

ジャワ海における海水流動の 3 次元シミュレーション

山下 隆 男*・Nining Sari Ningsih**・Aouf Lotfi***

1. 緒 言

インドネシアのジャワ海はカリマンタン島とジャワ島に挟まれた浅く、閉鎖性のやや高い内海である。この内海の海水の流動特性を明らかにすることは、汚染物質の拡散、河川から流送される火山性底質の移動とこれに伴う地形変化のみならず、太平洋―インド洋の海水交換の通路にもあたり、海洋循環や気候変動にも重要なテーマである。特に、地形変化予測や重金属の流出、拡散に関しては、どこにどのくらい時間をかけて、どれだけの量が堆積するのか、ジャワ海東部の深いロンボック海峡に流出するのかを検討する必要がある。この内海での海水流動の外力にはモンスーンに支配される風、風波および潮流である。すなわち、東西モンスーンによる吹送流と潮流場に波浪の影響を取り込み、実際の流れの 3 次元場を再現することが重要である。

本研究では第 3 世代の波浪モデル (WAM)、3 次元海洋循環モデルおよび気象の再解析結果 (ECMWF) を用いてジャワ海の海水流動の 3 次元シミュレーションを 1 年間 (1996 年) 行い、その解析性を検討する。

2. 数値モデル構成

2.1 波浪場モデル

ハンブルグの Max-Planck 気象研究所で、S. および K. Hasselmann らにより開発された、第 3 世代の波浪モデル WAM (WAMDI Group, 1988; Günther et al., 1992) を用いる。これは、2 次元のエネルギー輸送方程式をスペクトル形状を仮定せずに数値計算するもので、深海、浅海 (屈折特性) の両方の計算が可能である。

2.2 海洋循環モデル

本研究では、 σ 座標およびモード分割法を用いた 3 次元の海流計算モデルを開発した (Kowalik & Murty, 1993)。基礎式は連続式と運動方程式で、流速を外部 (U, V) および内部モード (u', v') に分割する。外部モードは長波の波速で伝播する鉛直分布を持たない成分で、内

部モードはそれよりゆっくりと変化するが鉛直分布を持つ成分である。外部モードの何回かに一度内部モードを計算する。計算方法は差分法で、時間差分には松野法を併用した leap flog 法、非線形移流項計算には高次近似の QUICKEST 法、コリオリ項には Fischer 法を用いる。境界条件は、沿岸境界で

$$q=q_m+\frac{C}{H}(\zeta-\zeta_m) \cdots \cdots \cdots (1)$$

鉛直流速に対して、

$$\omega(x,y,0,t)=\omega(x,y,1,t)=0 \cdots \cdots \cdots (2)$$

水平流速に対しては、海面、海底で

$$\begin{aligned} \frac{\rho N \sigma}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) &= (\tau_x^s, \tau_y^s) \\ &= \rho_a C_D W_T(W_x, W_y) \cdots \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} \frac{\rho N \sigma}{D} \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) &= (\tau_x^b, \tau_y^b) \\ &= \rho C_a [U_h^2 + V_h^2]^{1/2} (U_h, V_h) \\ &\cdots \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

ここに、

$$W_T = (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$C_s = \text{MAX} \left[\frac{\kappa^2}{[\ln(30z_r/k_b)]^2}, 0.0025 \right] \cdots \cdots \cdots (6)$$

$\kappa=0.4$ は von Kármán 定数、 z_0 粗度長さでここでは 0.146 cm とし、 $k_b (=30z_0)$ は海底での粗度である。数値計算で、壁面則を適用する場合、相対高さ z_r は海底面直上の格子点とする。この方法で海底摩擦が的確に与えられない場合には、 $C=0.0025$ で置き換える (Mellor, 1996)。また、乱流場の鉛直分布の計算にはプリンストン大学海洋循環モデル (POM) で使われている Mellor・Yamada (1982) の 2 次モーメント乱流クロージャー・モデルのソースコードを借用した。

2.3 波浪を考慮した海面せん断応力

Janssen (1992) に従って、波浪の影響を考慮した海面せん断応力を設定する。海面でのせん断応力 τ を乱流および波浪に起因する成分に分離し、 $\tau=\tau_t+\tau_w$ と考えると、波浪が存在する場合の有効粗度 z_e は次式のようになる。

* 正 会 員 工 博 京都大学助教授 防災研究所 災害観測実験研究センター
 ** 学生会員 工 修 京都大学大学院 工学研究科
 *** Ph.D. 京都大学 防災研究所 JSPS 外国人特別研究員

$$z_e = \frac{z_0}{\sqrt{1 - \tau_w/\tau}} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 z_0 は Charnock 式に従い

$$z_0 = \alpha u_*^2/g \dots\dots\dots (8)$$

$\alpha=0.0185$ で与え、風速の鉛直分布形状を対数則で次式の様に与える。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z + z_e - z_0}{z_e}\right) \dots\dots\dots (9)$$

式(7)、(8)、(9)より、繰り返し計算によって τ 、 z_0 、 z_e を求める。

2.4 波浪を考慮した海底面せん断応力

波浪の存在により海底面せん断応力が増加する効果を導入する。すなわち、海底面での全せん断応力は波浪による τ_w と流れ(乱流)による τ_c とに分離する。

$$\tau_T = \tau_c + \tau_w \dots\dots\dots (10)$$

ここで、流れの海底面での抵抗 τ_c は、海底面での流速 U_h 、 V_h を用いて、

$$\tau_{(x,y)c} = \rho \frac{f_c}{2} \sqrt{U_h^2 + V_h^2} (U_h, V_h) \dots\dots\dots (11)$$

τ_w は海底面における波浪の最大水粒子速度 V_w により次式で表示する。

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_w \rho U_w^2 \dots\dots\dots (12)$$

また、 f_c は次式で、

$$f_c = 2 \left[\frac{\kappa}{\ln(30 z_T/k_{bc})} \right]^2 \dots\dots\dots (13)$$

波による摩擦係数は次式の Grant・Madsen (1979) の表示を用いる。

$$f_w = \begin{cases} 0.13(k_b/A_b)^{0.40} & \rightarrow k_b/A_b < 0.08 \\ 0.23(k_b/A_b)^{0.62} & \rightarrow 0.08 < k_b/A_b < 1.00 \\ 0.23 & \rightarrow k_b/A_b > 0.08 \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $A_b=U_w/\omega$ 、 k_{bc} は流れ、波、共存場の摩擦速度 U_{*c} 、 U_{*w} 、 U_{*cw} を用いて、次式で求められる。

$$k_{bc} = k_b \left[24 \frac{U_{*cw}}{U_w} \frac{A_b}{k_b} \right]^{\theta} \dots\dots\dots (15)$$

3. ジャワ海の海水流動の3次元シミュレーション

3.1 計算条件

海上風は、ECMWF の再解析結果の海上風 (10 m 高度)を用いた。その他にも NCAR/NCEP の40年間の再解析結果の使用が可能である。ここでは、1996年の1年間のみの計算を行った。潮流計算には、IHBMの主要4分潮の調和定数より合成し、14地点の観測値によって適用性を確かめた。また、外部モードの10、30、50ステップ毎に1度内部モードを計算する3通りの分割間隔を変化させ、水位、流速場の検討を行った。30ステップまでの計算結果には分割間隔の相違による有意な差はなかった。図-1に計算領域と水深を示す。

3.2 ジャワ海の海水流動シミュレーション

(1) 波浪場

図-2に典型的な東西モンスーン時の波浪ベクトルおよびスラバヤ(S)、レンバン(R)での方向スペクトルを示す。波浪推算の結果から得られた、ジャワ海の一般的な波浪特性とすれば、西モンスーン時の波浪は東からのものに比べ波高が高い。典型的な西モンスーン時の東部ジャワ海の有義波高は2.8 mにおよぶが、東モンスーン時にはカリマンタン海峡で1 m程度である。スラバヤ(S)、レンバン(R)でのピーク周波数は東西モンスーン時にそれぞれ、0.33~0.34 Hz、0.26~0.27 Hzである。

(2) 海面せん断応力に及ぼす波浪の影響

ここでは、波浪の影響を海面せん断応力の評価に考慮した場合と抵抗係数を一定値(0.003)で与えた場合の流

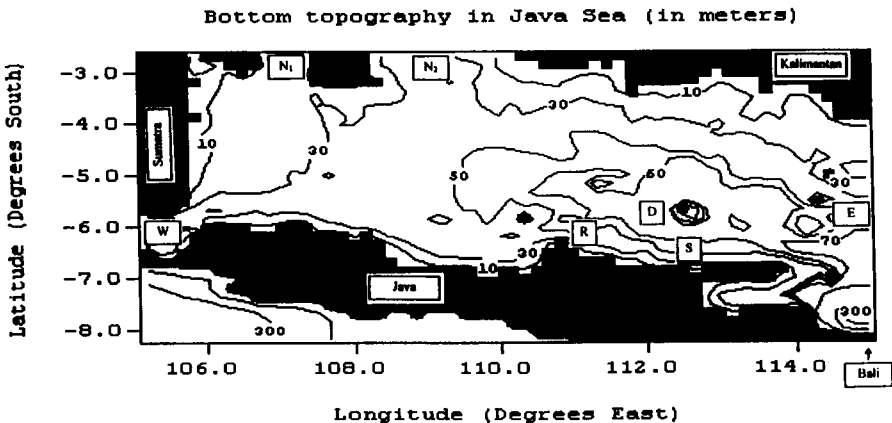


図-1 計算領域と水深

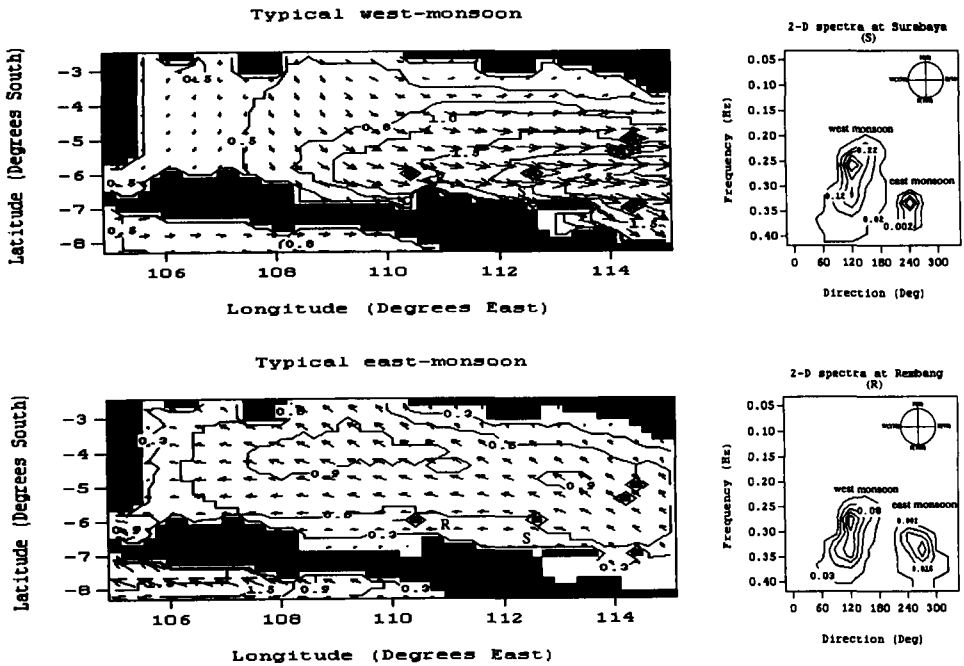


図-2 東西モンスーン時の波浪ベクトルおよびスラバヤ (S)、レンバン (R) での方向スペクトル

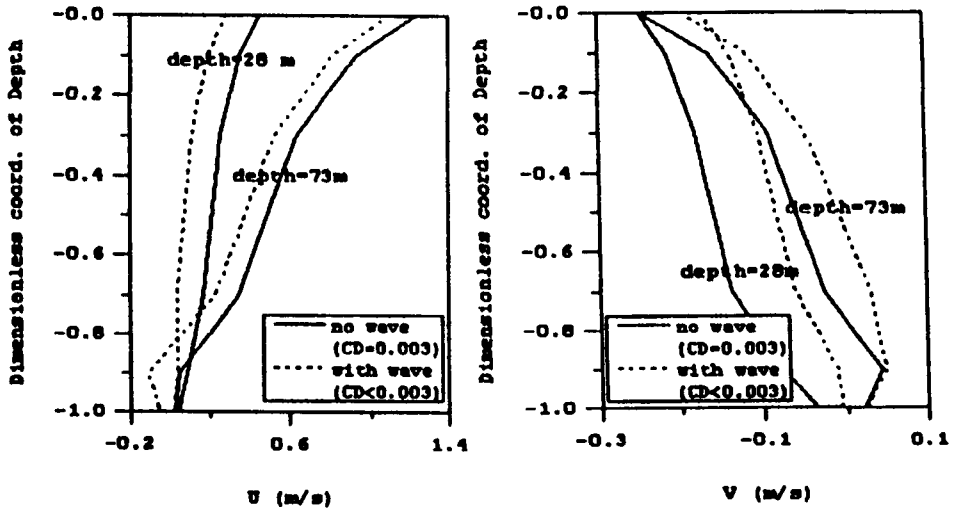


図-3 海面せん断応力の与え方の相違による流れの場の相違。水深 28 m 地点 (R: レンバン) および水深 73 m (D 点) での流速分布への影響

れの場に及ぼす影響を検討する。観測点レンバンにおいて、波浪に依存した抵抗係数と風速の変化を検討した結果、波浪を考慮した抵抗係数は 0.0015 から 0.0018 であった。一般に与える 0.0026 に比べてかなり小さな値である。図-3 に、水深 28 m 地点 (R: レンバン) および水深 73 m (D 点) での流速分布を示す。図中、実線は抵抗係数を一定値 (0.003) で与えた場合で、点線は波浪に依存した抵抗係数の場合である。この図より、波浪の影響を考慮するかしないかで流れの場の計算結果に大きな

相違が生じていることがわかる。

(3) 中立粒子の追跡による流れの特性

図-4 には典型的な東西モンスーン時の上層および下層の粒子の移動特性を示す。これより、表層の物質はモンスーンにより 2 週間程度でほぼ完全に流出するが、西モンスーンによりジャワ島北岸に堆積することがわかる。一方、下層の物質は移動速度が遅く、ジャワ海の中央部に堆積する傾向にあることがわかる。

ここで計算された結果がどの程度現象を再現している

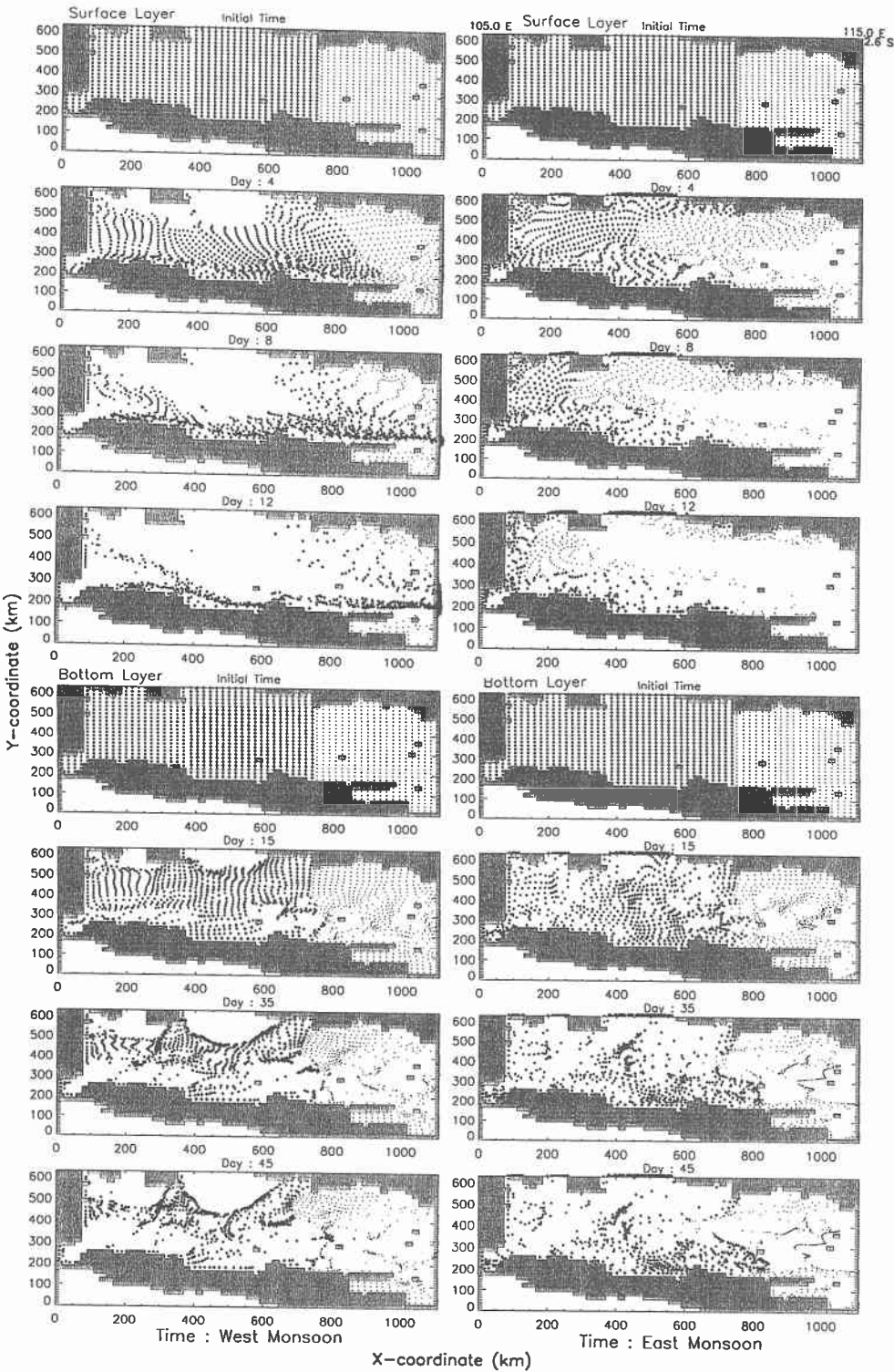


図-4 典型的な東西モンスーン時の粒子の移動特性

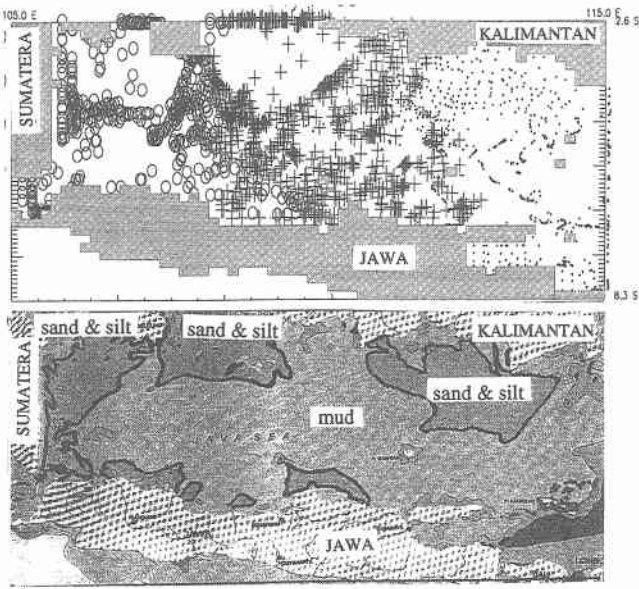


図-5 ジャワ海の底質分布図と下層粒子の移動特性との比較

かを調べるため、ジャワ海の底質分布図と下層粒子の移動特性との比較を行ってみる。図-5に典型的な東西モンスーンによる下層粒子の堆積パターンと、ジャワ海の底質分布図（砂・シルト、マッドの分布）との比較を示す。マッド（細粒底質）の分布が下層粒子の堆積パターンとよく一致していることから、ジャワ海においては細粒な底質は中央部に堆積する傾向にあることがわかる。

4. 結 語

吹送流、潮流および波浪の影響を考慮した3次元シミュレーションモデルを構築し、東西モンスーンによるジャワ海における海水流動の数値解析を行った。本研究で得られた主な成果は以下のようである。

(1) 第3世代の波浪モデル(WAM)と3次元海洋循環モデルおよび気候の再解析結果の海上風を用いたジャ

ワ海の海水流動の3次元シミュレーションモデルを構築し、1996年の1年間の波浪、海水流動のシミュレーションを行った。

(2) 物質移動、海水交換には3次元特性が極めて支配的であり、そこには海底摩擦、海面せん断応力に及ぼす波浪の効果が重要な役割を演じていることを示した。

(3) 下層粒子の堆積パターンと、ジャワ海の底質分布図（砂・シルト、マッドの分布）との比較から、マッド（細粒底質）の分布が下層粒子の堆積パターンとよく一致していることを示した。

本研究は、京都大学防災研究所IDNDRプロジェクト(Japan-Indonesia)および文部省科学研究費、特別研究員奨励費(No. 97464)の研究の一部として行われた。

参 考 文 献

- Grant, W. D., and O. S. Madsen (1982): Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *J. Geophys. Res.*, 87, 469-481.
- Günther, H., S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen, (1992): The WAM Model. Cycle 4, Report No. 4.
- Janssen, P. A. E. M., (1992): Experimental evidence of the effect of surface waves on the air flow. *J. Phys. Oceanography*, 22, 1600-1604.
- Kowalik, Z. and T. S. Murty, (1993): Numerical modeling of ocean dynamics. Advance Series on Ocean Engineering, Vol. 5, World scientific, 481 p.
- Mellor, G. L. (1996): Users Guide for A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model, Princeton University.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875.
- WAMDI Group, (1988): The WAM model - A third-generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanography*, 18, 1775-1810.