

UK-Japan Climate Collaboration MOU Project

Project Leaders

Julia Slingo	NCAS-Climate, Walker Institute for Climate Research, University of Reading, U.K.
Dave Griggs	Met Office Hadley Centre, U.K.
Malcolm Roberts	Met Office Hadley Centre, U.K.
Pier Luigi Vidale	NCAS-Climate, Walker Institute for Climate Research, University of Reading, U.K.
Keiko Takahashi	The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan

Authors

Malcolm Roberts ^{*1}, Adam Clayton ^{*1}, Pier Luigi Vidale ^{*2},
John Donners ^{*2} and Marie-Estelle Demory ^{*2}

*1 Met Office Hadley Centre

*2 NCAS-Climate, Walker Institute, University of Reading

In order to study the relevance of mesoscale processes to the large-scale mean climate in coupled and atmosphere-only GCMs, the UK-Japan Climate Collaboration project has developed a model matrix composed of atmospheric resolutions at 135km, 90km and 60km, and ocean models of 1 degree and 1/3 degree, all based on the Met Office Hadley Centre HadGEM1 formulation. The four coupled models in this matrix have been integrated for over 50 years, and the atmosphere-only models for 24 years (AMIP2-mode), so that both mean climate and its variability can be studied.

A wide variety of climate system processes have been studied to understand the impact of enhanced resolution. The simulation of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is much improved in the high-resolution coupled model, related to an improved mean state produced by the explicit representation of tropical instability waves in the ocean. The distribution of tropical cyclone strengths indicates that a larger proportion of intense events develop at higher resolution, with important consequences for climate and weather impacts work. While the Madden-Julian Oscillation seems to be less sensitive to model resolution, experiments in which convective processes are adapted to model resolution show improvements in the representation of the diurnal cycle.

Keywords: resolution, climate, ENSO, tropical cyclone, MJO

1. Introduction

The Earth Simulator Center (ESC), NERC's National Centre for Atmospheric Science (NCAS-Climate) at the Walker Institute, and the Met Office Hadley Centre (MOHC) signed a Memorandum of Understanding for 5 years in 2002, to collaborate on advanced climate system research. Our aim is to produce ground-breaking climate simulations on the Earth Simulator, by developing high resolution models derived from the MOHC HadGEM1 model [1], including 150km, 100km and 60km atmosphere, and 100km and 30km ocean resolution models. Higher resolution models will enable the representation of smaller scale processes, and it is the interaction of such processes with both the large-scale mean climate, and other emergent processes, that will help to better understand and reduce model uncertainty as well as building scientific capability. Such resolutions are also essential to represent regional detail for climate adaptation and impacts work. Our research

will also help to define the appropriate resolution for the next generation MOHC models such as HadGEM3.

2. Project status

During the course of 2006, multi-decadal integrations of at least 50 years of the coupled model matrix (four models) were completed, together with 20 year AMIP atmosphere integrations (three models); see Table 1 for details. This rich resource of model data is now being exploited, in collaboration with the HiGEM consortium in the UK, to understand various climate processes including: ENSO, the MJO, the Indian summer monsoon. Given the high resolution capability of the Earth Simulator, we are also investigating contributions by weather elements not normally resolved by climate models, such as mesoscale convective complexes, tropical cyclones and tropical instability waves.

The UJCC model matrix after 2 years

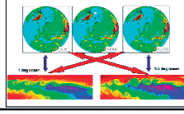
		ATMOSPHERE → 'higher resolution'			
↑ 'higher resolution'		at 50N →	N96: 1.5° ≅135km	N144: 1.0° ≅90km	N216: 0.6° ≅60km
↑ 'higher resolution'		1/3°	cross-res: low-Atm/hi-Ocn. 50 yrs	HiGEM 70 yrs	NUGEM 1yr, under development
OCEAN		1° -1/3°	HadGEM 70 years	cross-res: hi-Atm/low-Ocn. 50 yrs	
		ATMOSPHERE → 'higher resolution'			
AMIP2 forcing		HadGAM 30 years	HiGAM 30 yrs	NUGAM nx20 yrs	

Table 1 The UJCC matrix of coupled and AMIP atmosphere-only model integrations.

2.1 Model development, optimization and analysis tools

The primary model development and optimization effort has concentrated on the 60km NUGAM model, in order to improve model stability and efficiency.

Problems with gravity wave drag, filtering and diffusion have been overcome, with much help from Met Office staff, so that several 20 year integrations have been completed. Improved datasets for land surface properties, soils and albedo have also been developed so that the heterogeneity found in observations is reproduced in the model. Significant advances in model optimization have also been made, so that the model's efficiency is augmented by a factor of 2.5. The main gains in performance come from reducing the I/O that the model uses, and such improvements have also been passed back to the Met Office and the HiGEM consortium, to be applied to NWP and lower resolution models.

The Plot atlas is a web interface to browse through a collection of plots, enabling the comparison of model runs and climatologies for many variables and over all seasons. On-screen menus allow for a quick navigation through the different variables, model runs, seasons and climatologies, using multiple panels and overlays. Many climatologies are currently available, all with their own strengths (reanalyses, objective analyses, satellite data, inverse modelling). The comparison of the same plots for different models facilitates the collaboration between UJCC and other research groups: our climate model data collection currently comprises results from four research groups in the UK-Japan collaboration.

2.2 Science

(a) Tropical Pacific

The main analysis during 2005 concentrated on the tropi-

cal Pacific simulation in the coupled models, and how this improved as model resolution was increased. This work was completed in 2006, and a paper completed on it [2]. The main conclusions are that tropical instability waves (TIWs), which form near the equator due to shear instabilities in the ocean, play a primary role in converging heat on to the equator and hence warming the SSTs there. Such waves are poorly resolved at low ocean resolution, even when model parameters are given extreme values. The improvement of the SSTs due to the TIWs has important consequences for the atmospheric circulation, giving an improved Walker circulation along the equator and better placement of convection in the West Pacific warm pool. Three publications involving TIWs are originating within UJCC and HiGEM.

(b) ENSO

The 50+ year length of the coupled climate integrations enables analysis of model variability mechanisms such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO). ENSO is the primary interannual global climate signal: as such, it is vital to represent ENSO properly in order to understand global and regional variability. ENSO was rather weak in HadGEM1, and remains so in HadGEM1.1, but in the high resolution HiGEM1.1 model (also reproduced by the HiGEM1.2 model run in the UK) it is simulated extremely well. The Nino3 SST standard deviation is improved (0.73, 0.87, 0.96 for HadGEM1.1, HiGEM1.1 and HadISST [3] observations respectively), the power spectrum shows high power at 5–7 year periods and the teleconnections for SST and precipitation are well simulated. Examining the mechanisms for ENSO in the different model resolutions suggests that there is a role for the ocean (where waves along the thermocline

seem to be better represented) and for the atmosphere (for feedbacks which help to flip the state between warm events and cold events) with the higher resolution HiGEM1.1 model. Two publications, currently in preparation (one UJCC and one HiGEM) will document this work.

(c) Madden-Julian Oscillation (MJO)

During the year, a basic analysis was performed to assess the variation of MJO characteristics within the UJCC model matrix; particularly the sensitivity to resolution and basic-state changes. Later, this was extended to include data from an atmosphere-only version of MIROC, kindly provided by our Japanese collaborators.

The coupled UJCC models were all found to produce reasonable simulations of the MJO, with relatively minor variations between them. In particular, the strength and the spatial and temporal scales are all well-captured. The plots in Fig. 1 illustrate the propagation of (a) observed, and (b) modelled convective anomalies on MJO timescales. The model captures well the observed propagation of the anomalies across the Indian Ocean (40E–100E), but fails to capture its propagation into the Western Pacific (120E–). This is thought to be related to basic state errors in the Equatorial Pacific. A

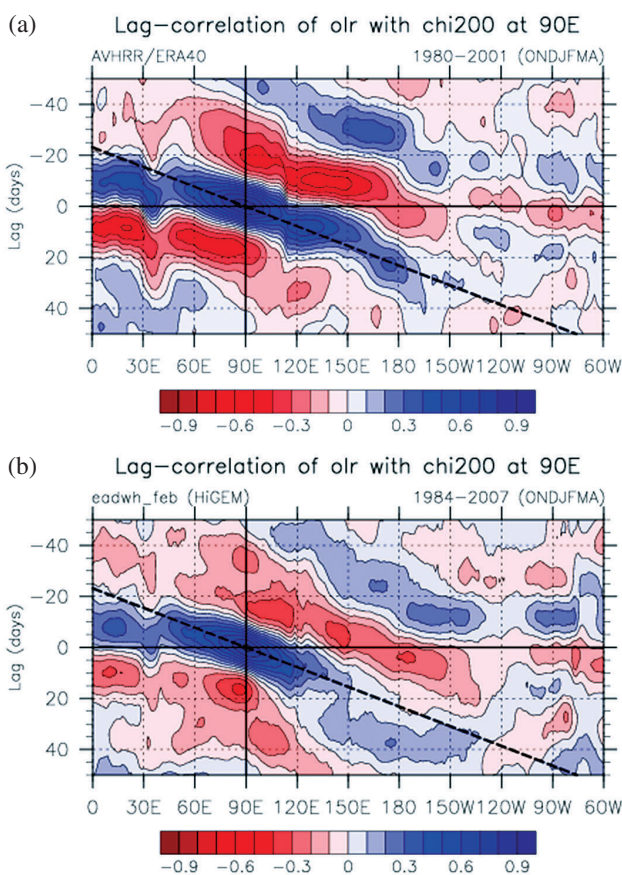


Fig. 1 Lag-correlation of outgoing long wave radiation (OLR) and velocity potential at 200 hPa (χ_{200}), with reference longitude at 90E. (a) AVHRR/ERA-40 observations [3], (b) HiGEM1.1 climate model integration.

publication with UK and Japanese groups active in this area will follow.

(d) Tropical cyclones

Analysis of the AMIP integrations at different model resolutions (and including results from Japanese GCMs) shows that the properties of tropical cyclones (TCs) vary strongly with resolution. The intensity distribution shifts towards a profile with relatively less weak events and more of the very strong events (see Fig. 2), with a long tail. Statistics also suggest enhanced formation of TCs off Africa, which improves the Central and North Atlantic distribution. These results suggest that resolution is crucial for such processes. Further work will analyse winds and precipitation associated with the TCs, and in particular regional tracks and impacts and interaction with ENSO and MJO. New simulations are underway, using idealised SSTs and also high-resolution SSTs from the coupled model, to address the nature of tropical cyclones in a warmer climate. A joint UK-Japan publication on the impact of high resolution on tropical cyclone simulation is planned, with a possible successor using the scenario simulations.

(e) CAPE and convection

A fundamental mode of variability of the global climate system is the diurnal cycle, associated with solar forcing. The response to this forcing is therefore a key test of the correctness of many, interacting processes in a climate model. The tropical land surface warms up and soil moisture evaporates during the day, resulting in a buildup of moist static energy in the boundary layer; this is released in the afternoon between 2 and 4pm, normally through convective precipitation. Convective precipitation in the HadGEM1 model, however, peaks around noon, because the convection

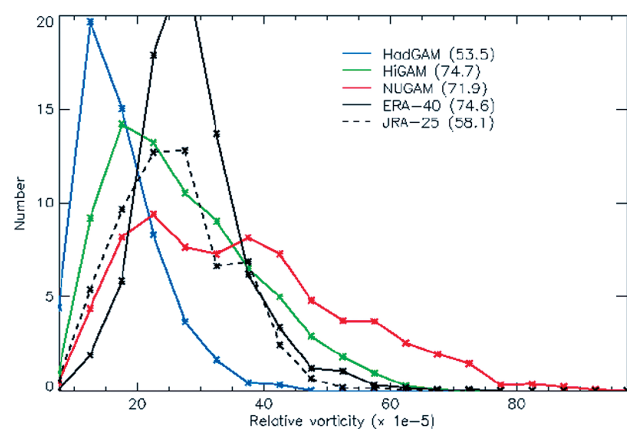


Fig. 2 Histogram of the number of tropical cyclones per year (Number) against their maximum relative vorticity ($1/s \times 10^5$) for three 20-year AMIP simulations using different model resolutions, together with ERA-40 [3] and JRA-25 [4] reanalyses. The number of TCs per year is in brackets.

responds too fast and too vigorously to the build-up of moist static energy. We have altered the time scale of the CAPE relaxation in the model, linking it to large-scale vertical velocity, which controls in part how readily convective towers can develop. Figure 3 depicts the local time of the peak in convective precipitation, and it shows that this change in the model brings the simulation much closer to the observed afternoon maximum over tropical land areas. A publication is in preparation.

Aim and objectives for 2007

As well as continuing analysis on the above topics, there will be many new areas to consider in 2007. A climate change integration using the HiGEM1.1 model with a 2% increase in CO₂ per year, currently underway, will be completed, as well as a long integration of the 60km atmosphere model with an idealised increase in SSTs. Several timeslice integrations are also planned, using the SSTs from the HiGEM1.1 climate change run to force the NUGAM model. Such integrations will allow the study of how small scale processes change under warming (for example tropical cyclones, ENSO), and how such changes might affect the large-scale mean climate during warming. This also contributes to the understanding of model uncertainties under climate change. Important mid-latitude processes such as the extra-tropical transition of tropical cyclones will also be studied, as well as further analysis of the interaction of the MJO, ENSO and tropical cyclones.

Acknowledgements

This work is funded by the Climate Prediction Programme of the UK Department of the Environment, Food and Rural Affairs, the Natural Environmental Research Council, the U.K. Foreign and Commonwealth Global Opportunities Fund, and supported by The Earth Simulator Center.

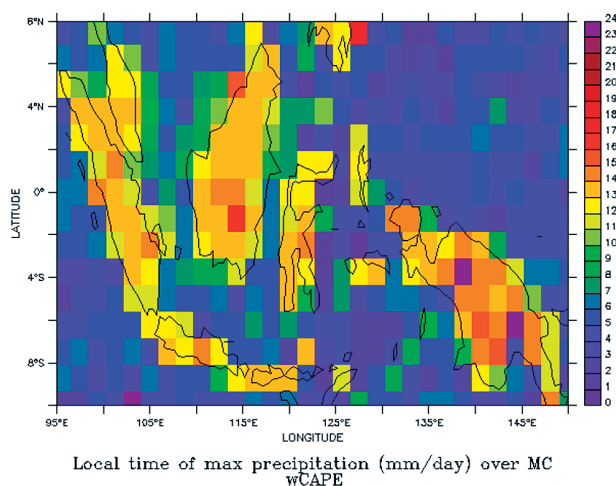


Fig. 3 The local time (24 hr clock) of maximum precipitation over the Maritime continent for the HadGAM simulation with the CAPE timescale based on the model vertical velocity (see text for details).

References

- [1] T. Johns and 24 co-authors, "The new Hadley Centre climate model HadGEM1: Evaluation of coupled simulations". *J. Climate*, 2006, 19, 1274–1301.
- [2] M. J. Roberts, A. Clayton, M.-E. Demory, J. Donners, P. L. Vidale, W. Norton, L. Shaffrey, I. Stevens, "UJCC: Impact of resolution on the tropical Pacific circulation in a matrix of coupled models". *J. Climate*, submitted.
- [3] N. A. Rayner, D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, A. Kaplan, "Global analyses of SST, sea ice and night marine air temperature since the late nineteenth century". *J. Geophys. Res.*, 108, 2003.
- [4] S. M. Uppala and Coauthors, "The ERA-40 reanalysis". *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2981–3012, 2005.
- [5] K. Onogi, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, J. Tsutsui, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, S. Kadokura, and K. Wada, "JRA-25: Japanese 25-year re-analysis project -progress and status". *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 3259–3268, 2005.

UK-Japan Climate Collaboration MOU project

プロジェクトリーダー

Julia Slingso	NCAS-Climate, Walker Institute for Climate Research, University of Reading, U.K.
Dave Griggs	Met Office Hadley Centre, U.K.
Malcolm Roberts	Met Office Hadley Centre, U.K.
Pier Luigi Vidale	NCAS-Climate, Walker Institute for Climate Research, University of Reading, U.K.
Keiko Takahashi	The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

著者

Malcolm Roberts*¹, Adam Clayton*¹, Pier Luigi Vidale*², John Donners*², Marie-Estelle Demory*²

*1 Met Office Hadley Centre

*2 NCAS-Climate, Walker Institute, University of Reading

大気海洋結合モデルと大気大循環モデル単独による、メソスケールプロセスの大規模気候平均場への関連性を研究するために、イギリス-日本気候共同研究プロジェクトでは、135km、90km、および60kmの解像度の気候大循環モデルと1度、および1/3度の海洋大循環モデルを用いて、異なる解像度を組み合わせた結合モデルを開発してきた。これらの大気、海洋モデルのそれぞれは、英国気象局ハドレーセンターのモデルHadGEM1の定式化に基づいたモデルである。異なる解像度の組み合わせのうち、4つのケースの大気海洋結合モデルを使用して50年積分と、また大気大循環モデル単独によりAMIP2-mode条件下で24年間の積分を、それぞれ地球シミュレータ上で実行し、それらの結果を利用して、気候平均場や気候変動についての解析を行っている。

気候システムプロセスの非常に多様なテーマについて、高解像度でのシミュレーションのインパクトを解明するための研究が行われている。エルニーニョ南方振動(ENSO)の再現は、高解像度の気候大循環モデルにより大きな改善があり、その改善は、海洋における熱帯の不安定波を精度よく再現したことによる平均場の改善がもたらしたものであることがわかった。また、熱帯低気圧の強度分布については、高解像度のシミュレーション結果では、強いサイクロンの数が増え、気候や気象研究との重要な関連があることを示している。一方、マッデン-ジュリアン振動(Madden-Julian Oscillation: MJO)は、解像度にはそれほど感度が高くないようである。モデルの解像度に大きな影響を受ける対流プロセスのシミュレーションでは、日変化の再現において改善を示した。

キーワード: resolution, climate, ENSO, tropical cyclone, MJO

1. Introduction

地球シミュレータセンター(ESC)、Walker研究所NERC大気科学ナショナルセンター、UK Met Officeハドレー気候研究センターは、5年計画の共同研究のための覚書(MOU)を締結し、2002年より共同研究を開始している。本MOUに基づくUK側の目的は、大気モデルとして150km、100kmおよび60km、海洋モデルとして100km、30kmの異なる解像度を組み合わせて、高解像度の気候大循環モデルMOHC HadGEM1を開発し、地球シミュレータ上で画期的な気候シミュレーション結果を生み出すことである。高解像度のモデルは、より小さなスケールのプロセスの再現が可能であり、大規模な平均気候場や、プロセス間相互作用は、大規模な平均気候場と小さなスケールの顕著現象プロセスの両方を伴うので、科学的な可能性の構築と同時に、モデルの不確定性のよりよい理解と減少のための一助になる。高解像度であることは、気候変動への適応や影響に対して、領域の詳細な事象再現のためには本質的であり、HadGEM3のような次世代

MOHCモデルに対する適切な解像度を定義する一助ともなる。

なお、本邦文報告においては、紙面の制約から、図表については、英文本文中の対応する表と図を参照していただきたい。

2. Project status

2006年は、Table 1に示す4つの異なる解像度の結合モデルを用いた50年積分に加えて、AMIP(Atmospheric Model Intercomparison Project: 理想的な条件下で大気大循環モデルの基本的な物理性能を、異なるモデル間で比較する国際プロジェクト)条件下での20年の数値実験を終了した。現在、その結果は、UK側のHiGEMコンソーシアムにおいて、ENSO、MJO、インディアンサマーモンスーンを含む様々な気候プロセスの解析が進められている。加えて、メソスケール対流の複雑性、熱帯低気圧、熱帯不安定波など、地球シミュレータ上で高解像度シミュレーションの結果により初めて可能となる様々な気象要素の解析を進めている。

2.1 Model development, optimization and analysis tools

モデルの安定性と効率を改善するための開発と計算性能最適化は、60km解像度のNUGAMモデルに対して集中的に行った。重力波ドラッグ、各種フィルタリングや拡散についての課題は、UK Met Office スタッフとの共同研究により解決し、これらの改善により数ケースの20年積分を終了した。また、地表面特性、土壤水分やアルベドの改善により、観測で得られる不均一性を、モデルにおいても再現することが出来た。計算性能最適化は、主に入出力データ量の削減によって、2.5倍の計算性能向上を達成し、これらの成果はUK Met OfficeやHiGEMコンソーシアムへフィードバックされ、数値気象予報や解像度がより粗いモデルへも適用している。

Plot atlasは、モデルの計算条件と、変数や季節ごとの気候値の比較を容易にするためのウェブ・インタフェースである。画面上のメニューにより、複数のパネルとオーバーレイを使って、種々の変数、モデルラン条件、季節、および気候値について、迅速な比較を行うことが可能である。異なるモデル間における同じ条件における結果比較は、UJCCと他の研究グループの間の共同研究協力を促進することになり、現在4研究グループの結果の比較が可能である。

2.2 Science

(a) 熱帯域域太平洋

2005年に行った結合モデルにおける熱帯域太平洋のシミュレーションにおける高解像度による結果の改善については、文献[2]にまとめている。主な成果は、熱帯不安定波 (tropical instability waves: TIWs) についてである。TIWsは海洋中のシア不安定による赤道域の不安定波であり、赤道域の熱的収束に主要な役割を果たしており、TIWsに起因して海洋表面温度 (sea surface temperature: SST) が上昇する。その不安定波は、モデルパラメータを変化させても低解像度では解像できない。TIWsによるSST分布の改善は、赤道に沿うウォーカー循環を改善し、西太平洋暖水域における対流位置の改善をもたらす。これらの結果は、UJCCとHiGEMの共同研究として3編の論文としてまとめた。

(b) ENSO

50年以上の結合モデルによる気候シミュレーションは、エルニーニョ南方振動 (El Niño-Southern Oscillation: ENSO) の変動メカニズムの解析を可能にする。ENSOは、年々変動の全球気候シグナルとして主要なものであり、全球と地域変動性を理解するためには、ENSOを適切に再現することが重要である。ENSOはHadGEM1では弱く、HadGEM1.1モデルについても同様であったが、高解像度HiGEM1.1では極めてよく再現された。

Nino3域のSST標準偏差が改善し、HadGEM1.1で0.73、HiGEM1.1では0.87、観測値 (HadISST) では0.96である。パワースペクトルは5-7年で高い値を示し、SSTと降水分布に対するテレコネクションがシミュレートされた。異なるモデル解像度におけるENSOのメカニズム研究結果は、よ

り高い解像度のHiGEM1.1モデルにおける海洋の役割 (温度躍層に沿った波がよりよく再現される) と大気の影響 (暖気による事象と冷気的事象間の転換に関連するフィードバック) が示唆される。

(c) Madden-Julian Oscillation (MJO)

UJCCモデルの異なる解像度の組み合わせにおいて、マッデンジュリアン振動 (Madden-Julian Oscillation: MJO) の特徴的バリエーションを調べるための基礎的な解析を行った。特に、解像度と基本状態変化に対する感度評価を行った。その後、解析対象を拡張し、MIROC (東京大学気候システム研究センターにて開発している大気海洋結合モデル) の大気モデルの結果データを対象とした。UJCC結合モデルは、どのモデルの解像度においても、比較的あまり差がなく妥当なシミュレーション結果を得た。特に、Fig. 1は、MJO時間スケールの対流の変位の伝播を示しており、(a)は観測値、(b)はモデルによるシミュレーション結果である。シミュレーション結果は、インド洋(40Eから100E)を横断する変位の伝播をよくとらえてはいるが、西太平洋(120Eより東方)への伝播を現すことができなかった。これは、赤道域太平洋における基本場のエラーに関連していると考えられる。UKと日本の共同研究では、継続してこの領域の解析を続ける予定である。

(d) Tropical cyclones

異なる解像度に対するAMIP条件下での積分結果の解析により、熱帯低気圧 (Tropical Cyclones: TCs) の特徴は、解像度により非常に変化することが示されている。TCsの強度分布は、解像度が高くなると相対的に弱い台風が少なくなり、個数の分布は広範であるが非常に強い熱帯低気圧が存在する傾向に推移している (Fig. 2)。統計的解析結果においても、アフリカ沖の熱帯低気圧が強化され、これらが中央および北大西洋におけるTCsの分布を促進することが示唆されている。これらの結果は、熱帯低気圧プロセスにおいては、解像度が非常に重要であることを示唆している。熱帯低気圧に関連する風、降雨についての解析、および特定領域における進路、ENSOやMJOへのインパクトや相互作用について、さらなる研究が行われる予定である。現在、より温暖化した気候における熱帯低気圧の特徴をとらえるために、理想的なSSTと結合モデルによる数値実験から得られた高解像度のSSTを与えた場合の異なる条件下での新たなシミュレーションを準備中である。

(e) CAPE and convection

全球の気候システムにおける基本モードは日サイクルであり、太陽による強制力に密接に結びついている。従って、この強制力への応答は、気候モデルにおける多くの相互作用過程の妥当性の重要なテストとなる。日中、熱帯の地表面は暖まり、土壤水分が蒸発し、その結果として、境界層における湿潤な静的エネルギーが蓄積され、通常午後2時から4時のあいだに、対流性降雨を通して開放される。しかし、HadGEM1モデルにおける対流性降雨は、主に正午

にピークがある。その理由は、対流の湿潤な静的エネルギーの蓄積に対する応答が、速すぎかつ活発すぎるからである。私たちは、どれほどすぐに対流性のタワーが発達できるかについての一部をコントロールし、大規模な垂直速度と結び付いているモデルの対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy: CAPE) の緩和に要する時間スケールを変化させた。Fig. 3は、対流性降雨のピークをローカル時間で示しており、この変更により、観測結果により近いシミュレーション結果が得られた。

Aim and objectives for 2007

上記の課題の解析と同様に、2007年はさらに新たなテーマを取り上げることになる。CO₂が1年に2%漸増する設定で、HiGEM1.1モデルを使用した気候変動実験を準備中で、実行予定である。また、水平解像度60kmの大気モデルにおいて理想的なSSTの上昇のもとでの長期積分を行う予定である。

HiGEM1.1を用いた気候変動実験から得られたSSTをNUGAMモデルに与えたタイムスライス実験も計画してい

る。このような数値実験は、温暖化の下では、どれくらい小さなスケールのプロセスが変化するのか(例えば熱帯低気圧やENSOなど)、そのような変化が大規模スケールの平均的な気候にどのような影響をあたえるのか、についての研究を可能にし、また、気候変動における不確定性の理解にも貢献することになる。熱帯低気圧の温帯低気圧化のような、中緯度における重要なプロセスについても、MJO、ENSO、熱帯低気圧の相互作用についてのさらなる解析と同様に、さらなる研究が進められる予定である。

Acknowledgements:

本研究は、英国環境・食料・農村地域省自然環境研究会議 (Department of the Environment, Food and Rural Affairs the Natural Environmental Research Council (NERC))、英国外務連邦省グローバル・オポチュニティー・ファンド (the Natural Environmental Research Council, the U.K. Foreign and Commonwealth Global Opportunities Fund (GOF)) から研究費を得ている。