

# 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

—2007年度日本気象学会賞受賞記念講演—

杉 正 人\*

## 1. はじめに

この度は、日本気象学会賞という形で、私のこれまで行ってきた研究を評価していただいたことを大変うれしく思っています。私が気象庁に入ったのは今から33年前になりますが、私の場合は気象庁に入ってから気象学の勉強を始め、それから数値予報モデルの開発と気候予測の研究を続けて来ました。この間、多くの人と出会い、多くのチャンスに恵まれたことによって、この度の受賞の対象となった研究の仕事ができたと考えております。まず、いろいろな形でお世話になった多くの方に心から感謝の意を表したいと思いません。本稿では、時間の制約のために講演では省略した部分を補足しながら、受賞の対象となった研究の紹介をさせていただきます。

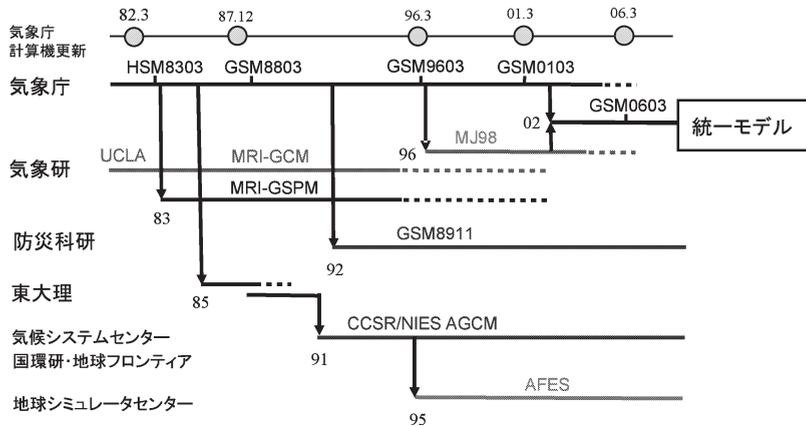
## 2. 全球数値予報モデルの開発

まず、私と気象庁全球数値予報モデルのかかわりについてお話しします。第1図のように、気象庁の数値予報モデルは、週間予報の精度向上と力学的長期予報の実現を目指して1988年の3月に、それまでの北半球モデルから全球モデルになりました。このとき同時に、物理過程の全面的な改訂が行われました。全球化、高解像度化とともに、放射過程の改良、重力波抵抗の導入などにより、予報精度が大幅に向上しました (Sugi *et al.* 1990)。その結果、1988年の9月にカナダのトロントで開かれた「数値モデルの系統誤差に関するワークショップ」(Sugi 1988 ; Bourke *et al.* 1991)でも、その長期ランの特性が、他の数値予報センターのモデルや大気大循環モデル (AGCM) と遜色ないことが確認されました。その後、私が、防災科

学技術研究所で気象庁の全球数値予報モデルをAGCMとして気候予測の研究のために用いることになりましたが、それによって、このモデルがAGCMとして優れた性能のモデルであることを十分確認することができました (Sugi *et al.* 1995 a, b)。さらに、1990年代の前半に実施された、大気モデル相互比較実験 (AMIP) においても、気象庁の全球数値予報モデルは、他の数値予報センターのモデルとともに、研究用のAGCMを凌駕する性能であることが示されました (Lau *et al.* 1996)。そこで気象研究所でも、私が防災科学技術研究所から気象研究所にもどってから、気象庁の数値予報モデルをもとにしたAGCM (第1図のMJ98モデル) の開発をすることになりました。さらに、最近では、気象庁と気象研究所が共同で「統一モデル」開発を推進する体制ができて今日に至っています。水平解像度20 kmの全球大気モデルが今年の秋からルーチン化される予定 (2007年11月にルーチン化された) ですが、それに先だって、気象研究所では文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト」で、地球シミュレータを使って、AGCM単体としては世界最高の解像度の温暖化予測計算を実現することができました。このようなモデル開発は、もちろん私一人の力でできるものではなく、多くの人の力を結集してできたものです。ここであらためて、気象庁の全球数値予報モデルの開発に携わってこられた方々に感謝の意を表したいと思いません。私自身と気象庁全球数値予報モデルのかかわりについて言いますと、ちょうど1988年の3月に全球モデルがルーチン化された時の前後数年間に数値予報課で全球モデル開発グループのリーダーをしていて、私自身は、放射スキームの開発を担当していました。この時期は、ちょうどモデルの予報精度の高度成長期で、そういう時期にモデル開発に携わることができたことは、私にとっては非常にラッキーなことだったと思っています。その後、私は気象

\*気象研究所予報研究部。

—2007年11月5日受領—  
—2008年2月25日受理—



第1図 気象庁全球大気モデルの系譜。HSMは半球モデル，GSMは全球モデル，それに続く数字はバージョン名（ルーチン化された年月）を表す。図には計算機の更新に対応した主要なバージョンのみ示されている。

研究所の方に移り、モデルの開発よりもモデルを用いた気候予測の研究の方が大きなウェイトを占めるようになりましたが、数値予報課時代に放射スキームの開発を担当していたことが、後で気候予測研究に大変役に立っています。この点については、この後の気候予測研究の話の中でお話したいと思います。

### 3. 気候予測に関する研究

私は、1989年の4月に数値予報課から気象研究所の方に移り、気候予測の研究を始めることになりました。気象研究所に移った理由の1つに、数値予報の精度の高度成長もそう長くは続かないだろうという思いがありました。その予想は半分しか正しくありませんでした。というのは、その後も衛星データの同化技術の発展などにより、予報精度のかなり大幅な向上があったからです。気象研究所に移ったもう1つの理由は、数値予報モデルを用いた長期予報、気候予測の研究にチャレンジしたいということでした。気象研究所に移った当時は、気象研究所では独自の大気モデル（第1図のMRI-GCM）を用いて気候の研究が行われており、気象庁の数値予報モデルを用いた研究はすぐには出来ませんでした。初めは、気象研究所のAGCMと気象庁の数値予報モデルを統合した新しいモデルを開発することを試みましたが、うまくいきませんでした。その後、1992年に、防災科学技術研究所に出向する機会が与えられ、そこで、ようやく気象庁の全球数値予報モデルを用いて気候予測の研究をしたいという私の希望が実現することになりました。当時

の科学技術庁の施策として、防災科学技術研究所を気候変動予測研究の研究拠点にしようということで、新しくスパコンを導入したところでした。この科学技術庁の施策は、その後、地球フロンティアシステムの設立や、地球シミュレータ開発計画へと発展していくことになります。私にとっては、当時としては非常に大きなスパコンの計算資源を使う機会が与えられ、気象庁の数値予報モデルをAGCMとして気候予測の

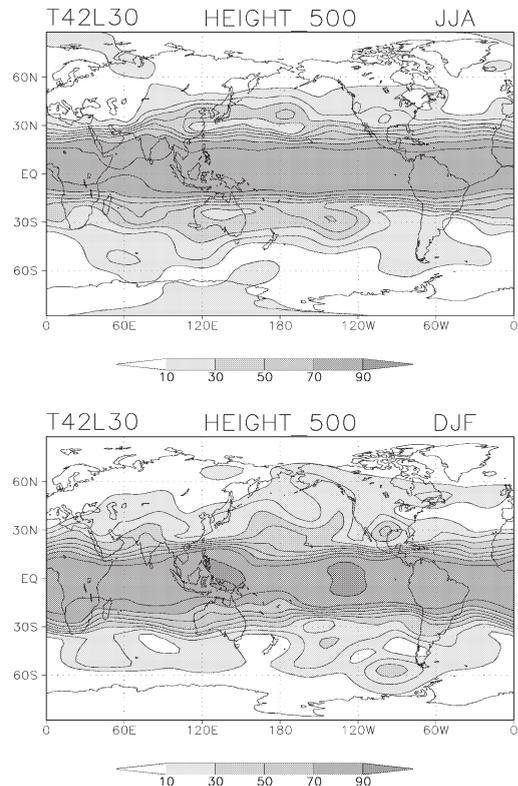
研究に使えるという、願ってもないチャンスが与えられたわけです。それと同時に、大きな責任を感じていました。この度の学会賞受賞は、その責任を少しでも果たせたことの証として肩の荷がおりたという気持ちもあります。

#### 3.1 季節予報の予測可能性

防災科学技術研究所では、2つの研究テーマについて気候予測に関する研究を行いました。1つは、季節予報の予測可能性の研究、もう1つは、地球温暖化と台風に関する研究です。いずれの研究も、数値予報モデルの特長を生かした、高解像度モデルの長期ランに基づく研究で、その後の私の研究のメインテーマとなりました。まず初めに、気象庁の数値予報モデルの気候特性、長期ランの誤差特性の調査を行いました。そのために、モデルの解像度を数値予報モデルのT106（水平解像度120 km）からT42（同300 km）に落として34年ランを行いました。その結果、気象庁数値予報モデルの気候特性は、世界のほかのAGCMと比べて同等以上のものであることを確認しました（Sugi *et al.* 1995 a, b）。一方では、他の多くのモデルにも共通するいくつかの問題点も明らかになりました。例えば、プラネタリー波の振幅が小さくなる、太平洋でのプロッキングの頻度が少ない、それと関連する問題として、熱帯西部太平洋での降水が少ないなどの問題です。これらの問題はすぐに解決することはできず、スパコンを遊ばせておくわけにもいかないので、ある程度の欠点は残したまま数値実験を始めることが必要でした。

季節予報の予測可能性の研究ですが、これは、たまたま1994年にハドレーセンター（英国）で開かれた「20世紀の気候（C20 C）ワークショップ」に参加したことから始まったものです。当時ハドレーセンターでは、20世紀の全球海面水温解析データセット（GISST）を作成し、それをAGCMの下部境界条件として用いて、20世紀の気候再現相互比較実験を系統的に行うことが企画されていました。その中の1つとして、過去50年の海面水温を用いてAGCMによるアンサンブルシミュレーションを行い、季節平均場の予測可能性を評価するという課題がありました。季節予報において、初期値問題としての大気予測可能性の限界とされている2週間を超えて予測ができるのは、海洋の長期変動によって駆動される大気の長期変動があるということが重要です。そのような変動の代表的なものとしては、エルニーニョ現象に伴う熱帯の海面水温の長期変動があります。そこで、季節予報の予測可能性の問題は、海面水温の変動を境界条件とした境界値問題として考えることができます。過去の観測された海面水温を境界値として大気モデルを用いてアンサンブル実験をする場合、アンサンブル平均の変動はアンサンブルのメンバーに共通の海面水温の変動で駆動された予測可能なシグナルの変動と考えることができます。したがって、大気的全変動（分散）のうちアンサンブル平均の変動（分散）がどのくらいの割合を占めるかということ計算すれば、それは予測可能性を示す指標と考えられます。実際の予測の場合は、海面水温も予測しなければなりません。海面水温の観測値を用いた実験の予測可能性は海面水温が完全に予測出来た場合の予測可能性で、潜在的予測可能性と呼ばれています。

1994年にハドレーセンターのC20 Cワークショップに参加した時は、ハドレーセンターの旧バージョンの海面水温データ（MOHSST）を用いて、T42の解像度のモデル（GSM8911）で3メンバーの34年のランを行って潜在的予測可能性の計算をしました（Sugi *et al.* 1997 b）。わずか3メンバーのアンサンブルでしたが、その後、気象研究所でGISSTを用いて、T42の解像度のMJ98モデルで行った6メンバー50年のアンサンブル実験で計算したものと、本質的な差はありませんでした。第2図は、気象研究所で行ったアンサンブル実験で計算した潜在的予測可能性の分布図の例です。この図からわかる通り、一般に季節予報の予測可能性は熱帯で大きく中高緯度では小さく



第2図 アンサンブル実験により求められた500 hPa 高度場の季節平均場の潜在的予測可能性（単位は%）。上は夏（6～8月）、下は冬（12～2月）。

なっています。日本付近では、予測可能な変動は全変動の30～40%程度です。中高緯度で予測可能な変動が半分以下しかないということは、決定論的な季節予報では当たる場合よりも外れる場合の方が多いということを示しています。だから季節予報は役に立たない、やめるべきであると考えのではなく、たとえ30～40%であっても有効な情報があるのだからそれを最大限活用する方法を考えるべきであるということを示しています。現在の日本の気象庁をはじめとして、世界の主要な気象機関では気学モデルのアンサンブル予報に基づく確率予報が季節予報の中心になっています。今のところ、確率予報の情報が利用者の意思決定に十分活用されているとは言えませんが、近い将来そのような季節予報の利用が進むことを期待しています。

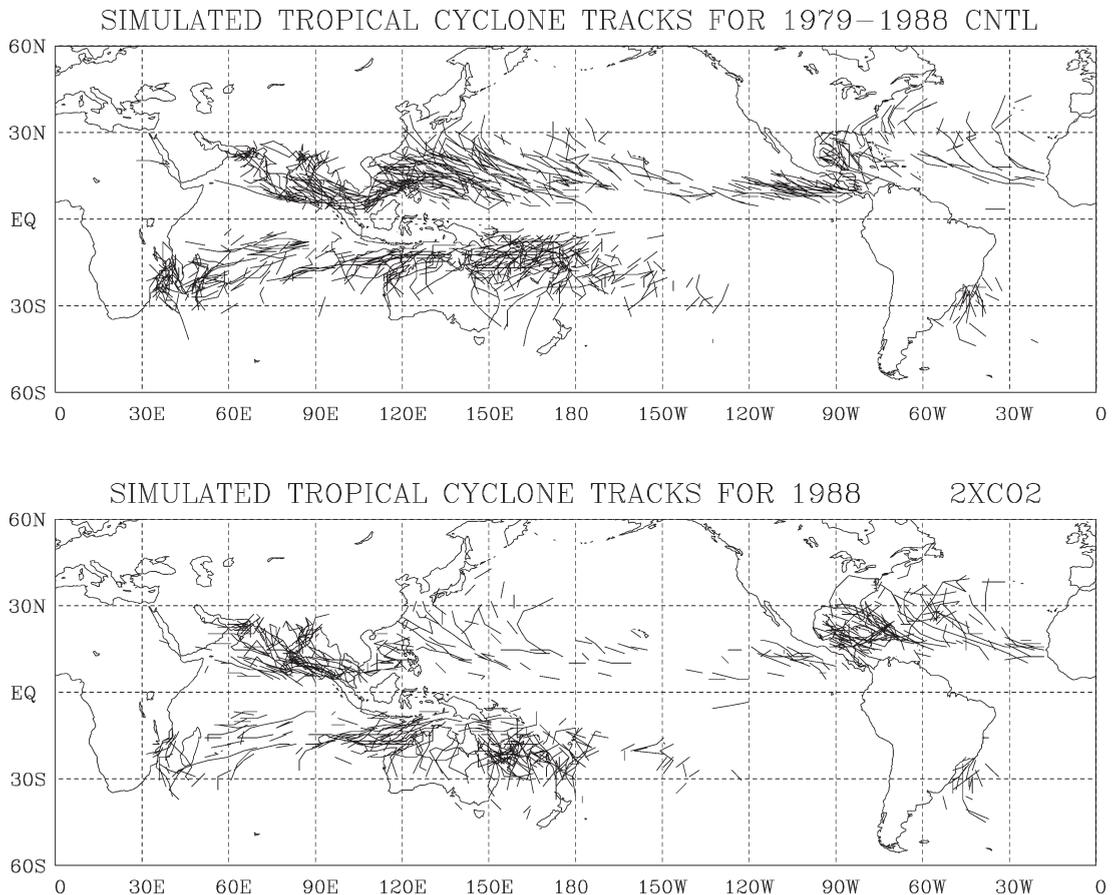
### 3.2 地球温暖化と台風

気候予測に関する研究の2つ目のテーマは、地球温

暖化によって台風がどうなるかという問題です。防災科学技術研究所で、地球温暖化と台風に関する数値実験を行った時の気象庁の数値予報モデルは、解像度 T106 (水平格子間隔120 km) の GSM8911モデル (第1図) でした。気象庁では、このモデルによる数値予報で台風の予測が大きく改善されていました。したがって、このモデルを AGCM として用いることにより、それまでに行われていた AGCM よりも台風のシミュレーションが大きく改善されることが期待できました。120 km という解像度は、当時の標準的な AGCM と比べると非常に高解像度のモデルといえます。当時の気象研究所の AGCM の格子間隔は、南北 400 km 東西 500 km でした。この当時、120 km という解像度で温暖化と台風の実験を行っていたのは、世界では、ほかにマックスプランク研究所 (ドイツ) の Bengtsson 達だけでした。今では、120 km の解像

度の AGCM の10年ランは比較的簡単に行えますが、当時の防災科学技術研究所のスパコンでは、10年ランを実行するのに9か月ほどかかりました。

第3図は、120 km の解像度の全球数値予報モデルによる数値実験で再現された熱帯低気圧の経路をプロットしたものです。上が現在の気候状態における10年間、下が大気中の二酸化炭素の濃度が2倍になって地球が温暖化したときの10年間に対応するものです。現在気候に対応する実験では、実際と比べて平均寿命が少し短いなどの欠点はあるものの、現実の熱帯低気圧の分布がほぼ再現されています。これと、温暖化したときの図 (下図) と比べてみると、温暖化した時の方が熱帯低気圧の数が少なくなっていることがわかります。全球では約30%の減少となっています (第1表)。この実験では特に北西太平洋の台風が大幅に減少しています。地球が温暖化すると全球の熱帯低気圧



第3図 解像度120 kmの全球数値予報モデルの10年ランで再現された熱帯低気圧の経路。上は現在気候、下は温暖化時。(Sugi *et al.* 2002 より)

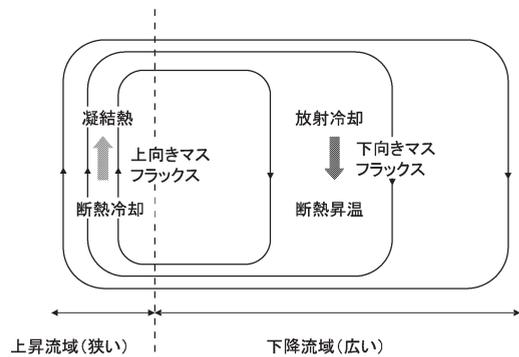
の数が減少するという結果は、すでに Bengtsson *et al.* (1996) によっても得られていました (第1表)。この結果は、「温暖化して大気中の水蒸気が増えれば、熱帯低気圧は強くなり数も増えるだろう」という常識的な予想と反するものであり、どうして減少するのかということに対する十分な説明なしには受け入れがたい結果でした。Bengtsson 達が結果を論文として公表したのは1996年でしたが、その論文に対しては実験設定が適当ではないなどの厳しいコメントが寄せられました。私達も1997年に実験結果の速報 (Sugi *et al.* 1997 a) を公表しましたが、その後結果を詳しく解析して、なぜ温暖化で熱帯低気圧の数が減るのかという理由を論文 (Sugi *et al.* 2002) としてまとめて公表するまでに時間がかかりました。なぜ温暖化で熱帯低気圧の数が減るのかという問題は、この研究の中で特に重要な問題ですので、その後の研究の成果も含めて、少し詳しく解説したいと思います。

Bengtsson *et al.* (1996) では、温暖化で熱帯低気圧の数が減る理由として熱帯の大気の循環が弱くなることを挙げていました。熱帯の大気循環が弱くなる理由としては、中緯度の偏西風の弱まりとハドレー循環の弱まりが関係しているのではないかと述べています。Sugi *et al.* (2002) では、熱帯の大気循環が弱くなる理由は、熱帯大気のエネルギーバランスによって説明できると考えました。熱帯大気の基本的な循環は、第4図のように、積乱雲に伴う狭い領域での強い上昇流と、雲の外の広い領域での弱い下降流、そしてそれらを結ぶ上層と下層の流れによって構成されています。上昇流域では、積雲活動に伴う凝結熱による加熱と上昇流による断熱冷却がバランスしています。下降流域では、放射冷却と下降流による断熱昇温がバランスしています。さらに、上昇流域全体の凝結熱量と下降流域全体の放射冷却量もバランスしています。断熱冷却 (昇温) 量は、上向き (下向き) のマス (質量) フラックスと大気の安定度 (対流圏上層と下層の温位の差に比例する量) の積で表すことができます。したがって、

$$\text{マスフラックス} \times \text{安定度} \approx \text{凝結熱 (放射冷却)}$$

第1表 高分解能の AGCM を用いた温暖化予測実験による熱帯低気圧の発生数の変化。各実験での現在気候時の熱帯低気圧数を100%とした時の温暖化時の熱帯低気圧数を%で示す。

文献	実験			熱帯低気圧数の変化		
	モデル	分解能	年数	全球	北西太平洋	北大西洋
Bengtsson <i>et al.</i> 1996	ECHAM4	120 km	5 y	63%	66%	87%
Sugi <i>et al.</i> 2002	JMA8911	120 km	10 y	66%	34%	161%
McDonald <i>et al.</i> 2005	HadAM3	100 km	15 y	94%	79%	75%
Oouchi <i>et al.</i> 2006	JMA/MRI	20 km	10 y	70%	62%	134%



第4図 熱帯の大気循環の模式図。

という関係が成り立ちます。この式から、温暖化によって大気中の水蒸気が増えて、対流活動に伴う凝結熱が増加しても、それ以上に安定度が増加すればマスフラックスは減少する、すなわち熱帯の循環が弱くなることがわかります。実際に、120 km の解像度のモデルの実験結果では、温暖化により熱帯の降水量 (凝結熱) は1%程度しか増加しないのに、安定度は5%以上増加しており、その結果マスフラックスが5%以上減少していました。次の問題は、温暖化するとどうして安定度が大きく増加するのに、降水量は少ししか増加しないのかということ です。

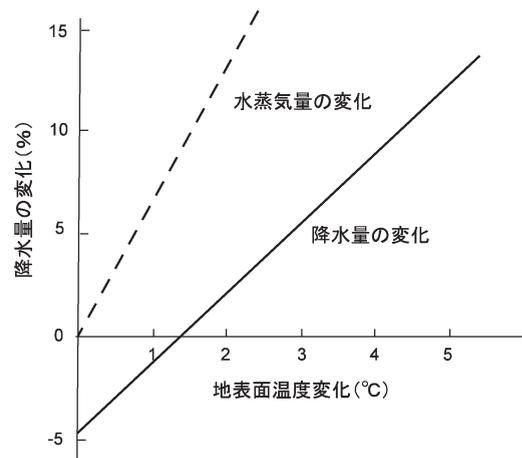
まず、温暖化した時の安定度の変化については次のように考えることができます。熱帯の大規模な対流雲の中心付近では、気温減率はほぼ湿潤断熱減率になっています。大規模な対流雲の雲頂付近と雲底付近では、雲の温度と周りの大気の温度が等しくなっています。したがって、熱帯対流圏の平均的な安定度とし

て、大規模な対流雲の雲頂付近と雲底付近の温位の差を考えると、それは湿潤断熱線の雲頂付近の温位と雲底付近の温位の差と同じになります。湿潤断熱線の雲頂付近の温位と雲底付近の温位の差は、雲底付近の空気塊が上昇して雲頂付近に到達するまでに出る凝結熱に比例します。この凝結熱は、雲頂付近では水蒸気量がほぼゼロになっているので、雲底付近の水蒸気量に比例します。すなわち、熱帯対流圏の平均的な安定度は、大規模な対流雲の雲底付近の水蒸気量に比例します。したがって、温暖化によって大気中の水蒸気量が大きく増加すると、安定度も大きく増加することになります。

温暖化した時に、マスマックスが減少するためには、安定度の増加よりも降水量（凝結熱）の増加が小さいことが必要です。温暖化によって大気中の水蒸気が大幅に（10%以上）増加するのになぜ降水量は少ししか増加しないのかということですが、これについては、Allen and Ingram (2002) が、「降水量は供給される水蒸気量によって決まるのではなく、エネルギー（放射冷却量）で決まる」という考え方を述べています。第5図は、二酸化炭素が2倍になったときの、地上気温の変化と、降水量、大気中の水蒸気量の変化の関係を示したものです。図のように、気温が1°C高くなると水蒸気量は約6%増えるのに、降水量の方は半分の3%しか増えません。これは、温暖化により気温が高くなり、水蒸気が増加しても、放射冷却量はそれほど大幅に増加しないためです。このように、降水量が放射冷却量によってコントロールされるということは、熱帯循環のエンジンの出力がラジエータの冷却能力で決まっていると言ってもよいと思います。私は、実は、降水量が放射冷却量によってコントロールされるということは、以前に数値予報課でモデル開発をしていたときに経験的に知っていました。私が放射スキームの開発をしていたとき、それ以前のモデルで降水量が実際より少なすぎるのは、放射冷却量が小さいことが原因であるらしいということが明らかになりました。そこで、そのことを確認するために、新しいモデルで、人工的に放射冷却量だけを小さくする実験を行いました。その結果、放射冷却量を小さくすると、それに比例して降水量が減ることが確認できました。この実験結果は、放射の物理定数（ステファン・ボルツマン定数）が小さかったら、全球の降水量は年間1000 mm よりも小さくなることを示しています。その時には実験結果についてあまり深く考えませんでした。

したが、温暖化したときの降水量の変化の問題を考えると、モデル開発の時のこの経験がとても役に立ちました。

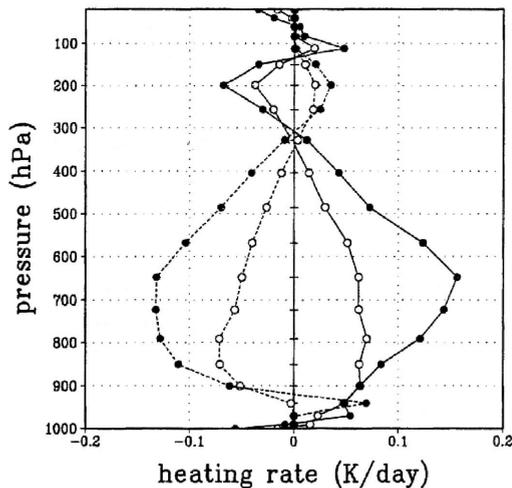
第5図では、もう1つ重要な点があります。それは、降水量の変化を表す直線が図の原点を通らないということです。これは、二酸化炭素濃度が2倍になっても、地上気温が上昇しない場合には、降水量が5%近くも減少することを示しています。二酸化炭素濃度が2倍になっても、地上気温が全く上昇しないことは実際には起きませんが、仮想的にそういう状況でどうなるかということを実験で調べることができます。実際にそういう実験をやってみると、確かに二酸化炭素濃度が2倍になっても、地上気温が上昇しない場合には、降水量が減少することがわかりました。実験によると、その場合には大気の放射冷却が減少し、それに伴って降水量（凝結加熱）の減少が見られます（第6図）。一般には、大気中の二酸化炭素のような温室効果気体の濃度が増加すると、放射冷却は増え、降水量も増えます。二酸化炭素の場合そうならないのは、二酸化炭素と水蒸気の赤外放射の吸収帯が同じ波長帯にあるためです（オーバーラップ効果）。第7図は、このオーバーラップ効果を説明したものです。二酸化炭素の吸収帯のある12.5~18 $\mu$ mの波長帯の放射冷却率をあらわします。上段は、水蒸気だけによる放射冷却、中段は、二酸化炭素だけによる放射冷却です。対流圏の下層では、放射冷却に寄与する主要な気



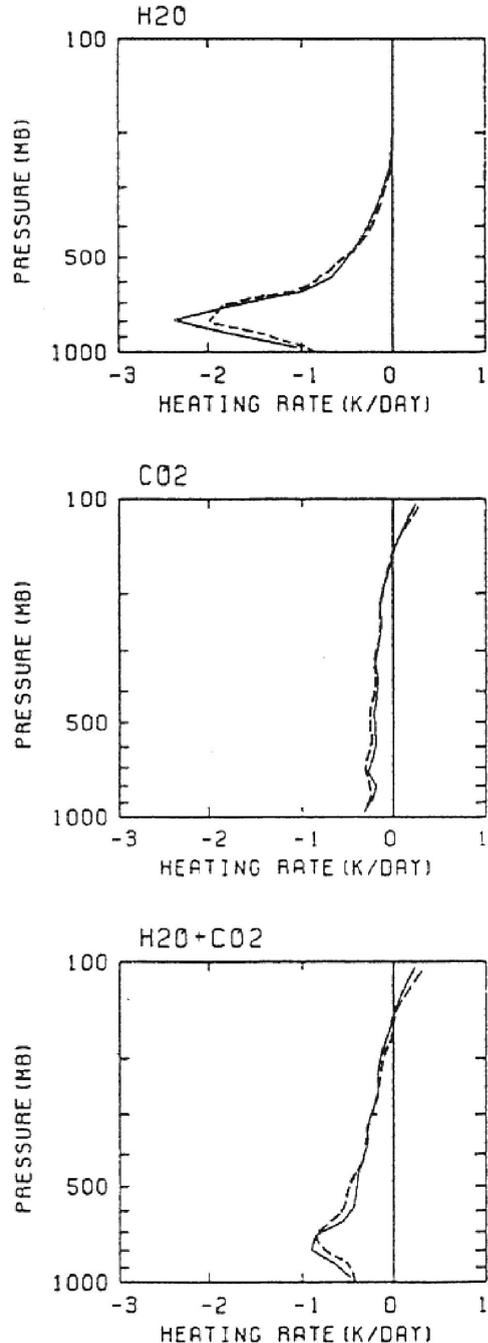
第5図 大気中の二酸化炭素濃度が現在の2倍になったときの全球降水量と水蒸気量の変化。(Allen and Ingram 2002のFig. 2に基づいて作成)

体は水蒸気で、二酸化炭素だけによる放射冷却率はあまり大きくありません。図の下段は、二酸化炭素と水蒸気が同時にあるときの放射冷却率です。上段の水蒸気だけの場合と比べると、二酸化炭素があることによって冷却率が大幅に減少しています。オーバーラップ効果により、二酸化炭素は水蒸気の放射冷却を減らす役割を果たしています。このため、二酸化炭素が増加すると、放射冷却が減り、降水量が減ることになります。余談ですが、この第7図は、実は、私が数値予報課で放射スキームの開発をしているときに作った図です。図の破線は、ラインバイラインの計算によるもので、開発した放射スキームが精度良くオーバーラップ効果を計算できていることを示すための図でした。このときの経験が、温暖化と台風の研究で大変役立ったこととなります。

以上の話をまとめますと、まず、地球が温暖化すると大気中の水蒸気が大幅に増加し熱帯の大気の安定度が増加します。一方、熱帯大気の循環を駆動する対流活動にともなう凝結熱と放射冷却量は少ししか増加しません。放射冷却量が少ししか増加しないことには、二酸化炭素と水蒸気のオーバーラップ効果が重要な役割を果たしています。温暖化により、大気の安定度が大幅に増加するのに、凝結熱や放射冷却が少ししか増加しないため、熱帯の循環（鉛直マスフラックス）は



第6図 海面水温を変えずに大気中の二酸化炭素濃度を増加させたとき（白丸は2倍、黒丸は4倍にしたとき）の、放射冷却量（実線）の減少と、凝結熱（点線）の減少。（Sugi and Yoshimura 2004より）



第7図 二酸化炭素と水蒸気の赤外放射の吸収帯のオーバーラップ効果。上段は水蒸気だけによる放射冷却率、中段は二酸化炭素だけによる放射冷却率、下段は両方がある場合の放射冷却率を示す。実線は全球モデルの放射スキームによる計算、破線はラインバイライン法による高精度の計算。（Sugi and Yoshimura 2004より）

弱くなります。その結果として、熱帯低気圧の数が減少します。このストーリーでオーバーラップ効果が重要な役割を果たしていることは大変興味深い点だと思います。もし、地球大気に二酸化炭素と水蒸気が共存せず、オーバーラップ効果が働かなかつたら、温暖化しても熱帯低気圧の数は減少しないはずで

す。このストーリーの最後の部分、熱帯全体のマスマックスの減少によって熱帯低気圧の数の減少が十分説明できるかどうかについてはまだ議論の余地があると言えます。しかし、これまでに行われた数値実験の結果は、このストーリーで良く理解できます。特に、Yoshimura and Sugi (2005) の実験結果は、このストーリーを強く支持するものです。この実験では、海面水温を一定にして二酸化炭素の濃度だけを増加させた場合と、二酸化炭素の濃度を変えずに、海面水温だけを増加させた場合の熱帯低気圧の数の変化を調べています。実験の結果では、二酸化炭素の濃度を変えずに海面水温だけを増加させた場合には、気温の上昇によって水蒸気が増え安定度が増加しますが、降水量もかなり増加します。これは、二酸化炭素濃度が一定のため、オーバーラップ効果による降水の減少が無いからです。この場合には、安定度の増加の効果と、降水量増加の効果が打ち消しあって、マスマックスは大きく変化しません。その結果、熱帯低気圧の数も大きく変化しません。一方、海面水温を一定にして二酸化炭素の濃度だけを増加させた場合には、水蒸気量はほとんど変化せず、したがって安定度も変化しませんが、オーバーラップ効果によって降水量は大きく減少します。その結果、マスマックスは弱くなり、熱帯低気圧の数が減少します。

温暖化すると全球の熱帯低気圧の数が減るという実験結果は、最近の他のモデルでも同じような結果が得られています(第1表)。特に、「人・自然・地球共生プロジェクト」で、地球シミュレータを用いて行われた解像度20 kmの全球モデルで行われた実験でも、温暖化による熱帯低気圧の数の変化については、私が行った解像度120 kmのモデルの結果と良く似た結果が得られました(Oouchi *et al.* 2006)。この実験結果では、さらに、温暖化によって熱帯低気圧の総数は減るが、非常に強い熱帯低気圧の数は増加することが示されました。このモデルは、それまでのモデルと比べて格段に解像度の高いモデルで、再現された熱帯低気圧もより現実になんて近づいています。したがって、それ以前の実験結果よりも信頼できる結果だと思いま

す。しかしながら、今年(2007年)の2月に公表されたIPCC第4次報告書の政策決定者向け要約では、「広範なモデル予測によれば、熱帯域の海面水温上昇に伴って、将来の熱帯低気圧(台風及びハリケーン)の強度は増大し、最大風速や降水強度は増加する可能性が高い。それと比べて世界的に熱帯低気圧の発生数が減少するとの予測については信頼性が低い。」と書かれています。その理由としては、多くのモデルの結果は定性的には一致しているが、定量的には一致していないということ、また、地域的な熱帯低気圧の数の変化についてはモデルの間で定性的にも一致していないことなどが考えられます。さらに、モデルの結果が一致していると言っても、積雲対流のパラメタリゼーションなど、すべてのモデルに共通する欠点があるかもしれないという疑念もあります。予測の信頼度を高めるためには、熱帯低気圧の発生・発達メカニズムの理解を深めること、そして、モデルによってそのメカニズムが正しく再現されていることを確認することが不可欠です。これらの問題を解決することが、温暖化と台風の問題で、今後の重要な課題であると思います。私は、若くはありませんが、まだしばらく現役の研究者としてこれらの問題の解決に向けて取り組みたいと思っています。幸いなことに、「人・自然・地球共生プロジェクト」の後継プロジェクトとして、今年度から「21世紀気候変動予測革新プログラム」が開始されました。私もこのプロジェクトのメンバーの1人として、熱帯低気圧の発生・発達メカニズムに関する研究を進めていくという決意表明をして、講演の結びとさせていただきます。最後に、これまで、モデル開発と気候予測の研究でお世話になった多くの方々にもう一度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。

#### 謝 辞

気象庁全球数値予報モデルの開発に関しては、特に、その生みの親ともいべき金光正郎、佐藤信夫の両氏に深く感謝の意を表します。また、気象庁数値予報課と気象研究所で全球モデルの開発に携わってきた多くの方々にも感謝の意を表したいと思います。私が、数値予報課でのモデル開発の後、気象研究所での気候予測の研究の仕事をやってみたくて考えるようになった理由の1つとして、フロリダ州立大学でクリシュナムルティ教授の指導のもとで、2年間、熱帯の数値予報の研究を行うチャンスに恵まれたことが

あります。指導していただいたクリシュナムルティ教授をはじめ、関係者の方々に厚くお礼を申し上げます。気象庁全球数値予報モデルを用いた気候予測の研究は、私が気象研究所から防災科学技術研究所へ出向していた時に始めることができたものです。防災科学技術研究所への出向の機会を与えていただいた気象研究所の時岡達志室長（当時）、防災科学技術研究所で共同研究者として研究の仕事を支えてくださった川村隆一さんに感謝の意を表します。気候予測の研究は、その後、気象研究所と地球フロンティアとの共同研究の中で進められました。この共同研究を推進・指導していただいた松野太郎地球フロンティアシステム長（当時）と真鍋淑郎温暖化研究領域長（当時）に厚くお礼申し上げます。また、温暖化と台風に関する研究では、この共同研究チームのメンバーとして気象研究所から地球フロンティアへ出向していた吉村 純さんの仕事が重要な役割を果たしています。以上のほかにも、モデル開発と気候予測の研究で大変多くの方々に世話になっております。ここに改めて深く感謝の意を表したいと思います。

参 考 文 献

- Allen, M. R. and W. J. Ingram, 2002 : Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, **419**, 224-232.
- 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.
- Bourke, W., P. Mullenmeister, K. Arpe, D. Baumhefner, P. Caplan, J. L. Kinter, S. F. Milton, W. F. Stern and M. Sugi, 1991 : Systematic Errors in Extended Range Predictions. WGNE Report No.16, WMO/TD-No. 444.
- Lau, K.-M., J. H. Kim and Y. Sud, 1996 : Intercomparison of hydrologic processes in AMIP GCMs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 2209-2227.
- 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, doi : 10.1007/s00382-004-0491-0.
- 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.
- Sugi, 1988 : The new Japan Meteorological Agency model : systematic errors in 30-day integrations. Report on CAS/JSC WGNE Workshop on Systematic Errors in Models of the Atmosphere, 19-23 September 1988, Toronto, WMO/TD-No.273, 112-119.
- 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, 1995 a : The climate simulated by the JMA global model, Part 1 : Global feature. Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, (54), 155-180.
- Sugi, M., R. D. Nair and N. Sato, 1995 b : The climate simulated by the JMA global model, Part 2 : Tropical precipitation. Report of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, (54), 181-197.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 1997 a : 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, 1997 b : 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. and J. Yoshimura, 2004 : A mechanism of tropical precipitation change due to CO<sub>2</sub> increase. *J. Climate*, **17**, 238-243.
- Yoshimura, J. and M. Sugi, 2005 : Tropical cyclone climatology in a high-resolution AGCM—Impacts of SST warming and CO<sub>2</sub> increase—. *SOLA*, **1**, 133-136.

Development of Global NWP Model and Climate  
Prediction Research Using the NWP Model

Masato SUGI\*

\* *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine Tsukuba, 305-0052 Ibaraki, Japan.*

(Received 5 November 2007 ; Accepted 25 February 2008)

---