

## 沿岸海域におけるシグマ座標系三次元数値モデルと それを用いた開口性湾域の海水流動シミュレーション

黒山 順二\*<sup>1</sup> 三寺 史夫\*<sup>2</sup> 工藤 君明\*<sup>1</sup>

沿岸海域における海水流動は多くの要因の影響を受けて複雑であるが、地形的に開放性が高い場合には特に外洋との相互作用が重要となる。本研究では開口性湾域を研究対象に選び、数値シミュレーションによって沿岸海域の海水流動に及ぼす外洋の影響を定量的に把握・予測し、さまざまな被害の予知や防止に資することを目的とする。そのために、我々は海底地形が比較的大きく変化するような沿岸海域に適した「シグマ座標系三次元数値モデル」を基本フレームにして、開口性湾域及びその外洋域の海水流動に関する数値モデルの構築を行っている。

本稿は研究の中間報告として、シグマ座標系三次元数値モデルの構造及び開口性湾域の代表である仙台湾の海水流動季節特性に関する数値シミュレーションの結果について述べる。数値モデルは、水平方向には球面座標で緯度・経度ともに2.5分の格子を用い、鉛直方向にはシグマ座標で20層とした。その結果として、夏季と冬季の比較により、湾内の海水流動は季節風のほかに外洋における黒潮や親潮等の湾内への流入等の影響を大きく受けることが分かった。今後、さらに沿岸海域と外洋の相互作用に関して検討を行う予定である。

キーワード：沿岸海域，海水流動，三次元モデル，数値シミュレーション

## A three-dimensional numerical model with sigma coordinates along the sea, and numerical simulations of seawater flows in a open bay region using the model

Junji KUROYAMA\*<sup>3</sup> Humio MITSUDERA\*<sup>4</sup>  
Kimiaki KUDO\*<sup>3</sup>

Due to the effect of many factors, seawater flows into the coastal sea are complicated, and especially the interaction with the ocean becomes very important for a coastal sea with a wide open area. In this study, the open bay area is chosen as the objective, and the effects of the ocean currents on seawater flows of the coastal sea are quantitatively understood and predicted by numerical simulations. The purpose is contributing to the forecast and prevention of various types of damage in the coastal sea. Using "the three-dimensional

\* 1 海域開発・利用研究部

\* 2 地球フロンティア研究システム (元：海洋観測研究部)

\* 3 Coastal Research Department

\* 4 Frontier Reseach System for Global Change Prediction (Ocean Research Department)

numerical model with sigma coordinates" suitable for the simulation on the flows in a sea area with rather steep topography, we have constructed a numerical model of the seawater flows in an open bay region.

As an interim report of the research, this paper describes the structure of a three-dimensional numerical model with sigma coordinates and the results of numerical simulations on seasonal characteristics of seawater flows in Sendai Bay, which is a representative of the open bay.

The spherical coordinates with grids in 2.5 min horizontally and sigma coordinates with 20 layers vertically are used in our numerical model.

As a result by comparison between winter and summer, it was indicated that the seawater flows into the bay was greatly affected by the inflows of Kuroshio and Oyashio, etc. to the bay, as well as the seasonal winds. In addition, examinations will be carried out on the interaction between the coastal sea and the ocean in future.

**Key Words :** Coastal sea, Seawater flow, Three dimensional model, Numerical simulation

## 1 はじめに

沿岸海域は海岸線に隣接する海の部分であり、通常は水深が200mより浅い大陸棚と陸岸との間の海域を指す。そのため陸からの淡水の影響を受け、栄養塩が豊富である。また浅いために底層に沈降した栄養塩も容易に有光層に回帰し、生物活動が活発な海域となっている。また沿岸海域は水産業のみならず工業やレジャー産業等によっても活用され、人間社会にとってなくてはならない存在である。

一般に沿岸海域の海水流動は多くの要因の影響を受けて複雑であり、海域に応じた固有の流動特性を持つことが多い。海岸・海底地形による湾の広さや水深、風による海面応力、河川水・外洋水による密度差、外洋域を流れる海流、潮汐による潮位変動のほかに、ある程度広い海域ではコリオリの力も無視できない。また、夏季には海面加熱による熱の流入及び成層効果、冬季には海面冷却による熱の流出などが重要となる。これらの要因によって、吹送流、密度流、潮流、潮汐残差流などが生じると考えられる。

地形的に開放性が高い沿岸海域では、特に外洋との相互作用が重要となる。たとえば沿岸海域の海水流動は外洋の流れや波の影響を大きく受ける反面、沿岸海域が外洋に対して物質の供給源になることもある。沿岸海域の海水流動を予測することは決して容易ではなく、その海域の自然特性に大きく依存していると思われる。このような場合、数値シミュレーションが非常に有効である。ところで、沿岸海域を地形的開放度（たとえば湾口幅÷湾長で定義される）によって分類すると、閉鎖性湾域、

開口性湾域及び外洋性沿岸海域の3つに大別することができる<sup>1)</sup>。このうち開放度が中程度である「開口性湾域」すなわち外洋に対して開放的な湾の場合、通常湾口付近から外洋に向かって海底地形が大きく変化している。湾外の外洋における海流の変動、台風による高潮あるいは汚染物質等が湾内へ侵入して、しばしば水産業等が大きな被害を受ける。本研究では開口性湾域を研究対象に選び、数値シミュレーションによって沿岸海域の海水流動に及ぼす外洋の影響を定量的に把握・予測し、さまざまな被害の予知や防止に資することを目的とする。そのためには沿岸海域に適した多層・高分解能の三次元数値モデルの開発が必要であり、我々は海底地形が比較的大きく変化するような沿岸海域に適した「シグマ座標系三次元数値モデル」を基本フレームに採用した。とりわけ最近注目を浴びているBlumberg & Mellor (1987)<sup>2)</sup>によって開発されたプリンストン海洋モデル (POM)を基にして改良・工夫を加え、開口性湾域及びその外洋域の海水流動に関する数値モデルの構築を行っている。

本稿は研究の中間報告として、まずシグマ座標系三次元数値モデルの構造について説明し、次にそれを用いた開口性湾域の海水流動季節特性に関する数値シミュレーションの結果について述べる。

## 2 数値モデルの構造

### 2.1 数値モデルの主な特徴

本研究で採用した数値モデルは米国プリンストンにおいてAlan F. Blumberg & George L. Mellor (1987)<sup>2)</sup>によって開発されたPrinceton Oceanic Model (POM)

を基にして、研究対象海域に適するように改良・工夫したものである。本節ではその数値モデルの基本的な構造について説明する。

POMの第1の特徴は曲線座標系にあり、水平方向に直交曲線座標を用い鉛直方向には後に説明するシグマ座標を用いている。これによって水平的及び鉛直的に変化に富んだ海域の数値シミュレーションが可能である。第2の特徴としては、乱流クロージャーマodelの組み込みにあると言える。着目している現象の時間的・空間的スケールより小さなスケールの変動現象は数値シミュレーションでは解明できず、海水流動のシミュレーションでは通常その小さな現象を「乱流」とみなして流体力学の乱流モデルを応用する。これは小さな変動流を大きな平均流によって表そうとするものである。海水流動のシミュレーションで現在最もよく使われている乱流モデルは、基本的な渦粘性モデルと呼ばれるものである。これは乱流による見掛け上の応力（レイノルズ応力）を便宜的に分子粘性と同様に取り扱うもので、通常は運動方程式に含まれる渦動粘性係数に一定値を与える。しかしながら、レイノルズ応力は分子粘性と異なり現象の規模や構造によって変化するため、我々が興味を持っている沿岸海域（湾内）と外洋域の相互作用の問題の場合、それぞれの海域で現象の規模が異なるために全対象海域に対して一定値の渦動粘性係数を与えることはできない。その点POMでは水平渦動粘性係数はSmagorinskyの式によって、また鉛直渦動粘性係数はMellor & Yamadaの乱流クロージャーマodel<sup>3)</sup>によって、それぞれ流れの構造に応じて連立方程式の解として決定されるため、時間及び場所によって異なる渦動粘性係数の値が与えられることになる。熱方程式及び塩分方程式に含まれる渦拡散係数についても同様である。したがって、POMは我々が研究対象とする海域のように水平的にも鉛直的にも大きく変化に富む海域には実に適した数値モデルと言える。（乱流の定義及び乱流クロージャーマodelについては付録Aを参照。）

## 2.2 基礎方程式

数値モデルの基礎方程式は、基本的な構成から言えば(1)連続の方程式、(2)水平2方向の運動方程式、(3)静水圧近似式、(4)熱方程式、(5)塩分方程式、(6)状態方程式、さらに(7)Smagorinskyの式、(8)乱流エネルギー輸送方程式及び(9)乱流スケール輸送方程式の合計10個である。それに対して、従属変数は3方向流速成分、圧力、密度、水温、塩分、さらに水平渦動粘性係数（水平渦拡散係数）、鉛直渦動粘性係数及び鉛直渦拡散係数の合計10個である。

したがって、従属変数と方程式の個数が一致しており、初期条件及び境界条件を適切に与えれば連立微分方程式が解けることになる。

次式で定義される $\sigma$ （シグマ）座標を導入する。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad \dots (2.1)$$

ただし $z$ は鉛直上向き座標、 $\eta$ は海面変位、 $H$ は水深を表し、海面（ $z = \eta$ ）において $\sigma = 0$ 、海底（ $z = -H$ ）において $\sigma = -1$ である。 $z$ 座標系と $\sigma$ 座標系の関係を図1に示す。

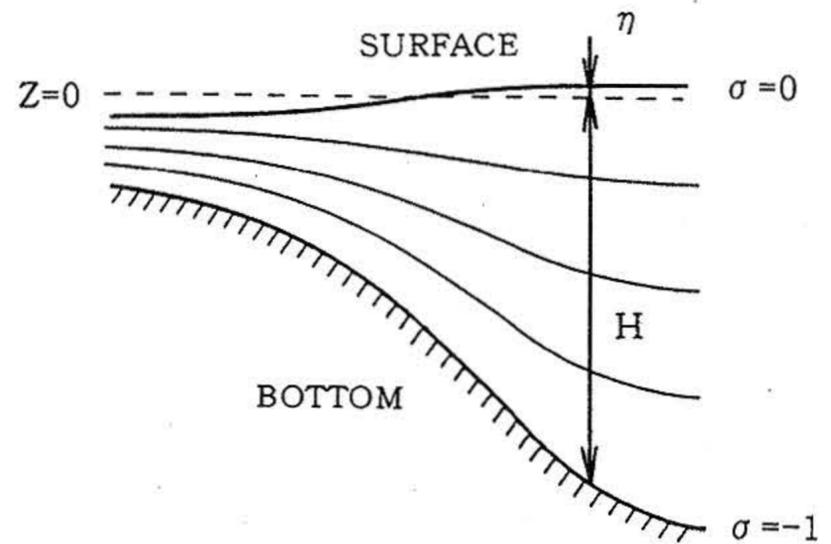


図1  $\sigma$ （シグマ）座標系  
Fig.1 Sigma coordinates

そこで、 $x$ 及び $y$ を東向き及び北向き水平座標、 $\sigma$ を新しい鉛直座標、 $t$ を時間とすれば、 $\sigma$ 座標系における基礎方程式は以下のとおりとなる。ただし、 $U, V, \omega$ は各方向流速、 $T$ はポテンシャル水温、 $S$ は塩分、 $\rho$ は密度を表す。また、 $q^2$ は乱流運動エネルギー、 $l$ は乱流スケールを表す。なお、静水圧近似式は圧力を海面変位に変換するために使われ、また状態方程式はMellor (1991)による方法で密度を計算するために使われる。

### (1) 連続の方程式

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad \dots (2.2)$$

### (2) 水平方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} \\ & + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] \\ & - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' + F_x \quad \dots (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} \\ & + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] \\ & - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' + F_y \quad \dots (2.4) \end{aligned}$$

(3) 熱方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T + \frac{\partial R}{\partial z} \quad \dots (2.5) \end{aligned}$$

(4) 塩分方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_s \quad \dots (2.6) \end{aligned}$$

(5) Smagorinskyの式

$$\begin{aligned} & A_M = C\Delta x\Delta y \\ & \cdot \left\{ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots (2.7) \\ & \text{(定数 } C=0.1) \end{aligned}$$

(6) 乱流エネルギー輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] \\ & + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_q \quad \dots (2.8) \end{aligned}$$

(7) 乱流スケール輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] \\ & + E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} \\ & - \frac{Dq^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \quad \dots (2.9) \end{aligned}$$

ただし、 $F_x$ ,  $F_y$ は水平渦粘性項、 $F_T$ 及び $F_s$ は熱及び塩分の水平渦拡散項であり、以下のとおり表される。 $A_M$ 及び $K_M$ は水平及び鉛直の渦動粘性係数、 $A_H$ 及び $K_H$ は水平及び鉛直の渦拡散係数である。なお、 $F_q$ 及び $F_{q^2 l}$ に

についても同様である。

$$\begin{aligned} F_x & \equiv \frac{\partial}{\partial x} (D\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (D\tau_{xy}) \\ F_y & \equiv \frac{\partial}{\partial x} (D\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (D\tau_{yy}) \\ \tau_{xx} & = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} & = A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ \tau_{yy} & = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \end{aligned} \quad \dots (2.10)$$

$$\begin{aligned} F_\phi & \equiv \frac{\partial}{\partial x} (Dq_x) + \frac{\partial}{\partial y} (Dq_y) \\ q_x & \equiv A_H \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad q_y \equiv A_H \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (\phi: T \text{ または } S) \end{aligned} \quad \dots (2.11)$$

$$\begin{aligned} K_M & = lqS_M, \quad K_H = lqS_H \quad \dots (2.12) \\ (S_M, S_H: \text{成層に関する安定度関数}) \end{aligned}$$

なお、上記の基礎方程式系において、 $g$ は重力加速度、 $f$ はコリオリのパラメータ、 $D (= H + \eta)$ は海面から海底までの水深を表す。

## 2.4 有限差分法及びモードの分離

本数値モデルでは微分方程式の離散化に有限差分法を使用し、荒川Cグリッドによるスタガードメッシュを採用している(図2)。時間差分はリーブフロッグ・スキームであるが、偶数番目と奇数番目の時間ステップにおける解の分離を防ぐためにフィルターを使う。

また、計算効率の向上のため、外部モード(鉛直平均された成分)と内部モード(鉛直平均からずれた成分)に分離して解かれる。

## 2.5 数値モデルの使用法

三次元計算を行う場合、診断モード(Diagnostic mode)と予報モード(Prognostic mode)の2通りの計算方法がある。前者は水温及び塩分の観測データが有るときに流れ場のみを計算する場合に使われる方法であり、後者は熱方程式及び塩分方程式を流れの方程式系と連立して水温及び塩分も計算によって求める方法である。診断計算については以前に実施しており<sup>4)</sup>、今回は後述のとおり予報計算を行った。

なお数値モデルの詳細については、George L.Mellor (1993)<sup>5)</sup>を参照されたい。

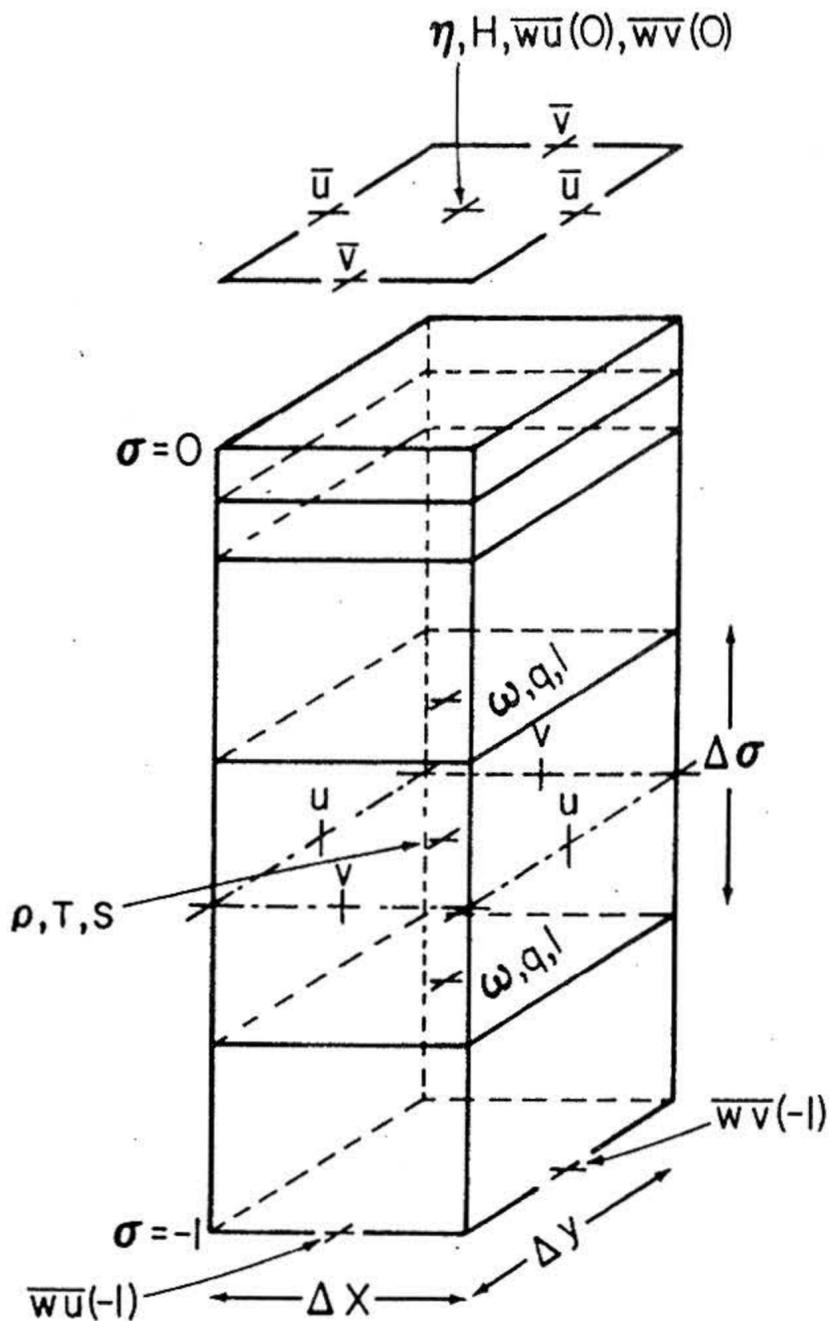


図2 差分法における荒川C格子  
Fig.2 Arakawa's C-grid in Defference Method

### 3 開口性湾域の海水流動シミュレーション

#### 3.1 方法

開口性湾域の代表例として仙台湾を選出し、その海水流動の季節特性を調べるために数値シミュレーションを行った。仙台湾は通常、宮城県の牡鹿半島と福島県の鶏ノ尾岬を結ぶ線により囲まれる海域を指す<sup>6)</sup>。仙台湾の地形的な特徴は、開放度が非常に高いこと、また海底地形が湾内から外洋に向かって大きく変化していることである。

本研究において数値モデルに使用した海底地形、メッシュ、及び対象海域を図3、図4、及び図5に示す。数値シミュレーションを行うにあたり、まず湾と外洋の相互作用を考慮するために図5に示すように湾域だけではなく外洋域まで大きく取り込み、しかも外洋域周辺における開境界条件(Open Boundary Condition)<sup>7)</sup>の影響

表1  $\sigma$ 座標における鉛直分割

Table1 Vertical division in sigma coordinates

Level:K	Sigma: $\sigma$	Sigma: $\sigma$	Layer Name
1	0.000	-0.004	1st
2	-0.007	-0.010	2nd
3	-0.015	-0.021	3rd
4	-0.029	-0.042	4th
5	-0.059	-0.088	5th
6	-0.118	-0.147	6th
7	-0.176	-0.206	7th
8	-0.235	-0.265	8th
9	-0.294	-0.324	9th
10	-0.353	-0.382	10th
11	-0.412	-0.441	11th
12	-0.471	-0.500	12th
13	-0.529	-0.559	13th
14	-0.588	-0.618	14th
15	-0.647	-0.676	15th
16	-0.706	-0.735	16th
17	-0.765	-0.794	17th
18	-0.824	-0.853	18th
19	-0.882	-0.912	19th
20	-0.941	-0.971	20th
21	-1.000		

響が湾域の方に及ぶのを防ぐために十分に広い海域を数値シミュレーションの対象海域とした。また対象海域における海底地形の大きな変化に対処するために、前述のシグマ座標系の三次元数値モデルを使用することにした。Blumberg & Mellor (1987)<sup>2)</sup>によって開発された数値モデル(POM)を基本フレームに採用し、対象海域の地形特性にうまく合うよう改良・工夫を加えて、沿岸海域により適した多層高分解能のシグマ座標系三次元数値モデルを構築した。

我々は研究対象とする海域がかなり広域になることを考慮して、水平曲線座標として球面座標を採用した。その際、球面座標系への変換には次式を使った。ただし、 $\lambda$ 及び $\phi$ はそれぞれ経度及び緯度を表し、 $R$ は地球の平均半径を表す。

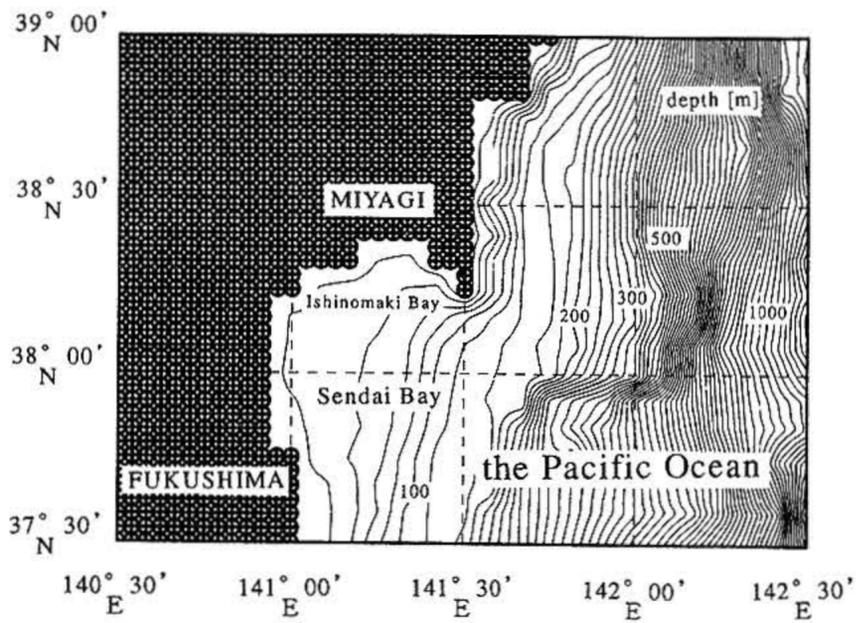


図3 数値モデルの海底地形  
Fig. 3 Topography used in the model

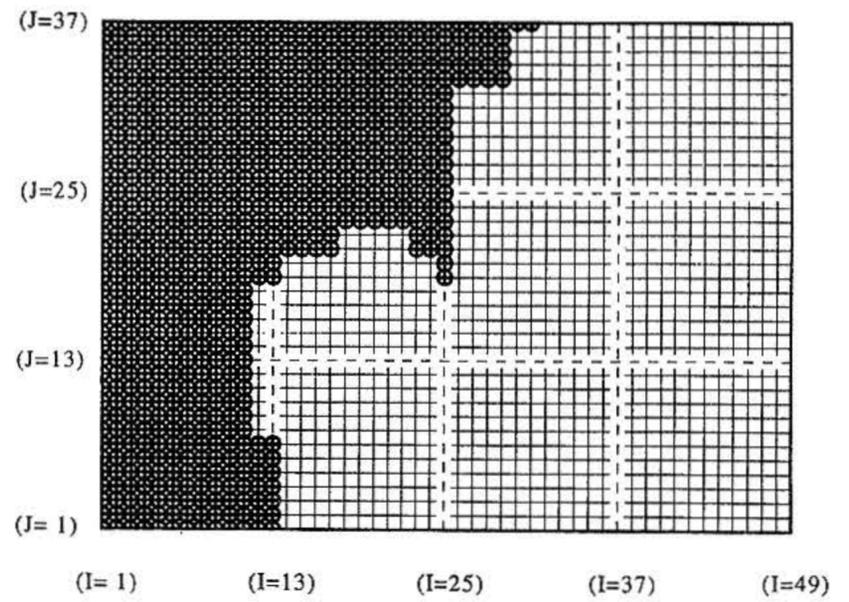


図4 数値モデルの水平メッシュ  
Fig. 4 Meshes used in the model

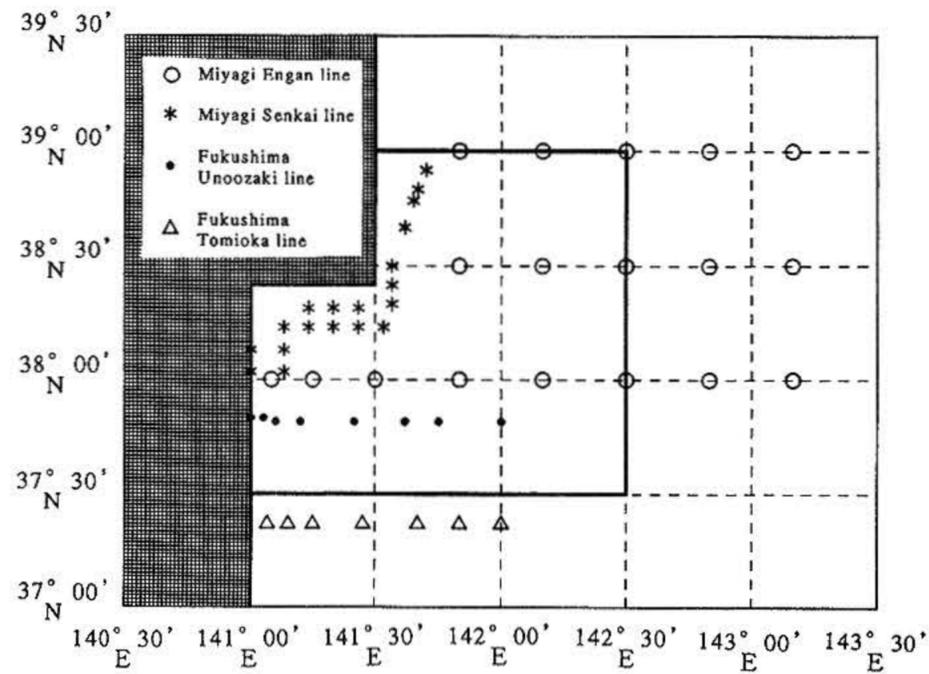


図5 数値シミュレーションの対象海域(太実線)及び水温と塩分のデータ補間に利用したCTD観測地点(宮城県と福島県による定線調査の観測地点)  
Fig. 5 Simulation sea area and CTD stations for data interpolation of temperature and salinity

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} = R \cos \varphi \frac{\partial}{\partial x}, \quad \frac{\partial}{\partial \varphi} = R \frac{\partial}{\partial y} \quad \dots(3.1)$$

数値シミュレーションに使用した水平方向格子は図4に示す通り経度・緯度方向ともに2.5分の格子であり、対象海域を48×36に分割した。この格子サイズは経度方向に3.6~3.7km、緯度方向に4.6kmの程度に相当する。鉛直方向には表1に示す通りシグマ座標で20層に分割した。またコリオリ効果はβ面近似によって考慮した。

今回の数値シミュレーションは、水温及び塩分も計算で求める方法である予報モード(Prognostic mode)によって実施した。季節による流動特性の違いを見るため、冬季と夏季の例として1992年の2月と8月を取り上げ、吹送流及び密度流を考慮した。まず海面の境界条件として必要な風の応力データについては適切な海上観測データがないため、仙台管区気象台及び石巻測候所による風向・風速データ<sup>9)</sup>を利用し、月平均風速から次式によって換算して風の海面応力として用いた<sup>9)</sup>。

$$\tau = \rho_o K_M \frac{\partial U}{\partial z} = \rho_a C_D |1W| 1W \quad \dots(3.2)$$

ただし

$\tau$ : 海面応力ベクトル,  $U$ : 流速ベクトル

$1W$ : 風速ベクトル,  $\rho_o$ : 海水密度,  $\rho_a$ : 大気密度

$C_D$ : 海面抵抗係数,  $K_M$ : 鉛直渦動粘性係数

なお海上風は陸上風の1.5倍程度の風速を持つ一定の季節風として、夏季は4 m/sの南東風、冬季は6 m/sの北西風とした。

次に、予報計算において初期条件及び境界条件として必要な水温及び塩分のデータに関しては、水産庁漁海況予報事業による宮城県の沿岸定線調査及び浅海定線調査ならびに福島県の鷓ノ尾崎定線調査及び富岡定線調査で得られた観測データを利用した<sup>10) 11)</sup>。その観測地点( $n$ )は図5に示す通り対象海域に点在しているため、次式の客観補間法によって各格子点( $i, j$ )における各深度の値に換算し、水温( $T$ )及び塩分( $S$ )のデータセットを作成したのち使用した<sup>9)</sup>。ただし、客観補間法の重み関数にはGauss分布を使った。

$$T_{i,j} = \frac{\sum_n w_n T_n}{\sum_n w_n}, \quad S_{i,j} = \frac{\sum_n w_n S_n}{\sum_n w_n} \quad \dots(3.3)$$

ただし、重み関数:

$$w_n = \exp(-4r^2/R^2), \quad r: \text{距離}, R: \text{影響半径}$$

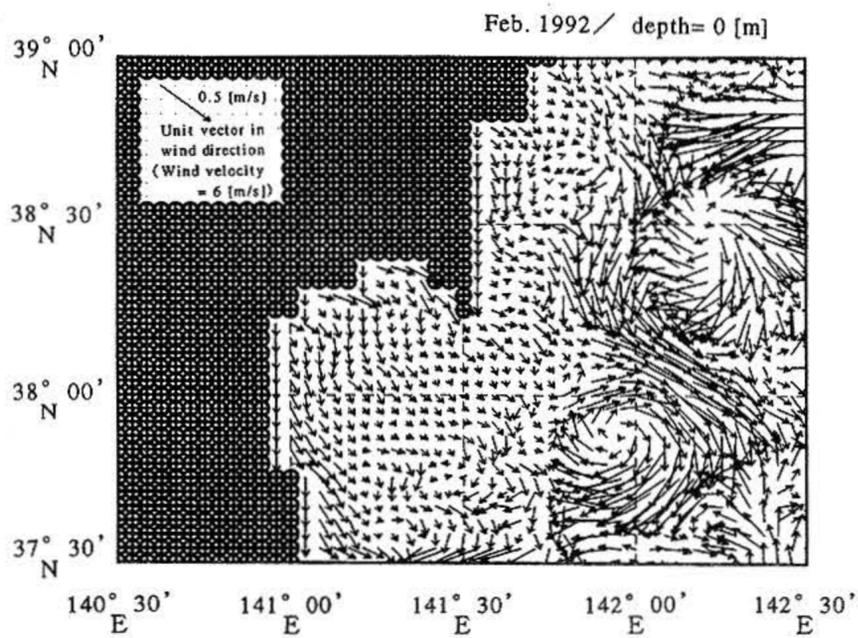
なお水平渦動性係数(水平渦拡散係数)及び鉛直渦動性係数(鉛直渦拡散係数)は、前述のとおり時間と場所

の関数として連立方程式の解として計算されるが、初期値はそれぞれ $10\text{m}^2/\text{s}^2$ 及び $0.01\text{m}^2/\text{s}^2$ と与えた。海岸における流れの境界条件として滑りなし条件を用い、また外洋域における周辺境界の開境界条件として放射条件とスポンジ条件を組み合わせて用いた。時間刻み幅は30秒とし、静止状態から始めてほぼ定常状態となるまで、現象時間で7日間の計算を行った。

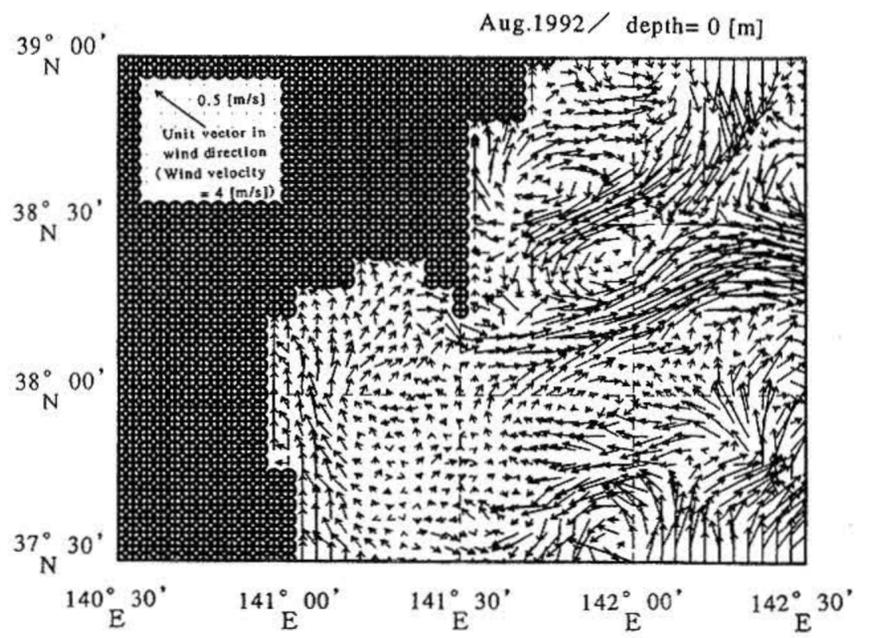
### 3.2 結果及び考察

数値シミュレーション結果の一例として、図6(a)(b)に計算の最終の時間ステップにおける対象全海域の水平流速ベクトル図を示す。(a)は冬季(1992年2月)、(b)は夏季(1992年8月)であり、それぞれについて深度0[m]、100[m]、200[m]における流れ場を表している。これらの図は、シグマ座標による流速の計算値を鉛直方向補間によってZ座標に変換して描いたものである。冬季・夏季ともに対象海域南東部の外洋域南側境界から北向きの強い流れが見られ、これは黒潮に相当するものと思われる。一方、夏季には対象海域北東部の外洋域北側境界から南向きの強い流れが見られ、これは親潮に相当すると思われる。

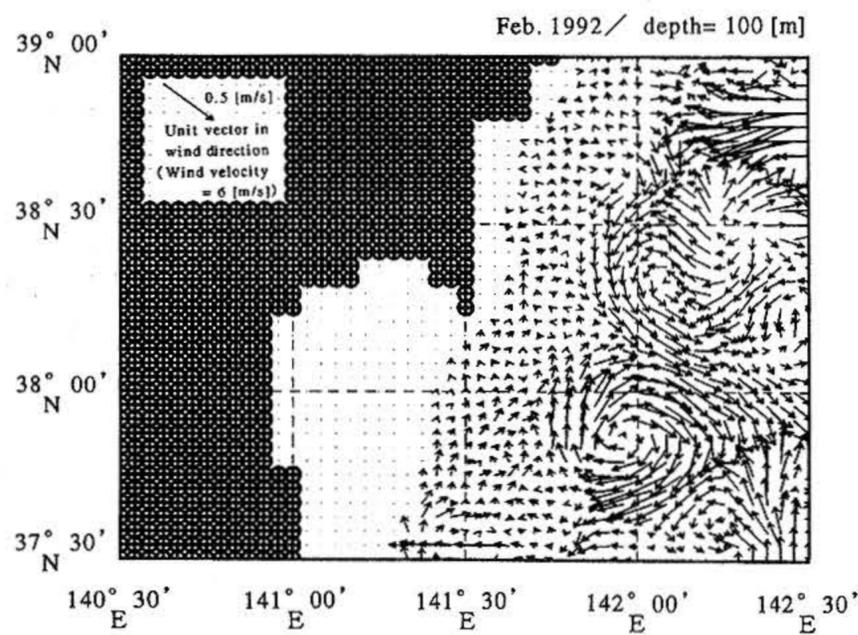
次に、湾域の海水流動に着目するために外洋域にはマスクをかけて、湾域における流速ベクトルを拡大表示して見やすくした図を、図7(a)(b)に示す。図6と同様に(a)は冬季(1992年2月)、(b)は夏季(1992年8月)であるが、深度は0[m]、20[m]、40[m]における流れ場を表している。深度0[m]の冬季と夏季を比較すると、冬季には北西の季節風によって表層ではほぼ湾全域で南東向きの流れが支配しているが、夏季には南東の季節風により仙台湾内の奥部で流れがせき止められるため流れが右方へ曲がり牡鹿半島の南部付近から東方へ流出している。深度は20[m]及び深度40[m]の冬季と夏季を比較すると、まず冬季には湾全域で北向きの流れが支配的であるが、これは表層水が南東向きに流れるため補流として下層の水が逆向きに流れていることが予想される。次に夏季には、牡鹿半島東部における非常に強い海流(沿岸境界流かもしれない)のほかに、湾の東部から湾内へのかなり強い流れが注目される。これは沿岸水に比べ重い外洋水が下層から湾内に流入しているものと推測される。ただし本稿では流速のみを考察したが、外洋水の流入等に関しては流速だけによる考察では不十分であり、今後は水温及び塩分の計算出力値も考慮してさらに検討する予定である。



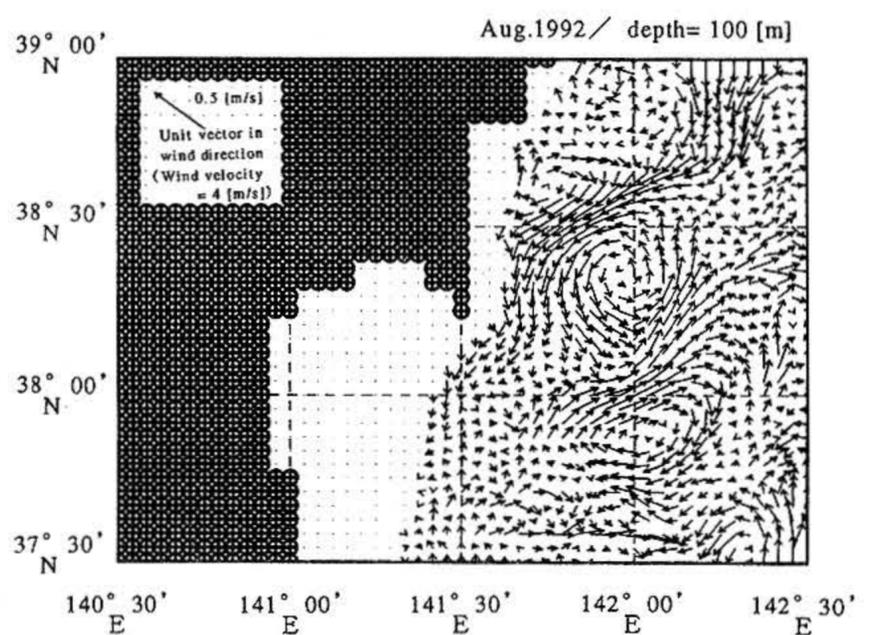
(a)-1 深度: 0 [ m ]



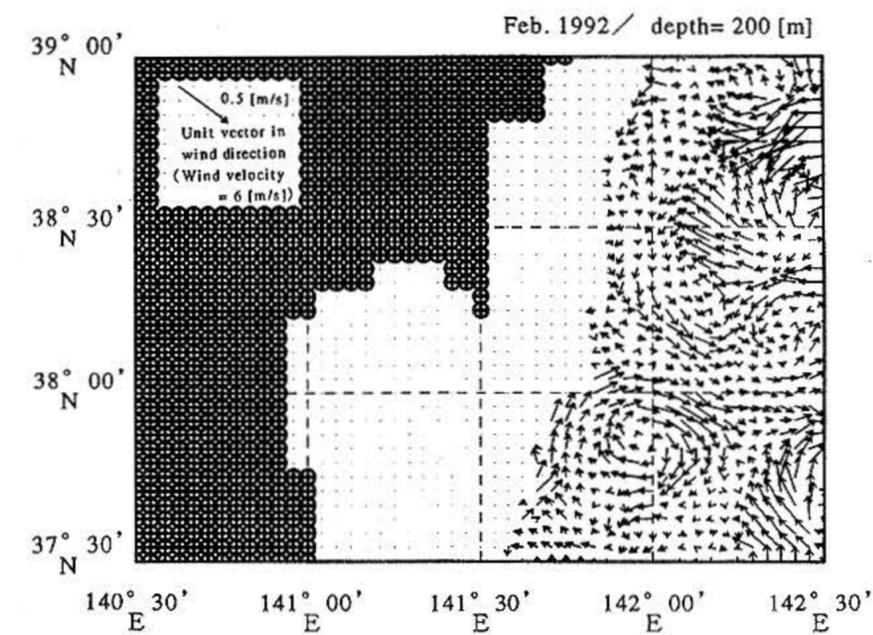
(b)-1 深度: 0 [ m ]



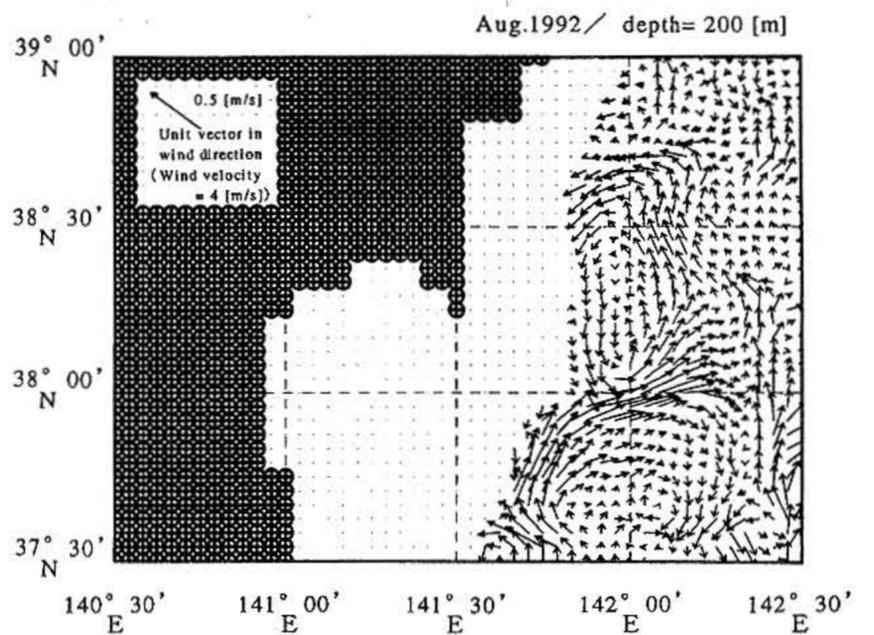
(a)-2 深度: 100 [ m ]



(b)-2 深度: 100 [ m ]



(a)-3 深度: 200 [ m ]

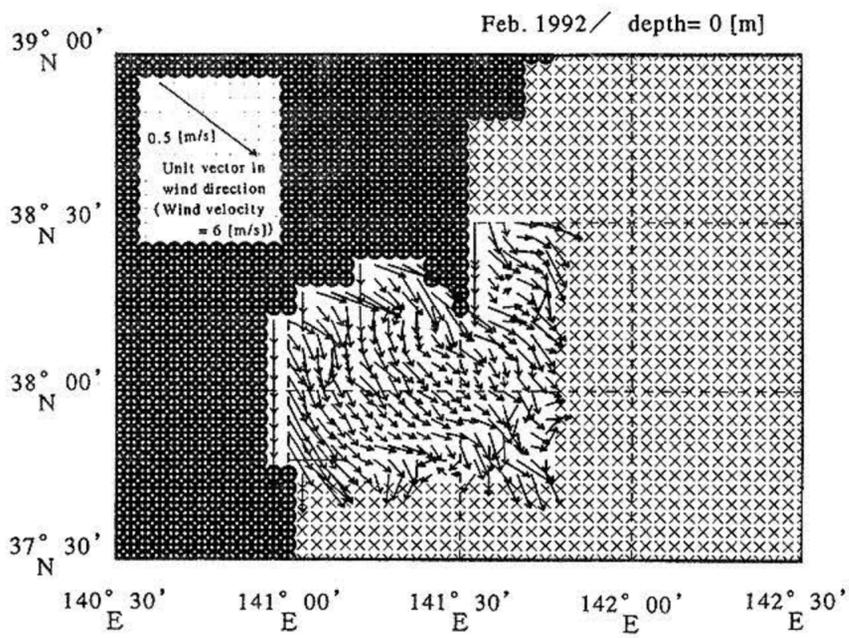


(b)-3 深度: 200 [ m ]

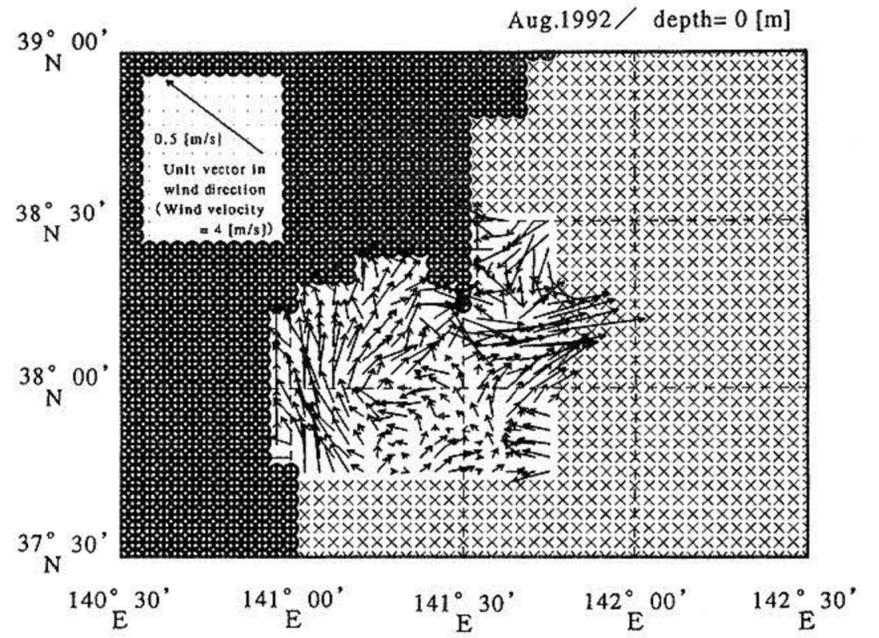
図6 対象全海域の水平流速ベクトル図 左側:(a) 冬季(1992年2月), 右側:(b) 夏季(1992年8月)

Fig. 6 Diagram of horizontal flow velocity in all sea area.

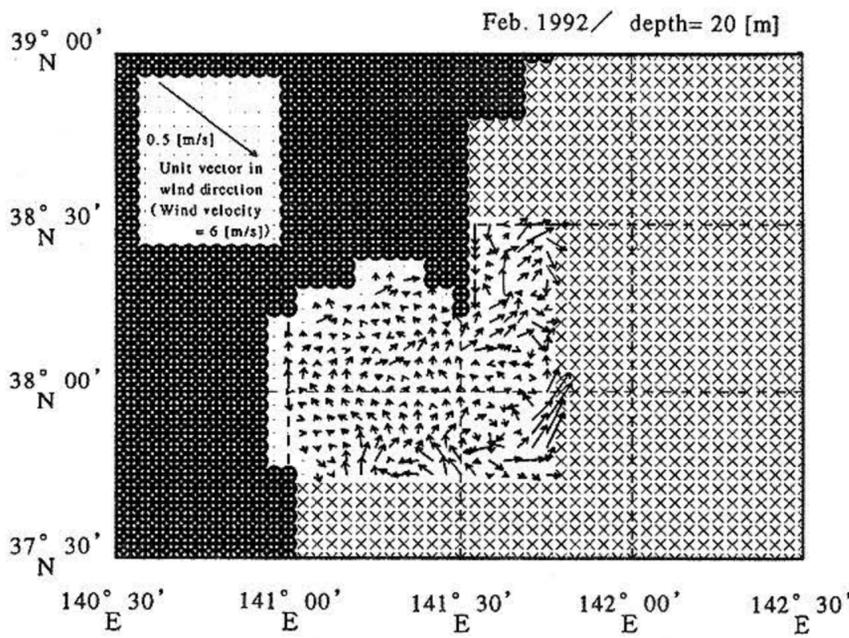
The left sides:(a) Winter (Feb. 1992), The right sides:(b) Summer (Aug. 1992)



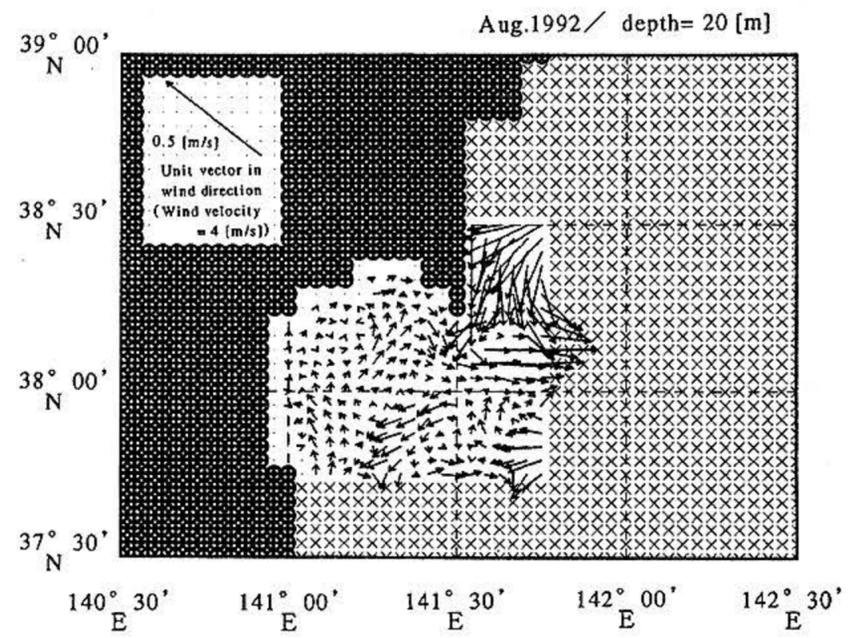
(a)-1 深度: 0 [ m ]



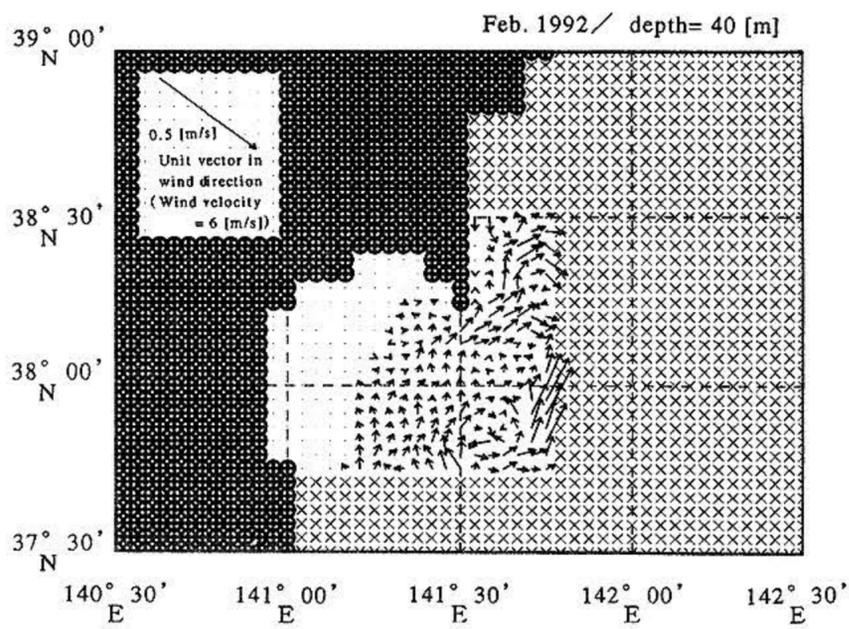
(b)-1 深度: 0 [ m ]



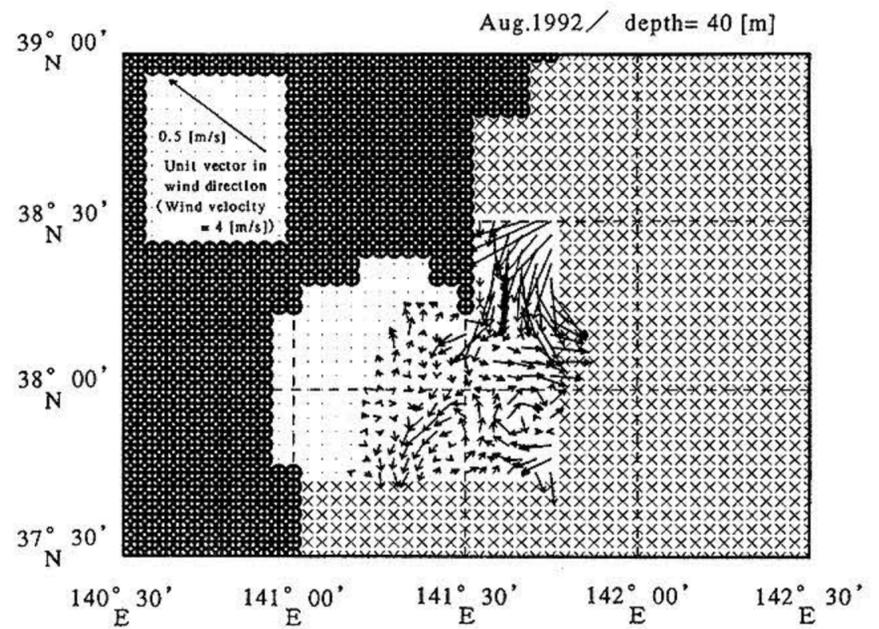
(a)-2 深度: 20 [ m ]



(b)-2 深度: 20 [ m ]



(a)-3 深度: 40 [ m ]



(b)-3 深度: 40 [ m ]

図7 仙台湾域の水平流速ベクトル図 左側:(a) 冬季(1992年2月), 右側:(b) 夏季(1992年8月)

Fig. 7 Diagram of horizontal flow velocity in Sendai Bay region.

The left sides:(a) Winter (Feb. 1992), The right sides:(b) Summer (Aug. 1992)

なお開境界条件は難しい問題であり今後さらに検討を要するものの、外洋域周辺境界において開境界条件を使った本計算結果はすべての境界において滑りなし条件を使った場合に比べ、外洋域の海流等をかなりうまく再現できたと思われる。また、仙台湾北部の石巻湾における実測値との比較を行い、「開口性湾域の三次元海水流動モデル」をさらに改良していく計画である。

#### 4. まとめ

開口性湾域の海水流動を数値シミュレーションするため、シグマ座標を用いた数値モデルを開発した。代表的開口性湾域である仙台湾及びその外洋域を対象海域として、吹送流及び密度流を考慮して海水流動の季節特性を調べた。その結果、開口性湾域における海水流動は季節風に強く支配されるほか、外洋の海流の湾内への流入等の影響を大きく受けることが分かった。今後、開境界条件の取り扱い方をさらに検討するとともに、湾域と外洋域の相互作用に関して物理学的考察をしていく予定である。

本研究において構築した「開口性湾域の三次元海水流動モデル」は基本的には開放度の高いどの海域にも適応が十分に可能であり、さらに改良すればたとえば急潮現象のような日本周辺域の海流の変動等による湾域の海水流動を解明・予測するために役立つものである。

#### 謝 辞

沿岸海域における数値モデルに関して多くの御助言・御指導を頂いた九州大学応用力学研究所の柳哲雄教授に感謝の意を表します。また仙台湾及び外洋域の海水流動特性に関して海洋物理学的な御助言を頂いた東北水産研究所の奥田邦明氏及び中央水産研究所の友定彰氏にお礼を申し上げます。さらに、海洋科学技術センター在職中に多方面にわたり御援助を頂いた農林水産省の宇野史郎氏に感謝します。また、数値モデルに関して有益な討論をして頂いた鹿児島大学の中村啓彦氏にお礼を申し上げます。なお本研究における計算は主に当センター所有のコンピューターの1つであるDEC7620を使って行われたものであり、計算機の利用に際し御協力を頂いた当センター数理解析技術室の各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 酒匂敏次ほか編：地域特性を生かした海洋開発の可能性に関する調査研究報告書（平成3年度，4年度），海洋科学技術センター委託，（社）国際海洋科学技術協会，（1992，1993）

- 2) Alan F. Blumberg and George L. Mellor : "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model." p1-16. In : Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Edited by N. Heaps, American Geophysical Union, (1987)
- 3) 横山長之ほか編著：大気環境シミュレーション - 大気の流れと拡散 - . 白亜書房, (1992)
- 4) 黒山順二：仙台湾を含む海域における海水流動の数値シミュレーション. 日本流体力学会年会 '96-第1回環境流体シンポジウム講演論文集, 405-406. (1996)
- 5) George L. Mellor : User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Princeton university, (1993)
- 6) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編：“第7章 仙台湾.” p253-286. In : 日本沿岸海洋誌. 東海大学出版会, (1985)
- 7) 久保田雅久・青山 靖：海洋数値モデルにおける Open Boundary Condition. 沿岸海洋研究ノート, 27(2), 178-200. (1990)
- 8) 仙台管区気象台：宮城県気象月報. 日本気象協会, (1992)
- 9) 柳 哲雄・井川周三：沿岸海域の残差流の診断モデル-周防灘・伊予灘への適用例-. 沿岸海洋研究ノート, 30(1), 108-115. (1992)
- 10) 宮城県水産研究開発センター：平成4年度漁海況調査報告書. (1994)
- 11) 福島県水産試験場：海洋調査要報. (第4報). 福島水試調査資料No.250, (1995)
- 12) 黒山順二：北太平洋に対する風成海洋大循環モデルについて. 海洋科学技術センター試験研究報告, 22, 145-172. (1989)
- 13) 黒山順二：北太平洋に対する風成海洋大循環モデルについて (第2報). 海洋科学技術センター試験研究報告, 24, 223-256. (1990)
- 14) 黒山順二：北太平洋に対する風成海洋大循環モデルについて (第3報). 海洋科学技術センター試験研究報告, 26, 97-112. (1991)
- 15) 黒山順二・工藤君明・三寺史夫：鉛直シグマ座標系の三次元数値モデルによる開口性湾域の海水流動に関する季節特性シミュレーション. 1997年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p.88, (1997)
- 16) George L. Mellor and Tetsuji Yamada : Development of a Turbulence Closure Model

for Geophysical Fluid Problems. Reviews of Geophysics and Space Physics, 20(4), 851-875, (1982)

- 17) 日本機械学会編：流れの数値シミュレーション。コロナ社, (1991)
- 18) 日本気象学会編：数値予報 (上)(下)。気象研究ノート (1978)

## 付録A：乱流の定義と乱流クロージャーマデルについて

### A-1 乱流の定義

海洋（大気も同様）について数値シミュレーションを行う場合、その変動場が乱流であるとして、平均的な量の従属変数とした方程式系を解く方法が一般的である。そこで原点に帰り、以下に乱流の定義に関して整理しておく。

#### A-1.1 流体力学における乱流に関する記述例

- (1) 玉虫文一ほか編集：理化学辞典(第3版), 岩波書店(1997)

一般にレイノルズ数の大きな流れは、空間的・時間的にきわめて不規則な変動、すなわち乱れ(turbulence)を示し、定常流れといっても平均値としての意味しか持たない。このような流れを乱流といい、これに対してレイノルズ数の小さな場合に起こる規則的な流れを層流という。

- (2) J.C. ロッタ(大路通雄 訳)：乱流, 岩波書店(1975)

乱流とは何かを一口で定義することは決して容易ではないが、乱流に備わった特徴的な性質をあげると以下のとおりである。

- ① 乱流は不規則運動である。つまり、速度の時間的変化が複雑すぎるために、個々の測定結果には全く再現性がなく、偶然の値と考えるほかはない。
- ② 乱流は渦運動である。
- ③ 乱流は3次元流である。
- ④ 乱流は非定常流である。

- (3) 西岡通男：“層流から乱流への遷移”, P.105, In: 流体力学の世界, 日本流体力学会編, 朝倉書店(1997)

乱流の特徴は下記のとおりである。

- ① 不規則な変動の存在。
- ② 大小様々なスケールの3次元的な渦運動の存在。
- ③ 激しい混合・拡散の作用。
- ④ 大きいエネルギー消散率。

#### A-1.2 海洋力学における乱流に関する記述例

- (1) 長島秀樹：“海洋中の乱流”, p.131, In: 海洋大事典, 和達清夫 監修, 東京堂出版(1987)

流体の運動の状態を大別すると、層流と乱流に分かれる。層流が整然とした秩序だった流れを示すのに対し、乱流は偶然的な流体の運動を表す。

海洋中の乱流のきわだった特徴の1つは、密度成層における乱流という点である。

- (2) 長島秀樹：“渦動粘性係数”, p.169, In: 海洋大事典, 和達清夫 監修, 東京堂出版(1987)

海水の運動は大小さまざまなスケールの渦を含んでいるのがふつうであり、この渦によって運動量は周囲に輸送されるが、このような渦を細大もろさず把握することは事実上不可能といえる。そこで取り扱う現象のスケールをある程度限定すると、それより小さいスケールの現象の運動量輸送への寄与をうまく表現することが必要となる。

もっとも簡単な方法は分子粘性と同様の表現形式をとることで、古典的輸送理論で用いられ、現在でもよく使われる。この場合、渦(また乱れ)による運動量輸送は分子粘性によるよりも桁違いに大きいのがふつうである。そこで、この分子粘性係数に対する係数を渦粘性係数と呼び、区別する。渦粘性係数は扱う現象のスケールにより異なるとともに水平方向( $K_h$ )と鉛直方向( $K_z$ )でもまた大きく異なる。沿岸の現象では $K_h$ はおよそ $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度であるが、大循環のスケールでは $10^7 \sim 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$ の値が使われる。また $K_z$ は成層状態にもよるが、 $0.1 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度といわれる。

- (3) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学, p.496, 東海大学出版会(1993)

乱れの定義については議論があるが、今は単純に、ある時間または距離を隔てると相関がなくなるような不規則な流体運動を意味するものとする。

海は通常は、乱れた状態にあるといえる。

時空間の小さなスケールでは明確な個性を持つ運動でも、不規則な外力と崩壊減衰機構で生成消滅を繰り返しているの、大きなスケールで見れば乱れとみなすことができる(下記の注釈\*)。

ある現象に注目したとき、我々は一般にそれより小さなスケールに対して、時間、空間、またはアンサンブル(集合)の平均操作を行う。そして、平均値からの偏りを乱れと考えて、その効果を拡散係数として取り入れることが多い。

(注釈\*：厳密な意味では純粋な乱れとそれぞれに定

まった速さで進む擾乱（波動）のランダムな集合とは区別すべきであるが、実際にはこれらが重なり、さらに非線形的に相互作用があるので、区別することは一般に困難である。ここでは、ともに不規則性を示すということで、同じ乱れとみなす。）

(4) 大久保明：“第Ⅲ編 海洋乱流・拡散”，p.267，

In：海洋物理Ⅰ，東海大学出版会(1970)

乱流は、流体のランダム運動である。しかし、海のすべてのランダム運動が乱流であるとは限らない。ランダムな波動も存在する。

乱流の主な特徴は、以下のとおりである。

- ① 乱流は回転性(rotational)であり、渦度(vorticity)を持つ。
- ② 乱流は3次元構造を持つ。
- ③ 乱流は本質的に非線形(nonlinear)である。
- ④ 乱流には周期性がない。
- ⑤ 乱流は拡散力(diffusive power)を持つ。
- ⑥ 非常にスケールの小さな乱れ(たとえば、1mm以下)を除くと、海洋乱流は非等方性(ant isotropic)で、水平方向のスケールは鉛直方向に比べてきわめて大きい。
- ⑦ 乱れの強さは、平均流の大きさに比べて必ずしも小さくない。

⑧ 外系からのエネルギーが最もスケールの大きい乱れに与えられるだけでなく、中間のスケールの乱流にも直接与えられているらしい。

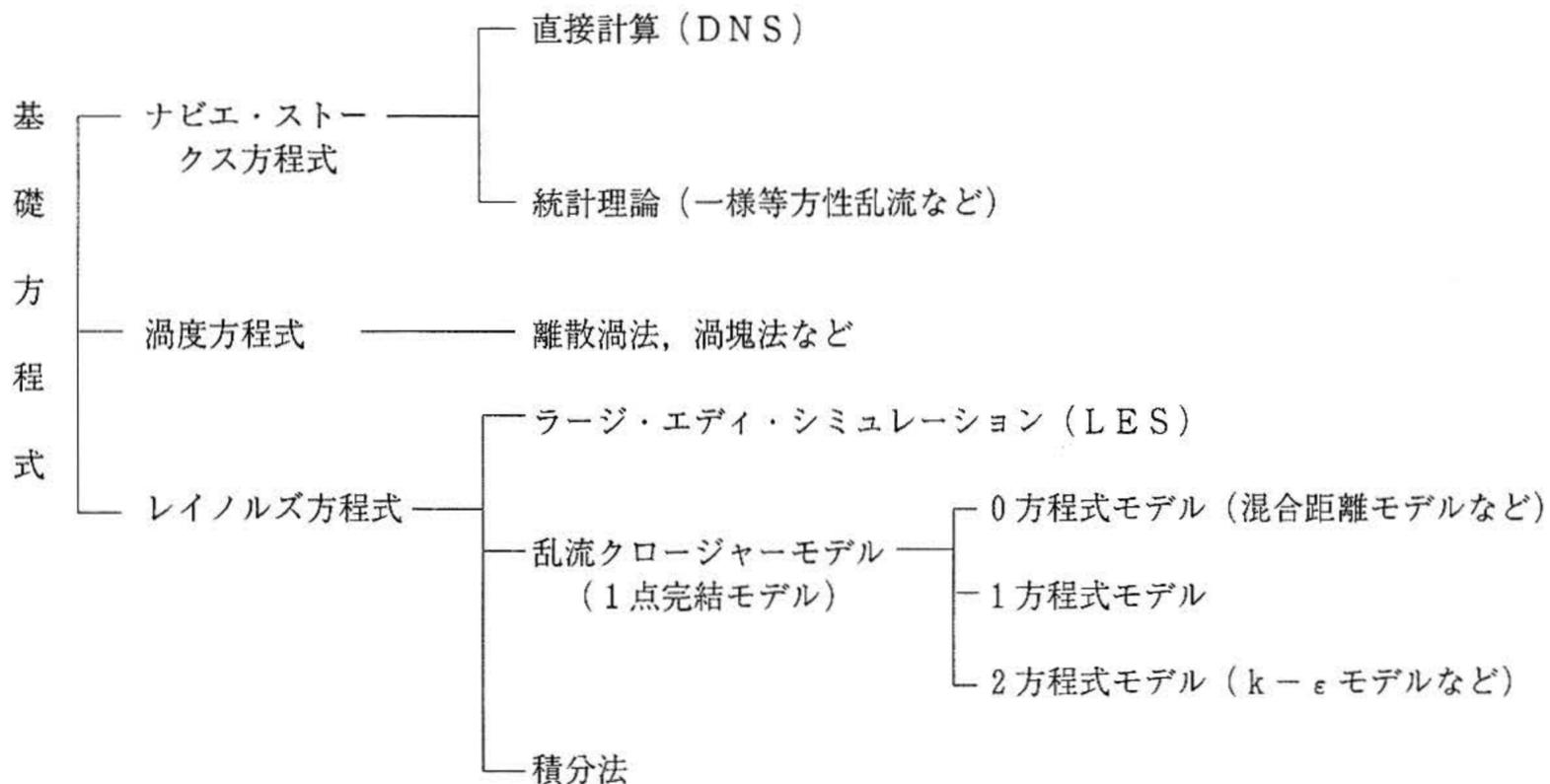
⑨ 海洋乱流は空間的にも時間的にも一様ではない。特に、鉛直方向の空間変化が著しい。

#### A-1.3 乱流の定義に関するまとめ(私見)<sup>16)-18)</sup>

流体力学の分野では、通常は室内実験スケールの現象を研究対象とし、規則的な流れである“層流”に対して不規則的な流れとして“乱流”を定義する。通常、レイノルズが小さい“層流”の状態からレイノルズが大きくなっていくと、ある臨界値を超えると“乱流”に移る。この“乱流”を数値シミュレーションするための方法がいろいろと考案されている(別図1)。

海洋力学(気象力学も同様)の分野では、室内実験スケールに比べてはるかに大きなスケールの現象を研究対象とし、レイノルズが非常に大きい。そのため上記の定義によれば、海洋力学などで取り扱うすべての現象が“乱流”であると言える。

実際に、海洋や大気における現象を数値シミュレーションするような場合、現象のスケールがあまりに大き過ぎるため、流体力学における“乱流”の小スケールで現象を取り扱うことは到底不可能である。そこで、通常は数



別図1 乱流の計算方法  
Fig. A1 Methods of turbulence calculation

値モデルの格子サイズよりも小さいスケールの現象を（その中に規則的な現象を含んでいても）“乱流”とみなして、流体力学における“乱流”の取り扱い方と同様にして数値シミュレーションが行われている。その一例が「乱流クロージャーモデル」である。

#### A-2 乱流クロージャーモデル

乱流を取り扱う場合には通常、平均量を従属変数とするため、まず基礎方程式系について平均操作を行う。その際、運動方程式であるナビエ・ストークス方程式（熱方程式、塩分方程式についても全く同様）は非線形であるため、平均操作によって変動量（乱れ）の2次の平均値（2次のモーメント）の項（レイノルズ応力項）が新たな未知量として生じ、未知数が方程式数よりも多くなって解けなくなる。そこで2次のモーメントに対する式を導出しても方程式の非線形性のため3次のモーメントが新たに発生し、結局は高次のモーメントに対する方程式を導出しても必ずさらに高次のモーメントを新たに含むことになり、方程式系が閉じない（完結しない）ので永遠に解けない。これは乱流クロージャー（完結性）問題

と呼ばれる。そこで未知数と方程式数を一致させるために、ある次数のモーメントを低次のモーメントと関係づける方法が考えられた。つまり変動量を平均量と関係づける方法（パラメタリゼーション）が、乱流クロージャーモデル（乱流1点完結モデル）である（別図1）。どの次数のモーメントをパラメタリゼーションするか、また乱流量として何を考えるかによって、乱流クロージャーモデルにはいくつかの種類がある。現時点では“2方程式モデル”が最も実用的であると考えられており、方程式系を閉じさせるために2個の“乱流量に対する輸送方程式”を必要とするものである。

本文で述べたPOMに組み込まれているMellor-Yamadaの乱流クロージャーモデルは、この“2方程式モデル”に属し“2次のクロージャーモデル”とも呼ばれ、方程式系を閉じさせるために、乱流混合距離（乱流スケール）に対する輸送方程式と乱流運動エネルギーに対する輸送方程式を必要とする。

（原稿受理：1997年12月10日）