

数値予報から気候予測研究へ

～地球温暖化時の台風の動向の研究の進展～

—2016年度藤原賞受賞記念講演—

杉 正 人*

1. はじめに

このたびは、藤原賞をいただくことになり大変光栄に思っています。受賞理由は、「数値天気予報・長期予報の精度向上並びに気候・地球温暖化予測研究への諸貢献と推進」となっておりますが、講演のタイトルは短く「数値予報から気候予測研究へ」とさせていただきます。このタイトルは、2007年に日本気象学会賞を受賞した時の記念講演(杉 2008b)のタイトルとほぼ同じで、講演内容もその時と重なる部分も多いと思いますが、せっかくの機会ですので、2007年以降の研究も含めて、あらためて私のこれまでの40年以上におよぶ研究人生を振り返ってみたいと思います。その中でも特に、私の研究の後半の中心テーマとなった、地球温暖化時の台風(熱帯低気圧)の動向の研究の進展に焦点をあてて、私の歩んできた道を振り返ってみたいと思います。

2. 数値予報から気候予測研究へ(第1表)

2.1 数値予報の改善を目指して

私は、大学では地球物理を専攻していないので、私の気象学の勉強は、今から42年前の1974年4月に気象庁に入ったところから始まりました。最初の勤務地の仙台管区気象台の構内にあった独身寮の一室で、千葉長さんと、谷貝 勇さんと私の3人で、数値予報の教科書(Haltiner 1971)で気象力学と数値予報の基礎について勉強会を開きました。勉強会の講師はいませ

んでしたが、読んでわからないところを3人で納得のゆくまで議論しながら、ゆっくり時間をかけて勉強することができました。今から振り返ると、仙台での3年間は、その後の研究人生の基盤となる気象学と数値予報の基礎をじっくり勉強することができた(当時の気象台ではそのような時間的余裕が十分あった)、とてもありがたい3年間だったと思います。

3年後の1977年4月に、気象庁予報部の電子計算室(今の数値予報課の前身)に転勤になり、数値予報モデルと数値実験や実験結果の解析についての実地勉強を始めました。この時は、金光正郎さんに大変お世話になりました。私の最初の気象学の研究論文は、金光さんとの共著になっています(Sugi and Kanamitsu 1982)。1982年からは、台風進路予想モデルの担当になり、台風と台風モデルに関する論文を勉強しました。

電子計算室勤務の8年目の1984年の10月から2年間、金光さんの推薦によりフロリダ州立大学でKrishnamurti先生の指導の下で、熱帯気象と熱帯の数値予報に関する研究を行う機会に恵まれました(Sugi 1986)。家族とともに過ごしたフロリダでの2年間の充実した研究生活は、私にその後研究者として歩むことを決意させることになりました。

1986年の9月に帰国して、数値予報課(1985年に電子計算室から数値予報課になった)での私の担当は、全球モデル開発グループリーダーでした。当時、金光さんが開発された北半球スペクトルモデル(HSM)が現業モデルとして動いていましたが、それを全球モデル(GSM)にするとともに、水平解像度をT42(300 km)からT63(200 km)に上げ、主要な物理過程の大幅な改良を行うことが計画されていました。新しいモデルは、1988年3月にGSM8803として現業化され、大幅な予報精度の向上が実現されました(Sugi

* 気象研究所。

msugi@mri-jma.go.jp

—2017年5月23日受領—

—2017年8月7日受理—

第1表 数値予報から気候予測研究へ

1974	気象庁仙台管区气象台	気象学と数値予報について基礎勉強モデルと数値実験について実地勉強熱帯の数値予報について勉強と研究 全球数値予報モデルの開発と業務化
1977	気象庁電子計算室	
1984	フロリダ州立大学	
1986	気象庁数値予報課	
1989	気象研究所気候研究部	気候モデル開発とモデル研究 季節予報予測可能性・温暖化と台風の研究 1997 地球フロンティア 2001 IPCC TAR
1992	防災科学技術研究所	
1996	気象研究所気候研究部	
2002	気象庁気候情報課	2002 地球シミュレータ 共生プロジェクト
2005	気象研究所予報研究部	
2009	海洋研究開発機構	2007 IPCC AR4 革新プログラム 2011 HPCI 戦略プログラム 2012 京コンピュータ 創生プログラム
2014	気象研究所気候研究部	2013 IPCC AR5

et al. 1990). この時のモデル開発の中で、私は放射スキームの開発を担当しましたが、この放射スキームと、岩崎俊樹さんが開発された重力波抵抗スキームの導入は、予報精度の向上に大きく貢献しました。

電子計算室、フロリダ州立大学、数値予報課での12年間の数値予報モデルの開発とそれを用いたモデル研究の体験を通して、いくつか重要な考え方、ものの方(私にとっては、気候研究の定理のようなもの)を学びました。

定理1：数値予報モデルは予測と理解の強力なツールである。

定理2：気候システムの本質は放射対流平衡である。

定理3：積雲対流による凝結熱は上昇流による断熱冷却とバランスする。

定理1は、私のモデルに対する基本的な考え方で、定理というよりモデル開発やモデル研究の指導原理とか基本理念というべきものです。モデル開発やモデルを用いた研究を行う者としては当然のことですが、私がこのことを強く実感したのは、5日予報の成功事例を体験した時です。1988年の3月に全球モデルが現業化されて間もないころの3月17日を初期値とする5日予報で、5日目の3月22日に日本の南岸に発達した低気圧が予想され、それに伴い関東地方で大雨になることが予想されていました。この予想は見事に当たり、実際に関東地方で大雨になりました(Sugi *et al.* 1990)。5日目の低気圧は、初期値にはなかったもの

ですが、モデルはこの低気圧の発生・発達を確かに予測していました。モデルの確かな予測能力を強く印象付ける事例でした。この成功事例は、ビギナーズラックというところもあり、すべての5日予報で予想が当たるとは限りません。しかし、「モデルの計算の本質は正しい計算であり、外れた事例については、その原因を解析し、モデルや初期値を改善することにより予報を改善することができる」という信念をモデル開発者は誰でも持っていると思います。このようなモデル開発者としての信念、モデルへの信頼感は、「モデルを用いて現象のメカニズムを理解することができる」というモデル研究者としての私の信念の基盤となっていると言えます。

定理2は放射スキームの開発の体験から学んだことです。全球モデルの開発を進めていた時に、当時の現業モデルHSMを全球化したモデルでは、なぜか全球平均の降水強度が実際の7割程度でした。このモデルに、新しい放射スキームを導入したところ、降水強度が実際と同じ程度まで増加しました。全球平均の降水強度は放射冷却で決まっているらしいということがわかりました。そこで、新しい放射スキームで、放射冷却率を7割に減らした実験をしてみると、予想通り降水強度も7割に減少しました。これにより、全球平均の降水強度は放射冷却率で決まっているということが確かめられました。すなわち、「全球平均の放射冷却と降水(主に熱帯の積雲対流に伴う降水)による凝結熱がバランスしている(放射対流平衡状態にある)」

ということです。この定理は、地球温暖化（放射強制力の変化に伴う気候変化）の問題を考えるとときに重要な定理だと思います。

定理3はモデル開発者なら誰でもよく知っていることだと思います。ただ、その解釈については、多分人によって異なっているのではないかと思います。積雲対流に伴う凝結熱は、他の加熱（放射冷却など）と比べると1桁から2桁大きく、その大部分はその加熱によって生じた上昇流に伴う断熱冷却とバランスし、正味の加熱量は他の加熱と同じオーダーになります。私の解釈は、「積雲対流の役割は、凝結熱にバランスする上昇流を生じさせ、その上昇流を通して大気循環に影響を及ぼすことである」というものです。この定理は、積雲対流が関係する大気循環や台風とその変化のメカニズムの理解に重要な定理だと思っています。

2.2 気候予測の改善を目指して（1）1989～2001年度

1988年3月の現業化で、全球モデルの開発が一段落したので、その年の夏に気象研究所への転勤希望を出しました。そして希望通り1989年の4月から気象研究所での気候予測の研究がスタートしました。気候研究部第一研究室（時岡達志室長）に配属になった私の仕事は、大気大循環モデル（AGCM）の開発・改良とAGCMを用いた数値実験でした。当時、気象研究所のAGCMは水平解像度 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ の格子モデルでした。このモデルを高解像度にするために、このモデルの物理過程を、気象庁の数値予報モデル（GSM）に移植することを試みましたが、木に竹を接ぐ様な試みはうまくいきませんでした。一方、この頃、研究室では長井嗣信さんがAGCMと海洋モデルを結合したモデルを開発して、エルニーニョ現象を再現することに成功しており、エルニーニョなどにもなる海面水温（SST）の変動が大気大循環に及ぼす影響を調査する数値実験が盛んに行われていました。私も、SSTの年々変動がモンスーン循環の年々変動に及ぼす影響などを調べたりしました。この時の数値実験を通して学んだ重要なことは、

定理4：熱帯のSST偏差は、積雲対流活動の偏差を通して全球の大気循環の偏差を生じさせる。ということです。この定理は、季節予報や気候変動の空間分布を考えるとときに特に重要な定理だと思います。

気象研究所で気候予測の研究を始めて3年後の1992年4月に、気象研究所と同じつくば市にある科学技術庁防災科学技術研究所へ出向することになりました。

その当時は私自身よく理解していなかったのですが、この出向は科学技術庁の気候変動研究の施策の第一ステップでした。その後、科学技術庁の施策は地球フロンティア研究システム（地球フロンティア）の創設、地球シミュレータの開発およびそれを用いた気候変動予測研究プロジェクトへと発展していきました。1992年の時点では、科学技術庁は防災科学技術研究所（NIED）を気候変動予測研究の研究拠点にしようと考えていたので、そのために必要な気候モデルの開発が私の任務でした。当初は、気象研究所（MRI）の大気大循環モデルMRI-AGCMと米国地球流体力学研究所（GFDL）の海洋大循環モデルGFDL-MOMを結合した大気海洋結合モデル（NIED気候モデル）を開発することが想定されていました。私としては高解像度のGCMとして気象庁の数値予報モデル（JMA-GSM）を使いたいという意向があり、結局JMA-GSMとGFDL-MOMを結合した気候モデルを作ることになりました。1995年に、このモデルを用いて防災科学技術研究所と気象研究所の共同で気候変動予測研究を行う研究プロジェクト「全地球システムモデル研究プロジェクト」（10年計画）がスタートしましたが、1997年の地球フロンティアの発足により、このプロジェクトは3年で発展的解消となりました。「全地球システムモデル研究プロジェクト」の目標は、大気化学過程や生態系を含む地球システムモデル（ESM）を開発し、それを用いて気候変動予測を行うこと、高解像度のAGCMを開発して、台風などの極端現象の将来変化の予測を行うことでした。これらの目標は、そのまま、地球フロンティアの目標になっています。

防災科学技術研究所での私の仕事は、まず大気海洋結合モデルを作る準備として気象庁の数値予報モデル（JMA-GSM）の気候特性を確認することでした。当時の気象庁の現業数値予報モデルは、1989年に佐藤信夫さんが力学過程を高速化し、植生モデル（SiB）を導入したGSM-8911でした。現業モデルは水平解像度T106（120 km）でしたが、はじめにT42の低解像度版の長期ランを行って気候特性を調べました。その結果、このモデルはほとんど手を加えなくても、他のGCMと比べて遜色のない、むしろ凌駕する気候再現性能を持っていることが確認できました（Sugi *et al.* 1995a, b）。モデルの気候特性が確認できたので、この低解像度版のモデルで、34年ランのアンサンブル実験を行い、川村隆一さんや、インドから来日していた

Karさんと一緒に、季節予報の予測可能性や、SSTの年々変動とモンスーン循環の変動の関係などに関する研究を行いました (Kawamura *et al.* 1995a, b, 1997a, b, 1998; Kar *et al.* 1996, 1997, 2001; Sugi *et al.* 1997b).

その後、低解像度の気候モデル JMA-GSM と海洋モデル GFDL-MOM を結合した気候海洋結合モデルができたところで、1994年から、高解像度 (T106) の気候モデルによる数値実験をスタートしました。T106のモデルでは、台風の再現性がよいという特長を最大限生かして、温暖化時の台風の動向を調べる実験を行いました。T106 (120 km) という解像度は、当時の AGCM としては非常に高い解像度でした。そのため、当時の防災科学技術研究所の計算機 (CRAY-YMP, ピーク性能1GFLOPS) では、10年の積分を実施するのに約9か月の時間が必要でした。実際、現在気候10年、将来気候10年の計算をするのに、1994年の9月から始めて、1996年の2月までかかりました。実験結果の速報は、WMOのテクニカルレポート (Sugi *et al.* 1997a) に報告しましたが、詳しい解析に時間がかかり、論文発表は5年後になってしまいました (Sugi *et al.* 2002)。

1996年4月に気象研究所に戻りましたが、戻ったところは気候研究部第2研究室で季節予報技術開発が主な研究課題でした。温暖化時の台風の動向の研究は、防災科学技術研究所との共同研究、地球フロンティアとの共同研究として行いました。気象研究所の温暖化の研究は、第4研究室 (野田 彰室長) で行われていました。1995年に IPCC の第2次評価報告書が刊行され、次の IPCC 評価報告書 (2001年刊行予定) に向けて、気候モデルの解像度を高くすることが急務と考えられていました。当時気象研究所では、地球温暖化などの気候研究のために用いる気候モデルとして、時岡さんたちが開発した水平解像度 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ の MRI-AGCM1 と海洋研究部で開発された海洋大循環モデルを結合した MRI-CGCM1が、また季節予報研究のための気候モデルとして、千葉さんたちが開発した、水平解像度 R24 ($5^{\circ} \times 3^{\circ}$) のスペクトルモデル MRI-GSPM が使われていました。防災科学技術研究所で、気象庁の数値予報モデルが高解像度の AGCM としてすぐれた気候再現性能を持つことが確認されたことから、気象研究所でも気象庁の数値予報モデルをベースにした高解像度の気候モデルを開発することになりました。当時の気象庁の現業数値予報モデル GSM9603

には、隈 健一さんが開発した積雲対流スキーム (予報型 Arakawa-Schubert スキーム) が組み込まれていました。このモデルに、柴田清孝さんが、高精度の放射スキーム (マルチパラメータバンドモデル) を導入し、モデルのトップを高くした MRI/JMA98モデル (MRI-AGCM2) を開発しました (Shibata *et al.* 1999)。さらに、行本誠史さんたちによって、この AGCM と気象研究所の海洋大循環モデル OGCM を結合した MRI-CGCM2が作られ (Yukimoto *et al.* 2001)、温暖化予測研究などの気候変動研究に用いられるようになりました。

季節予報に関しては、この MRI/JMA98モデルを用いて、予測可能性を調べるために、T42 (300 km) の解像度で50年6メンバーのアンサンブル実験を行いました。結果は、以前に防災科学技術研究所で行った、34年3メンバーのアンサンブル実験の結果とほぼ同じでした。予測可能性の指標となる海面水温によって決まる変動の分散の全分散に対する割合は、熱帯では0.8と高いのに対して、日本付近など中高緯度では0.3~0.4と低いことが示されました。また、この頃、1995年に始まった世界気候研究計画 (WCRP) のサブプログラム気候変動プログラム (CLIVAR) の第1数値実験グループ (NEG1) が推進していた季節予報モデル相互比較プロジェクト (SMIP) が行われており、気象庁と気象研究所も、現業数値予報モデル GSM9603を用いて、予測可能性を調べる比較実験に参加しました (Kobayashi *et al.* 2000; Kusunoki *et al.* 2001)。

科学技術庁は、1997年10月に気候変動研究の拠点として地球フロンティア (松野太郎先生がシステム長) を立ち上げました。私は、共同研究者として、地球温暖化予測研究領域 (真鍋淑郎さんが領域長) で温暖化と台風の研究をすることになりました。この時、私と一っしょに温暖化の研究を行ったのは、気象研究所から地球フロンティアに出向してきた吉村 純さん、中国から日本に来ていた Geng さん、インドから来日した Krishnan さんの3人でした (Krishan and Sugi 2001, 2003; Geng and Sugi 2001, 2003; Sugi *et al.* 2002; Sugi and Yoshimura 2004; Yoshimura and Sugi 2005; Yoshimura *et al.* 2006)。

1997年には、地球フロンティアの立ち上げと並行して、地球シミュレータ開発計画もスタートしました。地球フロンティアの目標である、ESM と高解像度の AGCM を実現するために、当時のスパコンの1000倍

以上の能力を持つ計算機を開発する計画でした。ハードウェアの開発とともに、その上で動くソフトウェアの開発も必要でした。気候モデル (CGCM) と ESM については、東大の気候システム研究センター (CCSR) が中心となって開発した AGCM をベースに地球フロンティアと CCSR による開発が進められました。高解像度の AGCM については、当時のもっとも高い解像度の AGCM の解像度が 100 km であったので、単純な計算では、1000倍の能力の計算機では 10 km の解像度の AGCM が実現可能ということになります。しかし、10 km という解像度は、積雲対流を直接解像するには粗すぎるが、従来のパラメタリゼーションを用いるには細かすぎるという、いわゆる積雲対流のグレーゾーン (2 km~20 km) の解像度になります。議論の結果、気象庁と気象研究所は、解像度 20 km の AGCM (Mizuta *et al.* 2006) の開発を、地球フロンティアは次世代のモデルとして全球雲解像モデル NICAM (Satoh *et al.* 2008) の開発を目指すことになりました。

2.3 気候予測の改善を目指して (2) 2002~2008 年度

2002年の3月に地球シミュレータが稼働を開始しました。そして、4月から地球シミュレータを利用した文部科学省の大型気候変動予測研究プロジェクト「人・自然・地球共生プロジェクト (2002~2006年度)」(共生プロジェクト) がスタートしました。私も、地球シミュレータの開発計画や、そのためのソフトウェアの開発プロジェクトなどに参加し、共生プロジェクトに参加する準備を進めてきました。ところが、ちょうど2002年の4月に、気象庁の気候情報課に課長として異動することになり、大変残念なことに共生プロジェクトには参加できなくなってしまいました。

気候情報課長としての私の任務は、気候情報業務の推進です。当時の気候情報業務の重点課題は、力学的季節予報の導入、季節予報モデルの開発、長期再解析の実施などでした。力学的季節予報に関しては、1996年にすでに、大気モデルのアンサンブル予報による力学的1か月予報が業務化されており、1999年には大気海洋結合モデルを用いたエルニーニョ予測も業務化されていました。次のステップは、エルニーニョ予測モデルで予測された海面水温を用いて、大気モデルアンサンブルによる力学的季節予報 (3か月予報、寒候期・暖候期予報) を業務化することでした。

当時、力学的季節予報に関する研究で世界をリード

していたのは、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の Palmer たちのグループでした (Palmer and Shukla 2000; Palmer *et al.* 2004)。彼らは、ヨーロッパで PROVOST (1994~1998)、DEMETER (2000~2003) などの大規模な季節予報実証実験プロジェクトを進めているところでした。PROVOST は大気モデルのアンサンブル予報実証実験で、アメリカでは同様のプロジェクト DSP が行われており、これらに対応する国際プロジェクトが SMIP でした。これらのプロジェクトの成果として、エルニーニョなどの熱帯の海面水温変動に起因する大気の変動は海面水温が正しく予測されれば予測可能であること、この予測可能性は一般に熱帯で大きく中高緯度では小さいこと、予測可能性が小さくても確率情報として有効利用が可能であることなどが明らかになりました。そして、アンサンブル予報結果から計算される確率情報の有効性をコストロスモデルなどにより評価する手法も示されました (Palmer *et al.* 2000)。

これらの背景のもとで、高野清治さん、前田修平さんたちによって、力学的季節予報の業務化の準備が進められていました。そして、まず2003年3月に、3か月予報に力学的手法が導入されました。その後、9月の寒候期予報、翌年の2月の暖候期予報から力学的手法を導入する計画でした。ところが、運悪く2003年の夏は10年ぶりの大冷夏となり、冷夏の予想ができなかったことから気象庁への風当たりが強くなり、力学的手法の導入が難しくなっていました。理論的には、季節予報は確率予報なのであり、1回の予報が当たっているか外れているかという議論はすべきではないのですが (杉 2008a)、そのことを気象庁内外の関係者に理解してもらうのは困難な状況でした。それでも、力学的手法による確率予報の方が、これまでの統計的手法による確率予報より精度が高いこと、そして、今後モデルを改良していくことにより精度の向上が期待できる、ということで何とかゴーサインを出してもらうことができました。その結果、季節予報の確率情報の利活用の促進と、モデルの改良による予報精度の向上が宿題として残されました。

2001年から2006年までの6年間、私は CLIVAR の季節から年々の予測作業部会 WGSIP (NEG1から WGSIP に名前が変更になった) のメンバーとして、世界の季節予報業務改善のための研究の推進にも携わりました。WGSIP での議論の中心テーマは、大気海洋結合モデルによるアンサンブル予測システムの構築

と予測スキルの実証実験を推進すること、また予測結果の具体的な利活用により季節予報の有効性を示す実証実験を推進することでした。季節予報の予測可能性は、日本などの中高緯度より熱帯で大きいので、まず予測スキルの高い熱帯で実証実験が行われていました。

WMOの気候委員会CCLでも気候業務の重要な課題として、季節予報の利活用の促進が議論されていました。2002年から2005年までの4年間、私はWMOの第II地区(アジア地区)の気候問題作業部会長としてCCLの管理部会のメンバーになっていました。CCLでは、季節予報の利活用促進のために、地域気候センターRCCの設立に向けた議論が行われていました。気象庁でもアジア地区の気候センターを目指して2002年にアジア太平洋気候センター(東京気候センター-TCC)を立ち上げていました。中国も2003年に北京気候センター-BCCを立ち上げました。2004年の第II地区(アジア地区)の気候問題作業部会で議論の結果、アジア地区ではTCCとBCCを共にネットワーク型のRCCノードとするという提案が了承され、2009年に両センターがRCCとしてWMOから指名されました。

PROVOSTの後に行われたDEMETERは、大気海洋結合モデルによる季節予報実証実験でした。このプロジェクトの成果などにより、大気海洋結合モデルによるアンサンブル予報が世界の季節予報業務の主流になりつつあり、気候情報課でも、季節予報のための大気海洋結合モデルの開発が急務となっていました。その頃、気象庁では、数値予報課、気候情報課、気象研究所などモデル開発を行っている部署が共同でモデルを開発する体制として、気象庁モデル技術開発推進本部が立ち上がっていました。私は、2000年から2008年までの9年間、モデル技術開発推進本部のグローバルモデル部会長として、全球モデルの開発の推進役を務めることになりました。グローバルモデル部会では、世界トップレベルの週間予報、1か月予報、季節予報、地球温暖化予測を実現するために、全球大気モデル、大気海洋結合モデル、気候モデルの開発を進めました。

最初の大きな成果は、気象研究所の吉村裕正さんが開発したセミラグランジュ移流スキーム(Yoshimura and Matsumura 2003)の導入による全球大気モデルの高速化です。これは、共生プロジェクトで解像度20 kmの全球大気モデルを実現するために必要な開発でした。2003年に共生プロジェクトのモデルに導入後、

気象庁の現業の数値予報モデルにも導入され、2007年には全球数値予報モデルの高解像度化が実現しています。また2004年には、気候情報課の藪将吉さんが開発した高精度の放射スキームが現業数値予報モデルに導入されました。これにより、成層圏、中間圏の放射計算の精度がよくなりモデルの上端を高くすることができました。

セミラグランジュ移流スキームと高精度放射スキームを導入した全球大気モデルは、気象・気候統一モデルとして、数値予報から気候予測まで広く使われるモデルとなりました。季節予報や地球温暖化予測のためのモデルとして、気象研究所の安田珠幾さんや行本誠史さんたちによって、この統一大気モデルと気象研究所で新しく開発された全球海洋モデルMRI.COMを結合した統一大気海洋結合モデルが開発されました。そして、このモデルと海洋データ同化システムからなるアンサンブル季節予測システムの開発が進められ、2008年にはエルニーニョ予測システムとして、2010年には季節予報システムとして現業化されました。

一方、温暖化予測モデルに関しては、IPCC第4次評価報告書(AR4)が公表された2007年には「21世紀気候変動予測研究革新プログラム(2007~2011年度)」(革新プログラム)が始まり、次のIPCCに向けたモデル開発が始まりました。特に、温暖化時の台風の動向の予測に関しては、積雲対流スキームの改良が必要であると考えられていました。そこで、それまでの統一全球大気モデルの予報型Arakawa-Schubertスキームに加えて、吉村裕正さんが新たに開発したYoshimuraスキーム(Yoshimura *et al.* 2015)と、メソモデルでよく使われているKain-Fritschスキームを導入したMRI-AGCM3.2が開発されました(Mizuta *et al.* 2012)。これによって、異なる3つの積雲対流スキームを選択できるようになりモデルアンサンブル実験が可能になりました。また行本誠史さんたちによって、MRI-AGCM3.2と全球海洋モデルMRI.COM3を結合した大気海洋結合モデルMRI-CGCM3が、さらに田中泰宙さんたちが開発した大気化学モデル(Tanaka *et al.* 2003)と結合した地球システムモデルMRI-ESM1が開発されました(Yukimoto *et al.* 2011, 2012)。これらのモデルを用いて、革新プログラム(2007~2011年度)や、IPCC第5次評価報告書(AR5)に向けた結合モデル相互比較実験(CMIP5)に参加し、多くの温暖化予測実験研究が行われました。

モデル技術開発推進本部のもう一つの成果としては、長期再解析の実施があります。再解析は、米国 NCEP とヨーロッパ ECMWF ですでに実施されており、気候関係者は気候予測業務・研究の推進に非常に重要な役割を果たすという認識を持っていました。再解析の実施は気候関係者の長年の念願でしたが、気象庁内でその必要性・意義について十分な理解が得られず、十分な計算資源が確保できないため再解析が実施できない状況が続いていました。こうした中、モデル技術開発推進本部の立ち上げのときに、主要な目標の一つとして長期再解析の実施を掲げることができました。そして、2001年に気象庁と電力中央研究所の共同研究プロジェクト（5年計画）として、大野木和敏さんをリーダーとする JRA-25長期再解析実施グループがスタートしました。2006年には、その成果が公表されています（Onogi *et al.* 2007）。

この時代（2002～2008年度）の、地球温暖化時の台風の動向に関する研究は、主に地球シミュレータを用いた共生プロジェクト（2002～2006年度）や革新プログラム（2007～2011年度）で行われました。私は、共生プロジェクトには直接参加することはできませんでしたが、大内和良さん、吉村 純さん、水田 亮さんたちによって、地球シミュレータを用いて解像度20 kmの全球大気モデル MRI/JMA-AGCM による温暖化予測実験が行われ、その実験結果をまとめた論文は世界に大きなインパクトを与えました（Oouchi *et al.* 2006；Mizuta *et al.* 2006）。私は2005年に気象研究所の予報研究部に異動となり、2007年度からスタートした革新プログラム（2007～2011年度）には参加することができました。革新プログラム前半（2007～2008年度）では、村上裕之さんや水田 亮さんたちによって、解像度20 kmの MRI/JMA-AGCM による温暖化予測実験とともに、解像度60 kmの MRI/JMA-AGCM による多数のアンサンブル実験も行われました。これらの実験結果を用いて、温暖化時の台風の動向に関する多くの解析研究が行われました（Sugi 2009, 2010；Sugi *et al.* 2009；Murakami and Sugi 2010；Murakami and Wang 2010；Murakami *et al.* 2011）。

2.4 気候予測の改善を目指して（3）2009年度～

2009年には、私は気象研究所から海洋研究開発機構の横浜研究所に移り、そこで革新プログラムに参加し温暖化時の台風の動向の研究を続けることになりました。革新プログラム後半（2009～2011年度）では、解像度20 km と60 km の MRI-AGCM3.2による多数の

温暖化予測実験が行われました。これらの多数の実験結果を用いて、温暖化時の台風の将来変化予測とそのメカニズムに関する詳細な解析が行われました（Murakami *et al.* 2012a, b, 2013；Kanada *et al.* 2013；Sugi 2012a, b；Sugi and Yoshimura 2012；Sugi *et al.* 2012, 2013, 2015, 2016）。2012年には、革新プログラムの次のプロジェクトとして、「気候変動リスク情報創生プログラム」（創生プログラム）が開始されました。私は、2014年3月に海洋研究開発機構を退職しましたが、4月から気象研究所の客員研究員として創生プログラムに参加し、温暖化時の台風の動向の研究を続けることになりました。

2012年には、世界最高速のスパコン「京」が稼働を始めましたが、その前の2011年から京コンピュータを用いる大型研究プロジェクト「HPCI 戦略プログラム（2011～2015年度）」（戦略プログラム）が開始されていました。私は、佐藤正樹さんをリーダーとする NICAM グループのメンバーとして戦略プログラムで、NICAM を用いた温暖化時の台風の動向の研究にも参加することになりました。京コンピュータのピーク性能10PFLOPS は地球シミュレータのピーク性能40TFLOPS の250倍ですが、実効速度は50倍程度で、戦略プログラムで当初目標として掲げていた“雲解像（3.5 km）”の NICAM による長期ランを行うことはできませんでした。温暖化時の台風の動向を調べるために、解像度14 km の NICAM の30年ランを実施しました。この実験によって、積雲対流パラメタリゼーションを用いないモデルでも、温暖化時には台風の発生数が減少することを確認するとともに、そのメカニズムに関して新しい知見が得られました（Satoh *et al.* 2015）。

2009年から2016年までの8年間、私はWMOの「気候変化の熱帯低気圧への影響に関する専門家チーム」（ET-CITC）のメンバーとして専門家チームの議論に参加しました。特に、2010年にレユニオンで開かれた第7回熱帯低気圧国際ワークショップ（IWTC-7）に向けて専門家チームが取りまとめたレビュー論文（Knutson *et al.* 2010）は、その後5年間で被引用数が1000件を超え、「地球が温暖化すると、台風の数は減るが、強い台風は増える」という専門家共通認識を世界に周知する論文となりました。

3. 地球温暖化時の台風の動向に関する研究の進展

3.1 温暖化で台風全体の数は減るが強い台風は増える

私が、防災科学技術研究所で気象庁の水平解像度 T106 (120 km) の全球数値予報モデル GSM8911 を用いて温暖化時の台風の動向の予測の計算を始めたのは 1994 年 9 月ですが、現在気候 10 年、将来気候 10 年の計算をするのに、当時の計算機では 1 年半かかり、計算が終わったのは 1996 年の 2 月でした。その後、詳しい解析をして論文として公表したのは、6 年後の 2002 年になってしまいました。論文の執筆が遅れたのはいくつかの理由があります。一つは、計算が終わった直後の 1996 年の 4 月に気象研究所に戻り、季節予報の研究がメインの研究テーマになったことです。幸いなことに、温暖化時の台風の研究も地球フロンティアとの共同研究という形で継続することができましたが、季節予報の予測可能性の論文を先に出す必要がありました。温暖化時の台風の論文の執筆が遅れたもう一つの理由（こちらの方が本質的な理由）は、「温暖化により台風の数が減る」という実験結果に疑問の声があったということです。

温暖化して大気中の水蒸気が増えると対流活動が活発になり、台風は強くなり数も増えるだろうというのが常識的な予想でした。私が温暖化時の台風の動向の予測の計算を始めたころには、ドイツのマックスプランク研究所の Bengtsson たちも ECMWF の数値予報モデルをもとに作られた全球大気モデル ECHAM3 を用いて同様の計算を実施していました。そして、1996 年には「温暖化により台風の数が減る」という結果を論文として公表していました (Bengtsson *et al.* 1996)。この論文に対しては、「ITCZ の降水量が減るから台風の数が減るとするのは、実験設定に問題があるのではないか」との批判的コメントが出されました (Landsea 1997)。温暖化で台風の数が減る理由を説明することが求められていました。私の論文 (Sugi *et al.* 2002) では、「熱帯の降水量は増えるが循環は弱まる。そのため台風の数が減る」という説明をしています。この結論に至るまで時間がかかり、2001 年に刊行された IPCC の第 3 次評価報告書 (TAR) には間に合いませんでした。

IPCC-TAR (IPCC 2001) では、Bengtsson *et al.* (1996) の論文は実験設定に問題がある (Landsea 1997) などの理由で「温暖化で全球の台風の数が減る」という結論は疑問視されています。一方、「温暖

化で台風が強くなる」ということについては、領域モデルにハリケーンモデルをネストした Knutson and Tuleya (1999) の実験結果などにより、妥当な結論とみなされています。IPCC-TAR の熱帯低気圧に関するまとめ (606 ページ) では、「熱帯低気圧の地域的な出現頻度が変化するかもしれない。最大強度が 5 ~ 10% 増加し、降水強度が 20 ~ 30% 増加するかもしれない」と書かれています。

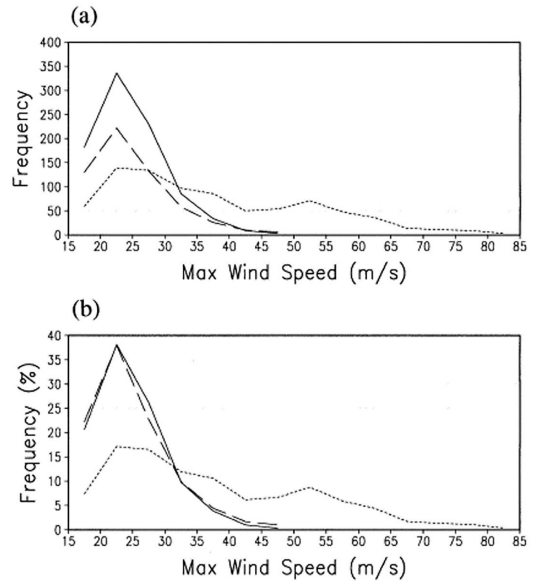
私の論文 (Sugi *et al.* 2002) では、第 1 図に示されているように「温暖化で台風全体の数が減る」ことは明瞭ですが、強さの変化についてははっきりしていません。強さの変化については、領域モデルにハリケーンモデルをネストした実験で示されていました (Knutson *et al.* 1998; Knutson and Tuleya 1999)。この実験では、同じ数の台風の強さが現在と温暖化時でどう変わるかを調べた結果、「温暖化で台風は強くなる」ことが示されています。「強い台風が増えるか」どうかは、「台風全体の数がどう変化するか」ということと、「台風の強さがどう変化するか」ということの二つの変化の兼ね合いで決まるので、二つの変化を同時に調べる実験が必要になります。「温暖化で強い台風が増える」ということは、McDonald *et al.* (2005) や Oouchi *et al.* (2006) による、高解像度の全球大気モデルによる実験で示されました。McDonald *et al.* (2005) は、英国気象局の解像度約 100 km の全球大気モデル HadAM3 の 17 年ランで、「温暖化により全球の台風の数は 6% 減るが、強い台風の数は増える」という結果を示しています。Oouchi *et al.* (2006) は、解像度 20 km の全球大気モデル MRI/JMA-AGCM の 10 年ランで「温暖化により全球の台風の数は 30% 減るが、強い台風の数は増える」ことを示しました (第 2 図)。この実験では、温暖化により台風の最大風速が 14% 増加することも示されました。

2007 年に IPCC 第 4 次評価報告書 (AR4) が刊行され (IPCC 2007)、第 10 章の全球予測の中で台風の将来変化に関する研究結果が紹介されています。全球大気モデルの実験結果として、Sugi *et al.* (2002) や McDonald *et al.* (2005) も引用されていますが、現実的な強さの台風を再現できない低解像度のモデルのカテゴリーに分類されて、その実験結果は信頼性が低いとされています。一方、Oouchi *et al.* (2006) は、解像度の高い領域モデルの実験結果とともに、現実的な強さの台風を再現できる高解像度のモデルのカテゴリ

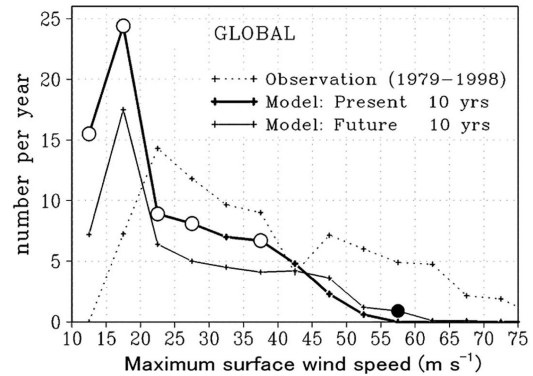
りに分類されています。しかし、このカテゴリーの全球モデルは一つしかないので、「温暖化で全球の台風の数が減る」という実験結果の信頼性は低いとされています。結局、IPCC-AR4の政策決定者向け要約 (SPM) では、「様々なモデル実験の結果、将来熱帯の海面水温が高くなると、熱帯低気圧 (台風, ハリケーン) は、より強くなることは確からしい。一方、将来温暖化により全球の熱帯低気圧の数が減少するという予測は信頼性が低い」と結論しています。

IPCC-AR4の後、多数の高解像度全球モデルによる温暖化実験の結果が発表されました。Sugi *et al.* (2009) では、共生プロジェクトと革新プログラムの前期の解像度20 km のモデルの4つの実験結果、解像度60 km のモデルによる4つの実験結果が報告されています。これらの実験では、温暖化により全球の台風の数が6~29%減ることが示されました。Zhao *et al.* (2009) では、米国地球流体力学研究所 (GFDL) の解像度50 km の全球大気モデルによる4つの温暖化実験の結果が報告されています。これらの実験でも、温暖化により全球の台風の数が11~20%減ることが示されました。IPCC-AR4の後に公表されたこれらの研究成果を踏まえて、WMOの「気候変化の熱帯低気圧への影響に関する専門家チーム」(ET-CITC)で再検討した結果、専門家チームの見解として「既存のモデル研究は一貫して全球の台風の数が増加すると予測している」とまとめています (Knutson *et al.* 2010)。

さらにこの後、革新プログラム後期の多数の実験の結果が公表されました。Murakami *et al.* (2012b) では、解像度20 km と60 km のMRI-AGCM3.1および3.2の4つの実験結果が報告されています。これらの実験では、温暖化により全球の台風の数が増加することが示されました。さらに、解像度20 km の実験では強い台風の数が増加することも示されました (第3図)。この図では、解像度が同じ20 km のモデルでも、積雲対流スキームが異なる二つのバージョン (MRI-AGCM3.1と3.2) では、台風の強度の分布が大きく異なり、温暖化による強い台風の増加の程度も異なっていることも示されています。Murakami *et al.* (2012a) では、解像度60 km のモデルによる、3つの積雲対流スキームと4つの海面水温変化パターンを用いた12メンバーのアンサンブル実験の結果が報告されています。その結果、温暖化により全球の台風数は



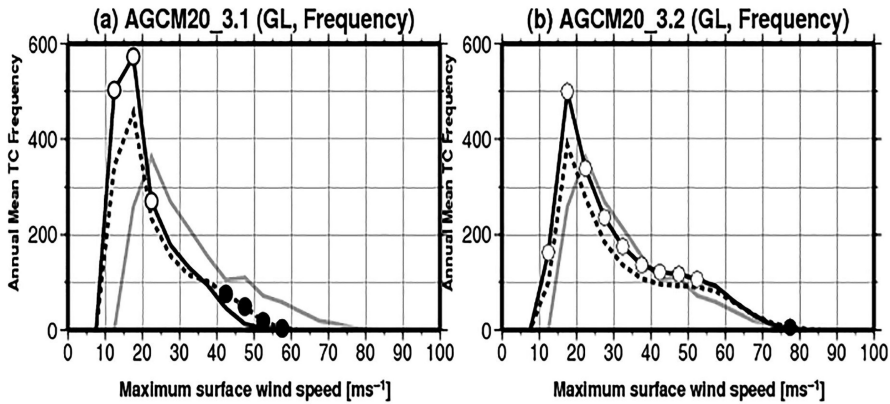
第1図 (a) 台風の最大風速の出現頻度。実線：現在気候実験，破線：将来 (2×CO₂) 実験，点線：観測。(b) 台風の最大風速の出現率 (%)。Sugi *et al.* (2002) より。



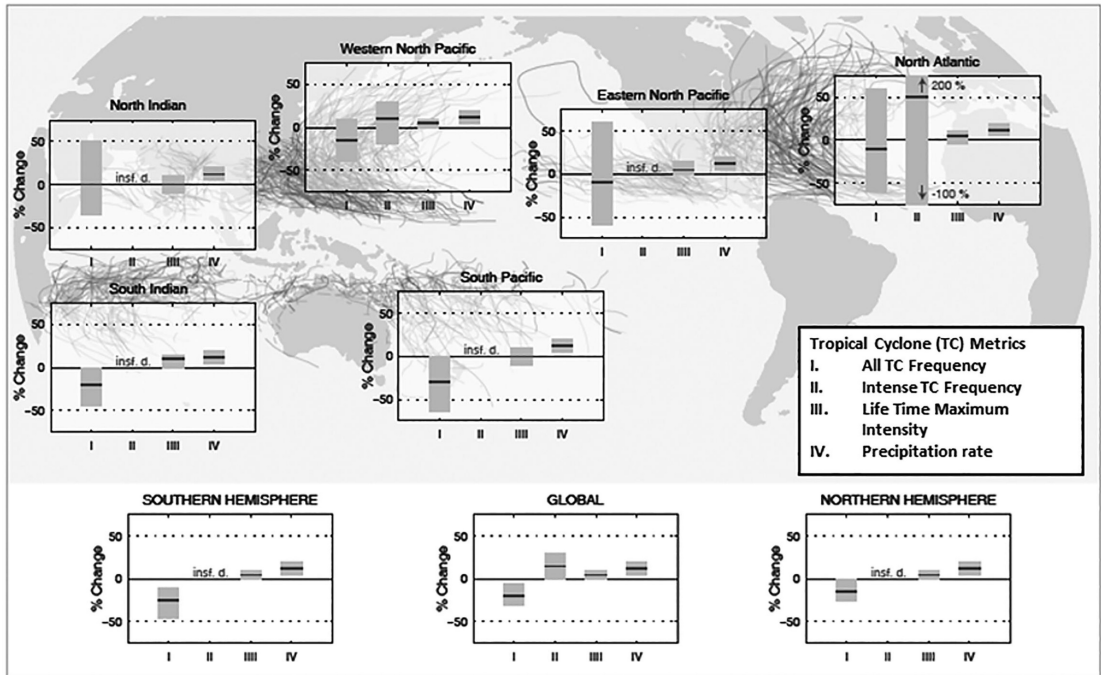
第2図 台風の生涯最大風速の出現頻度。太実線：現在気候実験，細実線：将来実験，点線：観測。Oouchi *et al.*(2006)より。

13~28%減ることが示されました。また、海域ごとの台風の数の変化は海面水温変化パターンの影響を強く受けることも示されました (定理4)。

2013年に公表されたIPCC第5次評価報告書 (AR5) (IPCC 2013) では、Knutson *et al.* (2010) のレビューとその後の研究成果をもとに、第14章の将来の地域的気候変化の中で、温暖化時の台風の動向に



第3図 台風の最大風速の出現頻度。実線：現在気候実験，点線：将来実験，灰色実線：観測。(a) 20 km MRI-AGCM_3.1, (b) 20 km MRI-AGCM_3.2. Murakami *et al.* (2012b) より。



第4図 各海域の、I 台風の発生数、II 非常に強い台風の発生数、III 平均生涯最大風速、IV 台風中心付近の降水強度、の将来変化(%)。下段は、左から南半球、全球、北半球。IPCC (2013) Figure 14.17より。

関する研究の成果のまとめを Figure 14.17 (1250 ページ) に示しています (第4図)。この図では、「温暖化により全球の台風の数は減る、非常に強い台風の数は増える、最大風速はわずかに増加する、台風中心周辺の降水強度はかなり増加する」ということが示さ

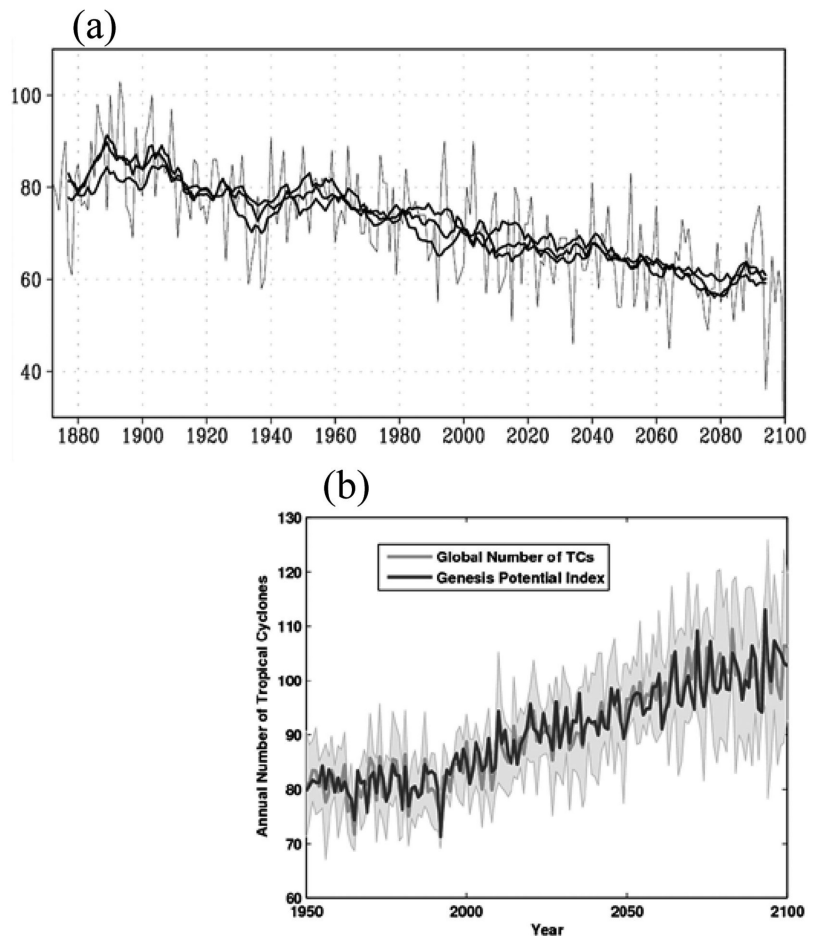
れています。この図には、台風の動向の地域的な変化の予測については不確実性が非常に大きいということ、この不確実性の低減が今後の重要課題であることも示されています。

3.2 地球温暖化による台風の変化のメカニズムに関する研究

Knutson *et al.* (2010) や IPCC-AR5 (2013) によって、「地球温暖化で全球の台風の数減る」ということは、多数の研究者の共通認識となりましたが、「それでも温暖化で台風の数が増える」と考える研究者もいます。IPCC-AR5 (2013) でも、本文中には「全球の台風の数減るもしくはほとんど変化しない可能性が高い」という記述があります (1252ページ)。第5図 a は、Sugi *et al.* (2015) の解像度60 km のMRI-AGCM3.2の228年ランの全球の台風数の長期変動で、19世紀末から21世紀末にかけて台風の数減少トレンドが明瞭です。一方、第5図 b は、Emanuel (2013) が大気海洋結合モデル比較実験 CMIP5の結果を用いて、力学的手法と統計的手法で推定した全球の台風数の長期変動で、20世紀半ばから21世紀末にかけて台風数の増加トレンドが明瞭です。私は、Emanuel (2013) の力学的手法は、初期渦の数が変わらないとする実験設定に問題があると思います。また、統計的手法は、現在気候の統計的關係を温暖化した気候に適用することに問題があると思います。これに対してEmanuelは「モデル実験でも、現在気候で台風の再現性がよいから将来予測が正しいとは言えない。多数のモデルが温暖化で台風の数減ると予測していても、どのモデルも共通の誤りをおかしている可能性もある」と主張していました。この議論は、台風の発生・発達将来変化のメカニズムが理解できなければ決着しない議論だと思えます。

Sugi *et al.* (2002) で

は、地球温暖化で全球の台風の数減る理由は、「熱帯の降水量は増えるが、熱帯大気の安定度が増し熱帯の循環が弱まるため」という説明をしています。温暖化で地表気温が1°C上昇すると、大気中の水蒸気は約7%増加しますが、降水量は2~3%しか増加しません。これは、降水量は放射冷却量とバランスしているためです (定理2)。温暖化で地表気温が1°C上昇しても、放射冷却量は2~3%しか増加しないことに対応しています。水蒸気量が7%増加しても、降水量が2~3%しか増加しないためには、雲の中の上昇流が弱くならなければなりません。温暖化により熱帯の上昇流が弱くなることは、大気の安定度の変化からも理解できます。積雲対流の降水に伴う凝結熱は、上昇流



第5図 (a) MRI-AGCM3.1の1876年から2099年までの228年ランの全球の台風発生数の変動。Sugi and Yoshimura (2012) より。(b) CMIP5のモデルの実験結果から、力学的手法と統計的手法で推定した全球の台風の1951年から2000年の発生数の変動。Emanuel (2013) より。

による断熱冷却とバランスしています (定理 3)。断熱冷却は安定度と上昇流の積に比例します。温暖化により熱帯大気安定度は、水蒸気量の増加とほぼ同じように 7%/°C 増加します (杉 2008b; Sugi 2012b)。断熱冷却量は、降水と同じように 2~3% しか増加しないので、バランスするためには上昇流が弱くならなければなりません。

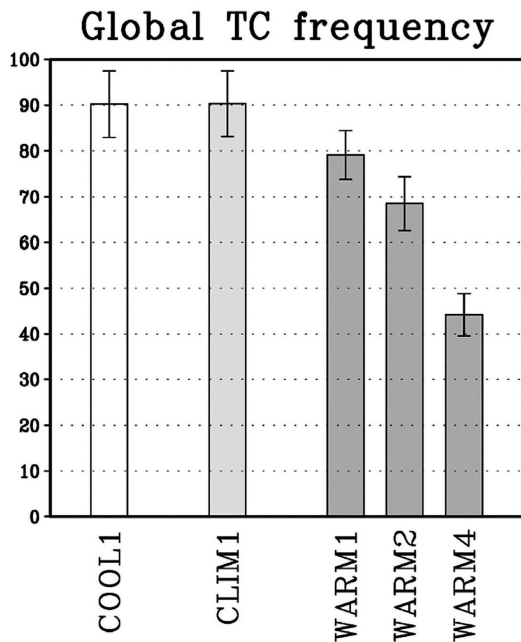
地球温暖化で熱帯の上昇流が弱くなることは、JMA-GSM を用いた実験でも、実際そうになっていることが確認できました (Sugi *et al.* 2002)。さらに、このことは、多くの気候モデルでも確認されています (Held and Soden 2006; Vecchi and Soden 2007)。地球温暖化で熱帯の上昇流が弱くなることは、かなり確かなことと考えられます。問題は、熱帯の平均的な上昇流が弱くなると台風の発生数が減ると言えるかということです。台風の発生には、積乱雲の集団の大規模な上昇流に伴う下層風の収束による渦の強化が必要

です。したがって、温暖化により上昇流が弱くなることは台風の発生に好都合ではないと言えます。しかし、平均的な上昇流と台風の発生数との定量的な関係の理解は、今後の課題として残されています。

温暖化による台風の発生数の変化のメカニズムに関する重要な研究として、吉村 純さんが JMA-GSM8911 を用いて地球フロンティアで行った数値実験があります (Yoshimura and Sugi 2005)。この実験では、CO₂ の濃度を一定にして SST だけを変化させた場合と、SST を一定にして CO₂ 濃度だけを変化させた場合で、それぞれ台風の発生数がどのように変化するかを調べています。その結果、SST の変化 (SST 効果) は台風の発生数をあまり変化させないが、CO₂ の変化 (CO₂ 効果) は台風の発生数を大きく変えるということが示されました (第 6 図)。Yoshimura and Sugi (2005) では、台風の発生数の変化に対する SST 効果が小さい理由については、SST が高くなって水蒸気が増え対流が活発になる効果と、安定度が増加して上昇流が弱くなる効果が互いにキャンセルするためと考えています。一方、CO₂ 効果については、CO₂ を増やすと降水量が減りますが、水蒸気量や安定度はほとんど変化しないので、上昇流が弱くなり台風の発生数が減ると考えています。

CO₂ 効果について、Sugi and Yoshimura (2004) では、CO₂ を増やすと降水量が減るのは CO₂ と水蒸気の長波放射の吸収帯のオーバーラップ効果によるものと考えています。オーバーラップ効果により、成層圏の CO₂ からの下向き長波放射の一部が、対流圏の水蒸気によって吸収され対流圏下層の大気を温める (放射冷却を弱める) ため、それとバランスする降水量も減ることになります (第 7 図)。CO₂ は、温室効果気体として下向き長波放射によって地表面を加熱しますが、それとは別に、オーバーラップ効果によって対流圏の大気を直接加熱します。この CO₂ による大気の直接加熱は CO₂ の直接効果として知られていますが、最近はこのオーバーラップ効果のためであるということは忘れられているようです (Bony *et al.* 2013)。

Yoshimura and Sugi (2005) では、温暖化による台風の発生数の減少に関して、SST 効果は小さく、大部分が CO₂ 効果で説明できると考えています。この考えが正しいとすれば、また CO₂ 効果はオーバーラップ効果のためであるとすれば、「地球の大気に水蒸気と CO₂ が共存し、オーバーラップ効果があるた



第 6 図 全球の台風の発生数に対する SST 効果 (COOL1, CLIM1, WARM1) と CO₂ 効果 (WARM1, WARM2, WARM4)。CLIM1 は現在気候実験, COOL1 (WARM1) は, SST は CLIM1 - 2 K (CLIM1 + 2 K), CO₂ は CLIM1 と同じ。WARM2 (WARM4) は, SST は WARM1 と同じ (CLIM1 + 2 K), CO₂ は WARM1 の 2 倍 (4 倍)。Yoshimura and Sugi (2005) より。

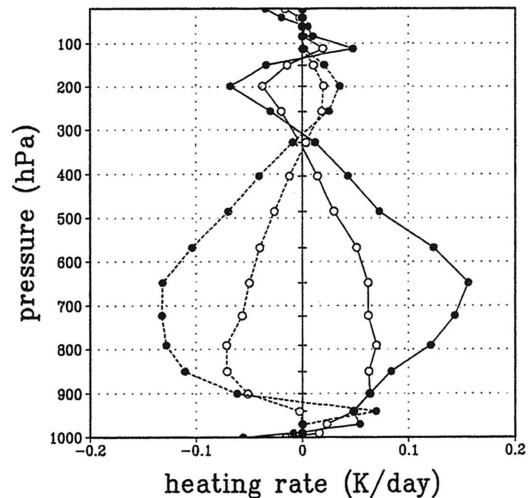
めに、CO₂が増えて温暖化すると台風の数が減る」と言うことができます。「温暖化で台風の数が減るのはオーバーラップ効果のためだ」という考えに到達したとき、私は自然の巧妙で不思議なからくりを発見した喜びを感じました。長い研究人生の中で、このような発見の喜びを一瞬でも感じる事ができたということは、研究者として一番幸せなことではないかと思っています。

その後の研究で、温暖化による台風の発生数の減少に関して、SST効果は決して小さくないことが示されました (Held and Zhao 2011; Sugi *et al.* 2012, 2015; Walsh *et al.* 2015)。したがって、「温暖化で台風の数が減るのは、オーバーラップ効果のためだけではない」ことが明らかになりました。しかし、オーバーラップ効果が重要な役割を果たしていることには変わりはないと思います。Sugi *et al.* (2015) では、温暖化による台風の発生数の減少に関する SST 効果を明確にするために、CO₂濃度は変えずに SST を現在より一様に 4 K 高くする実験と、4 K 低くする実験を行いました。その結果、SST を 4 K 高くすると台風の数は26%減少し、4 K 低くすると18%増加しました (第 8 図)。この実験の結果は予想通りの結果と言えますが、ひとつ興味深い点は、SST を 4 K 低くした場合に現在よりも台風が多く発生している点です。気象学の教科書には、台風は SST が 26°C 以上の海域で発生すると書かれていますが、SST を 4 K 低くした実験ではほとんどの台風は SST が 26°C 以下の海域で発生しています (第 8 図)。これは、26°C という絶対値が台風の発生の必要条件ではなく、相対的に SST が高く対流活動が活発な所で台風は発生することを示していると考えられます。

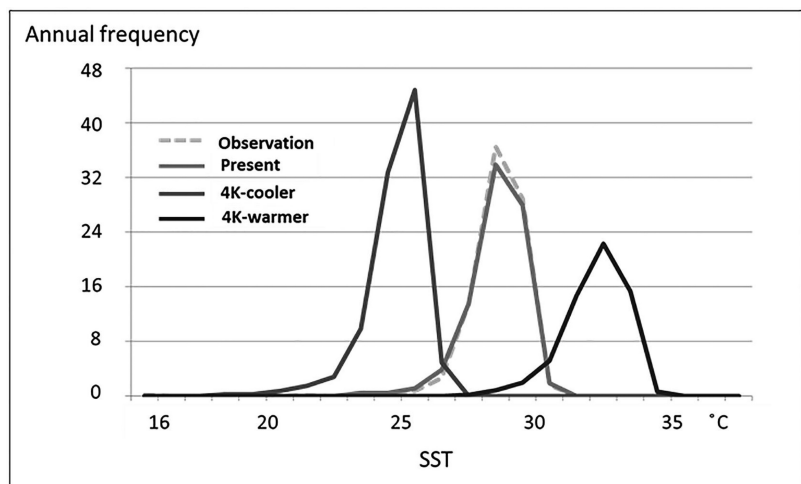
4. おわりに

ここまで、少し長くなりましたが私の40年の研究人生を振り返ってみました。最後に、いくつか補足させていただきます。一つは、私が過ごしてきた40年の時代背景についてです。私が

気象庁に入り数値予報の勉強を始めたのは1974年ですが、1975年に ECMWF が設立され、それを契機に全球モデルによる数値予報の大発展期が始まりました。1980年に ECMWF にスパコン CRAY1 が導入されたのを皮切りに、スパコンの大発展期も始まりました。私が数値予報業務に携わった、1977年から1988年は、数値予報の高度成長期と言ってよい時代でした。1989



第 7 図 大気中の CO₂濃度を 2 倍 (白丸) または 4 倍 (黒丸) にした時の放射加熱率 (実線) の増加 (放射冷却率の減少) と凝結熱 (点線) の減少。Sugi and Yoshimura (2004) より。



第 8 図 台風の発生地点の SST の出現頻度。中央実線 (破線) : 現在気候実験 (観測), 左 (右) 実線 : -4 K (+4 K) 実験。Sugi *et al.* (2015) より。

年に気象研究所に移り気候予測の研究を始めましたが、その前の1988年はIPCCが設立された年です。そこから、地球温暖化予測研究の大発展期が始まりました。私は、数値予報と温暖化予測研究のそれぞれの大発展期に業務や研究に参加できたことは大変幸運であったと思っています。

私の後半の気候予測研究の中心テーマは、地球温暖化時の台風の動向に関する研究ですが、この研究は、「全地球システムモデル研究」、「地球フロンティア」、地球シミュレータを用いた「共生プロジェクト」「革新プログラム」「創生プログラム」などの大型気候変動研究プロジェクトの中で実施されました。大型研究プロジェクトでは、当然大型研究予算に見合う実用的研究成果が求められます。しかし、それと同時に、それらの実用的研究を支える基礎研究も必要です。特に温暖化予測研究では、100年後の将来予測が正しいかどうか検証することができないので、将来変化のメカニズムの理解に関する基礎研究が不可欠です。大型プロジェクトの中で研究を進めていく際に、実用研究と基礎研究のバランスを考えるガイドラインとして、松野（1995）の「最も実用的な研究は最も基礎的な研究？」が大変役に立ちました。また、温暖時の台風の動向の研究では、台風の発生・発達のためのメカニズムやそれに関連する積雲対流の問題など、いくつかやり残した心残りのテーマがあります。気力と体力の続く限り、これらのテーマについて研究を続けたいと思っています。今後ともよろしく願います。

謝 辞

最後になりますが、40年におよぶ研究人生で、人とテーマとの出会いが大切であったことを強く感じています。研究を進めるうえで、多くの方と出会い、議論を通じてアイデアを少しずつつぎつぎと育んでいくプロセスが大切であったと感じています。金光正郎さん、松野太郎先生をはじめ、本文中にお名前を挙げさせていただいた方はもちろん、本文中にお名前を挙げなかった方々も含めて、研究やモデル開発にご指導、協力、助力、議論いただいた多くの方々に改めて深く感謝の意を表したいと思います。ありがとうございました。

参 考 文 献

- Bengtsson, L., M. Botzet and M. Esch, 1996 : Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? *Tellus*, **48A**, 57-73.
- Bony, S., G. Bellon, D. Klocke, S. Sherwood, S. Fermin and S. Denvil, 2013 : Robust direct effect of carbon dioxide on tropical circulation and regional precipitation. *Nature Geosci.*, **6**, doi : 10.1038/ngeo1799.
- Emanuel, K. A., 2013 : Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **110**, 12219-12224.
- Geng, Q.-Z. and M. Sugi, 2001 : Variability of the North Atlantic cyclone activity in winter analyzed from NCEP-NCAR reanalysis data. *J. Climate*, **14**, 3863-3873.
- Geng, Q.-Z. and M. Sugi, 2003 : Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols. — Study with a high-resolution AGCM. *J. Climate*, **16**, 2262-2274.
- Haltiner, G. J., 1971 : *Numerical Weather Prediction*. John Wiley and Sons, Inc., 317pp.
- Held, I. M. and B. J. Soden, 2006 : Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate*, **19**, 5686-5699.
- Held, I. M. and M. Zhao, 2011 : The response of tropical cyclone statistics to an increase in CO₂ with fixed sea surface temperatures. *J. Climate*, **24**, 5353-5364.
- IPCC, 2001 : *Climate Change 2001 : The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 892pp.
- IPCC, 2007 : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1009pp.
- IPCC, 2013 : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1552pp.
- Kanada, S., A. Wada and M. Sugi, 2013 : Future changes in structures of extremely intense tropical cyclones using a 2-km mesh nonhydrostatic model. *J. Climate*, **26**, 9986-10005.
- Kar, S. C., M. Sugi and N. Sato, 1996 : Simulation of the Indian summer monsoon and its variability using the JMA global model. *Pap. Meteor. Geophys.*, **47**, 65-101.
- Kar, S. C., M. Sugi and N. Sato, 1997 : Tropical intra-seasonal oscillation (30-60 day) during N.H. sum-

- mer in the JMA model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 975–994.
- Kar, S. C., M. Sugi and N. Sato, 2001 : Interannual variability of Indian summer monsoon and internal variability in the JMA global model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 607–623
- Kawamura, R., M. Sugi and N. Sato, 1995a : Interdecadal and interannual variability in the northern extratropical circulation simulated with the JMA global model. Part I : Wintertime leading mode. *J. Climate*, **8**, 3006–3019.
- Kawamura, R., M. Sugi and N. Sato, 1995b : Interdecadal and interannual variability in the northern extratropical circulation simulated with the JMA global model. Part II : Summertime leading mode. *J. Climate*, **8**, 3020–3027.
- Kawamura, R., M. Sugi, T. Kayahara and N. Sato, 1997 a : Recent abnormal changes in wintertime atmospheric response to tropical SST forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 783–786.
- Kawamura, R., M. Sugi and N. Sato, 1997b : Interdecadal and interannual variations over the North Pacific simulated by a set of three climate experiments. *J. Climate*, **10**, 2115–2121.
- Kawamura, R., M. Sugi, T. Kayahara and N. Sato, 1998 : Recent extraordinary cool and hot summers in East Asia simulated by an ensemble climate experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 597–617.
- Knutson, T. R. and R. E. Tuleya, 1999 : Increased hurricane intensities with CO₂-induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction system. *Clim. Dyn.*, **15**, 503–519.
- Knutson, T. R., R. E. Tuleya and Y. Kurihara, 1998 : Simulated increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate. *Science*, **279**, 1018–1020.
- Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A.K. Srivastava and M. Sugi, 2010 : Tropical cyclones and climate change. *Nature Geosci.*, **3**, doi : 10.1038/ngeo779.
- Kobayashi, C., K. Takano, S. Kusunoki, M. Sugi and A. Kitoh, 2000 : Seasonal predictability in winter over eastern Asia using the JMA global model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2111–2123.
- Krishnan, R. and M. Sugi, 2001 : Baiu rainfall variability and associated monsoon teleconnections. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 851–860.
- Krishnan, R. and M. Sugi, 2003 : Pacific decadal oscillation and variability of the Indian summer monsoon rainfall. *Clim. Dyn.*, **21**, 233–242.
- Kusunoki, S., M. Sugi, A. Kitoh, C. Kobayashi and K. Takano, 2001 : Atmospheric seasonal predictability experiments by the JMA AGCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 1183–1206.
- Landsea, C. W., 1997 : Comments on “Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes?” *Tellus*, **49A**, 622–623.
- 松野太郎, 1995 : 最も実用的な研究は最も基礎的な研究？ *天気*, **42**, 3–4.
- McDonald, R. E., D. G. Bleaken, D. R. Cresswell, V. D. Pope and C. A. Senior, 2005 : Tropical storms : representation and diagnosis in climate models and the impacts of climate change. *Clim. Dyn.*, **25**, 19–36.
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai and M. Nakagawa, 2006 : 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model. —Mean climate states—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 165–185.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh, 2012 : Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233–258.
- Murakami, H. and M. Sugi, 2010 : Effect of model resolution on tropical cyclone climate projections. *SOLA*, **6**, 73–76.
- Murakami, H. and B. Wang, 2010 : Future change of North Atlantic tropical cyclone tracks : Projection by a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Climate*, **23**, 2699–2721.
- Murakami, H., B. Wang and A. Kitoh, 2011 : Future change of western North Pacific typhoons : Projections by a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Climate*, **24**, 1154–1169.
- Murakami, H., R. Mizuta and E. Shindo, 2012a : Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM. *Clim. Dyn.*, **39**, 2569–2584.
- 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, 2012b : Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *J. Climate*, **25**, 3237–3260.
- Murakami, H., M. Sugi and A. Kitoh, 2013 : Future changes in tropical cyclone activity in the North

- Indian Ocean projected by high-resolution MRI-AGCMs. *Clim. Dyn.*, **40**, 1949-1968.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007 : The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki and A. Noda, 2006 : Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model : Frequency and wind intensity analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 259-276.
- Palmer, T. N. and J. Shukla, 2000 : Editorial to DSP/PROVOST special issue. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1989-1990.
- Palmer, T. N., C. Brankovic and D. S. Richardson, 2000 : A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2013-2034.
- Palmer, T. N. *et al.*, 2004 : Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 853-872.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008 : Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- Satoh, M., Y. Yamada, M. Sugi, C. Kodama and A. T. Noda, 2015 : Constraint on future change in global frequency of tropical cyclones due to global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 489-500.
- Shibata, K., H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka and M. Sugi, 1999 : A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with an MRI/JMA98 GCM. *Pap. Meteor. Geophys.*, **50**, 15-53.
- Sugi, M., 1986 : Dynamic normal mode initialization, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 623-636.
- 杉 正人, 2008a : 天気予報と確率. *科学*, **78**, 413-415.
- 杉 正人, 2008b : 全球数値予報モデルの開発とそれを用いた気候予測に関する研究. *天気*, **55**, 391-400.
- Sugi, M., 2009 : Possible changes in tropical cyclone frequency and intensity due to global warming. *Glob. Environ. Res.*, **13**, 107-113.
- Sugi, M., 2010 : Toward improved projection of the future tropical cyclone changes. Charabi, Y., ed., *Indian Ocean Tropical Cyclones and Climate Change*, Springer, 29-35.
- Sugi, M., 2012a : Changes in earth's energy flows and clouds in 228-year simulation with a high-resolution AGCM. *Surv. Geophys.*, **33**, 427-443.
- Sugi, M., 2012b : Reduction of global tropical cyclone frequency due to global warming. Oouchi, K. and H. Fudeyasu, ed., *Cyclones : Formation, Triggers and Control*, Nova Science Publishers, 115-124.
- Sugi, M. and M. Kanamitsu, 1982 : A study of a subtropical upper level cyclone using JMA operational forecast model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 932-946.
- Sugi, M. and J. Yoshimura, 2004 : A mechanism of tropical precipitation change due to CO₂ increase. *J. Climate*, **17**, 238-243.
- Sugi, M. and J. Yoshimura, 2012 : Decreasing trend of tropical cyclone frequency in 228-year high-resolution AGCM simulations. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L19805, doi : 10.1029/2012GL053360.
- Sugi, M., K. Kuma, K. Tada, K. Tamiya, N. Hasegawa, T. Iwasaki, S. Yamada and T. Kitade, 1990 : Description and performance of the JMA operational global spectral model (JMA-GSM88). *Geophys. Mag.*, **43**, 105-130.
- Sugi, M., R. Kawamura and N. Sato, 1995a : The climate simulated by the JMA global model. Part 1 : Global feature. *Rep. Natl. Res. Inst. Earth Sci. Disaster Prev.*, **54**, 155-180.
- Sugi, M., R. D. Nair and N. Sato, 1995b : The climate simulated by the JMA global model. Part 2 : Tropical precipitation. *Rep. Natl. Res. Inst. Earth Sci. Disaster Prev.*, **54**, 181-197.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 1997a : Influence of global warming on tropical cyclone climatology : An experiment with the JMA global model. *WGNE Report No.25, WMO/TD-No.792*, 7.69-7.70.
- Sugi, M., R. Kawamura and N. Sato, 1997b : A study of SST-forced variability and potential predictability of seasonal mean fields using the JMA global model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 717-736.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 2002 : Influence of the global warming on tropical cyclone climatology : An experiment with the JMA global model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 249-272.
- Sugi, M., H. Murakami and J. Yoshimura, 2009 : A reduction in global tropical cyclone frequency due to global warming. *SOLA*, **5**, 164-167.
- Sugi, M., H. Murakami and J. Yoshimura, 2012 : On the mechanism of tropical cyclone frequency changes due to global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 397-

- 408.
- Sugi, M., H. Murakami and J. Yoshimura, 2013 : Mechanism of the Indian Ocean tropical cyclone frequency changes due to global warming. Mohanty, U. C. *et al.*, ed., *Monitoring and Prediction of Tropical Cyclones in the Indian Ocean and Climate Change*, Springer, 40–49.
- Sugi, M., K. Yoshida and H. Murakami, 2015 : More tropical cyclones in a cooler climate? *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 6780–6784.
- Sugi, M., H. Murakami and K. Yoshida, 2016 : Projection of future changes in the frequency of intense tropical cyclones. *Clim. Dyn.*, doi : 10.1007/s00382-016-3361-7.
- Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba and H. Tanaka, 2003 : MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM : Model description. *Pap. Meteor. Geophys.*, **53**, 119–138.
- Vecchi, G. A. and B. J. Soden, 2007 : Global warming and the weakening of the tropical circulation. *J. Climate*, **20**, 4316–4340.
- Walsh, K. J. E. *et al.*, 2015 : Hurricanes and climate : The U.S. CLIVAR working group on hurricanes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 997–1017.
- Yoshimura, H. and T. Matsumura, 2003 : A semi-Lagrangian scheme conservative in the vertical direction. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Ocean Modeling*, **33**, 3.19–3.20.
- Yoshimura, H., R. Mizuta and H. Murakami, 2015 : A spectral cumulus parameterization scheme interpolating between two convective updrafts with semi-Lagrangian calculation of transport by compensatory subsidence. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 597–621.
- Yoshimura, J. and M. Sugi, 2005 : Tropical cyclone climatology in a high-resolution AGCM. —Impact of SST warming and CO₂ increase—. *SOLA*, **1**, 133–136.
- Yoshimura, J., M. Sugi and A. Noda, 2006 : Influence of greenhouse warming on tropical cyclone frequency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 405–428.
- Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, M. Sugi, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda and T. Uchiyama, 2001 : The new Meteorological Research Institute coupled GCM (MRI-CGCM2). —Model climate and variability—. *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 47–88.
- Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose and A. Kitoh, 2011 : Meteorological Research Institute–Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1). —Model Description—. *Tech. Rep. MRI*, (64), 83pp.
- Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose and A. Kitoh, 2012 : A new global climate model of the Meteorological Research Institute : MRI-CGCM3. —Model description and basic performance—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 23–64.
- Zhao, M., I. M. Held, S.-J. Lin and G. A. Vecchi, 2009 : Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50-km resolution GCM. *J. Climate*, **22**, 6653–6678.

From Numerical Weather Prediction to Climate Projection Research
—Research on Tropical Cyclone and Climate Change—

Masato SUGI*

* *Meteorological Research Institute.*
E-mail: msugi@mri-jma.go.jp

(Received 23 May 2017; Accepted 7 August 2017)
