

水島からの流出重油の拡がりについて

柿 沼 忠 男*・柳 哲 雄**

1. 緒 言

1974 年 12 月 18 日午後 8 時 40 分頃岡山県倉敷市水島コンビナートにある三菱石油(株)水島製油所の 270 号タンクから C 重油が約 1 時間にわたって流出し、その流出量は 35 000 kl に達した。重油は周囲の防油堤を越え、北西季節風や潮流などにのり、12 月 23 日には鳴門海峡にまで達した(図-1)。海上には約 10 000 kl が流出し

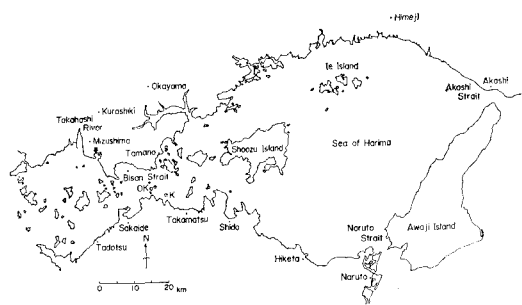


図-1 水島・備讃瀬戸・播磨灘

たといわれているが正確な数字は未だに明らかでなく、この流出重油による漁業被害は水産庁瀬戸内海漁業調整事務局のまとめによると 160 億円にのぼっている。

理学的にみればこのような油の拡がり方がどのような要因で決まったのか関心のある問題であり、工学的にみればおそらく再発するであろうこの種の油流出事故に際し、その拡がり方を予測する手法を確立することが必要であると思われる。

このような観点から、著者らは数度にわたって現地調査を実施するとともに、各官庁・漁業組合などの厚意により資料を収集してきた。この論文では、2 次元数値シミュレーションによって今回の油の拡がり方を再現することを試みる。

2. 解析方法

通例、油の拡がりは慣性域・粘性域・表面張力域の順にそれぞれ異なった物理法則に支配される。実際には、最初の数時間を除けば表面張力と粘性力のバランスで拡

がっていく(たとえば川村・清水(1975)¹⁾)。さて玉井・福嶋(1975)²⁾によると、今回の水島からの流出重油は表面張力域の理論式から予想される値の 10 倍程度の速さで拡がっていて、油層の移動には海域の構造が支配的な役割を果たしたということがわかっている。

そこで、ここでは拡散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \dots\dots\dots (1)$$

ここで、C: 油の濃度、x, y: 東、北方向の座標軸、u, v: x, y 方向の流速、K_x, K_y: x, y 方向の拡散係数、を差分化して解くことによって油の拡がりを求めることにした。地形格子は 1 分ごとに分割し(図-2)、その大き

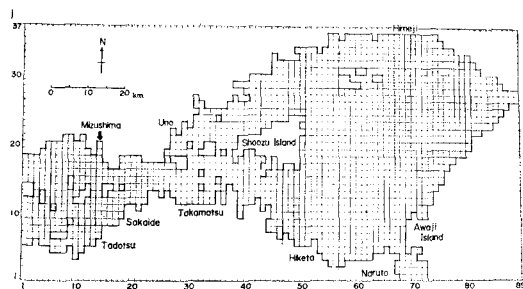


図-2 計算に用いた格子

さは 1.6 km × 1.9 km である。格子の中央で油の濃度、交点で流速を定義し、空間的には中央、時間的には前進差分で、4 分のタイムステップで解いていった。

$$\frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^{t-\alpha}}{t_i - t_{\alpha}} = \frac{1}{dx \cdot dy} (M_{i-1/2,j}^t - M_{i+1/2,j}^t + N_{i,j-1/2}^t - N_{i,j+1/2}^t), \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{i+1/2,j}^t &= \left\{ \frac{1}{4} (u_{i+1/2,j-1/2}^t + u_{i+1/2,j+1/2}^t) (C_{i,j}^t + C_{i+1,j}^t) + \left(\frac{s}{4} |u_{i+1/2,j-1/2}^t| + u_{i+1/2,j+1/2}^t | + \frac{K_x}{dx} \right) (C_{i,j}^t - C_{i+1,j}^t) \right\} dy, \\ N_{i,j-1/2}^t &= \left\{ \frac{1}{4} (v_{i,j-1/2}^t + v_{i,j+1/2}^t) (C_{i,j}^t + C_{i,j+1}^t) + \left(\frac{s}{4} |v_{i,j-1/2}^t| + v_{i,j+1/2}^t | + \frac{K_y}{dy} \right) (C_{i,j}^t - C_{i,j+1}^t) \right\} dx \end{aligned} \right\}$$

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学教室

** 正会員 理修 愛媛大学助手 工学部海洋工学教室

$$N_{i,j+1/2}^{\beta} = \left\{ \frac{1}{4} (v_{i-1/2,j+1/2}^{\beta} + v_{i+1/2,j+1/2}^{\beta}) (C_{i,j}^{\beta} + C_{i,j+1}^{\beta}) + \left(\frac{s}{4} |v_{i-1/2,j+1/2}^{\beta} + v_{i+1/2,j+1/2}^{\beta}| + \frac{K_y}{4y} \right) (C_{i,j}^{\alpha} - C_{i,j+1}^{\alpha}) \right\} \Delta x, \quad (3)$$

ここで, $\Delta x, \Delta y$: x, y 方向の格子間隔, M, N : x, y 方向の油のフラックス, s : スイッチング係数, α, β, γ : 時刻 ($\alpha < \beta < \gamma$) である。流速は恒流, 潮流, 吹送流の線形の重ね合わせが可能であるとして与えた。

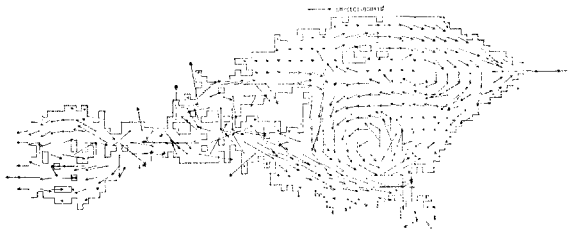


図-3 恒流

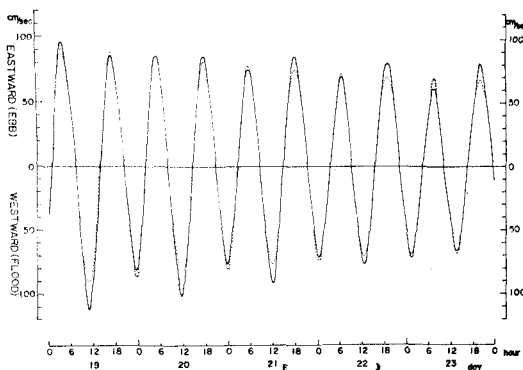


図-4 OK₀ 点の予報潮流

恒流の流速は現地の観測データに基づいて 図-3 に示すように与え, 潮流の流速は 図-1 中の OK₀ 点で予報されている備讃瀬戸の潮流流速 (図-4) を基準にして次式で与えた。

$$\begin{aligned} (u_T)_{i,j,t} &= \frac{V_{i,j}}{V_{OK_0}} \bar{V}_{OK_0} \sin \left\{ \frac{2\pi}{T} (t - t_0) \right. \\ &\quad \left. - K_{i,j} \right\} \frac{\sin \theta_{i,j}}{\cos \theta_{i,j}} \quad \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ここで, $(u_T)_{i,j,t}, (v_T)_{i,j,t}$: (i, j) 格子の時刻 t における x, y 方向の潮流流速, $V_{i,j}, V_{OK_0}$: (i, j) 格子, 地点 OK₀ の潮流楕円の長軸方向の最大振幅 (図-5), $\bar{V}_{OK_0}$: 地点 OK₀ の予報潮流振幅の 1 日平均値 (図-4 中破線で示したもの), T : 12 時間 30 分, t_0 : 地点 OK₀ の下げ潮前

のスラックの時刻, $K_{i,j}$: (i, j) 格子の地点 OK₀ に対する潮時差 (図-6), $\theta_{i,j}$: (i, j) 格子の潮流楕円の長軸方向である。また吹送流の流速は 図-1 に示した地点 K にある香川県の海上観測塔で得られた風の資料 (図-7) を

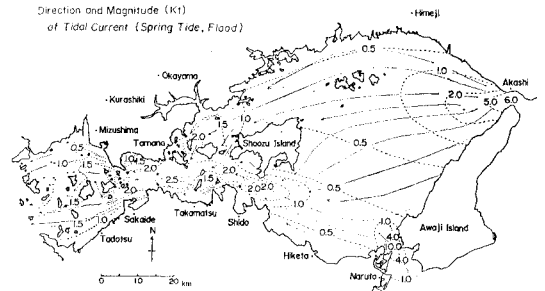


図-5 潮流の大きさと方向

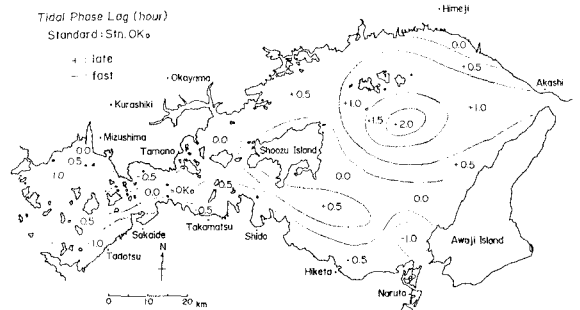


図-6 潮時差

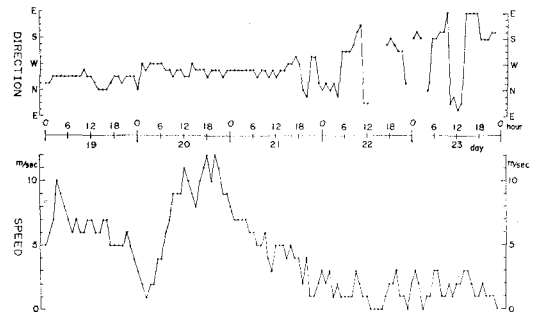


図-7 K 点の風向・風速

用いて, 次式により全域一様に与えた。

$$\frac{u_w}{v_w} = C_w \cdot W \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで, u_w, v_w : x, y 方向の吹送流流速, C_w : 風力係数, W : 風速, θ : 風の流下方向である。拡散係数は潮流楕円の長軸方向の最大振幅の 2 乗に比例するとして次式で与えた。

$$\begin{aligned} (K_x)_{i,j} &= A_K (V_x)_{i,j}^2, \\ (K_y)_{i,j} &= A_K (V_y)_{i,j}^2, \quad \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで, A_K : 比例定数, $(V_x)_{i,j}, (V_y)_{i,j}$: $V_{i,j}$ の x, y

成分である。また、油の濃度の初期条件は12月19日午前0時から午前6時まで水島（(14, 20) 格子）で 10^2 として与えた。

3. 解析結果

図-8～図-11は第5、第6管区海上保安本部の航空機による観測結果をもとにして描いた毎日の油の拡がりの様子である。図中、斜線で示した所が濃い油のあった所である。パラメーターをいろいろ変えてこの油の拡がりを再現しようとした。計算ケースの一覧を表-1に示す。現実の油の拡がりに最も近い計算結果が得られたのは潮流と恒流を与え、風力係数を3.5%, $A_K=100$ とした Run 5 の場合である。その結果を図-12～図-15に

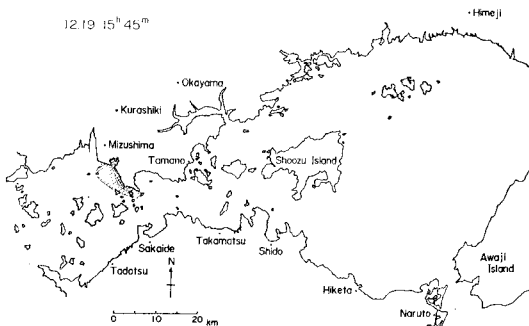


図-8 12月19日の油の拡がり（観測）

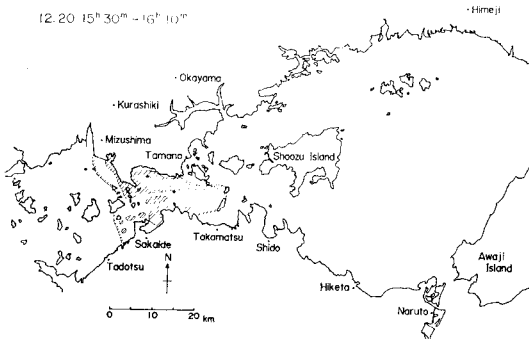


図-9 12月20日の油の拡がり（観測）

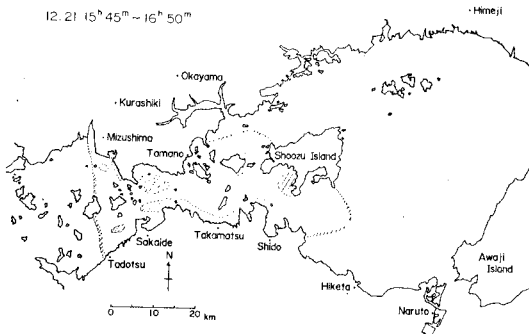


図-10 12月21日の油の拡がり（観測）

示す。各日とも午後のスラックにあたる時刻の拡がりを示した。20日, 21日, 22日はそれぞれ $C=10^{-2}$, 10^{-6} , 10^{-8} が油の先端に, $C=10^0$ が濃い油の領域に対応して

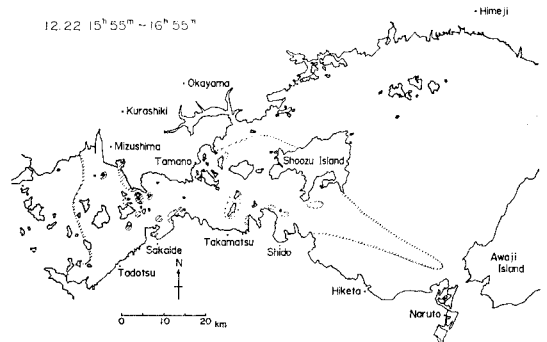


図-11 12月22日の油の拡がり（観測）

表-1 計算一覧

潮流	恒流	風力係数	風速係数	$K=A_K U^2$	Run No.
12.19	14.00	3%	$K=K_0$	$A_K=100$	(1)
		3.5%	$K=K_0$	$A_K=100$	(2)
		3.5%	$K=K_0$	$A_K=100$	(3)
		3.5%	$K=K_0$	$A_K=100$	(4)
		3.5%	$K=K_0$	$A_K=100$	(5)
		3.5%	$K=K_0$	$A_K=100$	(6)
		3.5%	$K=K_0$	$A_K=100$	(7)

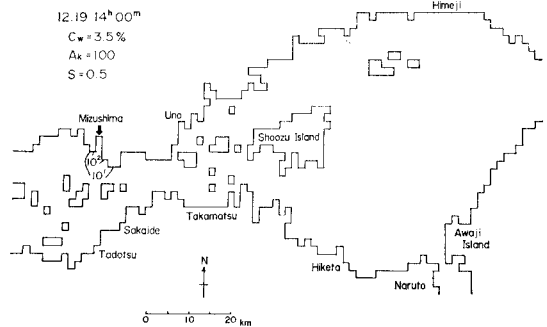


図-12 12月19日の油の拡がり（計算）

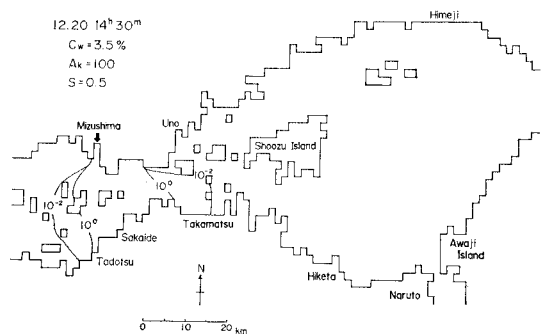


図-13 12月20日の油の拡がり（計算）

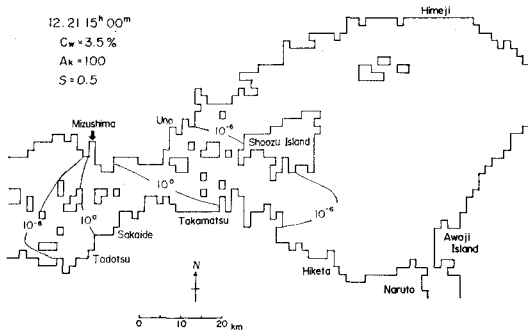


図-14 12月21日の油の拡がり(計算)

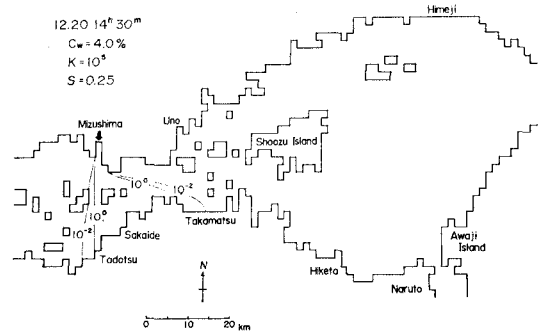


図-17 風力係数4%の場合の油の拡がり

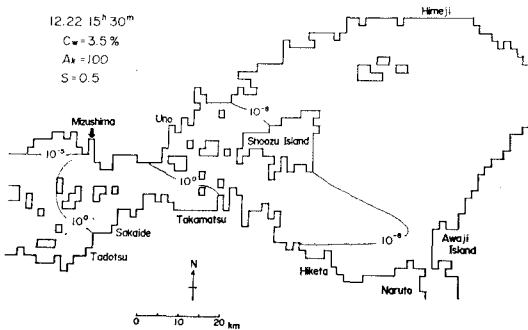


図-15 12月22日の油の拡がり(計算)

いる。21日までのパターンは比較的観測結果とよく合っているが、22日の西側のパターンが観測結果と大きく異なっている。これは計算上では22日には南東の風が吹いていて備讃瀬戸中央部の油が西に流された結果得られたものである。実際には油は西の方にはほとんど拡がっておらず、この差異については1) 風を全域一様で与えたことが現実とあわない、2) 22日の段階で油のかなりの部分が蒸発、沈降するとともに多くの島々の海岸に吸着されていて、風が西に吹いても流れていなかったなどの可能性が考えられるがはっきりしない。

風力係数を3%にしたRun 1では図-16に示すように東に片寄る油の拡がりを再現できない。また風力係数を4%にしたRun 6では図-17に示すように風の効果が強すぎて油は四国沿岸に吹きよせられ、

東に拡がっていかない。拡散係数を一定にしたRun 2と恒流をのぞいたRun 8では図-18、図-19に示すように油が播磨灘に入ってから細長い拡がりを再現できない。

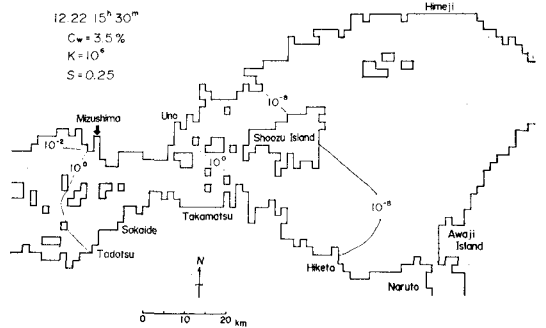


図-18 拡散係数一定の場合の油の拡がり

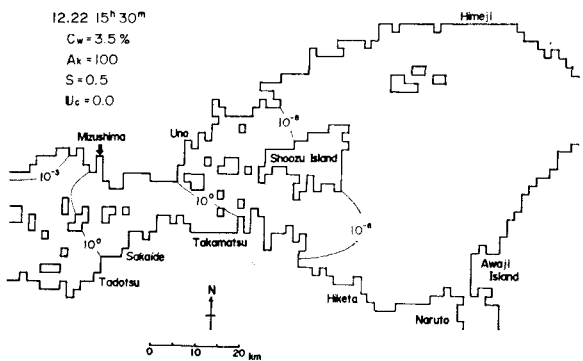


図-19 恒流がない場合の油の拡がり

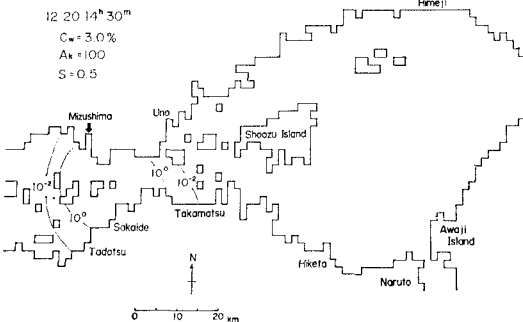


図-16 風力係数3%の場合の油の拡がり

4. 結 語

以上著者は水島からの流出重油の拡がりを2次元数値シミュレーションで再現しようとした結果以下のことが明らかになった。

(1) 潮流の卓越する海域での油の拡がりは拡散方程式を解くことによって再現できる。

(2) 油の拡がりに対する吹送流の風力係数は3.5%程度である。

(3) 拡散係数は流れに対して指向性を持たせて与えた方が油の拡がりをよく再現できる。

(4) 恒流は長期間の物質分布ばかりでなく⁸⁾、油の拡がりのような短時間の現象にも効いているようである。

最後にこの研究を進めるにあたって貴重な資料を提供して頂いた第5、第6管区海上保安本部、第3港湾建設局、岡山県、香川県、兵庫県、朝日新聞大阪本社、岡山県下津井地区の漁民、香川県引田地区の漁民、瀬戸内海汚染総合調査団の方々に深く感謝の意を表する。また数値計算を行うにあたって貴重な助言を頂いた京都大学大学院理学研究科院生大西行雄氏、調和解析(株)山田紀男氏、現地調査・数値計算に御協力頂いた愛媛大学工学

部岸 洋介講師、渡辺政広助手、伊福 誠助手、白井孝技官に深甚なる謝意を表するとともに、この数値計算を行うにあたって九州大学大型計算機センターのFACOM 230-75、愛媛大学計算機室のFACOM 230-28を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 川村雅彦・清水浩輔：流出油の物理的挙動，流出重油の海水中における挙動とその影響，pp. 11~17, 1975.
- 2) 玉井信行・福嶋祐介：瀬戸内海における流出油の拡がりについて，第3回環境問題シンポジウム講演集，pp. 88~93, 1975.
- 3) 樋口明生・柳 哲雄・柏井 誠：三河湾における潮流による拡散の水理模型実験について，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 361~366, 1974.