

3. 地球温暖化に伴う全球的な気候変化予測

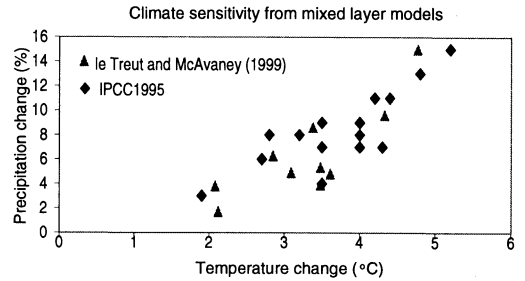
野田 彰*

1. はじめに

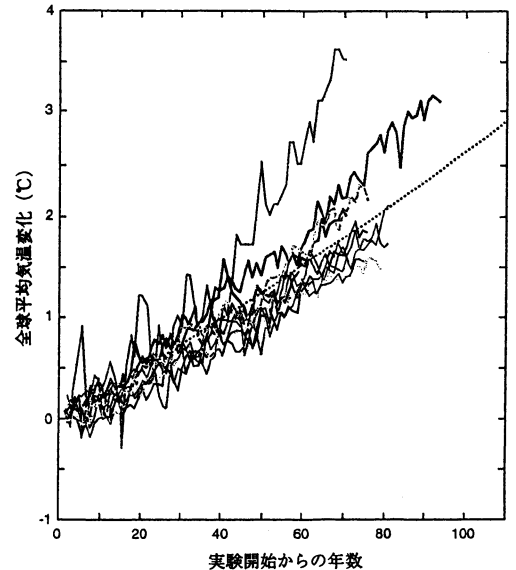
地球温暖化問題に対処するための国際的な取り組みである「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」において、地球温暖化の科学的評価が行われている。IPCCでは climate prediction (気候系に実際に起こりうる可能性の最も高い展開の記述または推定) と climate projection (温室効果気体・エアロゾル排出シナリオに対して気候モデルのシミュレーションに基づく気候系の応答の記述) を区別、定義し、後者を扱っている。本講演で扱う「予測」もすべて projection の意味で用いる。現在2001年刊行予定の第3次評価報告書 (TAR) に向けて執筆と査読作業が進められている。全球的気候変化予測に関しては、これまでの報告書 (IPCC, 1990, 1992, 1996) で示された基本的温暖化応答パターンやメカニズムが確認されたこと、大気海洋モデル、実験例、シナリオの種類や数が増え、予測の統計的有意性が増し、予測対象が広がったこと、しかし、モデルの不確実性については大きな進展がみられないことが示される予定である。ドラフト段階の詳しい内容や図を引用することはできないので、本講演では、気象研究所の実験例と対比させながら、地球温暖化予測の特徴をレビューし、自然変動と温暖化予測の関連性について話題を提供したい。

2. 全球平均場

二酸化炭素が2倍増の大気の平衡応答は、海洋混合層と大気との熱的平衡状態が支配的となるとの仮定の下に、大気大循環モデルと海洋混合層の熱力学モデルを結合させた大気・海洋混合層結合モデルを用いて求められている。同一の放射強制に対して、モデル間で、全球平均気温で2~5°C、降水量の増加率で1



第1図 大気・海洋混合層結合モデルによる二酸化炭素倍増に伴う全球年平均地上気温と降水量増加率の平衡状態での変化 (LeTreut and McAvaney, 1999)。



第2図 IPCC第2次報告書で用いられた種々の大気・海洋結合モデル及び簡単な気候モデルによってシミュレートされた温室効果気体が二酸化炭素換算で1%/年(複利)漸増した場合の全球年平均地上気温の変化(°C)。直線は単モデルによる結果 (IPCC, 1996)。

* 気象研究所気候研究部。

© 2000 日本気象学会

～15%のばらつきが見られる (第1図)。

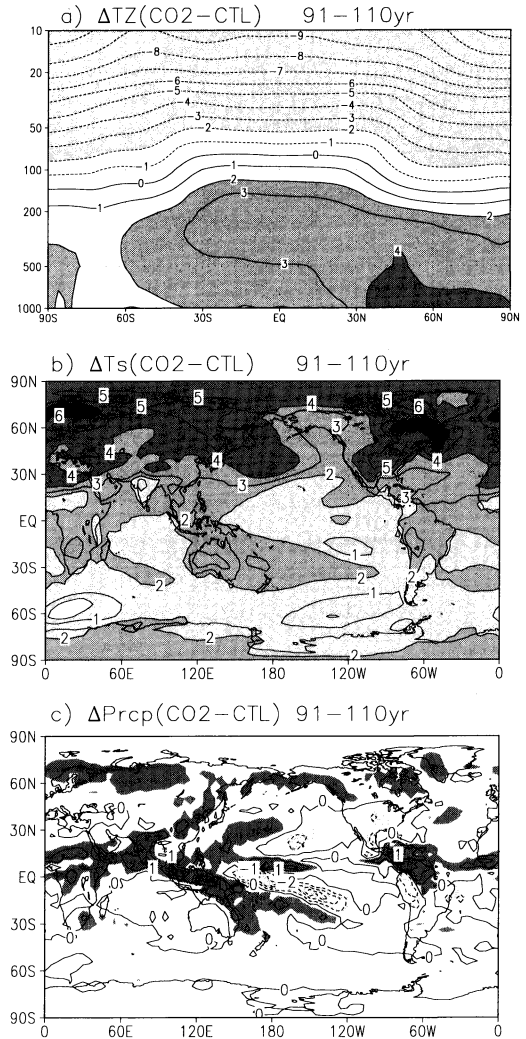
温室効果気体が二酸化炭素換算で年率1%の複利で漸増する際の大気・海洋結合モデルの時間応答を第2図に示す。赤外放射量(放射強制力)が二酸化炭素濃度の対数にほぼ比例するので、全球平均気温の昇温量は、積分開始初期の20年程度(コールド・スタート)を除き、線形的に増加している。気象研究所のMRI-CGCM1では、混合層モデルによる気候感度は非常に大きい(第1図で4.8°C)が、結合モデルでは中間的な昇温(第2図の二酸化炭素倍増時70年で1.6°C)になっている。この理由は、赤道域の海洋混合層で力学的な効果が効いて、ラニーニャ的な、海水の湧昇による冷却が生じたためである(5節参照)。海洋混合層の熱的強制に対する平衡応答において、従来仮定されてきたように、熱的な応答が支配的になるのか、今後、より高解像度の海洋混合層を用いた結合モデルで検証する必要がある。

3. 鉛直、水平分布

気象研究所の二酸化炭素漸増実験の結果(Tokioka *et al.*, 1995, 1996)を例にとって、二酸化炭素漸増のシグナルがはっきり現れる漸増100年後付近の応答パターンを第3図に示す。鉛直方向の応答(第3図a)では、放射対流1次元モデルから予想されるように成層圏の低温化(Manabe and Wetherald, 1967)が特徴的である。成層圏では対流による熱輸送が無いために、日射加熱(オゾンによる吸収)と赤外冷却(二酸化炭素とオゾンによる吸収・放出)の釣り合いから応答が決まるからである。即ち、二酸化炭素が増加することによって冷却が強まり、その結果、成層圏の温度が下がり、冷却率がオゾンによる日射加熱率と釣り合うのである。

その他の特徴として、沼地海洋・大気結合モデルで示された極域低層や低緯度対流圏上層の大きな昇温(Manabe and Wetherald, 1975)が見られる。極域と赤道域での昇温の鉛直分布の違いは、極域では放射冷却で逆転層が形成され地面の温暖化が地表付近で増大するが、低緯度域では積雲対流の効果により湿潤断熱的な変化が起きることで説明される。赤道域での昇温量を決めているのは、鉛直1次元の放射対流平衡だけでなく、対流が駆動する極向きの熱・水蒸気輸送の効果も重要であることが指摘されている(Takata and Noda, 1997)。

地理的分布を見ると(第3図b, c)、地上気温の昇温



第3図 気象研究所気候モデルで計算された二酸化炭素1%/年(複利)漸増による100年後(91~110年の20年平均)のa)東西平均年平均気温の子午面分布(縦軸はhPa)、b)全球年平均地上気温の変化(°C)と、c)降水量の変化(mm/日)地理分布。

に南北半球間で大きな違いが著しいことが目につく。高緯度地方では、冬季、大気と暖かい海洋の間において断熱材として機能している海水が減少する効果と、雪氷のアルベド・フィードバック効果が正のフィードバック効果として働き、大きな昇温が起こると予想される。実際、大気・海洋混合層結合モデルによる平衡実験では南北両半球の高緯度で大きな昇温が予測されている。従って、南半球側で昇温が小さいのは海洋大循環の効果である。深層水が形成されている海域(南

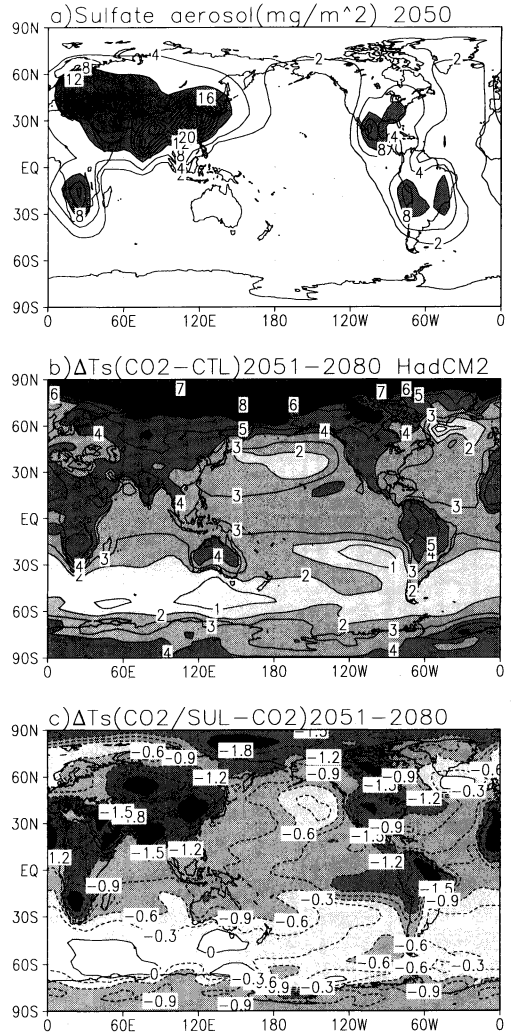
極周辺及び北大西洋)では、拡散・対流により深層水と混合するために海洋の有効熱容量が増大する効果が卓越して、温暖化が遅れるのである(第3図の基準実験では北大西洋の深層循環が非常に弱いために、他のモデルで認められる北大西洋の昇温の遅れは現れていない)。

次に、第3図bの北半球高緯度の昇温に着目すると、大きな昇温は高緯度で一様に起きていないことに気づく。特に、オホーツク海、バレンツ海、ハドソン湾付近の三か所で低緯度側に張り出していることが分かる。これらの位置を大気の流れと比較すると、冬季、ジェット気流の蛇行としてみられる東西波数3の定常プラネタリー波の気圧の谷(トラフ)に対応している。太陽放射は低緯度ほど大きいので、冬季の寒気の吹き出して雪線が低緯度に張り出している所では雪氷・アルベドフィードバック効果の影響をより受けやすく、その結果、大きな昇温が起きたと考えられる(Noda *et al.*, 1996)。別の説明として、最近、モデル相互比較の結果から、北極振動のパターン形成メカニズムとの関連性も指摘されている(山口ほか, 1999)。

太平洋中低緯度の温暖化パターンに楔形の偏差が見られる。降水の変化パターン(第3図c)や地表風応力の変化、赤道の東西・深さ断面での海水温の変化は、モデルのENSOモードと非常によく似たパターンとなっている。この点については5節で更に詳しく紹介する。

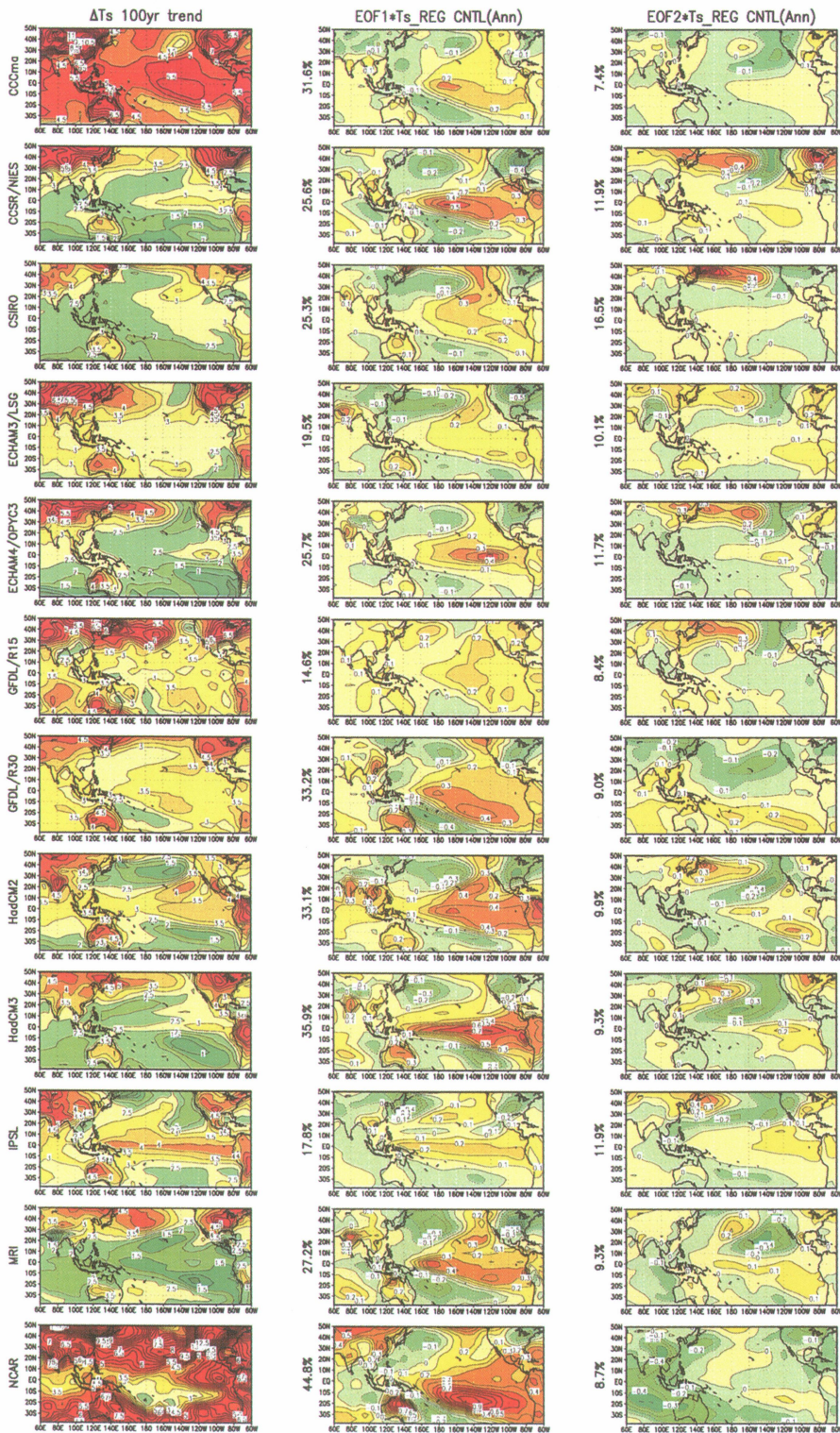
4. エアロゾルの効果

化石燃料に含まれる炭素の燃焼によって、二酸化炭素が生じ、温室効果が助長される。また、化石燃料には硫黄も含まれ、その燃焼によって硫酸の微粒子(エアロゾル)が生成される。エアロゾルは太陽放射を反射する効果(直接効果)や雲粒核となって雲の光学的性質を変える効果(間接効果)がある。これまでは、エアロゾルの効果を地表面のアルベドに換算する方法



第4図 硫酸エアロゾルの効果(英国気象局ハドレーセンターHadCM2) a) 2050年における排出シナリオ(以後この放出量がほぼ一定と仮定), b) 二酸化炭素増加(IS92aシナリオ)に基づく2051-2080年の30年平均地上気温変化, c) 硫酸エアロゾルの直接効果(二酸化炭素のみと二酸化炭素+硫酸エアロゾルの効果を取り入れた実験結果の差)。

第5図 種々の気候モデルで計算された太平洋の地上気温の(左)二酸化炭素1%/年(複利)漸増(又はシナリオIPCC1992 a)による100年当たりの気温増加率, 及び、(中)二酸化炭素一定の基準実験における自然変動の第一主要モード(経験直交関数第一モードEOF1)と(右)第二モードEOF2。基準実験の図の横に各モードが全変動量に占める割合を百分率で示してある。CCCma(加気候センター), CCSR/NIES(東大気候システム研究センター/国立環境研究所), CSIRO(豪州科学産業研究機構), ECHAM(独マックスプランク気象研究所, 3/LSG, 4/OPYC:モデルの違い), GFDL(米国地球流体力学研究所, R15, R30:解像度の違い), HadCM(英国ハドレーセンター, 2:フラックス調整有り, 3:フラックス調整無し), IPSL(仏流体力学研究所), MRI(気象研究所), NCAR(米国大気研究センター)(山口ほか, 1998)。



第5図 (図の説明は前頁(704)に掲載)

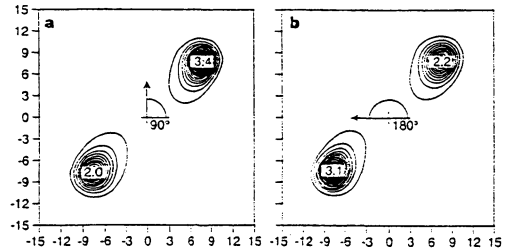
(直接効果; Mitchell *et al.*, 1995, 1997; Haywood *et al.*, 1997; 気象庁, 1999)や雲の反射率に換算する方法(間接効果; Meehl *et al.*, 1996)が用いられてきたが, 最近, 直接放射伝達方程式やエアロゾル・雲モデルを用いる試みもなされている (Emori *et al.*, 1999; 野沢ほか, 1999).

エアロゾルの寿命は1週間程度と短いために, その効果は, 排出領域を反映したパターンが現れることが予想される. しかし, 多くのモデル実験では, エアロゾルの効果は局在しておらず, 二酸化炭素のみの効果を考慮した場合の全球平均気温の昇温の抑制と, その温暖化パターンを弱める傾向が顕著に認められる. 第4図に英国のハドレーセンターの温暖化予測実験(5節参照)に用いられたエアロゾル排出分布と, そこで得られた二酸化炭素による温暖化パターン, エアロゾルの効果を例として示す.

5. 自然変動と温暖化予測

第3図の例の他に気象研究所の大气・海洋混合層結合モデルと大气・海洋結合モデルによるアンサンブル二酸化炭素増加実験では, 太平洋海面水温の自然変動の主要モードと温暖化パターンの間には密接な関連があることが示されている (Noda *et al.*, 1999a, b). 同様の関連性については Meehl and Washington (1996) や Cane *et al.* (1997) の他に Knutson and Manabe (1995, 1998), Barnett (1999), Timmermann *et al.* (1999) 等によっても指摘されている.

気象研究所のモデル結果と比較検討するために, IPCCのデータ配布センター(IPCC DDC)の二酸化炭素漸増実験の長期積分の結果を入手して解析を行った. 地上気温の時系列データを用いて, 基準実験の自然変動に対して EOF 解析, IS92aの二酸化炭素漸増シナリオに対してはトレンド解析を行った. 海面水温の変動に着目するため, EOF 解析は海洋の格子点上の地上気温について行った(山口ほか, 1998). その結果を第5図に示す. 図には IPCC DDCのデータのほかに個人的に入手したデータも含まれている(GFDL/R30: Knutson and Manabe, 私信1998; IPSL: Fairhead *et al.*, 私信1998). 第5図の左の列は年率1%の複利で漸増する二酸化炭素増加に伴う気温上昇のトレンド(°C/100年に換算), 中央の列は EOF1, 右列は EOF2を示す. 空間パターンの相関係数の詳細については省略するが, 大部分のモデルについて, 各々のモデルの温暖化パターンと EOF1または EOF2との間に高い相関



第6図 Lorenz モデルにおいて, 強制力 ($f_0 \cos \theta$, $f_0 \sin \theta$) が系の状態ベクトルの移動時間平均から得られた PDF に及ぼす影響. X-Y 平面での値を示す. $\sigma=10$, $r=28$, $b=8/3$. a: $\theta=90^\circ$; b: $\theta=180^\circ$ (Corti *et al.*, 1999).

が認められる. 更に, 温暖化予測パターンのモデル間の違いに着目すると, その違いは, モデルでシミュレートされた自然変動の主要モードのパターンの違いに起因していることが分かる. このことは, また, 観測されている自然変動をモデルがより忠実に再現できれば, 温暖化予測のモデル間のバラツキが減少することが期待できることを示している.

6. 非線形力学系からの類推

自然変動と外的な強制に対する応答パターンにはどのような関係があるのだろうか. Palmer (1993, 1999) は簡単な非線形力学系である Lorenz モデルに小さな強制項 f_0 を加えた場合の系の応答に着目した. すなわち,

$$\begin{aligned} dX/dt &= -\sigma X + \sigma Y + f_0 \cos \theta \\ dY/dt &= -XZ + rX - Y + f_0 \sin \theta \\ dZ/dt &= XY - bZ \end{aligned}$$

において, 強制項なしの場合と, 強制項の方向を変えた2つのアトラクター付近の存在確率関数(PDF)の変化を調べた(第6図, Corti *et al.*, 1999).

ここで得られた結果を一般化して, 彼は「非線形力学系に小振幅の外力が加わったときの応答は

- 1) 主要変動モード(EOF)間の存在確率が変化する.
- 2) 主要 EOF の空間構造は外力にほとんど無関係である。」との非線形力学的視点を提唱している.

野田(1999)は, 地球の気候システムはエネルギー的に開放系であること, 主要な自然変動が赤道から極への南北熱輸送システムに起きている点に着目し, 自然変動のメカニズムと地球温暖化との関連についてモ

デル化を行っている。

7. おわりに

温暖化予測の結果を羅列するよりは、主要な予測結果を選択して、そのメカニズムの紹介に重点を置いたために、内容が偏ってしまったことをお詫びする。特に人が居住する陸面に関しては、全く触れられていない。これまでのIPCC評価報告書(IPCC, 1990, 1992, 1996)や2001年刊行予定のIPCC第3次評価報告書で補って頂ければ幸いである。

謝辞

本報告は気象庁特別研究「地球温暖化予測技術の高度化に関する研究」、科学技術庁海洋開発及び地球科学技術調査研究促進費「エーロゾルと大気微量気体が地球温暖化に及ぼす影響解明のためのモデル開発研究」、気象研究所・東京電力共同研究、国立環境研究所地球環境センターの客員研究課題で得られた成果をまとめたものである。共同研究者および計算資源の確保にご尽力を頂いた各位に感謝の意を表したい。

参考文献

- Barnett, T. P., 1999 : Comparison of near-surface air temperature variability in 11 coupled global climate models, *J. Climate*, **12**, 511-518.
- Cane, M. A., A. C. Clement, A. Kaplan, Y. Kushnir, R. Murtugudde, D. Pozdnyakov, R. Seager and S. E. Zebiak, 1997 : 20th century sea surface temperature trends, *Science*, **275**, 957-960.
- Corti, S., F. Molteni and T. N. Palmer, 1999 : Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes, *Nature*, **398**, 799-802.
- Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto and T. Nakajima, 1999 : Coupled Ocean-Atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering, *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1299-1307.
- Haywood, J. M., R. J. Stouffer, R. T. Wetherald, S. Manabe and V. Ramaswamy, 1997 : Transient response of a coupled model to estimated changes in greenhouse gas and sulphate concentrations, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1335-1338.
- IPCC, 1990 : Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. eds. Houghton, J. T., G. J. Jenkins and

- J. J. Ephraums, Cambridge Univ. Press, UK, 365pp.
- IPCC, 1992 : Climate Change 1992, The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. eds. Houghton, J. T., B. A. Callander and S. K. Varney, Cambridge Univ. Press, UK, 200pp.
- IPCC, 1996 : Climate Change 1995 : The Science of Climate Change, Contribution to Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC. eds. Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, Cambridge Univ. Press, UK, 572pp.
- 気象庁, 1999 : 地球温暖化予測情報, 第3巻, 二酸化炭素濃度の増加及び硫酸エーロゾルの影響を考慮した全球大気・海洋結合モデルによる気候予測. 大蔵省印刷局製造, 87pp. (CD-ROMは、(財)気象業務支援センターから販売).
- Knutson, T. R. and S. Manabe, 1995 : Time-mean response over the tropical Pacific to increased CO₂ in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Climate*, **8**, 2181-2199.
- Knutson, T. R. and S. Manabe, 1998 : Model assessment of decadal variability and trends in the tropical Pacific ocean, *J. Climate*, **11**, 2273-2296.
- LeTreut, H. and B. J. McAvaney, 1999 : Model inter-comparison : slab ocean 2xCO₂ equilibrium experiments (in preparation).
- Manabe, S. and R. T. Wetherald, 1967 : Thermal equilibrium of the atmosphere with a give distribution of relative humidity, *J. Atmos. Sci.*, **24**, 241-259.
- Manabe, S. and R. T. Wetherald, 1975 : The effect of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 3-15.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, D. J. Erickson III, B. P. Briegleb and P. J. Jauman, 1996 : Climate change from increased CO₂ and direct and indirect effects of sulphate aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3755-3758.
- Meehl, G. A. and W. M. Washington, 1996 : El Niño-like climate change in a model with increased atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, **382**, 56-60.
- Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory and S. F. B. Tett, 1995 : Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols, *Nature*, **376**, 501-504.
- Mitchell, J. F. B. and T. C. Johns, 1997 : On the modification of global warming by sulphate aerosols, *J. Climate*, **10**, 245-267.

- 野沢 徹, 江守正多, 沼口 敦, 竹村俊彦, 中島映至, 阿部彩子, 木本昌秀, 1999: 多種類のエアロゾルによる直接・間接効果を考慮した場合の全球大気海洋結合モデルを用いた気候変化実験, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, A152.
- 野田 彰, 1999: 開放系における自然変動と気候変化, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, A155.
- Noda, A., S. Nakagawa, T. Motoi, S. Yukimoto and T. Tokioka, 1996: Global warming induced by CO₂ and the Okhotsk Sea, J. Remote Sensing Soc. Japan, 16, 89-99.
- Noda, A., K. Yoshimatsu, A. Kitoh and H. Koide, 1999 a: Relationship between natural variability and CO₂-induced warming pattern: MRI coupled atmosphere/mixed-layer ocean (slab) GCM Experiment, Preprint volume of the 10th Symposium on Global Change Studies. 10-15 January 1999, Dallas, Texas. 5A. 1.
- Noda, A., K. Yoshimatsu, S. Yukimoto, K. Yamaguchi, and S. Yamaki, 1999b: Relationship between natural variability and CO₂-induced warming pattern: MRI AOGCM Experiment, Preprint volume of the 10th Symposium on Global Change Studies, 10-15 January 1999, Dallas, Texas. 5A. 2.
- Palmer, T. N., 1993: A nonlinear dynamical perspective on climate change, *Weather*, 48, 313-348.
- Palmer, T. N., 1999: Nonlinear dynamical perspective on climate prediction, *J. Climate*, 12, 575-591.
- Takata, K. and A. Noda, 1997: The effect of cumulus convection on CO₂-induced climate change, *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 677-686.
- Timmermann, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif and E. Roeckner, 1999: ENSO response to greenhouse warming, *Nature*, 398, 694-696.
- Tokioka, T., A. Noda, A. Kitoh, Y. Nikaidou, S. Nakagawa, T. Motoi, S. Yukimoto and K. Takata, 1995: Transient CO₂ experiment with the MRI CGCM—Quick report—, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 817-826.
- Tokioka, T., A. Noda, A. Kitoh, Y. Nikaidou, S. Nakagawa, T. Motoi, S. Yukimoto and K. Takata, 1996: Transient CO₂ experiment with the MRI CGCM—Annual mean response—, CGER's Super-computer Monograph Report Vol. 2, National Inst. for Environ. Studies, Tsukuba, Japan, 86pp.
- 山口和貴, 八牧幸子, 野田 彰, 1998: 太平洋海面水温の自然変動と温暖化の空間パターンの類似性 (3) モデル間の相互比較, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, A164.
- 山口和貴, 野田 彰, 八牧幸子, 1999: 自然変動および温暖化予測のモデル相互比較, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, A154.

306 (地球温暖化; 地域気候モデル; 地域気候)

4. 地球温暖化に伴う日本域の気候変化予測

佐藤 康 雄*

1. はじめに

二酸化炭素 (以後 CO₂ と表記) を始めとする温室効果ガスの大気中濃度の増加による気候の温暖化が危惧されている。世界の多くの気候予測センターでは、高性能電子計算機を駆使して全球大気海洋結合モデル

(以後、特別な場合以外は全球気候モデルと表記) 中の CO₂ 濃度を例えば年率 1% 複利等の種々のシナリオで増加させ、現在の濃度に比べて 2 倍、4 倍になるときの気候変化予測実験を行っている。最近では CO₂ だけではなく、硫酸エアロゾルの効果も考慮されるようになってきている。全球気候モデルによる温暖化予測実験の最近の進展については、野田氏の講演の通りであるが、全球気候モデルの不確実性については依然とし

* 気象研究所環境・応用気象研究部。

© 2000 日本気象学会