

Greenhouse Gas-Induced Evolution of the Coupled Ocean-Atmosphere-Land Surface System over Several Centuries*



真鍋淑郎**

要 旨

大気中の二酸化炭素増大に伴う気候変化の研究は大気・海洋結合モデルを使ってすでいくつか行われており、おもに数10年先の予測がなされてきた (Bryan *et al.*, 1982; Schlesinger *et al.*, 1985; Bryan *et al.*, 1985; Bryan *et al.*, 1988; Washington *et al.*, 1989; Stouffer *et al.*, 1989; Manabe *et al.*, 1990; Manabe *et al.*, 1991; Hansen *et al.*, 1988; Cubasch *et al.*, 1992)。しかし、より遠い将来の予測はあまり注目されてこなかった。炭酸ガスが増加すると、地球の平均温度の永年的上昇を通じて海洋大気結合システムの大規模現象が影響を受け、気候が大きく変わるので、その効果は非常に重大である。たとえば、海洋の熱塩循環が大きく変わる可能性がある。氷期の終わりのころ、温度上昇と氷床融解にともなって海洋循環が突然変わったらしいという Broecker の議論 (Broecker, 1987) も、その可能性を示唆する。ここでは、海洋大気結合気候モデルを用いて、炭酸ガス量の2倍ないし4倍増加による全球気候の数100年間の変動を計算した。結論的には、500年後の全球平均気温上昇は、炭酸ガス2倍増の場合は3.5度、4倍増の場合は7度に達する。また、海水の熱膨張による海面水準の上昇はそれぞれ1mと1.8mに及ぶことがわかった(氷床の融解が加わると、海面上昇はこれよりさらに大きい)。さらに、炭酸ガス4倍増の時は、海洋の温度構造や力学構造が著しく変わる。すなわち、海洋の熱塩循環はぱったり止み、温度躍層がぐっと下がる、というまったく新しい安定な状態に落ち着いてしまう。このような変化は海洋深層との物質の交換を阻害するので、大気海洋結合系の炭素循環や生物地球化学過程に大きな影響を及ぼす可能性がある。

1. モデル

ここで使うモデル (Manabe *et al.*, 1991) は、大気と海洋の大循環モデル (GCM) と、陸面の熱収支と水収支の単純なモデルによって構成されている、現実的な地形分布を持つ全球モデルである。大気 GCM には、日射の季節変化が含まれており、雲は相対湿度によって予報されている。運動方程式の時間積分は鉛直方向には差分方式を使い、大気を9層に分けて行う。水平方向にはスペクトル法が使われ、球関数展開で R15(15のフーリエ成分にそれぞれルジャンドル関数が15次)の分解能である。海洋 GCM は、差分法が使われ、緯度方向に4.5度、経度方向に3.75度の水平空間分解能をもち、鉛直12層から成る。このモデルは、Bryan と

Lewis のモデル (Bryan *et al.*, 1979) とほぼ同じもので、メソスケールの渦の効果も、等密度面上のポテンシャル温度と塩分の拡散で表現している点でのみ異なる。大気と海洋の GCM は、熱、水、運動量の交換を通じて相互作用している。

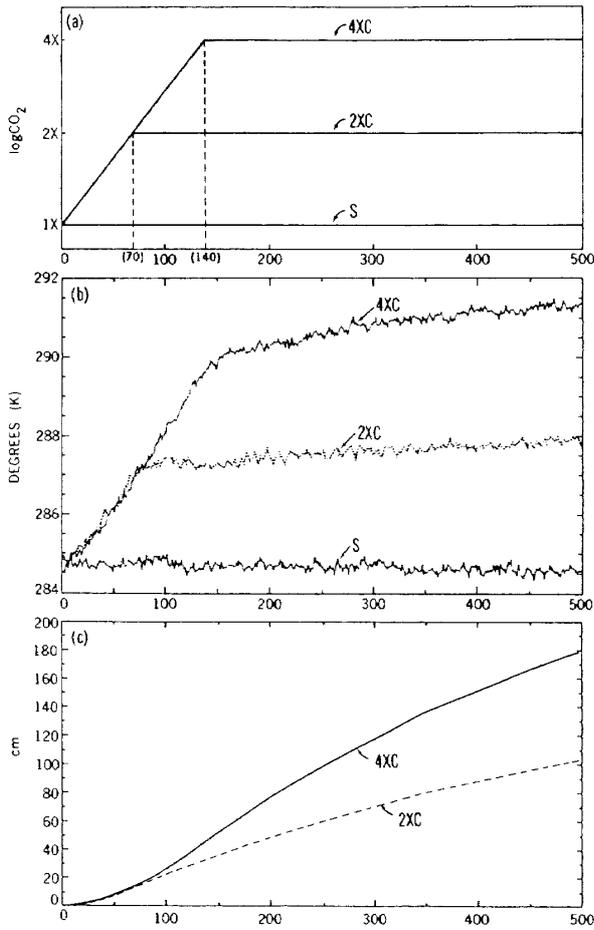
2. 数値実験

第1図 a のような炭酸ガスの時間的変化を仮定して、結合モデルの500年積分の計算が3例おこなわれた。1例めは、炭酸ガスが不変に保たれた標準積分 (S) である。2つめの積分 (4XC) では、炭酸ガスは毎年1% (複利的) の割合 (気候変化に関する政府間パネル IPCC (WMO-UNEP, 1990) が、水蒸気以外のすべての温室効果ガスの business as usual (BAU) の増加率を炭酸ガスに換算して計算した増加率に近い割合) で増加して140年かかって4倍に達すると、増加が止んで一定におちつく。3つめの積分 (2XC) では、炭酸ガスが同様に毎年1% (複利的) の割合で増加す

* 温暖化に伴う大気・海洋結合系の数世紀に亘る変動。

** Syukuro Manabe, GFDL/NOAA, Princeton Univ.

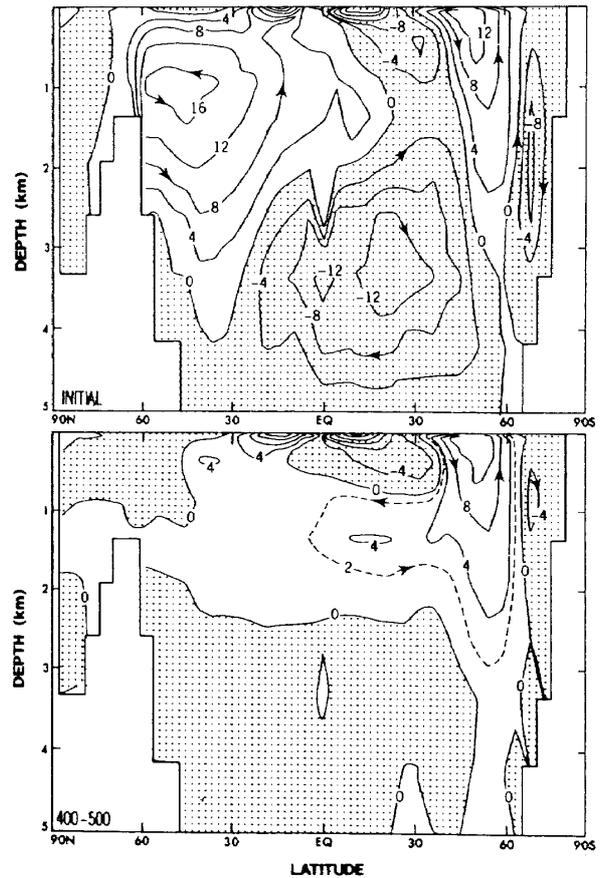
© 1994 日本気象学会



第1図 (a) 大気中の炭酸ガス濃度の時間変化。
 (b) 全球平均気温の時間変化。
 (c) 熱膨張による全球平均海面水準の上昇 (ここで海面水準の上昇は 4XC と S, 2XC と S の差として計算した)。

るが、70年経って2倍に達したときに増加が止んで一定におちつく。この3つの積分を比較することにより、炭酸ガス量の2倍ないし4倍増加の、結合システムへの長期的影響を評価する。

結合モデルの時間積分の初期条件は、海洋表面の温度、塩分、海水の現実的な分布を境界条件として、大気および海洋モデルを別々に積分して得た平衡状態をくっつけて作る。この初期条件から積分を開始するとモデルの気候は、固有の平衡条件の方へとずれていく。このずれを最小限に止めるために、大気と海洋の境界での熱と水のフラックスを調節する (Manabe *et al.*, 1991)。この調節は、海洋表面の温度や塩分の積分間の偏差の量とは独立であるので、偏差の量を減衰させることも増幅させることもない。



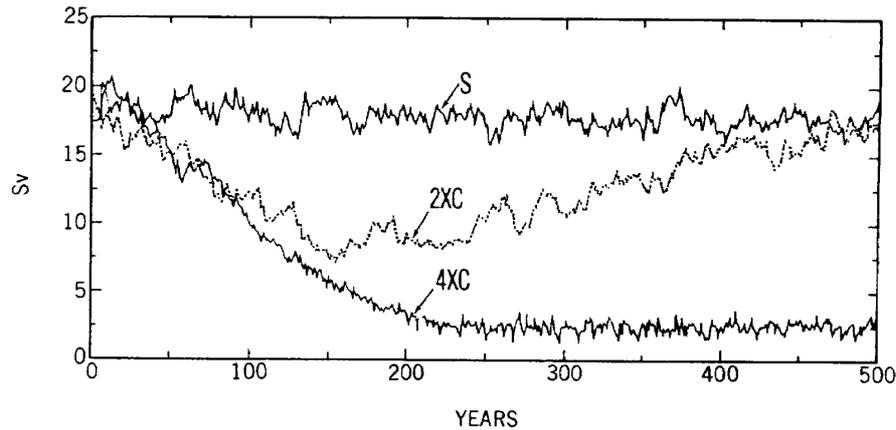
第2図 モデル海洋における熱塩循環 (東西平均)。
 上: 初期分布, 下: 400-500年平均, 単位はスベルドラップ ($10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)。

3. 全球平均

第1図bは、4XC, 2XC, Sの積分による全球平均気温の時系列を示す。4XC積分の最初の140年間には、全球平均気温は5度上昇し、上昇の割合は1世紀につき約3.5度である。140年め以降、炭酸ガスの増加がないにもかかわらず、全球平均気温はゆっくりとさらに1.5度上昇する。この後に尾を引く温度上昇は、海洋深層の大きな熱的慣性におもに因るものである。

これに似た特徴は、2XC積分の時系列にも明瞭に見られる。最初の70年間は、全球平均気温は2.2度上昇し、上昇の割合は1世紀につきやはり約3.5度である。炭酸ガスの増加が止む70年め以降も、全球平均気温はさらに1度上昇する。

海面水準はこのモデルによって陽に予報されているわけではない (Bryan *et al.*, 1979) が、4XCと2XCの両方の積分で、海水の熱膨張による海面水準の時間的変化が見積もられた (第1図c)。4XC積分の最初の数10年には、海面は10年につき約1cm上昇する。



第3図 4XC, 2XC, S から得た北大西洋の熱塩循環の強さの時間変化. 循環の強さは, その流線関数の最大値として定義した.

140年めの炭酸ガスの上昇停止後も, 海面上昇がずっと続く. 2XC 積分の海水準の時系列にも, これに似た特徴が表れている. 結局500年間にわたる海面上昇の総量は, 4XC 積分では 1.8 m におよび, 1 m 上昇の 2XC 積分の海面上昇の 2 倍に近い.

大陸氷床からの融解水の影響は, この海面水準の計算には含まれていないが, 融解率を氷床の表面熱収支から見積もることができる. この融解水の効果を考慮にいと, 海面水準の上昇の結果はもっと大きくなる可能性がある.

4. 熱塩循環

第2図は, 4XC では, モデル内の海洋のほとんどの部分で熱塩循環が消滅して, あとに風成循環が残されていることを示している. 例えば, 北大西洋では最初の200年で熱塩循環がほとんど消える (第3図). 南極大陸沿いでは, 熱塩循環が弱まり浅くなり, 南極底層水形成率はぐっと減るのである. 結果として, 太平洋と大西洋の両方で北に向かう底層水の流れが弱まる.

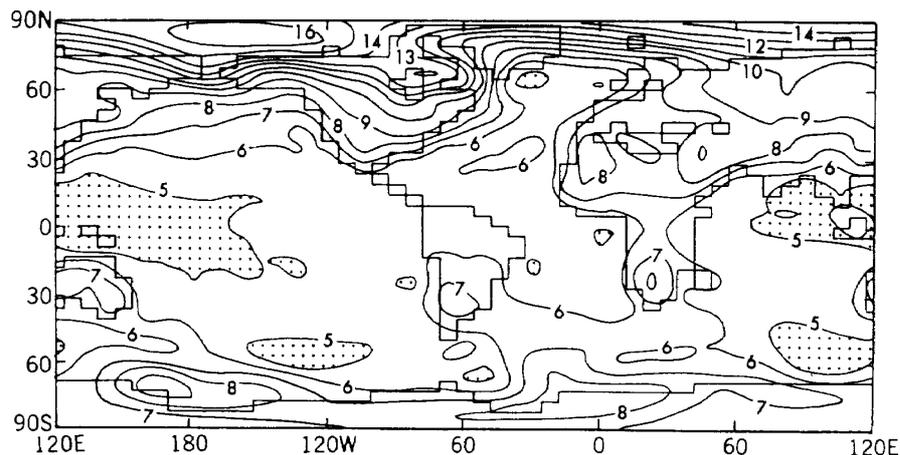
このような熱塩循環の衰弱はおもに, 高緯度で海洋表面への水の供給が顕著に増加して海の表層水の塩分が減り, 従って密度が減ることに因って起こる. 暖かくなったモデルの対流圏中で水蒸気の極向き輸送量が増加するため, 高緯度の海洋では, 降水量と蒸発量の差, および, 大陸からの流出量が増える.

これまで述べた 4XC に見られた大西洋の熱塩循環の変動は, 炭酸ガスが 2 倍になるまで増加する 2XC とは, 対照的である (第3図). 2XC でも, 炭酸ガスの増加が止んで表面の気温の上昇率や高緯度での塩分濃度の低下率が突然小さくなる70年め以降も減りつづ

け, もとの循環の強さの半分以下にまで減少する. しかしながら, 150年経た頃から, 熱塩循環はゆっくり回復に向かう. 上に述べた熱塩循環の弱体化にもなって, 低緯度における冷たい水の湧昇流も弱まり, 北大西洋の赤道と北緯45度の間の上昇水の昇温が起こる. 結果的に沈降域と湧昇域の密度の差異が大きくなることだが, 150年め頃から500年めまでの北大西洋の熱塩循環のゆっくりした回復に寄与しているようである.

2XC の実験結果からも明らかのように, 初期に見られる北大西洋の熱塩循環の衰弱は, 循環の不安定性によって起る現象ではない. むしろ, モデルの大西洋での密度分布の変化に熱塩循環がゆっくり適応していることを示している. ところが 4XC 積分の熱塩循環は, いったん消滅すると, 中低緯度の温度の正の偏差が大きくなって深層に及ぶにもかかわらず, 再生することがない. これより, 4XC 積分で起った熱塩循環が不活発な状態は, 両方の積分の初期に見られた活発な循環とは異なる別の安定解だということがいえる. 海洋大気の結合システムでの 2 つの安定解の存在は過去の研究 (Manabe and Stouffer, 1988) でも示されている.

重要な点は, このモデルの大西洋の熱塩循環を維持するうえで, 表面の水のフラックスの調節が必要だということである (Manabe and Stouffer, 1988). 既に説明したように, この熱と水のフラックスの調節は海面の温度と塩分の偏差とは独立なもので, この偏差の減衰率には影響を及ぼさない. しかし, このモデルの熱塩循環の安定度は実際のものよりかなり異なることもあるだろう. したがって, 炭酸ガスがたとえ 4 倍増されたとしても, 実際の海洋では熱塩循環の消滅は起こらないかもしれない. 一方, もし大陸氷床の融解に



第4図 炭酸ガス4倍増実験(4XC)から得られた表面気温増加(°C)の地理的分布. 昇温は4XCとSの差として計算し, 400-500年間の平均値である.

よって表面近くの水の塩分濃度が低下するという過程がモデルの中に含まれると, 2XC積分でも熱塩循環の消滅を引き起こす可能性がある.

5. 昇温の地理的分布

4XC実験の終わりにむかって, 特に北大西洋では, 温度躍層が深まり, 熱塩循環の弱化的ため深層水の著しい温暖化と塩分増加を招く. 表面気温の上昇(第4図)は, 炭酸ガス4倍増積分の終わりまでに夏半年の間に海水がほとんど完全に融解する北極海上で, とくに顕著(11-16度上昇)である. 一方, 北大西洋の北部や南極周海流では, (5-8度と)上昇は比較的小さい. そこでは, 海洋中の熱の鉛直混合が盛んなため, 海面温度の上昇は抑えられる(Manabe *et al.*, 1991). 陸上の温暖化は7から10度に及び, 北極海以外の海域での昇温より大きい. 以上述べた温度変化は, 現在の気候と, 約6500-9000万年前の白亜紀後期の温暖な気候との違いに匹敵する. 2XCの気温偏差のパターンは, 4XCのそれに似ているが, 量は約半分にとどまる.

6. おわりに

年間1%の割合(IPCCによるBAUの上昇率)で炭酸ガスの増加する4XCの最初の140年では, 全球平均にして, 気温上昇率は1世紀につき約3.5度である. これは, IPCCがBAU炭酸ガス増加率を仮定して見積もった, 1世紀につき3度という値より, 若干大きめである. このモデルの炭酸ガス2倍増に対する平衡応答の結果は約3.5度で, IPCCの推定している気候感度の範囲の1.5-4.5度の上半分属する. ゆえに, 現モ

デルは実際の気候より, 感度が高いかもしれない.

IPCCによると, BAUの上昇率で温室効果ガスの放出が21世紀の末まで続くと, 炭酸ガス4倍増に相当する温室効果が実現するという. 炭酸ガスが4倍増することを防止するために, ドラコ流の厳しい規制がおそらく必要となるであろう(Walker *et al.*, 1992). 現モデルが気候感度を過大評価している可能性を考慮すると, 2XCと4XCの実験は将来の気候変化の可能範囲を示している, と推測するのが妥当だろう. 4XC実験で起きたような非常に大きい気候の永年的変化が起らない, とは限らない.

参考文献

Broecker, W.S., 1987: Unpleasant surprises in the greenhouse?, *Nature*, 328, 123-126.
 Bryan, K. and L.J. Lewis, 1979: A water mass model of the world ocean, *J. Geophys. Res.*, 84, 2503-2517.
 Bryan, K., F.G. Komro, S. Manabe and M.J. Spelman, 1982: Transient climate response to increasing atmospheric carbon dioxide, *Science*, 215, 56-58.
 Bryan, K. and M.J. Spelman, 1985: The ocean's response to a CO₂-induced warming, *J. Geophys. Res.*, 90, 11679-11688.
 Bryan, K., S. Manabe and M.J. Spelman, 1988: Interhemispheric asymmetry in the transient response of a coupled ocean-atmosphere model to a CO₂ forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 851-867.
 Crowley, T.J. and G.N. North, 1991: Paleo-

- climatology, Oxford Monogr. Geol. Geophys., 16.
- Cubasch, U., K. Hasselmann, H. Höck, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, B.D. Santer and R. Sausen, 1992 : Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model, *Clim. Dynamics*, 8, 55-69.
- Hansen, J., I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy and G. Russell, 1988 : Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model, *J. Geophys. Res.*, 93, 9341-9864.
- Manabe, S. and R. J. Stouffer, 1988 : Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model, *J. Clim.*, 1, 841-866.
- Manabe, S., K. Bryan and M. J. Spelman, 1990 : Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide, *J. Phys. Oceanogr.*, 20, 722-749.
- Manabe, S., R. J. Stouffer, M. J. Spelman and K. Bryan, 1991 : Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I : Annual Mean Response, *J. Clim.*, 4, 785-818.
- Schlesinger, M. E., W. L. Gates and Y. J. Han, 1985 : The role of the ocean in CO₂-induced climate change : Preliminary results from the OSU coupled atmosphere-ocean general circulation model, *Coupled Ocean-Atmosphere Models*(ed. Nihoul, J. C. J.), Elsevier, 447-478.
- Stouffer, R. J., S. Manabe and K. Bryan, 1989 : Interhemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO₂, *Nature*, 342, 660-662.
- Walker, J. C. G. and J. F. Kasting, 1992 : Paleogeogr. *Paleoclimatol. Paleoecol.*, 97, 151-189.
- Washington, W. M. and G. A. Meehl, 1989 : Climate sensitivity due to increased CO₂ : experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model, *Clim. Dynamics*, 4, 1-38.
- WMO-UNEP, 1990 : Intergovernmental panel on climate change scientific assessment of climate, Cambridge Univ. Press, 365 pp.

[編集委員会注]

IAMAP・IAHS '93 の開会式において、真鍋淑郎博士 (GFDL/NOAA, Princeton Univ.) が行われた基調講演, "Greenhouse Gas-Induced Evolution of the Coupled Ocean-Atmosphere-Land Surface System over Several Centuries" を, IAMAP 特集号に掲載するにあたって, 事前に博士とご相談した結果, 講演内容は *Nature* Vol. 364, 215-218 (15 July 1993) に掲載された Century-scale effects of increased atmospheric CO₂ on the ocean-atmosphere system (S. Manabe and R. J. Stouffer) にほとんど含まれているため, 博士の申出に従って, これを翻訳して本誌に掲載することといたしました。翻訳は東京大学気候システム研究センターの阿部彩子さんに依頼し, 訳文については真鍋博士の校閲を受けております。

最近 *J. Clim.*, 7, 5-23 (January 1994) に掲載された Multiple century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide (S. Manabe and R. J. Stouffer) に詳しい説明ができていますのでご参照下さい。

この翻訳文の掲載にあたってはネイチャー・ジャパン(株)の転載許可(1993年10月19日付)を受けております。また, 原論文の著作権は Macmillan Magazine Ltd. にあります。