

# 数値モデルを用いた気候変動研究

—2021年度藤原賞受賞記念講演—

鬼頭 昭雄\*

## 1. はじめに

2021年度の日本気象学会藤原賞を受賞することとなり、大気大循環モデル・大気海洋結合モデルを用いた気候変動研究を評価していただいたことに感謝申し上げます。この解説では授賞選定理由に挙げていただいたことを中心に、私が主に使ってきた初期の気象研究所モデルのこと、アジアモンスーン研究との関わり、古気候モデリング、大規模山岳と気候、高解像度気候モデルによる実験、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)との関わりについて述べます。

## 2. MRI-GCM-Iの開発といわゆるAMIP実験

1980年まで東京高円寺にあった気象庁気象研究所では、時岡達志さん、山崎孝治さん、谷貝 勇さんにより、大気大循環モデルの開発が始まっていました。大先輩の片山 昭さんと時岡さんが、米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)で荒川昭夫先生らと共にモデル開発に加わっていた経緯から、気象研究所に移植されたUCLAモデルがベースです。モデル開発が本格的になるのは、気象研究所が現在のつくばへ移転し、大型計算機(HITAC M-200H, 48MFLOPS)が導入された1980年です(時岡 2015)。私と野田 彰さんはこの時に気象研究所へ異動して、時岡グループに加わりました。現在の気象研究所のスーパーコンピュータ(8代目、2020年設置)の総理論演算性能が

2.81PFLOPSですから、約6000万倍になっています。初代計算機では総主記憶容量が16MBで、磁気ディスク容量が0.8GBでしたから、記憶装置を有効に使うための工夫が必要でした。

私は、当初1/6球だったモデルの全球への拡張を担当しました。モデルの解像度は東西5度×南北4度×鉛直2層です。計算機の主記憶容量が小さく、一度に全球の格子を扱えないため、南北方向に5緯度帯分ずつ計算していく方式(スピン方式)でした。日本気象学会1980年度秋季大会において、時岡・山崎・谷貝・鬼頭「1/6セクターMRI GCMについて」(講演は山崎)、「全球2層大気大循環モデル」(講演は鬼頭)の口頭発表がありました。その後、対流圏5層モデルおよび成層圏まで含んだ12層モデルに拡張され、数値実験結果が発表されていきます。

1983~1985年にUCLAで、荒川先生とC.R. Mechoso先生の下で2年間過ごす機会を得た後、気象研究所に気候研究部が発足(1987年)してからは、所内経常研究課題「気候システムとその変動特性のモデルによる研究」や外部資金による「アジアモンスーン機構に関する研究」(後述)など、一連の課題に携わりました。1985年には2代目の計算機が設置され、演算性能は初代の13倍、総主記憶容量が8倍、磁気ディスク容量が100倍になり、数値実験を(当時としては)気軽に行えるようになった記憶があります。ただし計算機システムの使い勝手は悪く、ジョブの1つずつ手動での投入や、計算データを頻繁にテープにコピーする必要がありました。

1980年代後半に、年々変動する観測海面水温を境界条件とする実験を始めます。ただしこの時はまだ大気モデル相互比較実験(AMIP)開始前であり、AMIPという言葉はありませんでした。私の数値実験開始の

\* 気象業務支援センター/気象研究所。  
茨城県つくば市長峰1-1  
kitoh@mri-jma.go.jp

—2021年7月20日受領—  
—2021年9月8日受理—

きっかけはGFDLのN.-C. Lauの研究です。彼は1962～1976年の15年間の観測された熱帯太平洋海面水温を境界条件として大気大循環モデルを積分し（その他の海域の海面水温は気候値）、エルニーニョに対する大気の応答を調べたのでした（Lau 1985）。

私は1970～1989年の20年間の各年各月の全球海面水温を境界条件として与える数値実験を行いました。この結果は日本気象学会1990年度秋季大会などで報告するとともに、1991年と1992年の気象集誌に発表しました（Kitoh 1991a, 1991b, 1992）。この結果を持って、次に述べるAMIP設立会合に参加しました。なおこれから一連の研究により、1993年度日本気象学会賞を受賞しました（鬼頭 1994）。

### 3. 1990年代には多くの国際モデル相互比較実験が始まる

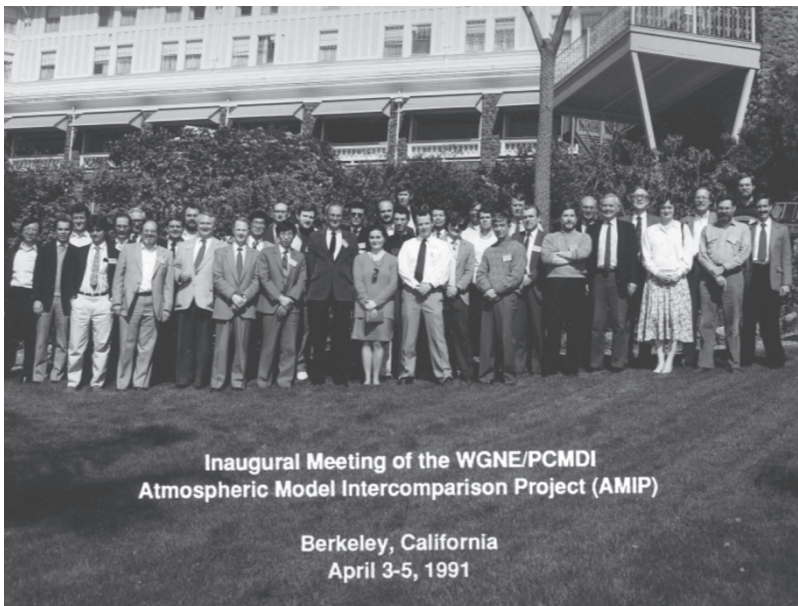
1990年代には多くの国際モデル相互比較実験が始まります（鬼頭 2013a）。1989年に米国エネルギー省は、米国気候モデルの改良、系統的な数値実験の実行、革新的なソフトウェアの開発、温室効果気体増加に対する地域規模の気候の変化の推定、モデル・コミュニティ間の協力推進を目的として、ローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）に15人のスタッフを擁する「気候モデルの診断と相互比較のためのプログラム」

（PCMDI：Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison）を設立しました。所長はオレゴン州立大から移ってきたL. Gatesで、彼はUCLA出身でもあります。この動きは英国気象局でのハドレー・センター設立やハンブルグのマックス・プランク気象研究所での気候研究拡大に対応していました。LLNL/PCMDIの主催で、最初のAMIPの立ち上げワークショップが1991年4月に行われました（第1図）（鬼頭・岩崎 1992）。

これ以前にも、WCRP/WGNEやFANGIOでモデル相互比較実験が行われていましたが、AMIPではモデル相互比較の目的を拡張し、かつ標準化した設定で行うこととしました。それまでのモデル相互比較実験では、海面水温「気候値」を境界条件として与えていましたし、各モデルで使われる海面水温気候値は必ずしも同一ではありませんでした。特に熱帯では、海面水温のわずかな違いにも敏感な積雲対流の立ち方の違いがあり得るため、結果の違いの一原因として指摘されることもあります。観測された月別海面水温気候値を境界条件として大気モデルを積分する実験はこれまでもあるものの、このプロジェクトでは年々変化も与えることにしました。また太陽定数も実験によりまちまちでした。AMIP実験のプロトコルでは、10年間（1979～1988年）の観測された海面水温と海水分布を用

いることに、また、太陽定数は $1365\text{W/m}^2$ 、大気中 $\text{CO}_2$ 濃度は $345\text{ppm}$ と設定されました。気象研究所では5層モデル（モデルトップは $100\text{hPa}$ ）と15層モデル（モデルトップは $1\text{hPa}$ ）で参加しました（Kitoh *et al.* 1995）。

上記ワークショップには23のモデルグループが参加しましたが、その後初期AMIPには、日本の3グループ（東京大学気候システム研究センター、気象庁数値予報課、気象研究所）を含む世界の30の大気大循環モデルが参加することになります。積分結果の診断についても議論され、26の解析サブプロジェクトが立ち上がりました（鬼頭ほか



第1図 AMIP立ち上げワークショップ（1991年4月）。

1995). そのひとつであるサブプロジェクト No.25 東アジアの気候 (East Asian Climate) グループは現在も活動を続けています. 2019年4月には香港で第14回東アジア気候会議を開催しています.

AMIP から発展した結合モデル相互比較実験 (CMIP) は過去気候再現実験や将来予測実験だけでなく, 最近では古気候実験やプロセス実験も含む大規模なものとなり, CMIP 第5期 (CMIP 5) モデル結果が IPCC 第5次評価報告書 (AR 5) に, CMIP 6 モデル結果が IPCC 第6次評価報告書 (AR 6) に活用されています.

#### 4. 大気・海洋混合層モデルの熱帯太平洋海面水温のエルニーニョ的変動

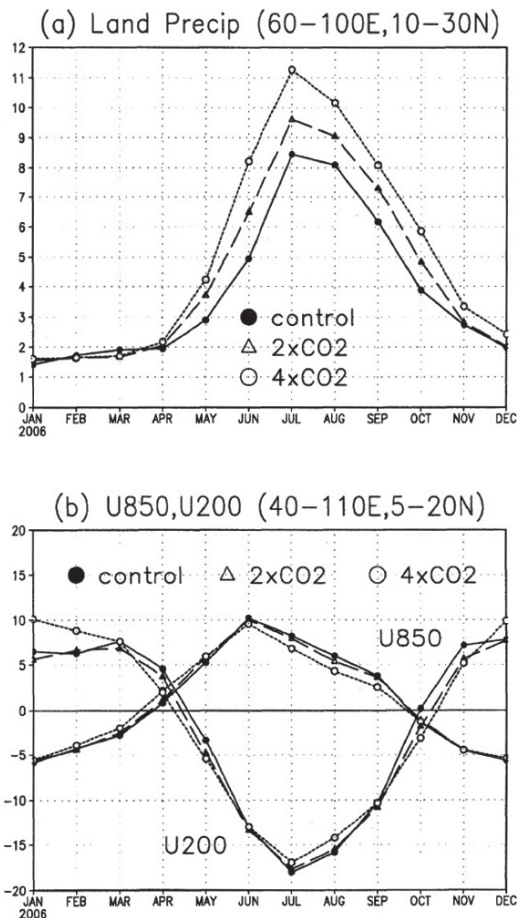
気象研究所では, 大気海洋結合モデルの前段階として, 大気大循環モデルに50mのスラブ海洋混合層を結合したモデルがありました. 私はこのモデルを使った数値実験を2つ行っています. 1つはこの後紹介する山岳上昇実験のきっかけになった実験ですが, もう1つの方 (Kitoh *et al.* 1999a) をまず紹介します.

海面水温は海面での熱フラックスから50m層の熱収支により求めます. このモデルを60年間積分して得られた太平洋赤道付近の海面水温の年々変動モードを解析しました. モデルの熱帯太平洋海面水温は約10年の時間スケールを持った大きい年々変動を示し, それに伴う大気の変動と亜熱帯〜中緯度域の海面水温変動パターンは結合モデルや観測されるものと似ていました. 東部熱帯太平洋海面水温の変化 (上昇) は, 短波放射フラックスの増加 (雲量減少) により始まり, 蒸発の増加 (強い風速) によりダンプします. 一方, 西部熱帯太平洋海面水温の変化 (上昇) は, 蒸発の減少 (弱い風速) により始まり, 短波放射フラックスの減少 (雲量増大) によりダンプします. 潜熱フラックスと短波放射フラックスが関わって, 海洋の力学が無い条件下でエルニーニョ南方振動現象 (ENSO) に似た変動モードが得られたわけです. これは米国気象学会で発表当時, ワシントン大学の M. Wallace 先生に気に入られた覚えがあります. 後年, 別の方が slab ocean El Niño と命名した論文を書かれています. 自分でも引用してもらいやすい名称をつければよかったと思った次第です.

#### 5. アジアモンスーン研究との関わり

私が本格的にアジアモンスーン研究に関わるのは,

1989年に始まった「アジアモンスーン機構に関する研究」に参加してからです. 科学技術庁 (当時) による海洋開発及地球科学技術調査研究促進費 (海地費) は10年間にわたる観測・解析・モデリングの長期的・総合的な研究を行える制度でした. このプロジェクトを実質的に推進されたのは村上勝人さんで, 私はサブテーマ「大規模モデルによる大気・海洋・陸面間の相互作用に関する実験研究」を担当させていただきました. 本サブテーマのメンバーは鬼頭を代表として, 時岡達志・野田 彰・杉 正人・二階堂義信・馬淵和雄・尾瀬智昭の皆さんです. 本サブテーマは, GCM を使ってモンスーン変動に関して総合的に解析した研究で,



第2図 (a) 60°E-100°E, 10°N-30°N の陸上で平均した月平均降水量季節変化 (mm/day). 実線は現在気候, 破線は CO<sub>2</sub> 倍増時, 点線は 4 倍増時. (b) 40°E-110°E, 5°N-20°N で平均した 850hPa と 200hPa の東西風 (m/s). Kitoh *et al.* (1997) より.

多くの学術論文を出すことができました。気象研究所での温暖化予測研究は時岡さん・野田さん・行本誠史さんを中心に行われていましたので、私自身はモンスーンの年々変動に関する数値実験をしていました。

### 5.1 温暖化によるモンスーン降水量の将来変化予測

気象研究所では大気海洋結合モデル(MRI-CGCM1)が開発され、大気中CO<sub>2</sub>濃度を年に1%ずつ漸増させる実験が行われました(Tokioka *et al.* 1995)。私はモンスーンからみて温暖化予測データを解析しました。実験は150年まで延長されたので、61~80年の20年をCO<sub>2</sub>倍増時、131~150年の20年を4倍増時とします。

第2図aはインド陸上(60°E-100°E, 10°N-30°N)で平均した降水量の、第2図bはインド洋北部(40°E-110°E, 5°N-20°N)で平均した対流圏上層200hPaと下層850hPaの東西風季節変化です。温暖化により夏季(6~8月)の850hPaと200hPaの東西風の鉛直シアは小さくなっており、一方で、インドの夏季の降水量は顕著に増加しています。アラビア海の西風は弱くなりますが、大気中の水蒸気量が増加するので水蒸気輸送は増加し、降水量の増加をもたらしているということです(Kitoh *et al.* 1997)。

その後、ENSOとモンスーンの関係(Kitoh *et al.* 1999b; Kitoh 2007a)、東アジアの降水変化の特徴(Kitoh *et al.* 2005)、東アジアモンスーンの開始と終了の将来変化(Kitoh and Uchiyama 2006)、20km格子モデルにおける東アジアモンスーン(Kitoh and Kusunoki 2008)、CMIP5モデルの全球陸上モンスーン降水量の将来変化(Kitoh *et al.* 2013)などの研究を行ったほか、アジアモンスーン将来変化のレビュー論文も発表しました(Kitoh 2006, 2011, 2017; Kitoh and Endo 2017, 2020)。

### 5.2 全球陸上モンスーン降水量の過去~将来の変化

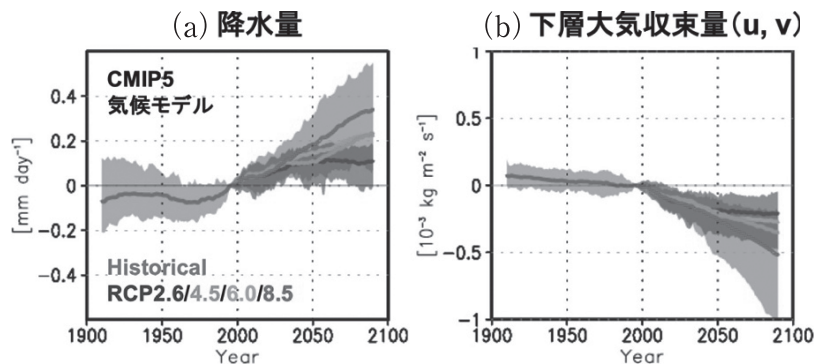
ここではKitoh *et al.* (2013)について触れたいと思います。

2010年から2013年にかけて、IPCC WG I 第5次評価報告書(AR5)第14章「気候の現象及びその将来の地域規

模気候変動との関連性」の主執筆者をしていました。執筆も大詰めになった頃にはCMIP5のデータが利用可能になっていましたが、世界のモンスーン地域の降水変化に関する適当な論文が見当たりませんでした。そこで世界のモンスーンを研究する私を含めて5人の主執筆者に気象研究所の遠藤洋和さんを入れて6人で解析・執筆し、「変化する世界におけるモンスーン：グローバルな文脈の中での地域的な視点」と題する論文を発表しました(Kitoh *et al.* 2013)。

第3図は世界の陸上モンスーン域の降水量と下層大気収束量の時系列です。29個のCMIP5モデル歴史実験及び4つのRCPシナリオ実験(シナリオによってモデル数は異なる)の20年移動平均値を現在(1986~2005年)からの偏差で示しています。将来変化では、どのシナリオでも世界全体ではモンスーンに伴う雨季の降水量は増加すると予測されます(第3図a)。夏季モンスーン域は力学的な収束域にあるのですが、第3図bで示すように将来はモンスーンの風が弱くなり収束量が減少します。しかしながら気温上昇による大気中の水蒸気の増加により水蒸気収束量は増加し降水量が増加することになります。IPCC WG I AR5では、「モンスーンの風は弱くなる可能性が高い一方、モンスーンの降水は大気中の水蒸気の増加により弱まる可能性が高い」と評価しました。

第4図は世界の7つのモンスーン域それぞれにおける降水量変化です。将来変化のモデル間のばらつきを地域毎に見ると、東アジアと南アジアの夏季モンスーン降水量は増加する可能性が高いが、アメリカおよびアフリカモンスーンでは降水量の増加は顕著ではない



第3図 世界の陸上モンスーン域の (a) 降水量 (mm/day), (b) 下層大気収束量 ( $10^{-3}\text{kg/m}^2/\text{s}$ )。歴史実験及び4つのRCPシナリオ実験の20年移動平均値を現在(1986~2005年)からの偏差で示す。IPCC WGI AR5 Figure 14.2 (2013) より抜粋および加筆。

(北アメリカではやや減少)ことがわかります。ちなみに降水強度はどのモンスーン域でも顕著に増加していました。

これらの地域差はどこからくるのでしょうか。モンスーン降水量変化は、熱力学的効果と力学的効果からなります。熱力学的効果すなわち将来気候における水蒸気量の変化はどこでも正である一方、夏季モンスーン域(本来下層大気の収束域です)は熱帯での風の弱まりにより風(上昇流)の変化は負となります。平均降水量の変化は両者が相殺されてもたらされるのですが、力学的効果つまり大気循環の変化は地域による違いが大きくなります。アジアではユーラシア大陸の昇温により大陸・海洋間の温度差が増加しモンスーン気流が強化されるため、ロバストにモンスーン降水量の増加率が大きくなると考えられます(Endo and Kitoh 2014; Endo *et al.* 2018)。

### 6. 古気候シミュレーション：最終氷期最盛期と完新世中期

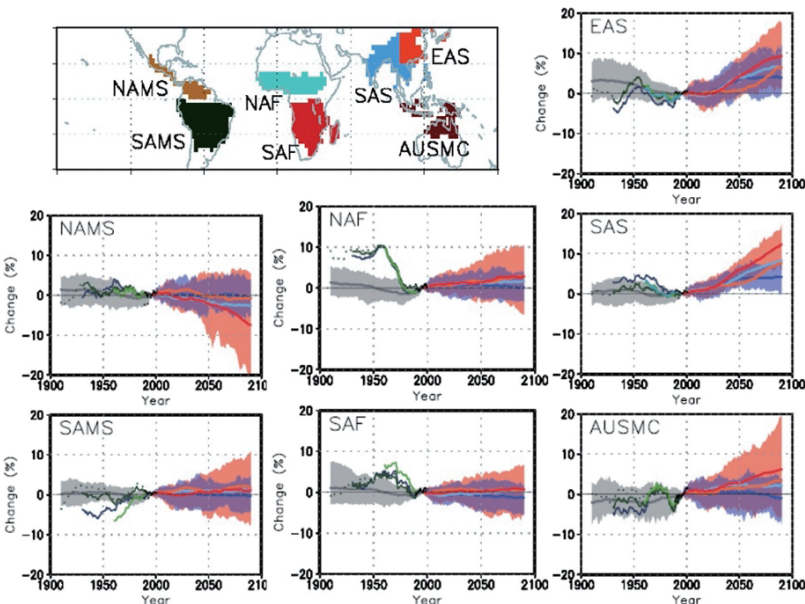
古気候については、CLIMAP (Climate: Long-Range Investigation, Mapping, and Prediction) プロジェクトで得られた復元データを用いた18000年前の

最終氷期のシミュレーション (Gates 1976) や、1億年前の中世代白亜紀のシミュレーション (Barron and Washington 1984) に興味を持っていました。

古気候グループとの関わりは、1991年に開かれたAMIP 設立集會に出席した際に、古気候モデル相互比較実験 (PMIP) の立ち上げを考えていたフランスの S. Joussaume からお誘いを受けたのがきっかけです。PMIP1では21000年前の最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum) および6000年前の完新世中期 (Mid-Holocene) の気候再現実験を行いました。

21000年前の最終氷期最盛期の実験は、低い大気中CO<sub>2</sub>濃度と拡大した大陸氷床に対する応答を見ることとなります。世界全体の海面水温が低下するにもかかわらず、ハワイ周辺では現在より温かい海面水温の領域がシミュレートされました。これは、太平洋亜熱帯高気圧の弱化による力学的な影響と考えられます (Kitoh *et al.* 2001)。6000年前の完新世中期実験では、太陽入射の季節緯度変化の違いに対する応答を調べています。北半球夏季にユーラシア大陸は現在より温まるために、アフリカ・アジアモンスーン降水域が北上します (Kitoh and Murakami 2002)。上記2論文はMRI-CGCM1でのPMIP 1実験ですが、その後、MRI-

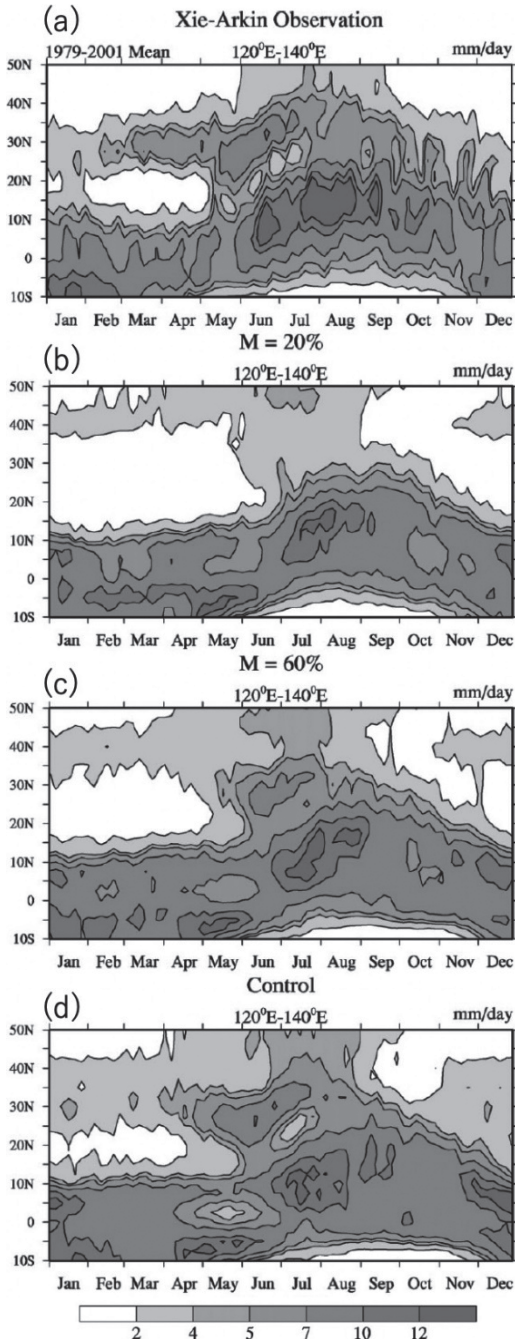
CGCM 2でPMIP 2の完新世中期実験を行いました (Kitoh *et al.* 2007)。この論文では完新世中期のENSOについて、モデルのフラックス補正の有無の影響について議論しました。モデル相互比較実験では、PMIPグループとしてモデルアンサンブルと古気候代替データとの比較検証を行うとともに気候変動のメカニズムを研究します (Joussaume *et al.* 1999など)。私はモデル相互比較論文のみでなく、気象研究所モデルの特長を活かした単独の論文発表も行うべきだと考え、独自性を探して解析したわけです。



第4図 7地域モンスーンの夏季陸上降水量。歴史実験及び4つのRCPシナリオ実験の20年移動平均値を現在(1986~2005年)からの変化率(%)で示す。2005年までの黒線は6つの観測値。左上は地域モンスーン領域。IPCC WGI AR5 Figure 14.4, 14.6, 14.7 (2013) より抜粋。

### 7. 大規模山岳が気候形成に果たす役割

アジアモンスーンの形成に



第5図 120°E-140°E 平均降水量 (mm/day) の時間緯度断面図。(a) 観測データ。(b-d) モデル実験。(b) 山岳高度20%, (c) 山岳高度60%, (d) 山岳高度100% (制御実験)。Kitoh (2004) より抜粋および加筆。

関しては、海陸分布と山岳が重要です。ヒマラヤ山脈・チベット高原の成立は、1億年前には南半球に位置していたインド亜大陸が、北上してユーラシア大陸に衝突したことによります。3000万年前の漸新世初期にはまだチベット高原の標高も低く、その北西にはテチス海が広がっていましたが、1000万年前くらいになると、テチス海が縮小し中央アジアが陸化することで内陸部に乾燥域が形成されるとともに、チベット高原のさらなる上昇により、現在に近いモンスーン気候ができあがったものと考えられています。したがってアジアモンスーンの変遷にとって、ヒマラヤ山脈・チベット高原の上昇というイベントが大きな役割を果たしてきたといえます。

山岳が気候形成に果たす役割を調べるモデル実験は1970年代より大気大循環モデルを用いて行われていましたが、私は大気海洋結合モデルを用いました。チベット高原やロッキー山脈などの大規模山岳は、大気大循環に直接影響を及ぼすだけでなく、山岳の影響を受けた大気循環が海面水温に影響し、それが大気循環にフィードバックすることが考えられるためです。モデルとしては、最初は大気・海洋混合層モデルを用いました (Kitoh 1997) が、順次、結合モデルであるMRI-CGCM 1 (Kitoh 2002), MRI-CGCM 2 を利用しました (Kitoh 2004)。

Kitoh (2004) による結果を紹介します。チベット高原が徐々に隆起したことを踏まえて、海陸分布は現在と同じにしたままで、世界のすべての山岳高度を0%から140%まで段階的に一律に変化させる実験を行いました (100%が現在気候実験)。それぞれ50年間積分し、40年分のデータを解析しています。

第5図aは観測の、第5図b, c, dは山岳高度20%, 60%, 100%の時の、120°E-140°Eで平均した降水量の時間緯度断面図です。モデルの制御実験 (第5図d) では初夏の降水域の北上を再現していますが、地形が平坦な場合では降水域は低緯度にとどまったままです。山岳高度を徐々に変えた実験から、チベット高原が上昇し60%以上にならないと、梅雨に相当する降水帯は現れないことがわかりました。東アジアと南アジアの違いに着目し、山岳効果により東アジアでの夏季の雨域北上が顕著であることを示しました。またチベット高原の上昇に伴い、ケッペンの気候区分で乾燥気候 (BS+BW) となる面積が減少していきます。特に中国では山岳高度0%~20%では砂漠気候 (BW), 40%ではステップ気候 (BS) ですが、60%で降水量増

加により温帯夏雨気候 (Cw) が現れ、さらなる山岳上昇により主に冬季の降水量増加により温帯多雨気候 (Cf) が現れてきます。インドでは砂漠気候からステップ気候を経てサバナ気候 (Aw) へと変遷することがわかりました (鬼頭 2005)。

大気海洋結合モデルを使った実験ですので、大気海洋結合過程がどこに効いてくるかを、大気のみの実験との比較で検討しました。山岳の有無や高度の違いは太平洋高気圧については貿易風の強弱に影響し、山岳が高いと熱帯太平洋ではラニーニャ的な平均状態をもたらします。この熱帯の海面水温分布は降水分布に当然影響し、大気単体実験に比べて結合モデル実験の方が東アジアへの水蒸気輸送が多くなり、梅雨降水帯の強化をもたらすことが示されました。

本実験で境界条件として与えた陸上植生分布は現在気候を使用 (山岳高度が変わっても変化させない) しましたが、山岳高度が変わればそれにつれて植生も変わるでしょう。安成哲三さんが、降水量に対して山岳効果と植生効果が同程度の影響を持つと報告しています (Yasunari *et al.* 2006)。世界のコミュニティでは、地質学的証拠に準じて山岳上昇を詳細に変化させる実験、東アフリカなどの個別の山塊の影響を調べる実験、力学的影響 (障壁効果) と顕熱など熱力学的影響を調べる実験など、多くの研究が行われています。

海洋の気候場が変われば ENSO の特徴も変わるだろうということで、「山岳上昇に伴う ENSO の変調」と題した解析をしました (Kitoh 2007b)。異なる強制力のもとでの調査が、ENSO 変動やその変化のメカニズムを理解する上で有効だろうというモチベーションです。山岳上昇とともに、降水や大気循環のパターンそして海面水温のみならず海洋循環の基本場に系統的な変化が現れます。山岳上昇に伴い、亜熱帯高気圧とそれに伴う貿易風が強くなります。また、山の高さが低いときは、太平洋の貿易風が弱いため、中部太平洋上に暖水域がありますが、山岳上昇に伴いインドネシア海洋大陸へ移動します。インド洋では東西海面水温勾配が逆転します。山なしランでは、最も強く、規則的で周期の長い ENSO が得られました。山の高さが高くなると、モデル ENSO の振幅は弱く、パターンはより不規則になり周期は短くなります。山岳上昇は、平均状態の貿易風を強化し、赤道風の南北方向の広がりを狭めます。こうした風系の変化がもたらす海洋構造の違いが、ENSO の変調に関与していると考えられます。

## 8. 共生・革新・創生・統合プログラム

授賞選定理由では地球シミュレータを活用する文部科学省の地球温暖化プロジェクトについても触れられています。2002年に第1期の「人・自然・地球共生プロジェクト」(共生) から始まり、第2期「21世紀気候変動予測革新プログラム」(革新)、第3期「気候変動リスク情報創生プログラム」(創生)、そして2021年度が第4期「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(統合)の最終年度です。私は革新プログラムのチーム3「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」の研究代表を務めました (Kitoh *et al.* 2009)。

共生プロジェクトで、気象研究所グループは当時世界最高解像度の全球大気モデルとそれにネストする地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングシステムを開発しました。第2期の革新プログラムでは、AMIP 実験的に現在・近未来・21世紀末のそれぞれ25年間を対象に20km 格子の全球モデルで計算を行い、地域気候モデルでは6月から10月を対象に計算がなされました。同プログラムでは、気象研究所の全球モデルグループによる数多くの実験を通じて、モデル気候値の改良がなされました。なかでも熱帯低気圧の空間分布と強度の再現性の改善がなされ、もとのモデルである MRI-AGCM3.1では北西太平洋で発生数が少なく、かつ強度が全体的に弱いというバイアスがありましたが、MRI-AGCM3.2ではそれらの改善がなされました (Murakami *et al.* 2012)。

気象研究所の高解像度大気大循環モデルにネストした地域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングシステムは、大気海洋結合モデルの現在再現実験における系統的バイアスの影響を最小限に抑えるために工夫されています (Kitoh *et al.* 2016)。このシステムを用いることで、台風・集中豪雨等の極端現象についての再現性の向上などにより、将来の極端現象に関する予測の信頼度が大きく改善しました。熱帯低気圧の存在頻度の将来変化や、アジア沿岸への接近頻度の減少や接近時の平均最大風速の増加をはじめとする全球スケールならびに日本域における気候変動予測がなされました。さらに京都大学防災研究所や土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) のメンバーと一緒にプロジェクトを行うことで、気象学者 (理学) と水文学者 (工学) の対話を含め、ダウンスケーリングによる高精度な将来予測結果を用いた地域別の洪水リスクなどの自然災害等の影響評価ができ

ました。

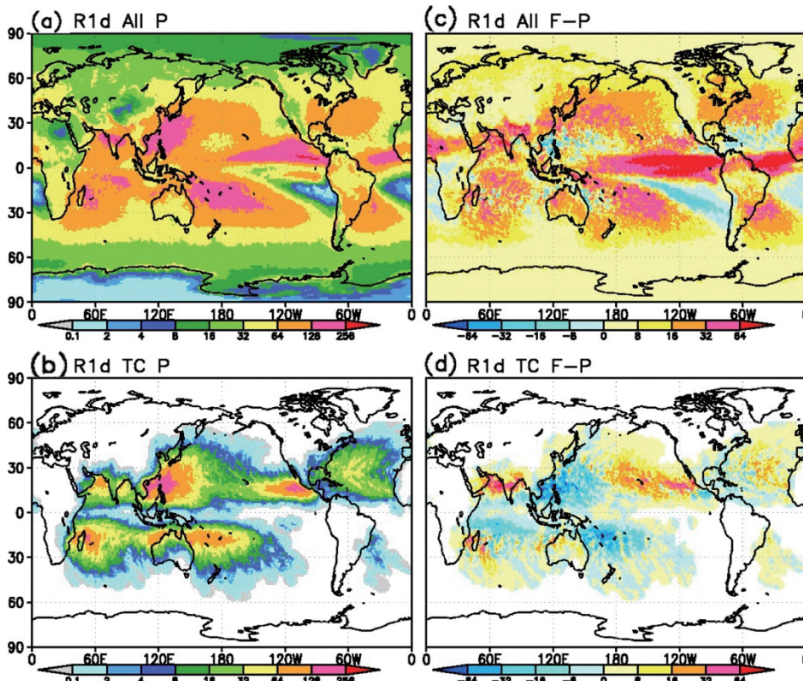
私個人の研究としては、全球20km格子モデルによる将来予測実験の結果を用いて、ボルネオ島における降水量日変化の振幅の将来の減少 (Kitoh and Arakawa 2005)、中東の「肥沃な三日月地帯」の消滅可能性 (Kitoh *et al.* 2008) や南米における将来の気候変化 (Kitoh *et al.* 2011) について調べました。また年最大1日降水量 (Rx1day) の変化について、熱帯低気圧によるものとそうでないものの分離を行いました (Kitoh and Endo 2016a, b)。第6図aは現在気候実験の、第6図bは熱帯低気圧起源の年最大1日降水量です。フィリピン付近では熱帯低気圧起源の極端降水量の寄与が大きいです。この地域において、温暖化した気候下では、熱帯低気圧の存在頻度が減少するため、年最大1日降水量の長期間平均値はほとんど変化しないこと (第6図c) およびそれは熱帯低気圧起源の年最大1日降水量の長期間平均値が減少するためであることを示しています (第6図d)。

さらに、創生プログラムで実施された大規模アンサンブル実験を使うと、解像度は60kmになりますが、10年に1度や100年に1度のイベントについて調べる

ことができます。それによると、台風起源の年最大1日降水量の長期間平均値や中央値は北西太平洋で減少するものの、90/99パーセンタイル値は日本付近で増加することが示されました (Kitoh and Endo 2019)。10年に1回といった低頻度の事象では増加することです。

高解像度大気大循環モデルによる将来予測実験のデータは世界各地で利用可能です。全球モデルが20km格子ですので、既存の地域気候モデルよりも高解像度ということになります。この利点を活かした途上国の温暖化への適応研究への協力として、世界銀行や国際協力機構 (JICA) のファンドにより、ラテンアメリカおよび東南アジア諸国の適応能力強化に貢献してきました。これは2004年12月にブエノスアイレスで開催された国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) 第10回締約国会合 (COP10) 時のサイドイベントで、近藤洋輝さんが共生プロジェクトの紹介をされ、その講演を聞いた世界銀行の W. Vergara 氏からアプローチがあったことがきっかけでした (近藤 2011)。2005年から2010年の間に、世界銀行経費により12人、JICA 経費により16人を気象研究所に招聘してデータ利用の研

修を実施しました。その後の創生・統合プログラムでは、全球モデルデータの提供にとどまらず、現地研究者を気象研究所に招聘し、気象研究所地域気候モデル (NHRM) による力学的ダウンスケーリングを当該地域に適用して計算し、共同で解析するように発展しています。



第6図 (a) 現在気候実験の年最大1日降水量 (Rx1day) (mm). (b) 現在気候実験の熱帯低気圧起源の Rx1day. (c), (d) は (a), (b) と同じ、ただし将来と現在の差。

## 9. IPCC 評価報告書の執筆者として

IPCC には、第1次評価報告書 (FAR) 補遺 (1992年公表) での執筆貢献者 (CA: Contributing Author) としての参加に始まり、第2次 (SAR) から第5次評価報告書 (AR5) では第1作業部会の、第6次評価報告書 (AR6) では第2作業部会的主執筆者 (LA: Lead Author)



として関わりました。第2次評価報告書第5章「気候モデル：評価」（1995年公表）と第3次評価報告書第8章「モデル評価」（2001年公表）では全球モデルの現在気候再現性を、第4次評価報告書第10章「全球気候予測」（2007年公表）では21世紀末の全球規模の気候変動予測を担当しました。第5次評価報告書第14章「気候の現象及びその将来の地域規模気候変動との関連性」（2013年公表）では、全球スケールの変動モードの変調が地域スケールの気候変動を決める上で重要であるとの論調でまとめられています。さらに、第2作業部会第6次評価報告書（AR6）では第10章「アジア」のLAとして、第1と第2作業部会の地域気候変化評価にかかる橋渡し役を務めました（2022年公表）。

IPCCの評価報告書は policy relevant（政策決定に有用な情報の提供を行う）だが、non policy prescriptive（実際の政策の制定に参画せず中立）でないといけないと、元第1作業部会議長の故 Houghton 卿が会合のたびに強調していました。一方で歴代の IPCC 評価報告書は、第2次評価報告書が京都議定書の規定定義に影響を与え、第5次評価報告書がパリ協定の環境を整備するなど、気候問題に関する世界的な行動計画に大きな影響を与えてきました。IPCC に関しては近藤（2011）と時岡（2015）が参考になります。

第1次評価報告書補遺に執筆貢献者として声をかけていただいたのは、1991年4月の AMIP 設立ワークショップで PCMDI 所長の L. Gates と知り合ったことがきっかけです。彼がB章「気候モデリング、気候予測とモデル評価」の筆頭執筆者でした。IPCC 関係の最初の出張が1991年11月の第1次補遺の会合で、それから30年にわたって関わり続けることができました。第2次評価報告書以降、日本政府から推薦していただきましたが、IPCC により選出してもらえたのは、各種モデル相互比較実験での活動が評価されたものと考えています。これらの一連の IPCC の仕事で一緒にいた方達との交流は私の財産となりました。

## 10. おわりに

これまで多くの解説原稿執筆や市民講座での講演などへの誘いをいただきました。基本的にお断りをせずに対応し、おかげで鬼頭（2013b, 2015, 2017）といった一般書も書かせていただきました。これらは IPCC 評価報告書執筆者としての経験を含む経歴を評価して下さったことだと考えています。

これまで気候モデルを用いた気候研究を楽しく行っ

てきました。いまや気候モデルはエアロゾルや化学過程のみならず、高解像度化に伴って都市や生態系を考慮するなど発展を遂げています。古気候から地球温暖化まで時間スケールも広がり研究対象も無限に広がっています（鬼頭 2009）。気候モデルというツールをどう活用するかは皆さんのアイデア次第です、楽しみながら研究してください。

## 謝 辞

数値モデルを用いた気候変動研究は、いうまでもなく数値モデルあってのものです。あらためて気象研究所の気候モデル開発者の皆さん、世界の気候モデル開発者の皆さん、ありがとうございます。また個々のお名前をあげることは控えますが、先生、先輩、同僚に恵まれたことを感謝します。ありがとうございます。

## 略語一覧

- AMIP : Atmospheric Model Intercomparison Project 大気モデル相互比較実験
- CMIP : Coupled Model Intercomparison Project 結合モデル相互比較実験
- ENSO : El Niño-Southern Oscillation エルニーニョ南方振動現象
- FANGIO : Feedback Analysis for GCM Intercomparison and Observation GCMの相互比較と観測のためのフィードバック解析
- GCM : General Circulation Model 大循環モデル
- GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory 地球流体力学研究所
- ICHARM : International Centre for Water Hazard and Risk Management under the auspices of UNESCO 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター
- IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
- JICA : Japan International Cooperation Agency 国際協力機構
- LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory ローレンス・リバモア国立研究所
- MRI : Meteorological Research Institute 気象研究所
- PCMDI : Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison 気候モデルの診断と相互比較のためのプログラム
- PMIP : Paleoclimate Model Intercomparison Project 古気候モデル相互比較実験
- UCLA : University of California, Los Angeles カリフォルニア大学ロサンゼルス校
- UNFCCC : United Nations Framework Convention on Cli-

mate Change 国連気候変動枠組条約  
 WCRP : World Climate Research Programme 世界気候  
 研究計画  
 WGNE : Working Group on Numerical Experimentation  
 数値実験に関する作業部会

### 参 考 文 献

- Barron, E. J. and W. M. Washington, 1984: The role of geographic variables in explaining paleoclimates: results from Cretaceous climate model sensitivity studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **89**, 1267-1279.
- Endo, H. and A. Kitoh, 2014: Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1704-1710.
- Endo, H., A. Kitoh and H. Ueda, 2018: A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: the role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere. *SOLA*, **14**, 57-63.
- Gates, W. L., 1976: Modelling the Ice-Age climate. *Science*, **191**, 1138-1144.
- Joussaume, S., K. E. Taylor, P. Braconnot, J. F. B. Mitchell, J. E. Kutzbach, S. P. Harrison, I. C. Prentice, A. J. Broccoli, A. Abe-Ouchi, P. J. Bartlein, C. Bonfils, B. Dong, J. Guiot, K. Herterich, C. D. Hewitt, D. Jolly, J. W. Kim, A. Kislov, A. Kitoh, M. F. Loutre, V. Masson, B. McAvaney, N. McFarlane, N. de Noblet, W. R. Peltier, J. Y. Peterschmitt, D. Pollard, D. Rind, J. F. Royer, M. E. Schlesinger, J. Syktus, S. Thompson, P. Valdes, G. Vettoretti, R. S. Webb and U. Wyputta, 1999: Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 859-862.
- Kitoh, A., 1991a: Interannual variations in an atmospheric GCM forced by the 1970-1989 SST. Part I: Response of the tropical atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 251-269.
- Kitoh, A., 1991b: Interannual variations in an atmospheric GCM forced by the 1970-1989 SST. Part II: Low-frequency variability of the wintertime Northern Hemisphere extratropics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 271-291.
- Kitoh, A., 1992: Simulated interannual variations of the Indo-Australian monsoons. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 563-583.
- 鬼頭昭雄, 1994 : 大気大循環モデルを用いた大気の長周期変動に関する研究 —1993年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **41**, 447-458.
- Kitoh, A., 1997: Mountain uplift and surface temperature changes. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 185-188.
- Kitoh, A., 2002: Effects of large-scale mountains on surface climate—A coupled ocean-atmosphere general circulation model study. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 1165-1181.
- Kitoh, A., 2004: Effects of mountain uplift on East Asian summer climate investigated by a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate*, **17**, 783-802.
- 鬼頭昭雄, 2005 : チベット高原の隆起がアジアモンスーンに及ぼす影響に関する気候モデルシミュレーション. *地質学雑誌*, **111**, 654-667.
- Kitoh, A., 2006: Asian monsoons in the future. *The Asian Monsoon*, Springer, 631-649.
- Kitoh, A., 2007a: Variability of Indian monsoon-ENSO relationship in a 1000-year MRI-CGCM2. 2 simulation. *Nat. Hazards*, **42**, 261-272.
- Kitoh, A., 2007b: ENSO modulation by mountain uplift. *Clim. Dyn.*, **28**, 781-796.
- 鬼頭昭雄, 2009 : 地球システムモデルによる気候研究～温暖化研究と古気候研究の接点～. *Jpn. Geosci. Lett.*, **5** (4), 1-3.
- Kitoh, A., 2011: Impact of climate change on Asian monsoon characteristics. *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, 2nd Edition, World Scientific Publication Company, 557-568.
- 鬼頭昭雄, 2013a: Model Intercomparison Projects. *天気*, **60**, 197-198.
- 鬼頭昭雄, 2013b : 気候は変えられるか? ウェッジ, 237pp.
- 鬼頭昭雄, 2015 : 異常気象と地球温暖化 —未来に何が待っているか. 岩波書店, 210pp.
- 鬼頭昭雄, 2017 : 変わりゆく気候 —気象のしくみと温暖化. NHKカルチャーラジオ 科学と人間, NHK出版, 159pp.
- Kitoh, A., 2017: The Asian monsoon and its future change in climate models: A review. *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 7-33.
- Kitoh, A. and O. Arakawa, 2005: Reduction in tropical rainfall diurnal variation by global warming simulated by a 20-km mesh climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18709, doi:10.1029/2005GL023350.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2016a: Changes in precipitation extremes projected by a 20-km mesh global atmospheric model. *Wea. Clim. Extrem.*, **11**, 41-52.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2016b: Future changes in rainfall extremes associated with El Niño projected by a global 20-km mesh atmospheric model. *SOLA*, **12A**, 1-6.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2017: Monsoon precipitation in a future warmer world. *The Global Monsoon System, Research and Forecast 3rd Edition*, 303-313.

- Kitoh, A. and H. Endo, 2019: Future changes in precipitation extremes associated with tropical cyclones projected by large-ensemble simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 141-152.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2020: Future Changes in Global Monsoon Precipitation and their Uncertainty: Results from 20-km and 60-km MRI-AGCM Ensemble Simulations. In: *The Multiscale Global Monsoon System*. World Scientific Publishing, 343-353.
- 鬼頭昭雄, 岩崎俊樹, 1992: モデル相互比較実験研究会議に参加して. *天気*, **39**, 673-677.
- Kitoh, A. and S. Kusunoki, 2008: East Asian summer monsoon simulation by a 20-km mesh AGCM. *Clim. Dyn.* **31**, 389-401.
- Kitoh, A. and S. Murakami, 2002: Tropical Pacific climate at the mid-Holocene and the Last Glacial Maximum simulated by a coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Paleoceanography*, **17**, 19-1-19-13.
- Kitoh, A. and T. Uchiyama, 2006: Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 247-258.
- 鬼頭昭雄, 田中 博, 萬納寺信崇, 沼口 敦, 長谷川 聡, 1995: 大気大循環モデル相互比較実験 (AMIP) 第1回国際会議の報告. *天気*, **42**, 853-857.
- Kitoh, A., A. Noda, Y. Nikaidou, T. Ose and T. Tokioka, 1995: AMIP simulations of the MRI GCM. *Pap. Meteor. Geophys.*, **45**, 121-148.
- Kitoh, A., S. Yukimoto, A. Noda and T. Motoi, 1997: Simulated changes in the Asian summer monsoon at times of increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 1019-1031.
- Kitoh, A., T. Motoi and H. Koide, 1999a: SST variability and its mechanism in a coupled atmosphere/mixed-layer ocean model. *J. Climate*, **12**, 1221-1239.
- Kitoh, A., S. Yukimoto and A. Noda, 1999b: ENSO-monsoon relationship in the MRI coupled GCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1221-1245.
- Kitoh, A., S. Murakami and H. Koide, 2001: A simulation of the Last Glacial Maximum with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2221-2224.
- Kitoh, A., M. Hosaka, Y. Adachi and K. Kamiguchi, 2005: Future projections of precipitation characteristics in East Asia simulated by the MRI CGCM2. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 467-478.
- Kitoh, A., T. Motoi and S. Murakami, 2007: El Niño-Southern Oscillation simulation at 6000 years before present with the MRI-CGCM2.3: Effect of flux adjustment. *J. Climate*, **20**, 2484-2499.
- Kitoh, A., A. Yatagai and P. Alpert, 2008: First super-high-resolution model projection that the ancient "Fertile Crescent" will disappear in this century. *Hydrol. Res. Lett.*, **2**, 1-4.
- Kitoh, A., T. Ose, K. Kurihara, S. Kusunoki, M. Sugi and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group, 2009: Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments. *Hydrol. Res. Lett.*, **3**, 49-53.
- Kitoh, A., S. Kusunoki and T. Nakaegawa, 2011: Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60km mesh Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI-AGCM). *J. Geophys. Res. Atmos.*, **116**, D06105, doi:10.1029/2010JD014920.
- Kitoh, A., H. Endo, K. Krishna Kumar, I. F. A. Cavalcanti, P. Goswami and T. Zhou, 2013: Monsoons in a changing world: a regional perspective in a global context. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 3053-3065.
- Kitoh, A., T. Ose and I. Takayabu, 2016: Dynamical downscaling for climate projection with high-resolution MRI AGCM-RCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94A**, 1-16.
- 近藤洋輝, 2011: 日本における地球温暖化研究の意義と課題～科学的知見と社会の関わり～ 2010年度藤原賞受賞記念講演. *天気*, **58**, 101-116.
- Lau, N.-C., 1985: Modeling the seasonal dependence of the atmospheric response to observed El Niños in 1962-76. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1970-1996.
- Murakami, H., Y. Wang, H. Yoshimura, R. Mizuta, M. Sugi, E. Shindo, Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, T. Ose and A. Kitoh, 2012: Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *J. Climate*, **25**, 3237-3260.
- 時岡達志, 2015: 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. *天気*, **62**, 557-568.
- Tokioka, T., A. Noda, A. Kitoh, Y. Nikaidou, S. Nakagawa, T. Motoi and S. Yukimoto, 1995: A transient CO<sub>2</sub> experiment with the MRI CGCM—quick report—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 817-826.
- Yasunari, T., K. Saito and K. Takata, 2006: Relative roles of large-scale orography and land surface processes in the global hydroclimate. Part I: Impacts on monsoon systems and the Tropics. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 626-641.

## Climate Change Research Using Numerical Models

Akio KITO<sup>H</sup>\*

\* *Japan Meteorological Business Support Center/Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine,  
Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan*  
*E-mail : kitoh@mri-jma.go.jp*

(Received 20 July 2021; Accepted 8 September 2021)

---