

18. モジュラーオーシャンモデル (MOM2) を用いた 日本海の海洋循環シミュレーション

A NUMERICAL SIMULATION OF OCEANIC CIRCULATION IN JAPAN SEA BY MODULAR OCEAN MODEL (MOM2)

熊倉俊郎* ・ 早川典生* ・ 細山田得三* ・ 播磨隆**

Toshiro KUMAKURA, Norio HAYAKAWA, Tokuzo HOSOYAMADA, Takashi HARIMA

ABSTRACT; Numerical simulation by Modular Ocean Model2 (MOM2) is carried out to understand whole image of oceanic structure in the Japan Sea. MOM2 is the numerical simulation code which integrates governing equation and calculates development of momentum, temperature, and salinity. The study is successful to reproduce the flow pattern of oceanic circulation in the Japan sea, which includes meandering of Tsushima Warm Current and the polar front in the center of Japan Sea.

KEYWORDS; Numerical Simulation, Oceanic Circulation, Japan Sea

1. はじめに

日本海の海洋循環に関する研究は、従来、主に南端の対馬海峡から流入する対馬暖流系のみを中心として行われている。しかしながら近年、1) 水産資源の効率的な維持確保の観点、2) 対馬暖流が輸送する熱量と日本海側の冬季降雪との短期的気候変動の観点、3) 海洋投棄された汚染物質の移流拡散予測の観点から日本海全体の海洋循環を把握する必要性が生じている。日本海はまた、太平洋の数十分の1に過ぎないにも拘わらず、大太平洋に生じている種々の物理現象の殆どすべてが、集約されていると言われており、海洋物理学者の強い関心を集めている。日本海は、図-1に示すように最深部が3000mを超え、対馬、津軽、宗谷の浅く狭い主要な3つの海峡を通してのみ外洋との海水交換を行っており、強い閉鎖性を有している。また、冬季には、強い北西からの季節風を受け、大気との相互作用も顕著である。しかしながらこれらの特異でしかも非常に興味のある現象について海洋物理学的説明が未だ十分行われていないのが現状である。これらの現象を解明するため観測と数値シミュレーションによる海洋循環の動態解析が不可欠である。

本研究では、近年開発され、一般公開されているモジュラーオーシャンモデル (MOM2) を用いて日本海の海洋循環の数値シミュレーションを行った。

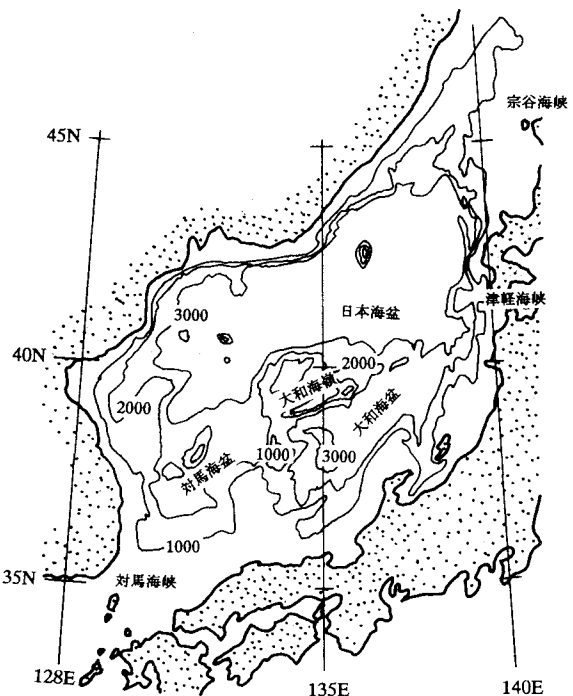


図-1 日本海の等深線図

* 長岡技術科学大学建設系 Department of Civil Engineering, Nagaoka Univ. of Technology、** 久慈市役所 Kuji city office

2. Modular Ocean Model (MOM)の概要

Modular Ocean Model (MOM)は、プリンストン大学地球流体力学研究所 (GFDL) で開発された3次元のプリミティブ海洋流体モデルである。以下にMOMの基礎方程式となる球面座標上での連続式(1)、運動量方程式(2)、塩分・水温の保存方程式(3)を示す。

$$\begin{aligned} W_t + \frac{m}{a}[u_\lambda + (v/m)_\varphi] &= 0 \quad (1) & u_t + \varepsilon_u - 2\Omega n v - m n u v / a &= -\frac{m}{a}(p/\rho_0)_\lambda + F^\lambda & T_t + \varepsilon T &= Q \quad (2) \\ v_t + \varepsilon_v + 2\Omega n v + m n u v / a &= -\frac{1}{a}(p/\rho_0)_\varphi + F^\varphi & S_t + \varepsilon S &= \sigma \quad (3) \end{aligned}$$

各記号の定義：

$$\begin{aligned} m &= \sec \varphi & \varepsilon_t &= \frac{m}{a}[(u\mu)_\lambda + (v\mu/m)_\varphi] + (w\mu)_t \\ n &= \sin \varphi \\ u &= a\dot{\lambda}/m \\ v &= a\dot{\varphi} \end{aligned}$$

ここで、 ϕ 、 λ 、 Ω 、 u 、 v 、 w はそれぞれ緯度、経度、地球の自転角速度、経度方向流速、緯度方向流速、鉛直方向流速である。また、 F^λ 、 F^ϕ は粘性項、 Q 、 σ は温度、塩分の拡散項である。

MOMは、まず、これらの基礎方程式を傾圧(baroclinic)成分と順圧(barotropic)成分に分割する。さらにこれらを差分化し、時間発展を計算して別々の解を得る。その後、両成分を合成して解を構成する¹⁾。計算領域は、鉛直方向に多層に分割され、密度成層を考慮することができる。MOMは本来、全球を対象としたモデルであり、基本的には境界がクローズした海洋を対象としている。MOM2は、従来のMOMに海面境界条件を付加したモデルとなっている。海面境界条件は、水温・塩分濃度・風応力についての設定値を設け、計算値とそれらの値の差を適当なダンピングタイムスケールで運動方程式内に強制項として加える手法をとっている。

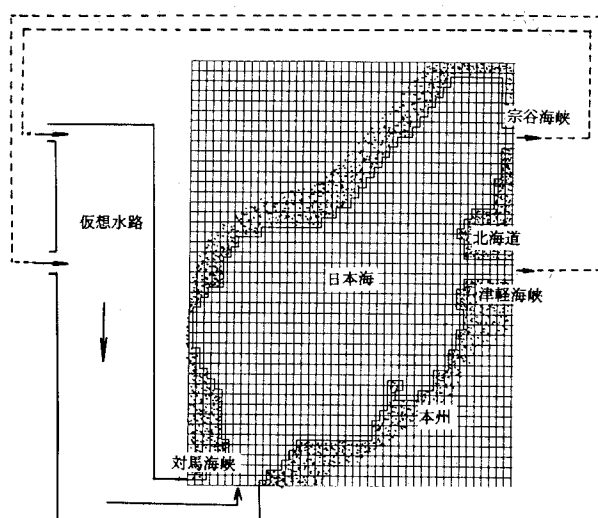


図-2 計算領域

3. 計算条件

3. 1 初期条件

本数値計算は、夏季と冬季の2つの季節を対象として行った。すなわち初期条件と境界条件としてそれぞれの平均的な気候値を与え、日本海の海洋循環の定常状態を計算した。水温、塩分に関する初期条件は、日本海洋データセンター(JODC)より提供されている水温・塩分データを用いて作成した。これらのデータを採取した観測点は疎らであり、しかも海底最深部までのデータが得られていない。計算に用いた格子点上の値は、これらのデータを補間して求めた。図-3には水深10mと150mにおけるそれぞれ夏季及び冬季の水温のコンター図を示す。水深150mにおいては、夏季と冬季の違いは流入口付近のみであり、日本海全域では、違いは顕著ではない。水深10mでは海上気温の変化を受けて夏季と冬季の違いが顕著である。

3. 2 境界条件

MOMは全球を計算対象としているため、側方境界からの海流の流入・流出条件を付加することができない。そのためKimらは日本海における計算で対馬暖流の流入条件を強制的に与えるサブルーチンを用いて処理している。本研究では、図-2に示すように津軽海峡の流出条件と九州西方の対馬海流の流入条件を周期境界条件を用いて

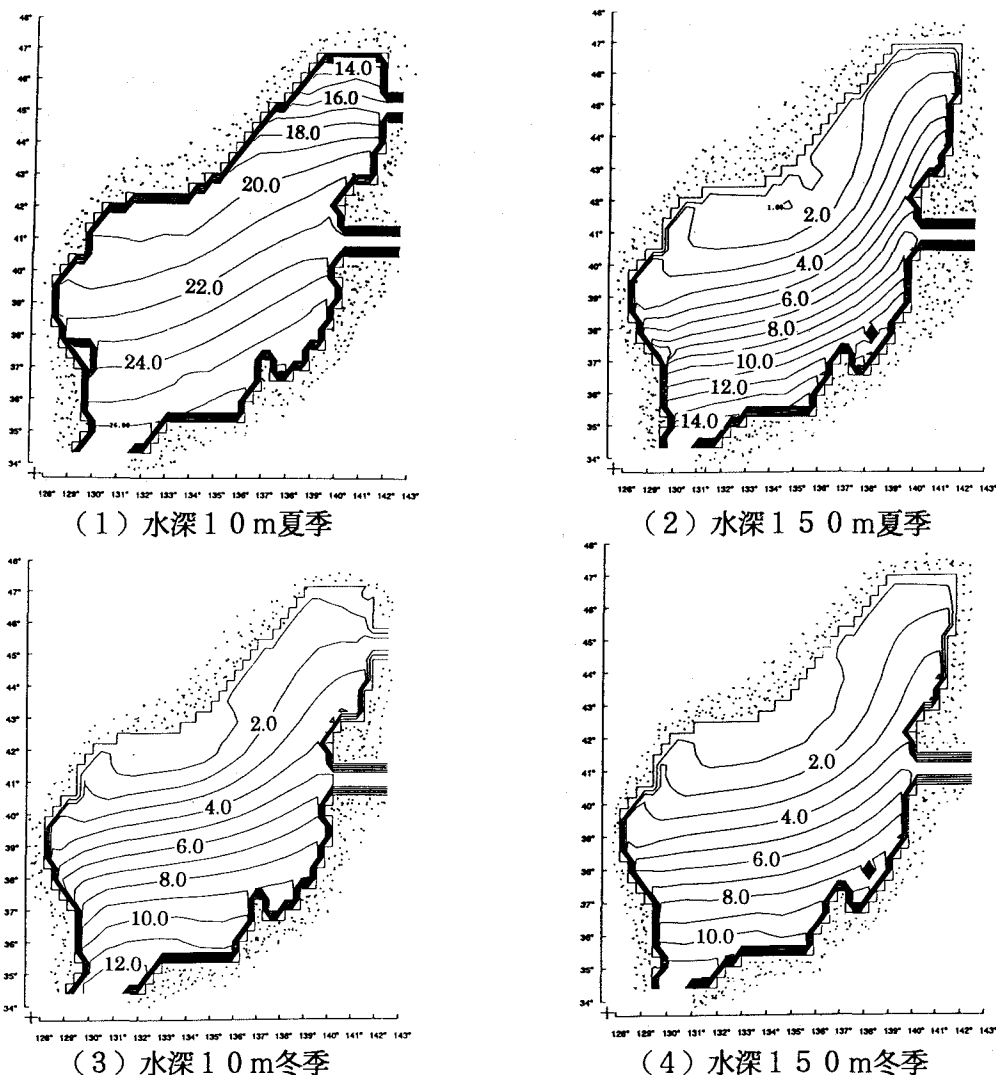


図-3 水温の初期条件のコンター図

連結させ、仮想的に閉鎖した海洋を対象として計算を行っている。ただし、仮想設置した水路内で海面境界条件と同じ手法を各層に適用して流出水の性質が直接流入水になるのを防いだ。

流入の境界条件として曳航式のADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)による対馬海峡の横断計測⁶⁾をもとにして流量を決定した。流入流速分布は各層で一様で、水温、塩分に関しても一様な分布を与えている。また、流出口である津軽海峡と宗谷海峡では、流出量比を6:4と仮定している。表-1に対馬暖流の流入条件を与える流量、水温、塩分の値を示す。

表-1 対馬海峡における流入流量、水温、塩分

季節	流量 (SV)	水温 (℃)	塩分(psu)
夏季	3.43	25.0	32.1
冬季	1.82	13.0	34.5
平均	2.63	19.0	33.3

また、海上面においては鉛直変位や鉛直方向の流速を0とする rigid-lid 近似を用い、海底面では、不透過条件を与えている。

3. 3 計算パラメータ及び計算格子

計算に用いるパラメータである、水平渦動粘性係数、水平渦動拡散係数、鉛直渦動粘性係数、鉛直渦動拡散係数はそれぞれ $1.0 \times 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $1.0 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $20 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $1.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ で一定とした。球面座標上における球の半径は、地球の平均的な半径 $6.37 \times 10^8 \text{ cm}$ とした。計算領域(図-2)は、北緯 $34 \sim 48^\circ$ 、東経 $128 \sim 143^\circ$ であり、格子間隔は緯度、経度方向ともに $1/3^\circ$ である。鉛直方向レベルは、表層(0)から 10, 20, 30, 60, 150, 150, 300, 480, 660, 880, 1200, 1500, 1800, 2200, 2700, 3200, 3700m の 16 層とした。計算時間間隔は、360 秒に設定した。この値は、安定性のための CFL 条件を満たし、計算は十分安定と考えられる。

4. 計算結果

図-4には、夏季と冬季における計算された定常流速場のベクトル図を示す。夏季の水深10mの流速は、対馬海峡を通過して北東方向へ流れ、本州の日本海岸に沿って北上していく。また一部は、対馬海峡から韓国東海岸に沿って北上し、北緯40度程度で沖向き(東向き)に流向が変わり、日本海中央部に流れ込んでいる。東進

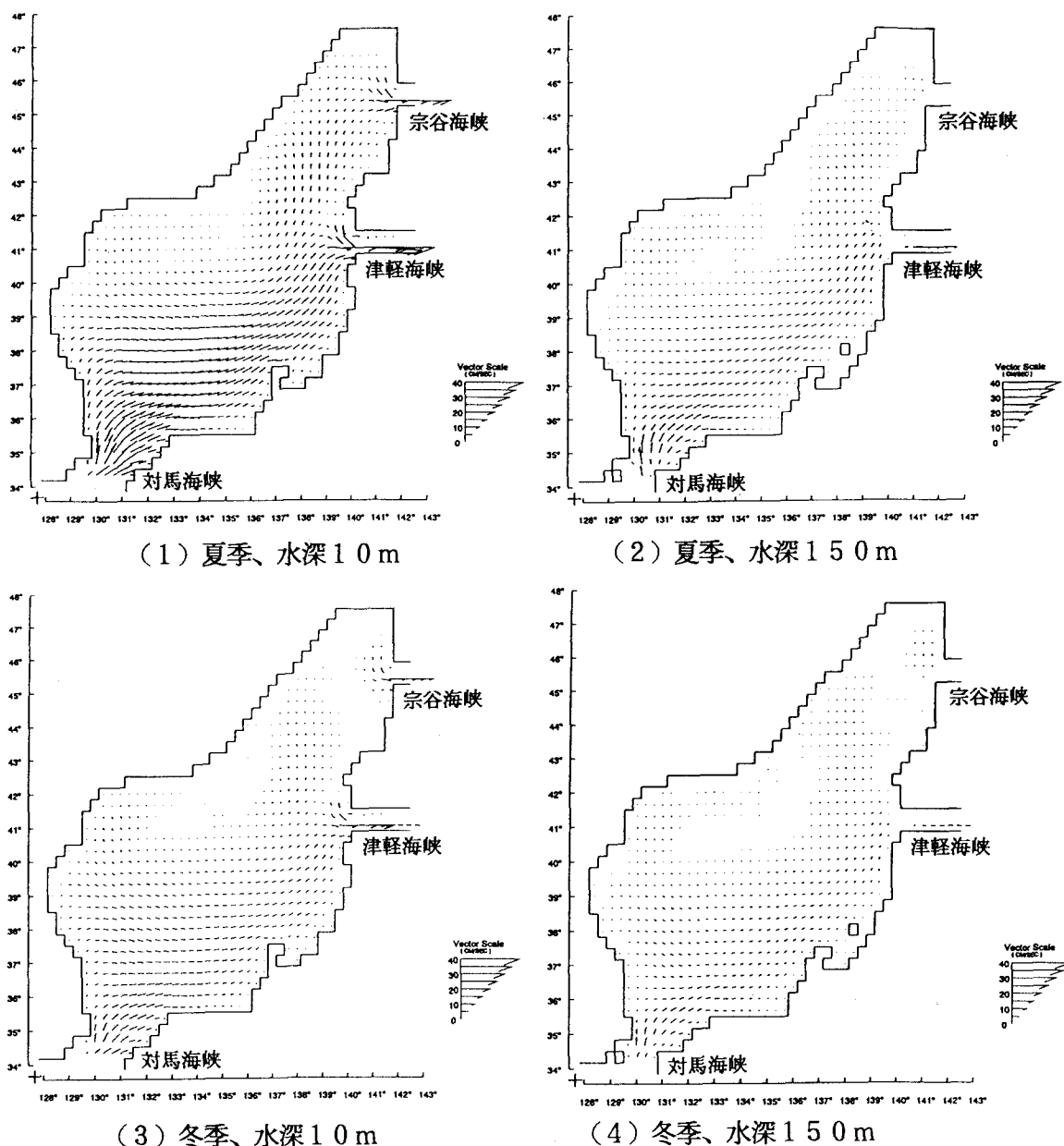


図-4 流速ベクトル図

する対馬暖流が日本海中央部付近に形成する南北の海域を隔てるフロントは極前線と呼ばれている。極前線以北の流れは、反時計回りの大きな循環流となっている。このような流れのパターンは、水深が深くなってもほぼ同様の傾向を示す。冬季においては対馬暖流の流入量の減少に応じて流速の値が小さくなっている。本州を北上する流れは、能登半島などの海岸の形状の影響を受けながら若干蛇行しながら北上し、津軽海峡と宗谷岬から太平洋側へ流出していく。なお、これらの結果はすべて対馬暖流の蛇行や中規模渦などの数百 km 程度の水平空間スケールを持った変動が現れていない。実際は、流れの傾圧性が強まる、夏季から秋季にかけてこの傾向が強まることが報告されている。これらの現象を計算上で再現するためには、対馬暖流の流入条件を設定する場合に、流入量に変動を加えたり傾圧成分を強調したりする必要がある。今回の数値シミュレーションは一部、流入する対馬海流の水温、塩分に鉛直分布を与えたが、これらをさらに強調するような操作を一切行っていない。

図-5には計算によって求めた夏季および冬季の水温のコンター図を示し、図-6には北緯40度と東経146度の日本海の断面内の等水温線のコンター図を示す。水温の水平勾配は、冬季よりも夏季の方が大きくなっている。日本海の夏季は冬季に比べて静穏であり、温度成層が強く、流れの傾圧成分が強くなる。日本海中央部の等温線はほぼ、流速ベクトル(図-4)と平行になっており、極前線による流速場の構造との関連性を示している。断面II-II'(図-5参照)は極前線を南北に横断する方向の断面であり、北緯40度以南では勾配が大きい、極前線以北では、比較的勾配が緩くなっている。これに比べて断面I-I'は等温線の勾配が小さく、東西方向には一様な水温構造であることを示している。

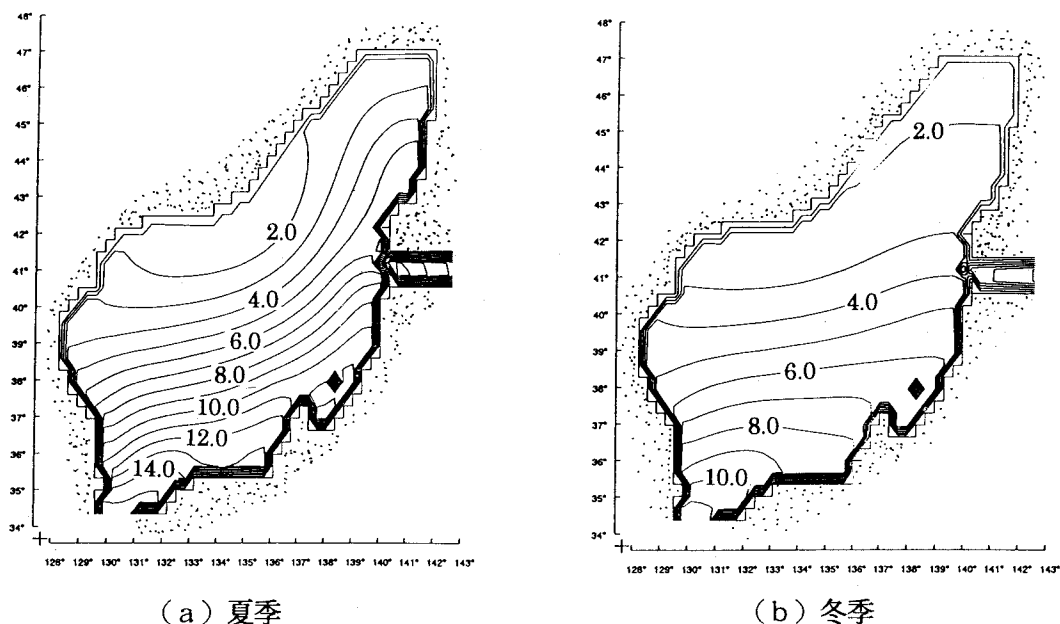


図-5 等水温線図 水深150m

5. まとめ

本研究により、MOM2によって中規模渦などの構造を除いた日本海の海洋循環の概略を把握することが可能であることが示された。また、極前線やそれに伴う熱塩構造についてもある程度把握することができた。本論文では、MOM2による数値計算とそれを用いた若干の結果を紹介するに留める。本モデルを所期の目的に対する回答を与えるツールとして整備していくためには、中規模渦の再現と海上風による吹送流の影響の加味、モデルの解像度をあげていく必要性などが挙げられる。また、リモートセンシングや現地海洋観測のデータの解析も強化していく必要があると思われる。また、これから対馬暖流の経年的な変動と日本海各海

域での平均海水温度の変動等の関係についても調べていく予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学応用力学研究所金哲鎬博士に有益な助言を多数頂いた。ここに謝意を表す。また、データ整理や図面の作成に関してご協力いただいた長岡技術科学大学大学院武井正幸君にも謝意を表す。また、日本海各海域で得られた水温、塩分、流速などのデータを収集するにあたり、これらを網羅したデータが無償で提供していただいた日本海洋データセンター（JODC）にも感謝の意を表す。

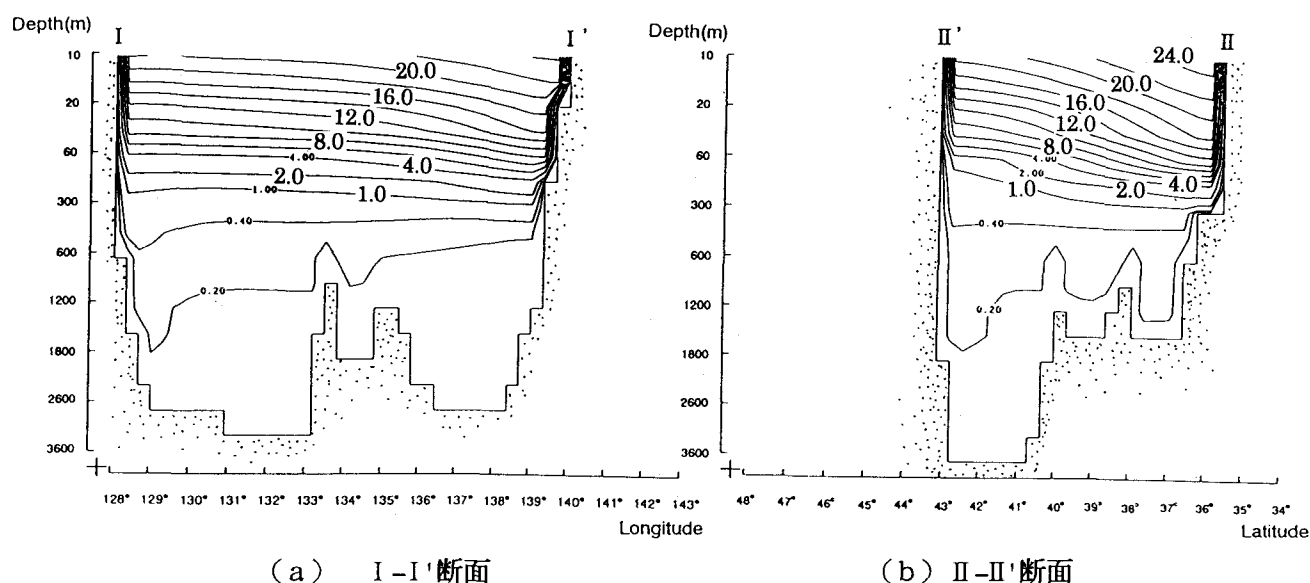


図-6 断面内等温線図

参考文献

- 1) Kirk Bryan: A Numerical Method for the Study of the circulation of the World Ocean, Journal of Computational Physics, 4 pp.347-376,1968.
- 2) Pacanowski,R.C.,Dixon,K. and Rosati,A., : The GFDL Modular Ocean Model Users Guide, version 1.1, GFDL Ocean Group Tech.Report No.2, 1991,1993.
- 3) Pacanowski,R.C.: MOM2 Documentation User's Guide and Reference Manual ver1.0,GFDL Ocean Technical Report No.3,1995.
- 4) 金哲鎬、伊宗煥：予報型数値モデルから見た日本海の海洋循環、月刊海洋/Vo. 1. 26 No. 12, pp762-766, 1994
- 5) 大島慶一郎：日本海の流出入システム、日本海洋学会講演要旨集、pp. 64-65, 1989.
- 6) 金子新：対馬海峡における海流の構造と流量、海岸工学論文集第37巻、pp. 784-788, 1990.
- 7) 長沼光亮：日本海の時況変動、海洋科学第9巻第2号、pp. 65-79, 1977.