

我が国における地球温暖化予測研究

～IPCC 発足前後, そしてその後～

—2014年度藤原賞受賞記念講演—

時 岡 達 志*

2014年の日本気象学会藤原賞を頂き心より感謝しております。受賞記念に「天気」に何か書くようにということで考えましたが、今回の受賞対象の一部に関係する我が国における地球温暖化予測研究を振り返ってみることにいたしました。IPCC (気候変動に関する政府間パネル; Intergovernmental Panel on Climate Change)¹⁾発足時から IPCC 第2次評価報告書作成に至る間、IPCC の第1作業部会 (WGI: 科学的評価担当) の活動に関わってきましたので、そのあたりのことを特に中心的に、当時の事実関係の記録として参考になることを意識して記述することにします。

1. IPCC 発足時とそれまでの我が国における関連研究の状況

IPCC が発足したのは1988年11月です。ここで言う CC (Climate Change) は一般的なものではなく人為的影響によって引き起こされている地球温暖化のことです。世界気象機関 (WMO) と国連環境計画 (UNEP) が合同で設立し、その1か月後に国連総会においてそれは endorse され、翌1989年1月に英国のニューネームに於いて IPCC・WGI の第1回会合が開催され、WGI の活動が始まりました。IPCC が設立されるというニュースが気象庁に伝わったのは、1988年6月にジュネーブで開催された WMO 第40回執行理事会に長官代理で出席した企画課国際協力班長の出張報告からでした。この執行理事会において、

WMO と UNEP が合同で IPCC を設立する案件が議論され採択されたということでした。当時私は気象研究所気候研究部第1研究室の室長をしておりました。このニュースが伝わった時点で、(計算機資源不足のため) 我が国では地球温暖化予測研究を行っていませんでした。しかし IPCC というものが設立されとなれば我が国においても地球温暖化予測研究を行わないわけにはいかず、国内事情を考慮すれば気象研究所気候研究部がそれをやらねばならない部署であることは明白でした。私は直ちに研究計画を修正し、気候研究部第1研究室において、計算機資源を最も必要としない大気・海洋混合層結合モデルによる地球温暖化予測研究に着手することにしました。

ここでまず、その時点までの我が国における関連研究を振り返っておくことにします。我が国において大気大循環モデル開発が本格的に始まったのが1980年でした。気象研究所が高円寺からつくばに同年3月に移転し、それを機に大型電子計算機が気象研究所に導入されたからです。山崎孝治さん、谷貝 勇さんに加えて、その年に異動してきた野田 彰さん、鬼頭昭雄さん、そして更にその後異動してきた尾瀬智昭さんを加えて、荒川昭夫さんが率いる UCLA グループの開発した大気大循環モデルをベースとしたモデルの開発に取り組み、それをを用いた性能検証実験や、地表面条件に対する大気循環の応答実験などを行っておりました (Tokioka *et al.* 1984, 1985, 1986, 1988; Kitoh and Tokioka 1986; Tokioka and Noda 1986; Tokioka and Yagai 1987; Kitoh *et al.* 1988a, b; Yamazaki 1988など)。

* 海洋研究開発機構統合的気候変動予測研究分野 (2015年3月末退職)。t2t0t2t9@a-net.email.ne.jp

—2015年3月31日受領—

—2015年4月24日受理—

¹⁾ IPCC について詳しく知りたい方は <http://www.ipcc.ch> や <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/> などを参照されたい。

当時、米国に於いては既に大気・海洋大循環結合モデルによる実験が行われており (Manabe and Hahn 1977; Manabe *et al.* 1979; Manabe and Broccoli 1985; Manabe and Stouffer 1988など), またそれを用いた地球温暖化予測研究もなされておりました (Schleginger *et al.* 1985; Stouffer *et al.* 1989; Washington and Meehl 1989). しかし, 気象研究所の計算機の能力を考えた場合, とても大気・海洋大循環結合モデルを走らせられる環境ではありませんでした. 私は海洋研究部第1研究室室長の遠藤昌宏さんと相談し, 将来の本格的な結合モデル開発を行う前に, 全球海洋ではなく, 計算機の負担が少しでも軽い, 太平洋域のみで大気と相互作用する大気・太平洋結合モデル開発を行うことにしました. 1986年のことです. この背景には, 当時大きな注目を浴びていた ENSO (El Niño-Southern Oscillation) のメカニズムに関する研究に, このような限定的な結合モデルでチャレンジするのも面白いのではないか, という思いがあったからです. 1987年度から新たなメンバーとして加わった長井嗣信さんに主としてこれに取り組んでもらうことにしました. その成果は後に Nagai *et al.* (1992) としてまとめられました.

こういう状況のところ IPCC が設立されるというニュースが伝わってきたわけです. 私は, 大気・太平洋結合モデル研究のほうの比率を下げ, 大気・海洋混合層結合モデルによる CO₂ 倍増時の気候シミュレーションに, より多く関わることにしました. この研究は野田さんに主としてやってもらいました. 翌年の1月に予定されている IPCC・WGI の第1回の会合までに残されている時間は半年しかありませんでしたが, それまでに何とか頑張って結果を出しておきたいということで, 野田さんには大急ぎで研究に取り組んでもらいました. このモデルによる現在気候と CO₂ 倍増時の気候データを作成し, 真鍋淑郎さん達がまだ調査しておられない降水形態の変化に的を絞った研究に取り組むことにしました. このために, モデルが降水量を計算する全ての時間ステップ (1時間間隔) の降水データを全ての格子点でダウンロードするという, 当時としては異例の大量のデータセットを作成し解析をしました (Noda and Tokioka 1989). その結果の一つを第1図に示します.

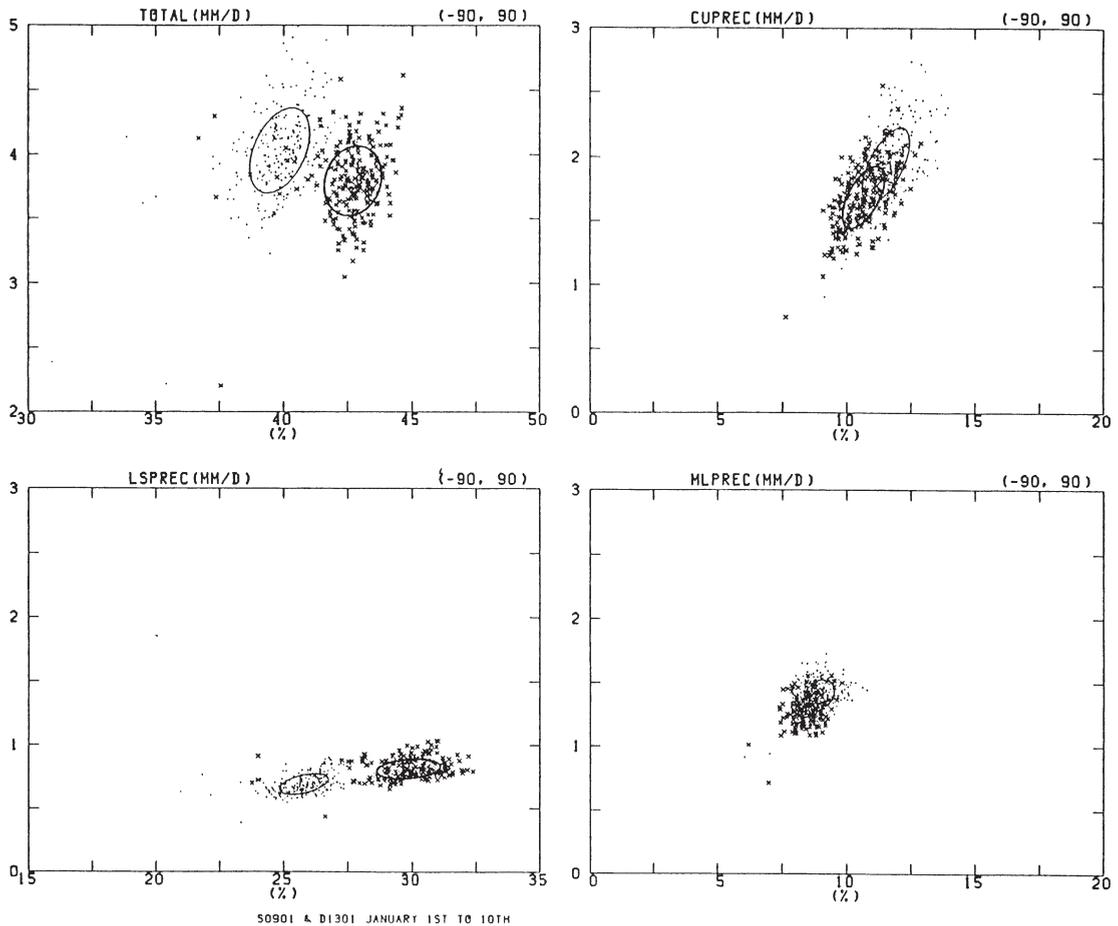
この解析では, 1時間内に地球上で降水が生じた格子点面積の総合計 (横軸) と総降水量 (縦軸) が CO₂ 倍増によりどのように変化するかを見ました. 御

覧のように現在と CO₂ 倍増時とは, この2次元平面上でそれぞれデータはほぼ楕円内に分布しますが, それぞれの楕円の中心が, CO₂ 倍増に伴い降水の生じる総格子点面積は減少するにもかかわらず総降水量は増加する方向に変化しています. このことは「全球平均で見て降水量と同時に降水強度が増加する」ということを示しています. この背景となる個々のイベントを考えると「現在よりも危険な豪雨発生の増大」を考えざるを得ません.

モデルの降水は, (パラメタ化した積雲対流モデルが計算する) 大気境界層に根を持つ積雲対流による降水と, 格子点の水蒸気量が飽和水蒸気量を超えることで生ずる大規模凝結, そして大気境界層より上の大気中で生ずる中層対流による降水, に分けられますが, 第1図のような変化は積雲対流による降水が増加し, 大規模凝結による降水が減少することで生じていることが分かりました. こういう変化は温暖化に伴って生じてもおかしくない変化であり, IPCC・WGI の第1次評価報告書 (Houghton *et al.* 1990) では我々の論文を引用して, 全球規模で生ずるこの降水形態の変化のことに触れております. 但し, モデルでは積雲対流自身をパラメタ化して取り扱っており, この結果が本当に正しいということはその後まだちゃんと調べられておりません. 最近の高解像度化した (しかし依然として積雲対流はパラメタ化した) 結合モデルにおいても, そして対流群を直接解像する NICAM (Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model; 佐藤 (2010) を参照) の結果についても調べられていません. 現在進行中の HPCI (High Performance Computing Infrastructure) 戦略プログラム分野3の中で, 解像度14 km, 7 km, 3.5 km の NICAM による温暖化時のデータが作成されつつあり, それを用いて是非この点を出来るだけ迅速に調査してほしいと思います.

2. IPCC・WGI の活動開始から IPCC 第1次報告書作成に至る時期

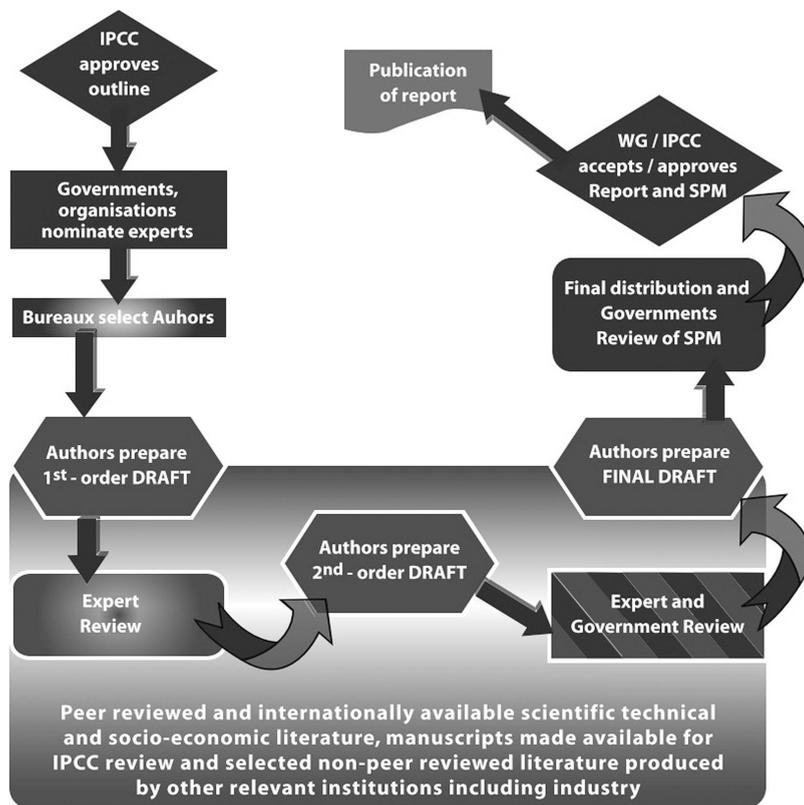
IPCC・WGI の第1回会合は先に述べましたように1989年1月下旬に英国のニューネハムで開かれ, WGI の活動が始まりました. その事務局は WGI の議長国である英国に置かれ, 英国気象局 (UKMO) の関係者たちが非常に張り切っていたのが印象的でした. IPCC 第1次評価報告書を翌年 (1990年) に取りまとめるということで, それに向けての議論が始まり



第1図 Noda and Tokioka (1989) によって得られた現在気候 (×) と大気中 CO₂ 濃度倍増時 (•) の全球平均の1時間降水量 (単位 mm/day; 縦軸) と降水の生じたモデルの格子点面積の全球表面積に対する割合 (横軸). 大気・海洋混合層モデルによる結果で, 1月について図にしたもの. 左上が全降水, 右上が積雲対流による降水, 左下が大規模凝結による降水, 右下が中層対流による降水. 用語に関しては本文を参照されたい.

ましたが, 第1回会合の冒頭で, IPCC の議長であるポリン氏から, 「我々が取りまとめなければならないのは評価報告書であって研究報告書ではない, この点をくれぐれも取り違えることの無いように」という念押しがありました。報告書で取り上げるべき内容に関しては, 地球温暖化の全体的な事項の記述に加えて, 地域的な変化の特徴についても取り上げるよう極力努めること, また, この報告書の執筆責任者の選定においては地域的なバランスに加えて, 経済発展段階の異なる国からも執筆者に加わってもらい, バランスを取ることを確認しました。IPCC 第2次評価報告書以降では, 第2図に示す手順に従って執筆責任者が決められ

ておりますが, 第1次評価報告書に関しては, 初回であり未だこのような手続きが明確になっておらず, また評価報告書の取りまとめの時期が切迫していて執筆者を早く決める必要があったためでしょうか, WGI の執筆責任者の選定は第2図とは異なり WGI の事務局が中心となって執筆責任者候補を決めて行ったと理解しております。兎に角, 私は第5章「Equilibrium Climate Change」の執筆責任者の一人に内定しました。確か第1回会合の1か月後位だったと思います。この章の他の執筆責任者は J. F. B. Mitchell, 真鍋淑郎, V. Meleshko の各氏でした。



第2図 IPCCにおける評価報告書を取りまとめる手順を示した図。左上のところに評価報告書の執筆責任者を決めるプロセスが示されている。

3. 我が国における最初の大気・海洋大循環結合モデル開発

各国における大気・海洋大循環結合モデル（以下結合モデルと略す）を用いた地球温暖化予測実験の実績は、IPCC 発足時においてはアメリカの3チーム（GFDL, NCAR, OSU）によるものを除いて有りませんでした。しかし、IPCC 第2次評価報告書の取りまとめが1995年頃になることがはっきりするにつれ、大気大循環モデル研究を行っている世界中の研究機関が結合モデル開発に急遽取りかかろうとしていることが明白になりました。我が国では1990年時点において、仮に結合モデルが存在していてもそれを走らせる計算機はありませんでしたが、我々も気象研究所において1990年から“走らせるあてのない結合モデル”の開発に取り掛かりました。大気・太平洋結合モデルは既に開発していたので、その経験（Nagai *et al.* 1992）は貴重でした。大気の水平解像度は東西5度、南北4度、海洋の方は東西2.5度ですが、南北方

向には大気・太平洋結合モデルでの経験をもとに ENSO のような年々変動も再現できる結合モデルにしようと考え、海洋中の赤道ケルビン波を精度よく表現できるように赤道近傍では0.5度にし、徐々に間隔を大きくして緯度12度より極よりでは南北2.5度としました。

結合モデル開発における最大の難問は現実的な海水分布の再現であり、これに関しては試行錯誤やむなしと覚悟して始めました。本井達夫さんがこの部分の担当で、このモデルのテスト実験をするための計算機資源確保に四苦八苦しながら開発を進めました。世の中は非常に面白いもので、丁度これとほぼ時を同じくして、お隣の国立環境研究所に地球環境研究センターが設立されるというニュース

が伝わってきました。1990年10月に設立されるとのことで、そこには大きいスパコンも導入になるということも伝わってきました。このあたりの詳細についての記憶はやや不確かですが、確か国立環境研究所に当時おられた秋元 肇さんを通して、そこに導入されるスパコンを我々が（無償で）使ってよい、という話が伝わってきたと思います。それまで計算機資源に関して全く見通しの無いまま、気象研究所の計算機のほかに日立製作所や、その当時共同研究を進めていた東京電力の好意で提供してもらった計算機も使って開発していたところに、突然遠くに光がさしてきたのを覚えています。地球環境研究センターには NEC の SX II が導入されるということも分かりました。それからは、NEC サイドのご好意にも甘えて NEC の山梨県の工場の方に出向いてモデルのテストランをしたこともありましたが、当時、結合モデル開発メンバーの中で最も若かった行本誠史さんには現地まで出かけて活躍してもらいました。

4. IPCC 発足後の国内における新たな動きとハドレーセンターの発足

IPCC が設立されて以降、我が国において地球温暖化問題に対する各省庁の認識が進み、関係するいくつかの省庁でそれに対する新たな施策がとられました。地球環境研究センターの設立は環境庁によるそういう施策の一つでした。気象庁では、1991年度より気象庁の特別研究として地球温暖化予測研究を気象研究所で行うこととなり、その年の10月に気候研究部にそのための研究室が新設されました。文部省においては、東京大学に気候システム研究センターを1991年4月に設立し、これに続いていくつかの大学に環境という名称の入った新組織を順次新設していきました。

では外国ではどうだったのでしょうか。残念ながらこのことについて具体的な情報をちゃんと収集したわけではありませんが、IPCC 第1作業部会の諸会合に出席し、いくつかの国からの参加者と話をしたことをもとに判断する限りにおいて、英国以外の主要国においては我が国における動き程度の施策のようでした。英国における施策が日本を含め他の国と異なっていたのは、IPCC・WGIの事務局を引き受けているUKMOに対する集中した即効的な投資を行った点においてでした。その施策の中心はハドレーセンターの新設でした。英国において地球温暖化予測研究を中心に研究センターとしてハドレーセンターを設立し、そこに大型のスパコンを導入しました。しかも全てが素早く実施され、1990年5月にウィンザーで開催されたWGI本会議に合わせてハドレーセンターの開所式が執り行われました。開所式はその当時UKMOのあったブラックネルで行われましたが、私を含めてWGI本会議に出席していた十数名が招かれました。そこには時の首相であるサッチャーさんも列席されました¹²。これは私にとって大きな驚きでした。ハドレーセンターの開所式に一国の首相が列席されるとい

うことは、我が国に置き換えてみれば気象研究所の開所式に首相が列席されるようなもので、信じられないことでした。それだけ英国としてはハドレーセンター設立を重要視し、且つ首相御自身もその活躍に大きな期待を寄せておられたということでしょう。

ハドレーセンターに関する印象を続けて記しますと、その予算規模の急激な拡大と、異例な予算の流れの導入に触れないわけにはいきません。組織上はUKMOの下部組織であるハドレーセンターですが、その全予算のおよそ7割が環境省からの予算でまかなわれ、残りの3割が従来通りのUKMOからの予算(従って関係する研究部門の予算が一举にほぼ3倍になった)、しかも環境省からの予算はUKMOを通すことなく直接ハドレーセンターに来るというものでした。英国においてもこのようなお金の流れは異例中の異例とのことでした。以下はこれらのことから行った私の推測ですが、IPCC・WGIの議長国になることやハドレーセンターの設立に対してサッチャー首相は積極的に指導力を発揮されたのではないのでしょうか。このような迅速で即効性のある英国の執った施策がハドレーセンターのメンバーひとりひとりの研究意欲を鼓舞したことは間違いなく、IPCC第2次評価報告書での英国の活躍は目覚ましいものでした。

5. 結合モデルによる我が国で初めての地球温暖化実験

さて、話を気象研究所における結合モデルによる地球温暖化予測実験に戻しましょう。モデルを開発してもそれを走らせる計算機資源の当てのないまま開始したモデル開発でしたが、お隣の国立環境研究所に新設された地球環境研究センターに導入されるSX IIを使わせてもらえることとなり、なんとかIPCC第2次評価報告書に間に合わせられるように実験を実施できる目処が立ちました。この実験のために提供してもらった計算機資源量は、正味140年間(70年×2)の時間積分を行わねばならないのに対して170年分の積分用の計算機資源量でした。初めて走らせる結合モデルによる実験であり、通常であれば正味に要する計算機資源量の数倍をかけてもおかしくないのですが、それを、一度のやり直しもできない計算機資源量しか要求しませんでした。これは完全に私のミスでして、どうして少なくとも必要量の2倍の340年分程度の要求をしなかったのか、現在その理由を思い出そうとしましたが思い出せません。兎に角、余分に走らせる

¹² この時のサッチャー首相の挨拶は<http://www.margareththatcher.org/document/108102> に載っております。サッチャー首相はオクスフォード大学で化学を専攻した政治家で、科学をよく理解する政治家としての一面に興味を持たれる方は以下のサイトもご覧ください。
<http://www.chem.ox.ac.uk/history/>
<http://www.margareththatcher.org/document/107346>
<http://blogs.royalsociety.org/history-of-science/2013/04/17/prime-ministers/>

のは僅か30年分の時間積分のみ、という中で実験を行いました。我々の場合、南極周辺の海水に関しては幸運なことにほぼ気候分布に近いものが最初から再現されていて問題有りませんでした。問題は北極海の方に生じました。これに対するモデルの調整を行いました。その調整の成否を、モデルを十分走らせて確認すべきところを、本番の計算に必要な計算機時間確保を優先して考え、テストランを十分行わなかったことが今となって悔やまれます。

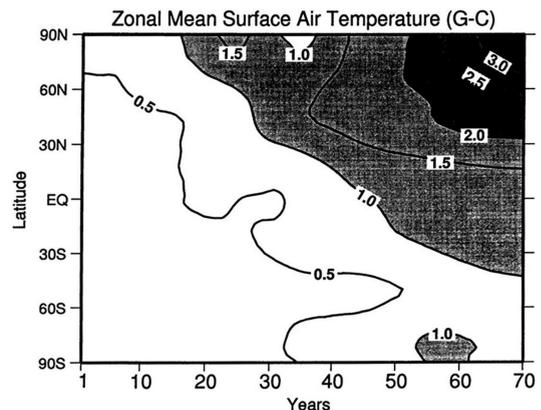
我々にとって初めての結合モデルによる実験 (Tokioka *et al.* 1995) では、温暖化時の気候変化の特徴に関しては、南北半球の非対称性、特に南極周極流域での温暖化の遅延に関して、既に発表されていた結合モデル実験の結果 (Stouffer *et al.* 1989 など) とほぼ同様であることを確認しました (第3図)。我々の実験で私が個人的に最も興味を抱いていたのは、結合モデルで再現される自然の気候変動でした。現在気候についての70年分の積分で得られた海面水温の変動に関して EOF 解析をすると、PDO (Pacific Decadal Oscillation) によく似たパターンが最大の長期変動モードとして検出されました (第4図)。私はこの結果を確認できて、我々の行った初めての結合モデル実験は、実験前に行うべきモデルの事前検討・調整が十分行えず心残りな点はありませんでしたが、大気と海洋間の10年規模での相互作用に関する限り、我々のモデルはそれを正しく再現し得ていることを確信できました。モデルで再現された年々から10年規模の変動に関する解析結果は、第2次評価報告書が出た後に Yukimoto *et al.* (1996) としてまとめられました。

IPCC・WGIの第2次評価報告書 (Houghton *et al.* 1995) は予定通り1995年に取りまとめられましたが、これの執筆者の選考は第2図の手順で進められました。その結果、私は第6章「Climate Models - Projections of Future Climate」の執筆者の

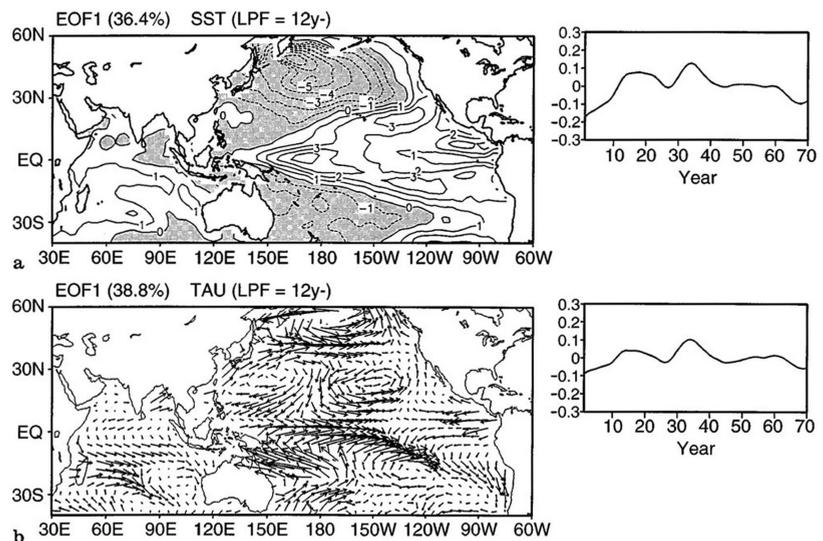
一人となり、更に鬼頭さんが第5章「Climate Models - Evaluation」の執筆責任者の一人となって、取りまとめに貢献いたしました。

6. 科学技術庁における新たな動き

IPCCの発足を受けて、各国とも地球温暖化に関する



第3図 Tokioka *et al.* (1995) による我が国で最初の大気・海洋大循環結合モデルによって得られた東西平均地上気温の緯度・時間変化図。実験では大気中CO₂濃度は1%/年の割合で増加させている。70年後に大気中CO₂濃度は倍増している。



第4図 Tokioka *et al.* (1995) の実験で得られた現在気候を再現した70年分のデータについて、最も卓越する長期の海面水温変動モードを解析したものの (Yukimoto *et al.* 1996)。海面水温 (左上図) と海面風の水平構造とそれぞれの振幅 (右図) を示す。

る研究の強化を行いました。予測研究の分野に関して言えば、前にも記しましたが、即効策をとり、その通りにその効果を素早く出したのが英国でした。英国のとった対応措置が、おそらく研究現場から上がった提案をほぼその通りに実現させる（研究を実施しているところを集中的に強化し、研究にとって不可欠な計算機環境を整備する）というものだったからでしょう。翻って我が国における対応をみてみますと、結果的に色々なところへの分散投資という形になっておりました。そういう中で、1990年代半ばから我が国においても状況に変化の兆しが表れてきました。当時の科学技術庁が、あることを発端に科学技術政策を見直し、後の科学技術基本法の施行（1995年11月）、そして科学技術基本計画の決定（1996年7月）に繋がる、新たな動きを開始しました。その中で、いくつかの柱の一つとして地球環境問題が取り上げられたからです。その動機はともあれ、このことは我が国の地球温暖化予測研究にとっては大きな朗報でした。松野太郎氏（当時北海道大学大学院環境科学研究科教授）を部会長とする地球科学技術部会なるものが航空・電子等科学技術審議会（航電審）の下に立ち上がり、1996年6月に「地球変動の予測の実現に向けて」という報告書を取りまとめました。私もこの部会の委員の一人としてこの報告書の作成に関わりました。この1年後に、同じく松野太郎氏を部会長とする計算・科学技術推進委員会の「地球シミュレータの推進について」という報告書がまとめられました。私も、同じくこの報告書作成に関与しました。この両報告書は一見して、ある目的達成（地球温暖化予測研究推進）のもとに綿密に計画されたもののように見えますが、その大本をたどれば実は両者は全く別途の動機に根差したものでした。故三好 甫氏（当時の材料科学技術振興財団参与、後の地球シミュレータ研究開発センター長）は、かねてより新たなスパコン開発のアイデアを持ち、当時そのような計算機の出現を最も待ち望んでいた地球科学分野のためにそれを開発したいと考え、1993年頃から地道に自らの夢の実現のためにスパコンのユーザーと目される関係者からの情報収集やスポンサーである科学技術庁への働きかけに動いておられました。それが「地球変動予測に向けて」の報告書と（偶然なことに）ほぼ時を同じくして実現に向けて動き出し、地球温暖化予測研究、そして地球科学のためのコンピュータ開発、ということになってきたからです（この間の詳しい事情に関しては「地球シミュレータ開発

史（海洋研究開発機構 2010）」を参照されたい）。この事は、地球温暖化予測研究の振興を願うものにとっては願ってもない幸運なことでした。このような背景があつて1997年10月に地球フロンティア研究システム¹³なるものが宇宙開発事業団と海洋科学技術センターとの共同研究事業として発足しました。地球シミュレータ開発は1997年4月の「地球シミュレータ研究開発センター」の発足とともに開始され、2001年度末に完成する運びとなりました。こういう事情で、我が国における、後の“地球システム統合モデル”開発へのしっかりとした道筋が実質的に出来上がりました。

物事の新たな展開は、関係者の地道な努力の結果として達成されます。しかし、その達成に至る鎖のつながりは“時の女神”のいたずらによって理想的に繋がることがあります。我が国における地球温暖化予測のための地球システム統合モデル開発への道筋が出来上がったのも、まさにこのような時の女神の助けが働いたから、と私には思われてなりません。物事の新たな展開には、このような時の女神の助けが結構重要なものかもしれません。

2002年3月、予定通り地球シミュレータが横浜（現海洋研究開発機構の横浜研究所）に完成し、2002年度よりその運用が始まりました。その発足当初、浜松町のビルで研究を開始した地球フロンティア研究システムも、この稼働開始を機に横浜に移ってきました。システム長であった松野太郎氏をはじめとして、多くの関係者の努力の積み重ねにより、私にとっての長年の夢であった地球温暖化予測研究施設と環境がやっと横浜に揃い、2002年度より研究が本格的に始まることとなりました。

7. 横浜研究所における予測研究活動の開始

完成なった地球シミュレータを用いて素晴らしい成果を上げるための新たなビッグプロジェクトが2002年10月から立ち上がりました。皆さんご承知の、文部科

¹³ 地球フロンティア研究システム発足の詳しい経緯を知りたい方は松野（1998）を参照してください。地球フロンティア研究システムの発足により、我が国の気象分野において大学や政府系研究機関の研究者が、このような大型プロジェクトに兼務や出向という形で加わることが一般的となり、また関係する若手研究者の就職先にもなりましたが、こうしてこの分野の研究者数の増加が図られました。それは主に任期制雇用の研究者の増加によるものでした。

第1表 文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト（2002～2006年度）」で取り組まれた7つの課題と課題代表者。

課題番号	研究課題名	主管研究実施機関名	研究代表者
1	大気海洋結合モデルの高解像度化	東京大学気候システム研究センター	住 明正
1	同上	電力中央研究所	丸山康樹
2	地球温暖化予測統合モデルの開発	地球フロンティア研究システム	松野太郎
3	諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化	東京大学生産技術研究所	安岡善文
3	同上	東京大学大学院理学系研究科	日比谷紀之
4	高精度・高分解能気候モデルの開発	地球科学技術総合推進機構	野田 彰
5	広域水循環予測及び対策技術の高度化	三菱重工工業株式会社	植田洋匡
6	水資源予測モデルの開発	山梨大学	竹内邦良
7	四次元同化システムの高度化及びデータセットの整備	地球フロンティア研究システム	淡路敏之

学省「人・自然・地球共生プロジェクト（通称共生プロジェクト）」の開始です。これは5年計画のプロジェクトで、7つの研究課題を備えたものでした（第1表）。この立ち上げに関して私は何も関与しませんが、2003年4月より地球フロンティア研究システム地球温暖化予測研究プログラムのプログラム長に就任した関係で、このプロジェクトに間接的に関わることとなりました。この中で注目された研究課題の一つが、炭素循環変化と気候変化とを連立させて環境変化を予測する環境変化予測モデル（通称気候システム統合モデル）の開発でした。もう一つは、直接的に地球温暖化予測とは関係しませんが、松野太郎氏がかねてから提唱しておられた、長年静力学平衡近似のもとにシミュレーション研究を行ってきたものをやめ、本来の流体力学方程式に立ち返って超高解像度大気モデルNICAMを構築しようという研究¹⁴であり、どちらも地球フロンティア研究システムで積極的に取り組まれておりました。これら以外に、従来の気候モデルによる地球温暖化予測研究も当然ながら入っていて、地球シミュレータを用いて成果を出そうという共生プロジェクトは世界的に注目される成果を上げ始めました。そしてその成果の一部は2007年に取りまとめられたIPCC第4次評価報告書に大きく貢献しました。

¹⁴ NICAMは直接地球温暖化予測と関係ないと書きましたが、松野氏がこのようなモデル開発の必要性を考えられた主たる理由の一つは、地球温暖化時の台風の動向予測結果に確信を持つには、積雲対流をパラメタリゼーションしない全球大気大循環モデルによる研究が必要である、と考えられたためであったことを書き添えておきます。

5年計画の共生プロジェクトの終了を引き継いで、地球温暖化問題により特化した文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム（通称革新プログラム、第5図）」が2007年度より5年計画のプログラムとしてスタートしました。この中の長期気候変動予測研究課題の課題代表として私は革新プログラムに関わることとなりました。更に、この終了を引き継いで2012年に立ち上がった「気候変動リスク情報創生プログラム（通称創生プログラム）」では、安定化目標値設定に資する地球温暖化予測課題のプログラムオフィサー（PO）として現在関与しております¹⁵。これらのプログラムの中で、地球システム統合モデルの開発は現在も続けられております。新たに付け加えられた炭素循環に関係する部分の精緻化は着実に進展しておりますが、このモデルが500年から1000年程度先までの予測モデルとして信頼して使えるようになるのに今後どの程度の年月を要するのかを予測するのはまだ難しい状態です。炭素循環に関する部分のモデルの検証、そして統合モデル全体の検証に関して、その道筋がまだ明確に見通せないからです。

地球システム統合モデルの高度化は時間を要する課題です。本来ならこの高度化したモデルによる1000年程度先までの予測に基づいて地球シナリオの選択の議論がなされるべきですが、それに至るまでの段階では、簡易地球システムモデルによる結果などを総合してシナリオ選択の議論はなされることとなります。これらのモデルを用いた研究により、既に現在までに分かってきたことをきちんと整理し、理解しなが

¹⁵ 2015年3月末で退きました。



第5図 文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム（通称革新プログラム、2007～2011年度）」の概要図。

ら地球シナリオ選択の議論をしていくことが重要です。これまでに地球システム統合モデルにより明確にされてきたことの中で最も注目すべきことは、大気中CO₂濃度を安定化させるシナリオを実現させようとすると、安定化達成段階で許される人為起源のCO₂総排出量は、現在の排出量の9割以上の削減をしなければならないということです。しかも、このシナリオの下では、安定化させる大気中CO₂濃度レベルに応じて地球表面の気温は一定幅上昇したところで安定化します。そこで松野氏は、9割以上の人為的CO₂排出量の削減が達成できるのであれば、もう少し頑張って10割削減にはどうか（ゼロエミッションシナリオ）ということを提唱しています。これを実現できれば、時間はかかりますがやがては産業革命前の濃度レベルまで大気中のCO₂濃度は徐々に低下してゆき、それに応じて地球表面気温も産業革命前のレベルにまで戻っていきます。問題なのは、この戻っていくプロセスです。この辺りの理解を今後の研究によりしっかり解明する必要がありますが、現在既に分かっていることは、ゼロエミッションにして最初の数十年程度の期間は、（炭素循環の中で表層の生態系の比較的早いプロセス間の調整が成り立つ期間で）大気中のCO₂濃度は相対的に早く低下しますが、この比較的早いプロセス間でのバランスがほぼ成り立ったのちは、海洋

の深層循環によるCO₂吸収プロセスによって支配されるレジームに入ってしまう、CO₂濃度変化は1000年スケールで考えなければならない非常にゆっくりしたスピードに低下するという事です（Nohara *et al.* 2013など）。大事な点は、最初の数十年程度の間ほどの程度の大気中CO₂濃度低下が実現するかを明確に知ることです。

8. 今後への期待

現在、地球システム統合モデルはまだ開発の途上で、いつ頃の程度にモデルが進展するかを見通すのは難しいですが、その一方

で、これまで既に排出された人為的CO₂排出量と、今後も予想される排出量を基にした将来の気温上昇を考えますと、予測にはある程度の不確実性の残る中ではありますが、将来の地球環境をどのような状態で維持していくかということを見通して、そのためのCO₂排出削減に入るべき時点に現在既に達しているように思います。その際に考慮すべき要件に関しては色々議論が分かれるところがあるかもしれませんが、私にとってはやはり大幅な水位上昇を回避するシナリオの選択を真剣に考えるべきと考えております。

グリーンランド氷床の90%の消失で6m超の水位上昇がocこり（Ridley *et al.* 2010）、更に南極氷床の消失によりその10倍程度の水位上昇が見積もられております。これを避けようと思えば、数年前までは、全球平均地上気温上昇を1.9度～5.1度以下に抑えなければならない（Gregory and Huybrechts 2006）、といわれておりましたが、最近これが大幅に厳しい値に見直されてきています。Robinson *et al.* (2012)は0.8～3.2度（最良の見積もりは1.6度）という結果を出しています。これまでの見積もりでは、氷床融解により氷床地形が変化していくプロセスを考慮していなかったようで、それを考慮するとこのような厳しい値となるということです。Nohara *et al.* (2015)によると、彼らの提唱するZ650シナリオでは2150年段階で

ゼロエミッションが実現できたとすれば、気温上昇が2度以上になる期間を比較的短期間にとどめられ、それ以降の深層循環プロセスで支配される極めて緩やかな大気中CO₂濃度低下、そして地上気温低下のフェーズに入っていくことが示されています。しかし気温上昇をRobinson達の最良の見積もりである1.6度以下に抑えようとするならば、CO₂ゼロエミッションを始めねばならない年は2150年よりも前倒しにしなければなりません。今後この辺りの議論に必要な予測情報が緊急に求められます。

IPCCの活動が始まって4半世紀が経ちました。しかしながら地球温暖化問題の解決に安心して辿りつける道にいつ世界が到達するのか、それを予測するのは現在なおできない状態です。私は偶々大気大循環モデル開発に関係していたため地球温暖化予測研究に関わることとなり、予測研究に軸足を置きつつ地球温暖化問題について考えてきました。この小文を閉じるに当たり、現在私が地球温暖化問題について考えていることと、その予測のためのモデル開発研究体制について少し述べさせていただきたいと思います。

まず第一点は、地球温暖化予測研究は研究としてやっているだけでは駄目で、その結果を地球温暖化の影響を研究する人達、対応策を研究する人達、そして対応のための技術開発研究に携わる人達、にもよく知ってもらい、お互いに関連する情報の共有をしっかりと図ることの大切さです。IPCCではすでにこのことを認識して、発足当時、第1（予測研究）、第2（影響評価研究）、第3（緩和策などの研究）作業部会間の連携が必ずしも密でなかったところを改善し、連携を強化するための仕組みを導入しています。我が国においても関係者はそのような必要性を認識してそのように動きつつありますが、実質的にお互いの情報交換を密にする動きを加速していただきたいと思いません。

第二点は以下の通りです。我々は地球温暖化問題から、地球の地表面でのエネルギーバランスを人間活動により不用意に壊せば、それは気候変動を引き起こすことになるということを、身を以て経験してしまいました。今後これ以上CO₂以外の要因による更なる気候変動問題をひきおこさないため、地表面でのエネルギーバランスを変えないという観点からの地球環境監視を現在以上にしっかりしていかねばなりませんし、そのための監視体制を確立すること、そしてそれに基づいて全世界が協力して地表面でのエネルギーバラン

スを維持していく仕組みを構築することが必要です。気候変動枠組条約（UNFCCC）の締約国会議（COP）、あるいは他のしかるべき機関で、やがてはこのようなことが議論されることになるでしょうが、各国の多様な利害得失を超えて、このような状態の実現することを願います。その実現を少しでも加速させるために、より明確な地球環境変化予測を実現させること、これが私の願っている夢であります。

最後に、地球温暖化予測などのためのモデル開発研究について触れたいと思います。25年前に比べれば我が国における現在の関連する研究環境は非常に良くなっており、地球フロンティア研究システム発足以降、計算機資源を含め研究環境の改善が如何にこの分野の研究を発展させていくうえで有効であるかということを実感してまいりました。しかしながら現在の体制にはまだまだ改善の余地があり、今後地球環境予測のためのモデル開発を、基盤的研究として継続的にしっかり取り組んでいけるための理想的な形について、日本学会のしかるべき部署で、これまでのモデル開発の歴史を踏まえて議論し、提言を作成し、それを実現させていってほしいと思います。

地球環境変化予測研究に取り組んでいる方々の今後の研究の力強い進展とその成果を、大きな期待を寄せつつ見守っていきたくて思っています。

謝 辞

ここで取り上げた地球温暖化予測研究を行うことに関して実に多くの方々にお世話になりました。それらの方々のお名前を全てあげることができないことをお許し下さい。気象研究所において大気大循環モデル、及びそれに関する諸モデル開発・研究を進めることに関係し、UCLAの荒川昭夫名誉教授、そして一緒に開発・研究を行った山崎孝治、野田 彰、鬼頭昭雄、谷貝 勇、尾瀬智昭、長井嗣信、行本誠史、遠藤昌宏、北村佳照、本井達夫の諸氏にお世話になりました。お礼を申し上げます。また、その後の地球フロンティア研究システム、地球環境フロンティア研究センターにおける研究の機会を与えて下さった松野太郎東大名誉教授、そしてそこにおける研究を進めるうえで世話になった多くの方々にお礼を申し上げます。また、有益なコメントを頂いた査読者にもお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- Gregory, J. M. and P. Huybrechts, 2006: Ice-sheet contributions to future sea level change. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **364**, 1709-1732.
- Houghton, J. T. *et al.* (ed.), 1990: *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge Univ. Press, 365pp.
- Houghton, J. T. *et al.* (ed.), 1995: *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, 572pp.
- 海洋研究開発機構編, 2010: 地球シミュレータ開発史. 海洋研究開発機構, 111pp.
- Kitoh, A. and T. Tokioka, 1986: A simulation of the tropospheric general circulation with the MRI atmospheric general circulation model. Part II: The July performance. *Pap. Meteor. Geophys.*, **37**, 145-168.
- Kitoh, A., T. Ose, K. Yamazaki and T. Tokioka, 1988a: Long-range forecast experiments for the summer of 1984 with the MRI-GCM - Sensitivities to the sea surface temperature anomalies and cumulus parameterizations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 913-925.
- Kitoh, A., K. Yamazaki and T. Tokioka, 1988b: Influence of soil moisture and surface albedo changes over the African tropical rain forest on summer climate investigated with the MRI-GCM-I. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 65-86.
- Manabe, S. and A. J. Broccoli, 1985: A comparison of climate model sensitivity with data from the last glacial maximum. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2643-2651.
- Manabe, S. and D. G. Hahn, 1977: Simulation of the tropical climate of an ice age. *J. Geophys. Res.*, **82**, 3889-3911.
- Manabe, S. and R. J. Stouffer, 1988: Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, **1**, 841-866.
- Manabe, S., D. G. Hahn and J. L. Holloway, 1979: Climate simulations with GFDL spectral models of the atmosphere. Report of the JOC Study Conference on Climate Models: Performance, Intercomparison and Sensitivity Studies, GARP Publication Series No. 22, Vol. 1, WMO, Geneva, 41-94.
- 松野太郎, 1998: 地球フロンティア研究システムの発足. *天気*, **45**, 307-308.
- Nagai, T., T. Tokioka, M. Endoh and Y. Kitamura, 1992: El Niño-Southern Oscillation simulated in an MRI atmosphere-ocean coupled general circulation model. *J. Climate*, **5**, 1202-1233.
- Noda, A. and T. Tokioka, 1989: The effect of doubling the CO₂ concentration on convective and non-convective precipitation in a general circulation model coupled with a simple mixed layer ocean model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 1057-1069.
- Nohara, D., Y. Yoshida, K. Misumi and M. Ohba, 2013: Dependency of climate change and carbon cycle on CO₂ emission pathways. *Environ. Res. Lett.*, **8**, 014047, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014047.
- Nohara, D., S. Watanabe, K. Tachiiri, T. Hajima, H. Okajima, J. Tsutsui and T. Matsuno, 2015: Climate stabilization via zero-emission concept: examination using earth system models. (to be published)
- Ridley, J., J. M. Gregory, P. Huybrechts and J. Lowe, 2010: Thresholds for irreversible decline of the Greenland ice sheet. *Clim. Dyn.*, **35**, 1065-1073.
- Robinson, A., R. Calov and A. Ganopolski, 2012: Multi-stability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. *Nature Clim. Change*, **2**, 429-432.
- 佐藤正樹, 2010: 全球雲解像モデルNICAMによるMISMO-MJO再現実験. *天気*, **57**, 779-783.
- Schlesinger, M. E., W. L. Gates and Y.-J. Han, 1985: The role of the ocean in CO₂ induced climate change. Preliminary results from the OSU coupled atmosphere-ocean model. In: *Coupled Atmosphere and Ocean Models*, J. C. J. Nihoul (ed), Elsevier, 447-478.
- Stouffer, R. J., S. Manabe and K. Bryan, 1989: Inter-hemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO₂. *Nature*, **342**, 660-662.
- Tokioka, T. and A. Noda, 1986: Effects of large-scale orography on January atmospheric circulation: A numerical experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 819-840.
- Tokioka, T. and I. Yagai, 1987: Atmospheric tides appearing in a global atmospheric general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 423-438.
- Tokioka, T., K. Yamazaki, I. Yagai and A. Kitoh, 1984: A description of the MRI atmospheric general circulation model (the MRI-GCM-D). *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, (13), 249pp.
- Tokioka, T., A. Kitoh, I. Yagai and K. Yamazaki, 1985: A simulation of the tropospheric general circulation with the MRI atmospheric general circulation model. Part I: The January performance. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 749-778.
- Tokioka, T., A. Kitoh and A. Katayama, 1986: Atmospheric response to the sea surface temperature anomalies in the mature phase of El Niño: Numerical experiment under the perpetual January condition. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 347-362.

- Tokioka, T., K. Yamazaki, A. Kitoh and T. Ose, 1988: The equatorial 30-60 day oscillation and the Arakawa-Schubert penetrative cumulus parameterization. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 883-901.
- Tokioka, T., A. Noda, A. Kitoh, Y. Nikaidou, S. Nakagawa, T. Motoi, S. Yukimoto and K. Takata, 1995: A transient CO₂ experiment with the MRI CGCM -Quick report-. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 817-826.
- Washington, W. M. and G. A. Meehl, 1989: Climate sensitivity due to increased CO₂: experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model. *Clim. Dyn.*, **4**, 1-38.
- Yamazaki, K., 1988: Influence of sea surface temperature anomalies over the Indian Ocean and Pacific Ocean on the tropical atmospheric circulation: A numerical experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 797-806.
- Yukimoto, S., M. Endoh, Y. Kitamura, A. Kitoh, T. Motoi, A. Noda and T. Tokioka, 1996: Interannual and interdecadal variabilities in the Pacific in a MRI coupled GCM. *Clim. Dyn.*, **12**, 667-683.

Global Warming Projection Study in Japan
— In the Period Just Before the Start of the IPCC and After —

Tatsushi TOKIOKA*

** Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency of Marine and Earth Science and Technology.*

(Received 31 March 2015; Accepted 24 April 2015)
