

25. NCARの大気・海洋結合モデルによる温暖化予測実験

Global warming projection using NCAR Climate System Model (CSM)

平口 博丸*・丸山 康樹*・筒井純一*・仲敷 憲和*

Hiromaru HIRAKUCHI, Kohki MARUYAMA, Jun'ichi TSUTSUI, Norikazu NAKASHIKI

ABSTRACT: Coupled atmosphere-ocean climate models are the most powerful tools to assess future climate change. However, it is wellknown that the coupling of ocean and atmosphere causes climate drift due to discrepancies in surface fluxes. To reduce climate drift in coupled models, most models make flux adjustment even though flux adjustment are relatively large. The National Center for Atmospheric Research (NCAR) has developed the Climate System Model (CSM) which is a coupled model with no surface flux corrections, and reported that there is virtually no trend in the surface temperature during the 300-year control run. In this paper, we conduct a 10-year control run and a 115-year transient run by using NCAR CSM through the collaboration research between Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) and NCAR. The transient experiment assumes a 1%/year compound increase in CO₂ which gives a doubling CO₂ after 70 years, and tripling after 110 years, respectively. Atmospheric, oceanic, and sea ice changes in future climate are analyzed and discussed.

KEYWORDS: global warming, coupled climate model, transient run, flux adjustment

1 はじめに

昨年京都で開催された国連気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)において、二酸化炭素(CO₂)などの排出量削減が議論され、地球温暖化問題は新たな一步を踏み出した。しかし、CO₂の削減量と温暖化の抑制効果の間には科学的に不確実な点も残されている。今後、CO₂排出削減方法などを検討する上で、信頼性の高い温暖化予測への期待が強まるものと考えられる。

温暖化予測に用いられる従来の気候モデルでは、大気と海洋の間で交換されるフラックス(熱、運動量、水分)を人為的に補正しており、フラックスコレクションと呼ばれている。それによるフラックスの補正量はかなり大きくなる場合があり、予測結果の信頼性の問題も指摘されている(IPCC, 1995)。このようなモデル上の不確実性を小さくするために、米国の大気研究センター(National Center for Atmospheric Research, NCAR)では、フラックスコレクションを不要とする大気・海洋結合モデル(Climate System Model, CSM)を開発し、300年間の現状気候の再現実験から、地表面温度のドリフトが非常に少ないモデルであると報告している(Bovill and Gent, 1998)。

本研究は、このNCAR CSMを用いて、大気中のCO₂濃度が年率1%の割合で増加する漸増実験を行ない、温暖化時の気候変化を検討する。漸増実験はCO₂濃度が現状の3倍にまで達する115年間とし、大気・海洋・海水等に関する全球規模の気候変化を解析する。

2 大気・海洋結合モデルの概要

温暖化予測に用いたNCAR CSMは、大気・海洋・地表面・海水モデルの4つのサブモデル、およびこれらサブモデル相互間のフラックスの受け渡しを行うフラックス・カップラーの計5つのサブモデルから構成される。各サブモデルの概要は以下のようである。

* (財)電力中央研究所環境科学部 Environmental Science Department, Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko 1646, Abiko-shi, Chiba, Japan 270-1194.

大気モデルは NCAR CCM3 と呼ばれるスペクトルモデルで、大気の放射過程、積雲対流などによる降水過程、大気境界層などが考慮されている (Kiehl et al., 1996)。モデルの水平解像度は約 280km (波数切断 T42)、鉛直方向は地上から上部成層圏 (約 4hPa) までを 18 層に不等分割し、計算時間間隔は 20 分である。地表面モデルでは地表での様々な物理プロセス (土壌・植物・雪氷などによるフラックス) が計算される (Bonan, 1996)。ただし、生物の成長や二酸化炭素の固定などの生物・化学的プロセスに関しては考慮されていない。時間および水平解像度は大気モデルと同じである。海洋モデルは、GFDL の海洋モデル MOM1 を基に、中規模渦や海洋混合層の計算法などを改良したものである (NCAR Oceanography section, 1996)。水平解像度は東西方向に 2.4 度、南北方向には 1.2 ~ 2.4 度で低・高緯度の解像度が高い。鉛直方向は海面から水深約 6000m までを 45 層に分割し、鉛直解像度は 12 ~ 250m で上層の解像度が高くなっている。海水モデルでは、海水の生成・融解に係わる熱力学プロセスと海水の破壊や漂流に係わる力学プロセスが考慮されている (Bettge et al., 1996)。海水モデルの水平解像度は海洋モデルと同じである。フラックス・カップラーは、サブモデル相互間で交換されるフラックスを計算し、その結果をそれぞれのサブモデルに受け渡す (Bryan et al., 1996)。サブモデル間のフラックスのやり取りには、分散メモリ型計算機で利用されるデータ通信ライブラリ MPI(Message Passing Interface) を用いている。

3 実験条件

温暖化予測にあたっては、将来の温室効果ガスの排出シナリオが重要となるが、現時点では COP3 後の削減量を盛り込んだ排出シナリオを提示することは難しい。一方、フラックスコレクションを用いない温暖化予測結果を評価する場合、従来の予測計算で標準的に使用されている排出シナリオを用いるのが望ましい。そこで本研究では、従来の予測計算と同様に、大気中 CO₂ 濃度の増加率を年率 1% と仮定し、CO₂ 濃度が現状の 3 倍に達するまでの 115 年間の漸増実験を行った。また、この漸増実験に先立ち、大気中 CO₂ 濃度が現状レベル (355ppmv : 1991 年相当) の一定条件下で、10 年間の現状気候再現実験 (コントロールラン) も実施した。図 1 は本実験の大気中 CO₂ 濃度増加シナリオを示したものであり、横軸は NCAR で既に実施された 300 年間の現状気候再現実験 (以後、NCAR コントロールランと呼ぶ) のモデル年である。即ち、本研究では NCAR コントロールランの 15 年目の計算結果をリスタートデータとして用い、計 125 年間の計算を行った (丸山ら, 1997)。

4 予測結果

4.1 地表温度

全球の地表温度の月・年平均値の時間変化を図 2 に示す。図の横軸は NCAR コントロールランを基準とした計算期間であり、本研究の結果を実線で、NCAR コントロールランの結果を破線で示した。いずれの場合も細線が月平均値、太線が年平均値を表わす。大気中の CO₂ 濃度が増加する 25 年目以降、漸増実験では全球地表温度の年平均値が時間と共に上昇し、CO₂ 濃度が現状の 2 倍を越える 95 ~ 104 年目 (漸増実験開始後 71 ~ 80 年 : 以後、2 倍の CO₂ 時と呼ぶ) には現状よりも約 1.5 °C の温度上昇、3 倍濃度になる 130 ~ 140 年目 (漸増実験開始後 106 ~ 115 年目 : 以後、3 倍の CO₂ 時と呼ぶ) には約 2.3 °C の温度上昇となっている。

漸増実験結果を基に、年平均地表温度の上昇率の地理的分布を解析した結果を図 3 に示す。細かい (粗い) 陰影は 10 年間で 0.15 °C 以下 (0.4 °C 以上) の温度上昇域を表す。地表温度の上昇は低・中緯度よりも高緯度で大きく、特に北半球で顕著である。カムチャッカ半島からベーリング海周辺海域、およびグリーンランド周辺では 0.6 °C/10 年以上の温度上昇が見られる。これらの温度上昇は主に冬季に生じており、冬季北半球の高緯度で温度上昇が顕著に見られると言う従来の予測結果と類似の結果となっている。

4.2 降水量

全球平均年降水量 (mm/day) の時間変化を図 4 に示す。点線で示した NCAR コントロールランでは年平均降水量は約 3.05mm/day 程度であるが、実線で示した漸増実験結果では CO₂ の増加と共に降水

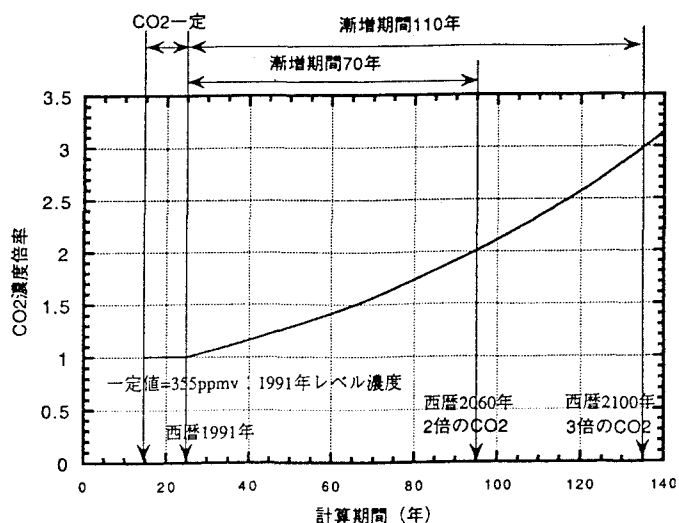


図 1: 大気中 CO₂ 濃度の増加シナリオ (355ppmv を基準として、年率 1% の増加)

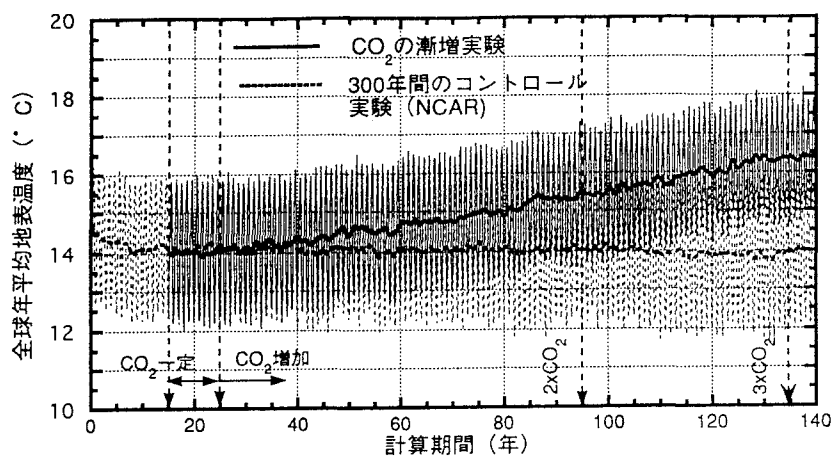


図 2: 全球平均地表温度の予測結果。実線は漸増実験結果、破線は NCAR コントロールランの結果。

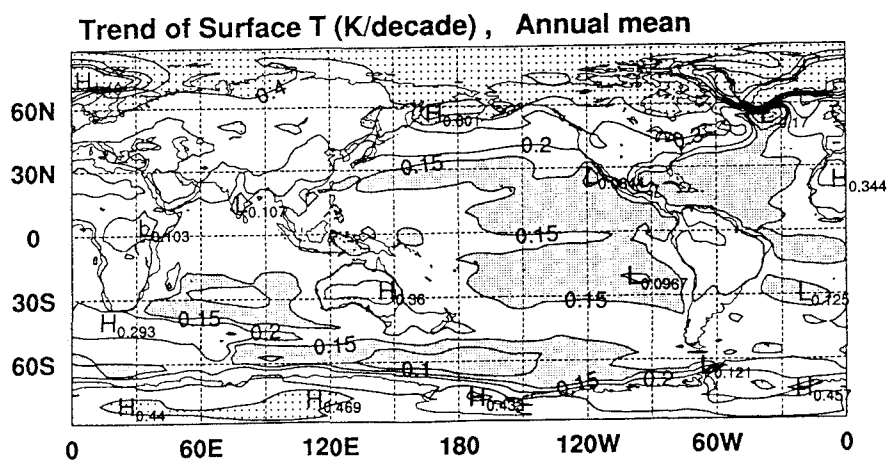


図 3: 年平均地表温度の上昇率の地理的分布 (単位: °C/10 年)。細かい (粗い) 陰影は 0.15 °C/10 年以下 (0.4 °C/10 年以上) の温度上昇域を表す。

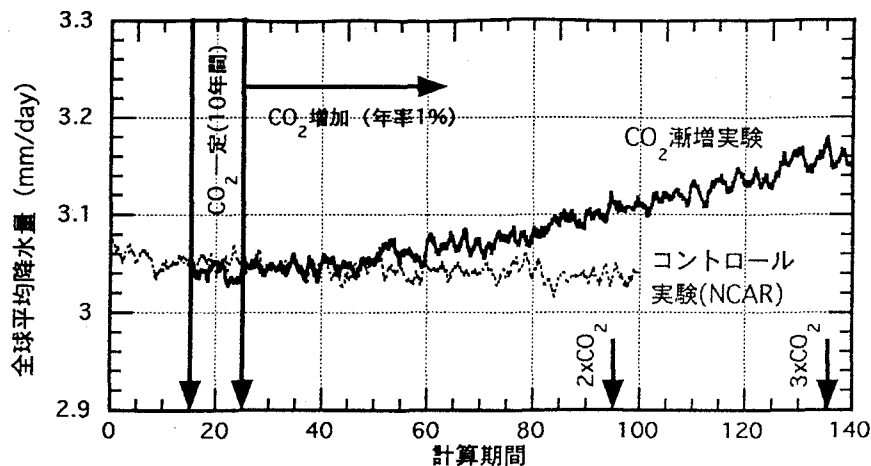


図 4: 全球平均年降水量の時間変化 (単位: mm/day)。

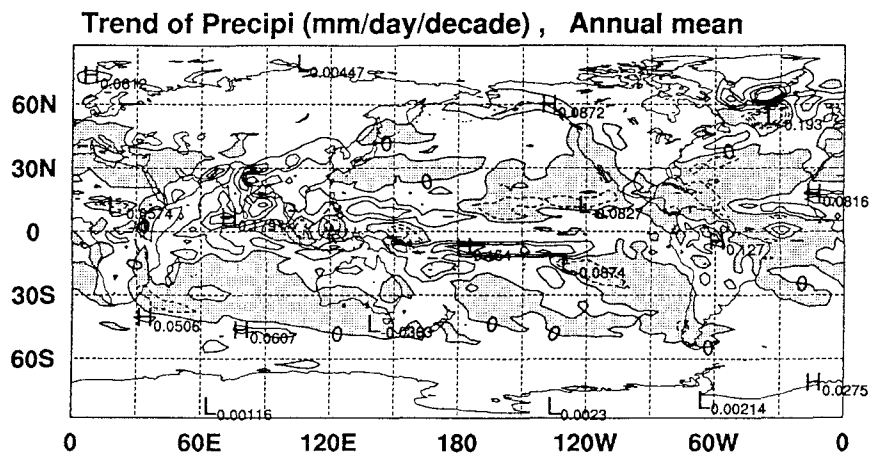


図 5: 年平均降水量の変化率の地理的分布 (単位: mm/day/10 年)。陰影は降水量が減少する領域を表す。

量が増加しており、2 倍および 3 倍の CO_2 時には現状の約 2% および約 4% 増となっている。

図 5 は年平均降水量の変化率の地理的分布を示したものである。コンター間隔は 0.04mm/day/10 年 であり、陰影は降水量が減少する領域を表す。中緯度の海洋上では降水量が減少傾向にあり、インド・アジアモンスーン域では降水量は増加し、日本でも若干増加傾向にある。しかしながら、トレンドの統計的検定によれば、高緯度域の降水量増加は有意であるが、インド・アジアモンスーン域などの一部を除く低・中緯度では変動が大きく、トレンドの統計的有意性が認められない地域が多い (有意水準 5%)。

4.3 海洋循環

コントロール実験により得られた黒潮やメキシコ湾流の流動パターンは、海洋大循環に関する既往の観測結果とほぼ一致する。ただし、モデルではフィリピンや朝鮮半島などの細かな地形が省略されているため、対馬海流の流れの過大評価など、空間解像度の粗さに起因すると思われる問題点も散見された。また、南極周極流の流速は観測値の 2 倍程度と過大である。海洋モデル単独による現状気候の再現結果にはそのような観測値との乖離は見られないことから、これは大気モデルと海洋モデルを結合した際の

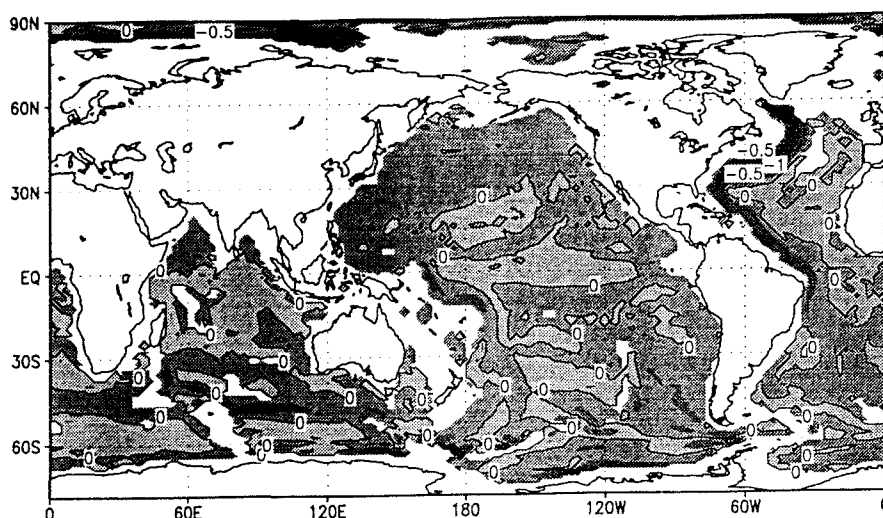


図 6: 水深約 3000m 層での水平流速の変化を 2 倍の CO_2 時とコントロールランとの差で示す (単位: cm/s)。最も薄い陰影は流速が速くなる領域を表わす。それより濃い陰影は流速が遅くなる領域を表し、陰影は濃いほど流速の低下量が大きい。

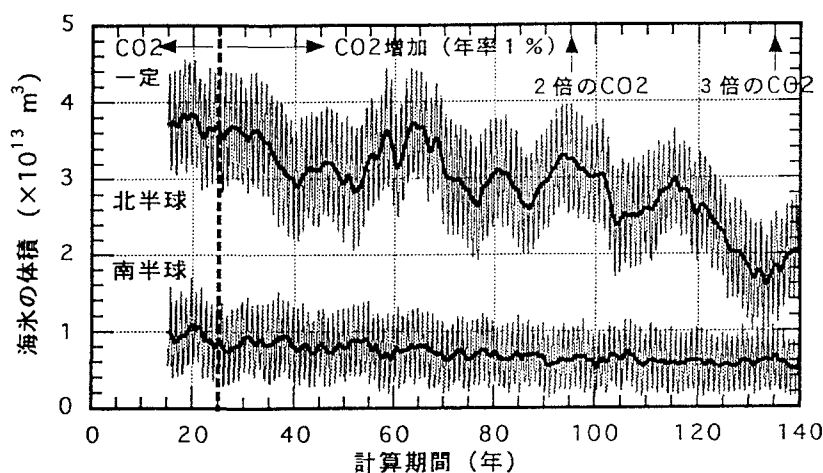


図 7: 南・北半球の海水体積の時間変化。細線は月平均、太線は年平均である。

問題と考えられる。ついで、温暖化に伴う黒潮、対馬海流、メキシコ湾流、南極周極流など代表的な海流の断面流量の変化を検討した結果、温暖化に伴いメキシコ湾流の断面流量は減少する傾向にあるが、他の海流には顕著な変化は認められなかった。

従来の海洋学の知見によると、北アメリカ東岸を北上したメキシコ湾流はグリーンランド沖で沈み込み、深層水となって南下する、いわゆるコンベヤーベルトと呼ばれる 3 次元的な海洋循環が形成されていると考えられている。図 6 は 2 倍の CO_2 時を対象にして、水深約 3000m 層における流速の変化を示したものである。もっと薄い陰影は速度が増加する領域を表し、陰影が濃くなるほど流速は減少する。これによれば、グリーンランド沖で沈み込み、北アメリカ東岸を南下する深層水の水速は弱まる事が分かる。さらに、海洋全体としても深層循環は弱まる傾向にある。

4.4 海水

海水は温暖化を加速する正のフィードバックを持つため、海水の変化は極めて重要な問題である。図 7 は、北半球と南半球を対象として、海水体積の時間変化を解析した結果である。両半球ともに太い実

線が年平均値、細い破線が月平均値を表す。CO₂を増加させた25年目以降、北半球の海水体積は20年前後の周期で大きく変動しながら時間経過とともに減少する。海水体積は2倍のCO₂時には現状の約80%に、3倍時には約50%にまで減少する。一方、南極大陸周辺の南半球の海水体積はほぼ単調に減少している。しかし、2倍および3倍CO₂時の海水体積の減少率は北半球とほぼ同じ80%、50%程度である。

5 結語

フラックスコレクションが不要な大気海洋結合モデル (NCAR CSM) を用いて、CO₂の漸増実験を行った。実験は、大気中CO₂濃度が年率1%で増加すると仮定し、CO₂濃度が現状レベルの3倍に達するまでの115年間の漸増実験とした。その結果、冬季北半球の高緯度で温度上昇が顕著であること、全球平均した年降水量は増加することなど、従来の予測結果と類似した結果が得られた。温暖化に伴い、インド・アジアモンスーン域や高緯度域での降水量は増加する傾向にあるが、中・低緯度域の降水量変化は時間的な変動が大きく、統計的な有意性は確認できなかった。一方、海洋循環では温暖化によりメキシコ湾流の断面流量変化が減少する傾向にあった。海洋の中・深層の流れは全球的に弱まり、特に北アメリカ東岸を南下する深層流の減少が顕著である。このことは、温暖化に伴い海洋の鉛直循環が弱まる可能性を示唆している。南北両半球の海水体積は温暖化に伴い減少し、2倍および3倍のCO₂時には現状の約80%および50%にまで減少した。

本研究はNCARとの共同研究の一環として実施したものであり、計算機はNEC SX4/32CPUを使用した。温暖化予測実験を行うにあたっては、NCARの多数の研究者の協力を得た。また、計算機の使用およびデータの記録に際してはNECおよびSONYの協力を得た。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- Bettge, T.W., J.W. Weatherly, W.M. Washington, D. Pollard, B.P. Briegleb, and W.G. Strad Jr (1996) : The NCAR CSM Sea Ice Model, NCAR/TN-425+STR, NCAR Technical Note, 25p.
- Bonan, G.B (1996) : The NCAR Land Surface Model (LSM version 1.0) coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR/TN-429+STR, NCAR Technical Note.
- Boville, B.A., P.R. Gent (1998) : The NCAR climate system model, version one, submitted to Journal of Climate.
- Bryan, F.O, B.G. Kauffman, W.G. Large, and P.R. Gent (1996) : The NCAR CSM Flux Coupler, NCAR/TN-424+STR, NCAR Technical Note.
- IPCC WG-I (1995) : Climate Change 1995, The science of climate change, Cambridge University Press, 572p.
- Kiehl J.T., J.J. Hack, G.B. Bonan, B.A. Boville, B.P. Briegleb, D.L. Williamson, and P.J. Rasch (1996) : Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3), NCAR/TN-420+STR, NCAR Technical Note, 152p.
- NCAR Oceanography Section (1996) : The NCAR CSM Ocean Model, NCAR/TN-423+STR, NCAR Technical Note.
- 丸山康樹・平口博丸・筒井純一・仲敷憲和・門倉真二・角湯正剛 (1997) : 大気・海洋結合モデル (NCAR/CSM) による全球温暖化予測、電力中央研究所研究報告:U97034, 24p.