理学科キャベンディッシュ研究所. hy277@cam.ac.uk

© 2012 日本気象学会



第2図 参加者の集合写真. Jane Strachan 氏提供.

は大気の運動のカオス性について言及した後、診断的なバランス（地衡風・静水圧・温度風）、および予報的なバランス（準地衡風）に着目しながら渦位を導いた。次にロスビー波の伝搬や上下相互作用、碎波、波動平均流相互作用を解説した。

レディング大学の R. Hogan は気候モデルにおける放射・雲スキームについて解説した。特に参加者の目を引いたのは、雲粒から電子レンジまで様々なケースについて Maxwell 方程式の数値解を示したアニメーションである (<http://www.met.reading.ac.uk/clouds/maxwell/>)。放射伝達に何となく苦手意識を持つ小玉にとっては目から鱗であった。

レディング大学の M. Ambaum は熱力学の基礎と大気の熱収支について講義した。エンタルピーを用いることで、温暖化による降水の増加など、様々な現象を簡単に説明できることを示した。

3.2 相互作用

2週目は気候の各要素間の相互作用に主眼を置いた講義が行われた。

MetOffice の J. Slingo は水循環をキーワードに、降水分布やアジアモンスーン、海洋循環、陸水循環、対流などを解説した。熱帯海上で海面水温（SST）と降水量に良い関係が見られるという図が小玉にとって新鮮であった。

レディング大学の P. L. Vidale は陸面モデルの進化について紹介し、世代毎の陸面モデルの定式化と問題点についてイラストを交えながら解説した。

East Anglia 大学の C. Le Quere は、二酸化炭素の海面吸収を意識しながら生化学過程を通じた海洋中の炭素循環について講義した。

3.3 モデルの実験設定と解析

2週目の午後には気候モデルの実験設定や解析手法について講義が行われた。

エクセター大学の M. Collins は、気候予測の不確実性評価の手法としてマ

ルチモデルアンサンブルと物理摂動アンサンブルを紹介した。

MetOffice の J. Lowe は気候変動シナリオと緩和策について論じた。全球平均気温の上昇量目標と温室効果気体の排出削減開始年に応じて、その後に必要となる削減率が大きく異なるという図が印象に残った。

レディング大学の J. Gregory は、気候感度パラメータをモデル・観測から求める試みについて丁寧に解説した。

3.4 セミナー

レディング大学の S. Woolnough はエネルギー論の観点から、様々な現象のスケール間相互作用を考察した。代表例として、マッデンジュリアン振動（MJO）の数値モデル再現性をモデル解像度などに注目して議論した。

オックスフォード大学の D. Marshall は海洋モデルと南極周極流の研究をレビューした。海洋で解像すべき渦の大きさは大気の総観規模擾乱の30分の1という模式図を示して、海洋モデルの高解像度化の重要性を分かりやすく述べていた。

エクセター大学の J. Thurnburn は、超並列計算機を見据えた次世代全球モデルの力学コアの検討状況を説明した。球面格子の切り方と変数の配置について様々な候補の長所と短所を挙げた。

第1表 スケジュールと担当講師.

日程	第1週	第2週
9:00-10:30	※講義：気候の各要素 ・大気力学 (J. Methven) ・海洋力学 (R. A. Wood) ・放射と雲 (R. Hogan) ・大気の熱力学 (M. Ambaum) ・氷床のモデリング (T. Payne)	※講義：相互作用 ・海洋大気相互作用 (R. Sutton) ・大気化学 (J. A. Pyle) ・水循環 (J. Slingo) ・陸面大気相互作用 (P. L. Vidale) ・海洋炭素循環 (C. Le Quere)
11:00-12:30 13:30-17:00	※講義と実習：数値流体力学 (H. Weller, N. Nikiforakis) ・偏微分方程式の数値解法 ・移流スキーム ・誤差評価 ・格子生成とアダプティブメッシュ ・グループプレゼンテーション ※気候実験室に向けた準備 ・気候実験室のテーマ決定 ・講義：統計 (D. B. Stephenson) ・講義：気候モデル評価 (L. Shaffrey)	※講義：実験設定と解析 ・気候予測の不確実性 (M. Collins) ・将来気候変動シナリオと緩和策のインパクト (J. Lowe) ・気候変動の検出と要因 (G. Hegerl) ・気候感度 (J. Gregory) ※実習：気候実験室 (P. L. Vidale) ・実験テーマ：SST ± 2 K, CO ₂ 倍増, 山岳除去, 植生分布除去, 火山噴火, 完新世中期 ・グループプレゼンテーション
17:00-18:00	※セミナー ・スケール間相互作用とエネルギーカスケード (S. Woolnough) ・太陽活動の長期変動と全球・領域気候への影響 (M. Lockwood) ・10年スケールの気候予測 (D. Smith) ・海洋大循環モデルと南極周極流 (D. Marshall) ・次世代気象気候モデルの力学コア (J. Thuburn)	※セミナー ・確率的地球システムモデル (T. Palmer) ・地球の炭素循環 (P. Cox) ・極端現象の要因分析 (P. Stott) ※英国式フォーマルディナー
19:30-21:00	※セミナー ・アンサンブル週間予報の解説 ・モデル性能の依存性 (P. L. Vidale) ※1次元モデルを用いた気候感度の実習 ※ポスターセッション (その1)	※セミナー ・アンサンブル週間予報の解説 ・今夏の異常気象 ※ポスターセッション (その2)

4. 実習

実習では Linux がインストールされたノートパソコンが2人に1台の割合で配布され、実際に手を動かして数値スキームの誤差評価や気候モデルの出力結果の解析を行った。

4.1 数値流体力学

1週目の実習では、移流スキームの誤差に主眼を置いた実習が行われた。

初日はレディング大学の H. Weller が線形移流方程式の初歩とセミラグランジアンスキームについて講義・実習を行った。また、MetOffice の最新の気候モデルである HadGEM を中心に、水平格子の切り方や変数の配置について解説を行った。

2日目以降はケンブリッジ大学の N. Nikiforakis

が様々な偏微分方程式（熱伝導方程式・移流方程式・圧縮性流体方程式）の数値解法について講義・実習を行った。参加者は予め用意されたプログラムを用いて、初期・境界条件や CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件などを規定するパラメータを自由に動かし、テキストを参考にしながら数値解の挙動を考察した。週の後半では、より高度な内容として、格子の大きさを解の挙動に応じて局所的に細分化するアダプティブメッシュ法 (AMR) を用いた全球モデリングの研究紹介が行われ、参加者は実習用モデルを用いたトレーサー移流実験を通して AMR の有効性を検証した。1週目の土曜日には各自が試した内容を発表し、講師や参加者から質疑を受けることでお互いの理解度を確認した。

以上のように、短い時間で多くの内容をカバーするため講義は駆け足であった一方、講義の内容をすぐに実習で試することができるのはとても効率が良いと感じた。特に山崎は、個人で本格的なプログラムを組むのは困難な全球アグティブモデルが実習用に整備されていることに感銘を受けた。一方、提供されたプログラムの仕様や時間的な制約から、実習中にプログラムの中身を書き換えたり自分自身でプログラムを書いたりすることは困難だったため、実習の意義をきちんと理解できないままパラメータを動かして終わってしまう参加者もいたように思える。著者らにとっては、数値流体力学をどう教えるか、という観点からも大いに参考になる実習であった。

4.2 気候実験室

1週目の金曜日から2週目にかけて、参加者自ら気候モデルを動かして出力を解析する実習が行われた。

1週目の木曜日までに、「専門分野が異なる」「異なる国から参加」「好きなプログラミング言語が一緒」といった条件をなるべく満たす人とペアを組むことを求められた。上の条件を満たす数が多いペアから順に実験テーマ(第1表参照)を選ぶことができる。このようなペアの組み方は、初対面の参加者同士で会話のきっかけができて非常によいと感じた。小玉らは SST を現在気候に比べて 2 K 上昇・下降させる実験 (SST \pm 2 K 実験) を行い、気候場へのインパクトを調べることになった。同一の実験テーマを選んだ2、3組のペアでグループを作り、各ペアが行った解析の結果を一つにまとめてサマースクール最終日に発表することになる。各グループにはチューターが1人つき、技術的な支援や発表内容のアドバイスをしてくれた。

はじめに MetOffice の前世代の大気モデルである HadAM3 をノートパソコン上で動かした。初期・境界条件の作成や物理過程の設定はグラフィカルな処理ではほぼ完結しており、間違いが起きないように配慮してあった。解析は与えられた課題や興味に応じてペアで相談しながら行うが、最終的には複数のペアで解析結果を持ち寄り、一貫した流れの発表を行うことが求められる。限られた時間の中、ペア内で解析方針を話し合い、グループミーティングで他のペアと議論しながら一つの発表に仕上げしていく作業は新鮮であった。英語を使って多人数で行う議論に慣れない小玉は、次々に変わる議論の流れについていけず、なかなか発言のタイミングをつかめなかった。言うは易しではあ

るが、つたない英語でも自分の意見をどんどん表明するしたたかさを身につけなければと強く感じた。

5. 夜のセッション

夕食後は場所を学寮がある Selwyn College に移し、サマースクール校長の P. L. Vidale 監修のもと、さらに1時間程度のセミナーや実習が行われた。

毎週月曜日には ECMWF が発表した1週間の週間予報、金曜日には週間予報の成績についてブリーフィングがあった。ケンブリッジ周辺の気温といったローカルな話題だけでなく、パキスタンの洪水やアメリカのハリケーン、日本上陸直前に突然進路を変えた台風第6号など、様々な話題が提供された。定期的に気象のブリーフィングを行うことは、気候を知る上でも重要であると強調されていた。

1週目の火曜日と2週目の水曜日には参加者によるポスター発表が行われた。掲示場所を確保できなかった都合でポスターを一番前に掲げて全員の前で発表するという変わった形式ではあったが、活発な質疑応答が行われた。

1週目の木曜日には1次元の大気海洋モデルを用いた簡単な実習が行われた。このモデルは Excel 形式で予め用意され、放射強制力を入力すると過去100年程度の地上気温が自動的にプロットされる仕組みになっている。不確定性の範囲内で放射強制力の値を変更し、できるだけ過去の気温を説明できるようにモデルを「チューニング」することが与えられた課題であった。小玉は(どの気候モデルでも多かれ少なかれやっていることとはいえ)都合のいいようにパラメータを動かす是非が気になったが、どの要素がどれだけ気候に影響を与えるかを学習する上で面白い教材であると感じた。

サマースクール最終日の前夜は英国式のフォーマルディナーが開催された。2週間濃密な時間を共有しただけあって、参加者同士で写真を撮り合うなど打ち解けた雰囲気であった。

6. 日常生活

平日は朝9時から夜9時、発表準備などがある場合はさらに遅い時間まで講義や実習をこなした。一日のすべてのイベントが終わった後は、多くの参加者はぐったりしているように見えた。体力の残っている参加者(もしくは発散したい参加者?)は、Selwyn College 内にあるバーで適当な相手を見つけてグラス



第3図 学内のあちこちで見られる芝生上の看板と Selwyn cat の Gus (Elise Croft 氏提供)。ケンブリッジの学生にはお馴染みの立て看板も、Gus はおかまいなしのようだ。

片手に歓談したりしていた。

サマースクール折り返しの土曜日の午後と日曜日にはまとまった自由時間があり、著者らは Selwyn College や King's College といった大学 College のいくつかを見学し、ケンブリッジの街を散策した。ケンブリッジ大学全体で31個ある College の各構内にはよく整備された大きな庭園と学生寮があり、リスやウサギなどの小動物のほか、カレッジ内を流れるケム川沿いにはたくさんの川鳥が学生らと共存していた。構内の芝生にはもれなく「KEEP OFF THE GRASS」の注意書きがあり、芝生の上を歩くことができるのはカレッジのフェローの特権だそうだが、Selwyn College の飼猫 Gus に限っては特例のようだった(第3図)。土曜日の夜には、サマースクールの仲間と共にケンブリッジで一番古いといわれているパブ「イーグル」に赴き、歴史ある雰囲気の中でエールビール片手に互いの国の文化などについて語り合った。折しもロンドン近郊で暴動が起きた記憶がさめやらない時期であったが、ケンブリッジの街は人も街も雰囲気が非常に良かった。

7. おわりに

小玉は、気候モデルを網羅的に学べること、気候を研究している同年代の若手研究者と交流できること、に魅力を感じてサマースクールに参加した。2週間という長丁場であるにも関わらず、どのイベントも準備がとてもよく行き届いていて驚いた。サマースクール校長の P. L. Vidale に伺うと、今回のサマースクール

で一番苦労したのはファンディングの獲得であるとのことであった。第1回、第2回ではサマースクールのタイトルに UJCC (UK Japan Climate Collaboration) を冠していたが、第3回となる今回は UJCC がタイトルから外れ、日本からの参加費は全額日本側負担となった。このようになった詳しい経緯は分からないが、ファンディングの財政悪化に加えて、日本からの参加者が前回1人と少なかったことも一因ではないかと推察する。本サマースクールは気候システムを網羅的に学ぶ貴重な機会であり、第一線で活躍する研究者による講義は独自性にあふれた興味深いものである。何より、様々な背景を持った同年代の若手研究者・学生と寝食をともにしながら交流できる貴重な機会である。小玉は時にはお酒の力で語学力の不足を補いながら、好きな漫画の話から日本の地震や原子力発電所の状況まで語り合ったのは貴重な経験となった。また、講義や参加者との交流は自身の研究を見つめ直すよいきっかけを与えてくれた。2年後に予定されている次回はぜひ、日本からも多くの若手が参加されることを期待している。参加には少なからず費用がかかるので、若手研究者・学生を指導する立場にある方にはぜひ、利用可能なファンド情報を積極的に提示しつつ、このサマースクールへの参加を促して頂けたら幸いである。

(小玉知央)

山崎は、滞在先の研究室リーダー N. Nikiforakis がサマースクールの世話人の一人であった縁から、正規に参加を申し込んではいなかったものの、主に前半の1週間に参加させていただいた。当初は「聴講生」として有名講師陣の講義のいくつかでも聴講できればと思っていたのだが、参加者もスタッフも非常に親切かつフレンドリーで、気付けばグループ実習にもしっかり加わっていた。モデリングがテーマのサマースクールということで、普段モデル開発に携わっている山崎としては、何らかの形でモデルに関わっている、あるいはモデルに興味のある同年代ばかりが集まっている中議論ができるのは刺激的であった。滞在先での研究との両立は大変だったが、それ以上に2週間という短い期間に母国の違う仲間と研究や将来について語り合い、これから同じフィールドで研究をしていく者同士として確かなつながりを持てたことは嬉しく、参加させてもらえて本当に良かったと思った。モデルを志す若手には2年後の次回への積極的な参加を勧めたい。

(山崎弘恵)

謝 辞 (Acknowledgements)

We express our sincere gratitude to Prof. P. L. Vidale at University of Reading, the head of the school, and Dr. M. Roberts at the MetOffice for their kind support and tireless effort to this project. Our thanks also go to the School lecturers and tutors for their great talks and advice. In addition, we are grateful to the Selwyn College for its resources and support. The second author offers her special thanks to Dr. N. Nikiforakis for his generous sponsorship.

第1著者の渡航費と参加費を全額支給してくださった JAMSTEC 次世代モデリング研究プログラムに深くお礼申し上げます。

略語一覧

AMR : Adaptive Mesh Refinement アダプティブメッシュ法
DAMTP : Department of Applied Mathematics and

Theoretical Physics 応用数学理論物理学教室

ECMWF : European Centre for Medium - Range Weather Forecasts ヨーロッパ中期予報センター

HadAM : Hadley Centre Atmospheric Model ハドレーセンター大気モデル

HadGEM : Hadley Centre Global Environment Model ハドレーセンター全球環境モデル

MJO : Madden Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動

NCAS : National Centre for Atmospheric Science 英国大気科学研究センター

SST : Sea Surface Temperature 海面水温

参 考 文 献

堀 E. 正岳, 立入 郁, 杉村 剛, 大西 領, 大塚浩司, 東塚知己, ロスビンタルティカルティカレストリ, 草原和弥, 2008 : 第1回 UJCC-NCAS 気候モデルに関するサマースクール参加報告. 天気, 55, 475-480.

中野満寿男, 2010 : 第2回 UJCC-NCAS 気候モデルに関するサマースクール参加報告. 天気, 57, 229-231.