

35. 温暖化による日本周辺の海域環境変化の予測

Prediction of the Global Warming in the Ocean around Japan

坪野 考樹*, 仲敷 憲和*, 丸山 康樹*

Takaki TSUBONO*, Norikazu NAKASHIKI*, Kouki MARUYAMA*

ABSTRACT: The global ocean circulation model developed by CRIEPI was applied to the regional ocean around Japan. On the bases of the global warming computation by NCAR/CSM-1(Climate System Model), the change of SST(Sea Surface Temperature) and Kuroshio around Japan was calculated in detail by using the regional ocean model. The effect of the global warming was summarized as follows; 1) The surface ocean circulation will be enhanced, especially, Kuroshio in the Pacific and Tsushima current in Japan Sea will become stronger, 2) SST will rise around Japan, especially in the east off Hokkaido, 3) The dynamic sea surface height will rise around Japan. The sea surface rise in the Kuroshio is remarkable in the Pacific side of western Japan.

KEYWORD: global warming, climate change, ocean surrounding Japan, nesting model, coupled climate model

1. はじめに

大気中の CO₂ 濃度増加にともなう温暖化については、全球大気・海洋結合モデルにより、気温上昇等が予測されており(平口ら(1998))、この温暖化影響による日本周辺海域の流動変化は、沿岸の流動や水温の変動等に大きな影響を及ぼすことが予測される。現在、北太平洋規模の海洋循環の再現には、全球海洋モデルが用いられているが、計算時間の制限により計算格子が粗いため、海底地形や対馬海峡等を再現することが難しく、各地域の流動特性の再現は不十分である。Free-Surface 全球海洋モデル((Nakashiki 1996))は、流速を順圧成分と傾圧成分にモード分離せずに計算するために、計算領域に開境界が存在する場合でも境界条件の設定が比較的容易に行える。そこで、本研究では、温暖化時の日本周辺の海洋環境の変化を検討するために、全球海洋モデルの計算結果を境界条件とした地域海洋モデルの構築を行い、全球気候モデル(NCAR/CSM-1: Climate System Model(Gent(1998))による温暖化(CO₂ 漸増時)の計算結果を、西部北太平洋を対象とした地域海洋モデルに適用し、日本周辺での海水温の上昇や黒潮等の流動の変化について詳細な検討を行った。

2. モデルの概要

2.1 基礎式

本研究で構築した地域海洋モデルの基礎式は、全球海洋モデル(Nakashiki(1996))と同様である。本モデルで用いた基礎式は、球面座標系での流体の運動方程式に、Thin Shell Approximation、Hydrostatic Approximation、Bousinesq Approximation の仮定を用いた式、および式(1)に示す水温・塩分の保存式である。式(1)中の右辺第3項は、水温・塩分の計算値を観測値に緩和させるための項である。また、海水の密度計算には、計算時間を短縮するため、ポテンシャル水温から密度を計算する方法((Ishizaki 1994))を用いた。

$$\frac{dF}{dt} = +K_H \nabla F + K_V \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + \gamma(F^* - F) \quad (1)$$

* 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, 270-1194 Japan.

ここに、 F :スカラー量 (ポテンシャル水温 ($^{\circ}\text{C}$), 塩分), *:観測値, γ :緩和時間= (day^{-1}), K_H, K_V :水平, 鉛直方向の渦動拡散係数 (m^2/s) である。

2.2 計算領域・格子と離散化

図-1 に、本研究で用いた計算領域を示す。計算領域は、深度方向に-6000 mから表層まで、緯度方向に 20°S から 65°N 、および経度方向に 90°E から 180°E までの西部太平洋を対象とした。水平方向のメッシュ間隔は、緯度、経度方向ともに、ネスティング手法の検討に使用する全球海洋モデル ($2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 、45層) のメッシュ間隔の $1/3$ となる $2/3^{\circ}$ とした。また、深度方向の計算メッシュは、全球海洋モデルのメッシュ間隔と同様とし、海表面で 12.5m、海底面で 500 m となる可変メッシュ (45層) とした。地域海洋モデルの計算点の総数は、約 78 万点 ($128 \times 135 \times 45$) である。また、時間ステップは $\Delta t = 2 \text{ min}$ とした。本モデルでは、計算格子に C-グリッドを用いており、流速の各成分は計算セルの各断面の中心で、圧力、水温、塩分はセルの中心で定義される。また、基礎式の離散化には、時間項に前進差分を、移流項に有限体積法による差分を、拡散項に中心差分を用いた。なお、地域海洋モデルに用いた渦動粘性係数 (cm^2/s) は、水平方向に 1×10^8 、鉛直方向に 10、渦動拡散係数は、水平方向に 5×10^7 、鉛直方向に 1 とした。

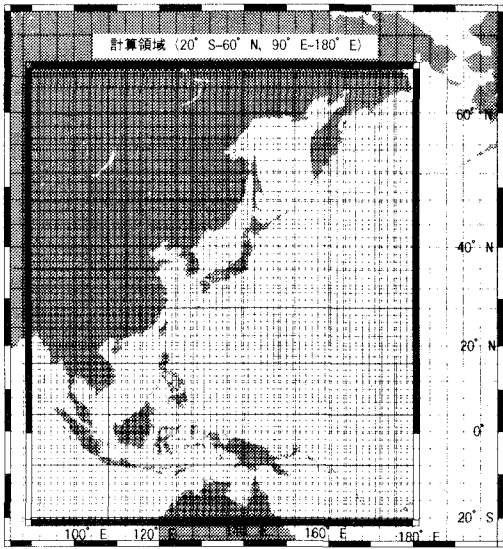


図 - 1 計算領域

2.3 計算条件

CO_2 増加時の全球温暖化予測には、NCAR (米国大気研究センター) が開発した大気・海洋結合モデル (CSM-1: Climate System Model) の結果を用いた。本モデルを構成する大気モデルの空間解像度は約 300km (T42) であり、海洋モデルの解像度は約 200km ($2^{\circ} \times 2^{\circ}$)、鉛直方向には 45 層である。温暖化予測に用いた大気中の CO_2 濃度の増加は、毎年 1 % の割合で漸増するものと仮定しており、大気中の

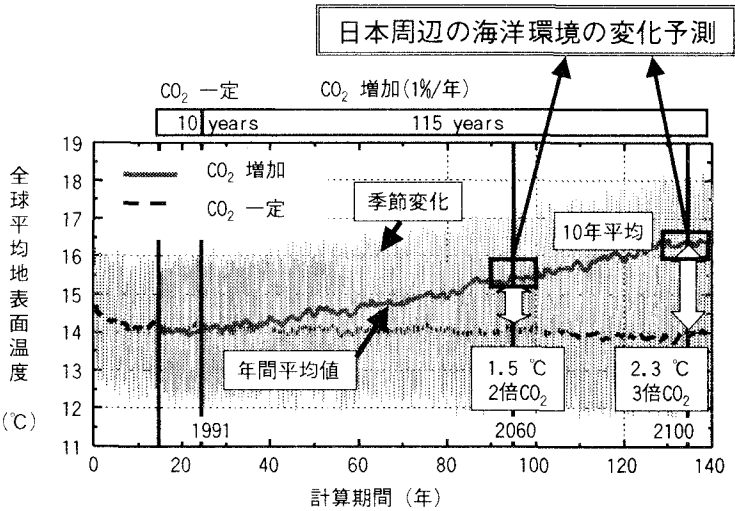


図 - 2 CSM による温暖化予測と地域海洋モデルの計算期間

CO_2 濃度は、1991 年時点の濃度 (355ppmv) を現状として、70 年後に 2 倍、110 年後に現状の 3 倍となっている。図-2 に、CSM-1 より計算した全球平均の地表面温度の上昇を示す。なお、気候モデルによる温暖化予測の詳細については、丸山ら (1997) の報告を参照されたい。本研究では、このうち CO_2 濃度が現状の 2 倍 (全球平均値表面温度が 1.5°C 上昇)、3 倍 (全球平均値表面温度が 2.3°C 上昇) になった時点の予測結果を用いて、日本周辺の海洋環境の変化を詳細に検討した。なお、 CO_2 濃度が、それぞれ 2 倍、3 倍になった時の気温、水温、海上風などの気候値としては、前後 5 年を含む 10 年間の平均値を使用した。

2.4 計算の手順

地域海洋モデルを用いて温暖化時の海洋環境の変化を予測するためには、まず現状の気候値を再現することが必要である。CSMにより計算された現状(1×CO₂)の海洋流動は、全般的には現状の流動を再現できているが、モデルの解像度が粗く、フィリピンや朝鮮半島が省略されているために、西部赤道域や南シナ海、日本海などの海域で計算誤差が大きくなっている。また水位については、全球気候モデル(CSM-1)では計算できないため、温暖化時の日本周辺海洋環境の計算に用いる境界条件は、全球海洋モデルを用いて以下のように Step1,Step2 の手順で求めた。

STEP.1 現状の海洋環境計算

駆動力を風応力(Hellerman S. and M. Rosenstein(1983)), 水温, 塩分(World Ocean Atlas(1994))とし、全球海洋モデル(解像度:2°×2°,45層)を用いて、現状の海洋を再現した。

STEP.2 温暖化時の海洋環境計算

全球気候モデルに含まれる系統的な誤差の影響を取り除くために、温暖化時の駆動力には、CSMで得られた気温, 水温, および海上風の結果を直接用いずに、以下の駆動力を用いて、STEP.1で使用した全球海洋モデルを駆動した。

温暖化による影響(偏差)=(2,3×CO₂時の計算結果(CSM))-(CO₂が1倍時の計算結果(CSM))

全球海洋モデルに使用する温暖化時の駆動力=STEP.1で使用した現状の気候値+温暖化による影響(偏差)

(2)

この式のように、全球海洋モデルに使用する温暖化時の駆動力は、まずCSMにより計算された2,3×CO₂時の海洋環境から現状(1×CO₂)の海洋環境の偏差を求め、この偏差をSTEP.1で使用した駆動力に加えることで、設定した。

2.5 初期条件と境界条件

表-1に、地域海洋モデルに必要な計算条件を示す。地域海洋モデルの海表面境界では、2,3,4で使用した条件を、側方境界では、2.4のSTEP.1,STEP2の全球海洋モデルで得られた計算結果を設定した。また、本研究では、地域海洋モデルの計算が気候変化予測計算のうちCO₂濃度が2倍、3倍における短期的なものであるため、開表面の境界条件は、フラックスを用いずに式(1)中の緩和項を用いて、海面水温で緩和した。なお、水温・塩分の緩和時間γは2min⁻¹とした。地域海洋モデルの計算領域内部の初期値は、2.4において計算した現状の気候値を用いた。

表 1 初期条件と境界条件

	海表面	計算領域開境界(側方)	計算領域内部
初期条件	水位		水温, 塩分, 流速
境界条件	海上風, 海面水温(海面気温)	水位, 水温, 塩分, 流速	

3. 結果および考察

2,3,4で述べた1×CO₂(現状)、2,3倍の条件で全球海洋モデルにより計算された流動・水温・塩分を境界条件として地域海洋モデルを駆動し、その結果について検討を行った。計算のSpin-upは、初期値として各メッシュに全球海洋モデルの計算結果の補間値を与え、計算が表層付近で定常状態になるまで、8年間計算を行った。図-3に、現状のCO₂条件での計算結果(表層付近の流速・海面高度)を示す。海面高度は、台湾の東方で約1m程度であり、人口衛星等によって観測されているパターンと良く一致している。また、流動に関しては、黒潮続流が北上している傾向があるものの、黒潮や対馬暖流等のパターンも良く再現されている。表-2に、各計算条件における各海峡海流の流量変化を示す。黒潮の流量は、全球気候モデルでも地域海洋モデルでも観測値の範囲内である。しかし、全球気候モデルでは、朝鮮半島が再現されていなかったため、対馬暖流等日本海での流量が過大評価されていたが、地域海洋モデルでは観測値に近づいている。同様に、地域海洋モデルでは、インドネシア通過流に関しても改善され

表 2 温暖化時の海流の変化

モデル		断面通過流量 (Sv=10 ⁶)					
		宗谷海峡 宗谷海峡	津軽海峡 津軽海峡	対馬海峡 対馬海峡	黒潮 黒潮	台湾海峡 台湾海峡	インドネシ ア通過流
地域海洋モデル	1 × CO ₂	0.33	1.17	1.50	39.69	0.11	15.72
	2 × CO ₂	0.37	1.27	1.63	48.75	0.13	14.17
	3 × CO ₂	0.36	1.28	1.64	49.65	0.19	12.98
全球気候モデル CSM	1 × CO ₂	-	5.7	5.7	49	-	26
	2 × CO ₂	-	5.8	5.8	51	-	27
	3 × CO ₂	-	5.8	5.8	48	-	26
推定値		0.8	1.4	2.2	30-60		16-18

ている。

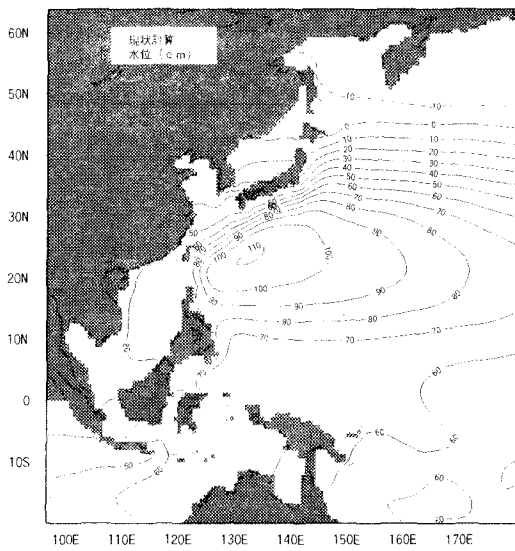
図-4に、3 × CO₂の海洋環境の変化を示す。図は日本周辺を拡大した結果を示し、水位、流速、水温、塩分の変化(3 × CO₂-現状)を示したものである。流速、水温、塩分の変化については、海表面での境界条件の設定の影響を避けるため、第2層(水深18.75m)の値を示した。計算結果より、CO₂濃度が増加すると次の傾向があることが分かった。

- (1) 流動の変化にともない、“力学的海面高度”が上昇する。日本周辺では、水位上昇は5 cm程度であり、特に黒潮流域にあたる太平洋側の影響が大きく、黒潮流軸では15 cm程度である。温暖化時の水面変化は、IPCC(1996)等での全球一様の上昇値(2100年で50 cm程度)に“力学的海面高度”の変化(約5cm)が加算されることになる。
- (2) 太平洋域では、黒潮や黒潮続流などの流動が強化される。また、日本海においても、対馬暖流や日本海の流動は強化される傾向にある。逆に、インドネシア通過流の流量は減少する。
- (3) 3 × CO₂時には、日本周辺の年平均水温は約2℃上昇する。特に北海道東岸の海域では昇温が大きく、3℃程度上昇する。これは、温暖化時に海水が減少したために、冬季の大気温度が大きく上昇した結果と考えられる。また、日本海では、朝鮮半島東岸の昇温が大きくなっている。
- (4) 海表面の塩分濃度は、日本周辺では減少している。これは、温暖化時には西部北太平洋の中緯度地域で降雨が増加する(例えば、丸山(1997))
- (5)) ことによる影響と考えられる。また、北海道東岸の海域では、塩分濃度が大きく減少しているが、これは海水が解けることによって供給される淡水の影響と考えられる。

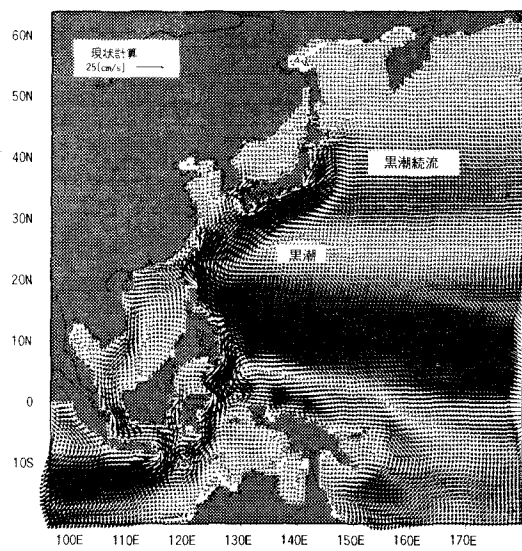
4. おわりに

全球気候モデル(NCAR/CSM-1)により計算された全球での海洋環境に基づいて、現状、2.3 × CO₂の西部北太平洋(20°S-65°N、90°E-180°E; 2/3° × 2/3°、45層)について検討を行った。その結果、現状では、黒潮や対馬暖流、日本海等の流動は定性的によく再現されており、モデルは妥当なものと思われる。また、2.3 × CO₂の日本周辺の海域環境では、流動の変化にともない、“力学的海面高度”が上昇する等の海域環境の変化について、全球気候モデルに比べて詳細な情報が得られた。

全球モデルでは、計算時間等の制約により高解像度の計算格子を使うことは困難であるが、本研究で示したように、高解像度の地域海洋モデルを用いると流動計算の精度が向上し、より精度の高い海洋環

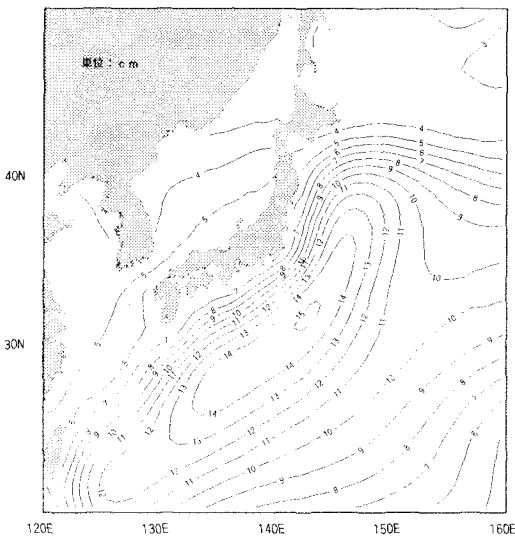


年間平均海面高度

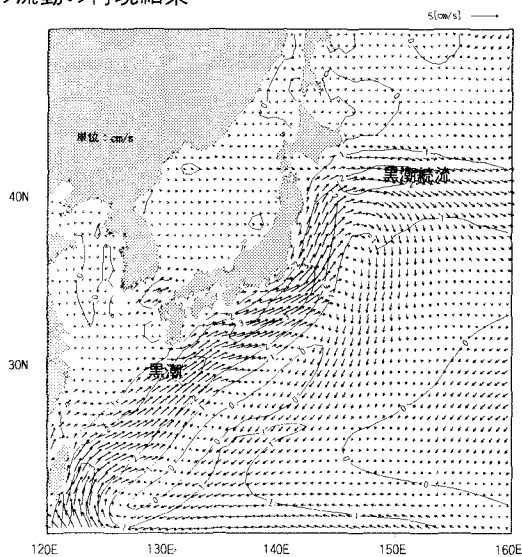


水深 18.75m での流速

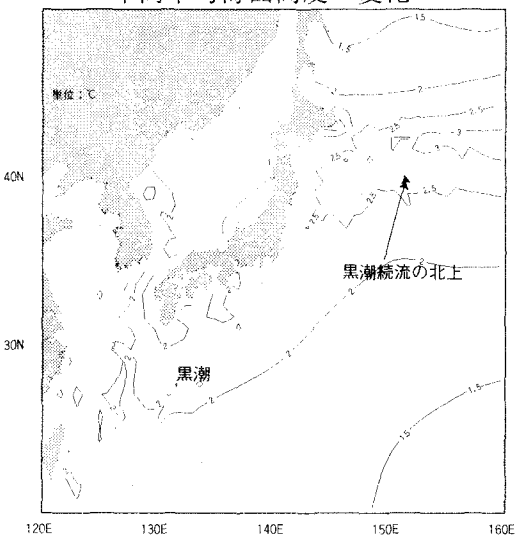
図 - 3 現状 CO_2 条件での流動の再現結果



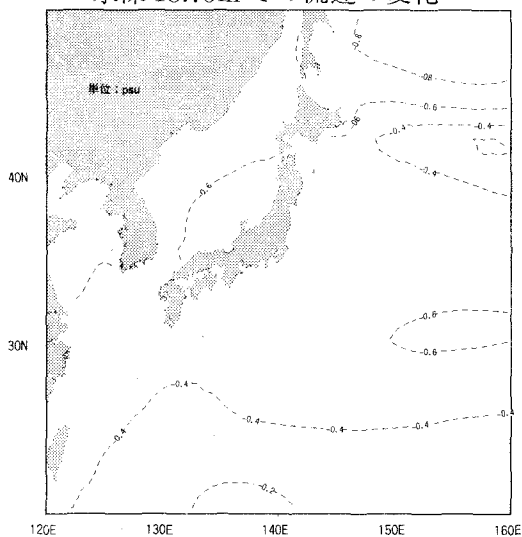
年間平均海面高度の変化



水深 18.75m での流速の変化



年間平均海面水温の変化



年間平均海面塩分の変化

図 - 4 $3 \times \text{CO}_2$ 条件の海洋環境変化

境の変化の予測が可能である。今後は、さらに温暖化予測の信頼性を向上させるため、以下の検討を行う予定である。

- 温暖化時の大気温や海上風の季節変動等の影響についても検討を行うとともに、海氷の影響や混合層の季節変動等の影響をより精度良く考慮できるように、地域海洋モデルの改良をおこなう。
- 日本海等の縁辺海の流動をより精度良く計算するためには、海底地形や陸地をより詳細に再現する必要がある、モデルの一層の高解像度化を行う。

謝辞

地域海洋モデルの検討にあたっては、NCAR の W. R. Holland、F. O. Bryan、M. W. Hecht から多くの有益な助言を得た。また、本研究の実施にあたり、計算、解析には電力計算センターの田口富貴子女史の協力を得た。これら多数の方々の協力に深く感謝の意を表します。

参考文献

- National Oceanographic Data Center (1994). World ocean atlas 1994 cd-rom data set documentation. *Informal Report* ..
- Eds, J. T. Houghton, F. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (1996). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Gent, P. P. (1998). The ncar climate system model global ocean component. *Jour. of Climate*, 1287–1306.
- Hellerman, S. and M. Rosenstein (1983). Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr.* 13(2), 1,093–1,104.
- Ishizaki, H. (1994). A simulation of the abyssal circulation in the north pacific ocean, part 1: flow field and comparison with observations. *J. Phys. Oceanogr.* 13(2), 1,093–1,104.
- Nakashiki, N. (1996). Application of regional of models to ocean disposal of co₂. *Ocean Storage of CO₂ Workshop 1-Ocean Circulation*, 71–98.
- 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. 電力研究所報告.
- 平口博丸, 筒井純一, 丸山康樹, 仲敷憲和. (1998). NCAR の大気・海洋結合モデルによる温暖化予測実験. 第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集 6, 187–192.