

## 津波による油の拡がりに関する数値計算

## A SIMULATION MODEL OF OIL SPREAD DUE TO TSUNAMIS

後藤 智明\*

By Chiaki GOTO

A simulation model of oil spread due to tsunamis is developed. The equations for the motion of oil are the Navier-Stokes equation and the continuity equation. Since no effects of surface tension is included, the method is only applicable for a short time, in which the inertia and viscous effects dominate. This method is applied to Miyako Bay, on the North Sanriku Coast in Japan. It is assumed that 2000 m<sup>3</sup> oil spill from tanks due to earthquake. Input tsunami is the same magnitude as Tokachi-oki Tsunami hit in 1968.

## 1. 序

津波による油の拡がりに関する数値計算法を検討する。

津波が直接の原因となって油が流出した例としては、1968年十勝沖地震津波の八戸港の例がある。港内に停泊していたタンカーの油槽が破損し、油が港内に拡がったのである。その他、直接の原因は津波ではないが、地震動のため石油タンクが壊れ、油が拡がった例は多い。1964年の新潟地震では、流出した油が発火し、津波浸水域に火災をひろめている。

津波危険地域である三陸沿岸では、小さな漁港においても船舶用の石油タンクが設置されている所が数多くある。さらに、いくつかの港湾では、石油の大量備蓄が行われ、しかも津波対策が不十分な所が多い。もし、発火点が低い油であれば、流出後に火災を起こす危険が大きく、津波とともに市街地へ流れ込んでくる場合には、想像を絶するような二次災害を引き起こす可能性がある。たとえ発火性の弱いものであっても、海水汚染により養殖水産業にとっては重大な問題となると思われる。

Fay<sup>1)</sup>の研究によると、静水面上に放出された油は、

蒸発などによる体積減がなく、油層が水底に達しない程度であるならば、慣性力、重力、粘性力、表面張力の効果により拡がり、時間とともに、重力-慣性力領域、重力-粘性力領域そして表面張力-粘性力領域へと変わっていくことが知られている。

重力-慣性力領域の理論解法としては、Abbot<sup>2)</sup>の特性曲線法による数値解、Hoult<sup>3)</sup>、Fannelopら<sup>4)</sup>の相似解を仮定する方法がある。この領域の解を求めるときに最も問題となるのは油層先端の条件である。普通、油層先端速度と油層厚の間に何らかの人為的な条件を設定している。

重力-粘性力領域には、Hoult<sup>3)</sup>、Fannelopら<sup>4)</sup>およびBuckmaster<sup>5)</sup>の解がある。これらの理論は、油の粘性がきわめて大きく、あたかも平板が水面を滑っているのと同じ状態であると仮定し解かれている。

表面張力-粘性力領域にはHoult<sup>3)</sup>の解がある。しかし、実験値とは大きく異なる結果となり、その原因はいまだに明らかにされていない。

一方、数値シミュレーションでは、力のつり合いとは関係なしに、拡散方程式を用いたり<sup>6)</sup>、油層の移動速度を水や風などの移流速度と経験的に結び付けて計算しているもの<sup>7)</sup>が多い。したがって、計算結果が係数の大小に左右されるといった問題があるようである。

\* 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科  
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

本研究では、油の運動の方程式を導き、それを解くといった、より実現象に近い数値シミュレーション法を検討する。油の拡がりに関する水理実験結果との比較を通じ数値計算の精度を検討する。また、この計算法を現地海岸へ適用することにより、実用上の問題点に関する考察も行う。ただし、津波の現象は数時間のオーダーであるのに比べ、放出油量で多少異なるが表面張力の効果が卓越するのは数日後程度であることから、本研究では表面張力の影響を無視している。また、油を移流させる外力としては、津波の水流だけを考える。

2. 支配方程式と計算法

(1) 油の連続と運動の式

水平方向に  $(x, y)$  軸を採用する。油の水平方向流速を  $(u_0, v_0)$ 、水の流速を  $(u, v)$  とおく。基準面からの油層表面の高さを  $\eta_0$ 、水面の高さを  $\eta$  とおく。油の密度を  $\rho_0$ 、水の密度を  $\rho$ 、重力加速度を  $g$  とし、油の鉛直加速度は重力加速度に比べ小さいと仮定すると、油の連続および運動の式は

$$\frac{\partial D_0}{\partial t} + \frac{\partial M_0}{\partial x} + \frac{\partial N_0}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 M_0) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 M_0) + g D_0 \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_0} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u_0 N_0) + \frac{\partial}{\partial y} (v_0 N_0) + g D_0 \frac{\partial \eta_0}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_0} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 $D_0$  は油層の厚さであり、 $M_0 = u_0 D_0$ 、 $N_0 = v_0 D_0$  である。 $\tau_x$ 、 $\tau_y$  は抵抗力を表わす。

$D_0$  と  $\eta_0$  の関係を導く。Fig. 1(a) のように油層が水面上に浮いている場合と Fig. 1(b) のように油層が水底に達する場合に分けて考える。ただし、図に示すように、 $\eta$ 、 $\eta_0$  は鉛直上向を正、 $h$ 、 $h_0$  は鉛直下向を正にとる。油の鉛直加速度が無視できると、鉛直方向の力のつり合いは、それぞれ

$$\rho_0 g D_0 = \rho g (D_0 - \eta_0 + \eta) \leq \rho g D \dots\dots\dots (4)$$

および

$$\rho_0 g D_0 > \rho g (D_0 - \eta_0 + \eta) = \rho g D \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。したがって、 $D_0$  と  $\eta_0$  の関係は

$$D \geq \frac{\rho_0}{\rho} D_0 \text{ のとき } \eta_0 = \epsilon D_0 + \eta \dots\dots\dots (6)$$

および

$$D < \frac{\rho_0}{\rho} D_0 \text{ のとき } \eta_0 = D_0 - h \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 $\epsilon = 1 - \rho_0/\rho$  である。式(6)中の  $\eta$  は水流に関する計算結果から既知の値であり、式(7)中の  $h$  は地盤データであるので、式(6)、(7)により方程式系(1)~(3)は閉じていることになる。

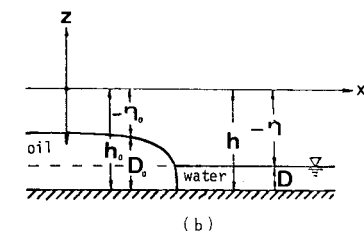
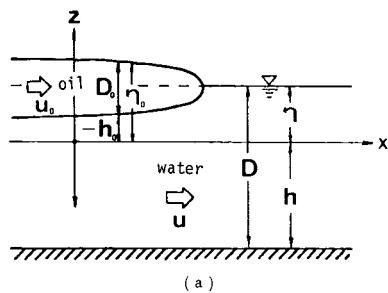


Fig. 1 Definition sketches.

油層底面に働く抵抗力は相対速度の2乗に比例するものと仮定し、

$$D \geq \frac{\rho_0}{\rho} D_0 \text{ のとき}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_x}{\rho_0} &= f(u_0 - u) \sqrt{(u_0 - u)^2 + (v_0 - v)^2} \\ \frac{\tau_y}{\rho_0} &= f(v_0 - v) \sqrt{(u_0 - u)^2 + (v_0 - v)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$D < \frac{\rho_0}{\rho} D_0 \text{ のとき}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_x}{\rho_0} &= f_b u_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} \\ \frac{\tau_y}{\rho_0} &= f_b v_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

とおく。ここで、 $f$ 、 $f_b$  は抵抗係数である。

(2) 計算法

式(1)~(3)の計算にはリープフロッグ法を用いる。差分式は津波に関するもの<sup>8)</sup>とほぼ同じである。計算の初期条件は油層厚および線流量の分布を与えるものとする。

本計算では特別な油層先端条件を用いていない。ただし、差分計算の誤差の特性上、油層先端で厚さが完全に零とはならないため、油層先端厚さと初期油層厚さの比が  $10^{-5}$  となる地点を油の拡がりの先端と定める方法を用いている。本研究の範囲では  $10^{-4}$  以下の値を用いれば、全体の拡がり面積に影響を及ぼさない。

3. 計算結果と従来の研究成果の比較

(1) 一次元拡がり

式(1)~(3)を用いた計算で最も問題であると思わ

れることは、抵抗係数の評価に関してである。特に、重力-粘性力領域では、この抵抗係数の大小が油の拡がりを左右するといっても過言ではない。

ここでは、静水面上への油の一次元拡がりに関して従来の研究成果と計算結果を比較することにより、抵抗係数について検討を行う。油と水の間の抵抗係数としては、首藤ら<sup>9)</sup>の研究を参考として

$$f = f' / R_e \dots \dots \dots (10)$$

を仮定する。ここで、 $R_e$ は油に関するレイノルズ数で局所的な代表流速を  $U_0$ 、動粘性係数を  $\nu_0$  とおくと

$$R_e = U_0 D_0 / \nu_0$$

で定義される。 $f'$  は定数である。

計算は、埜口ら<sup>10)</sup>の水理実験と同様に、水槽端にシャッターをへだてて貯留した油をシャッターを引き上げることで放出した油の拡がりについて行う。水の流れはなく、式(4)を満足する水深を有するものと仮定する。計算は一次元拡がりのみを考え、空間格子を2.5 cm、時間格子を0.05 sとする。油は比重0.9、動粘性係数43 cstのものであり、貯留量は0.75 m<sup>3</sup>である。水槽幅は0.5 mとする。

Fig. 2に埜口らの水理実験結果と  $f'$  の値を変えた5種類の計算結果との比較を示す。図は拡がり長さに関するもので、各軸は、

$$L_r = [\epsilon g \nu_0^2 (V/B)^5]^{1/7}$$

および

$$t_r = [(\epsilon g)^{-2} \nu_0^{-3} (V/B)^4]^{1/7}$$

で無次元化されている。ここで、 $V$ は放出油量、 $B$ は水槽幅である。

$f'$  の小さい計算では実験値に比べ油の拡がり速度の大きい結果となる。 $f'$  が0.25と大きい計算では、重力-粘性力領域で拡がり速度が幾分小さめな結果となる。以上のことから、本研究では油と水の間の抵抗係数として  $f'=0.2$  すなわち  $f=0.2/R_e$  を採用する。ただし、油層の拡がりに伴う水の運動を本計算法では全く考えていないので、この抵抗係数は油層先端を含めた平均的なものと考えらるべきである。実際、首藤ら<sup>9)</sup>は油層先端と他の部分では抵抗係数が大きく異なることを報告している。

Fig. 3に油の一次元拡がりに関する従来の代表的な研究成果と計算結果を比較したものを示す。計算は上述のものに付け加え放出油量0.0075 m<sup>3</sup> に関しても行っており、その結果は黒丸印、黒三角印で示してある。従来の研究成果は実線、破線等で示してあり、上述の研究成果以外に Suchon<sup>11)</sup>の水理実験結果も載せてある。

放出油量のオーダーが異なる2種類の無次元拡がりに関する計算結果の差はほとんどみられず、埜口らおよび Suchonの実験値とよく一致する。したがって、抵抗係

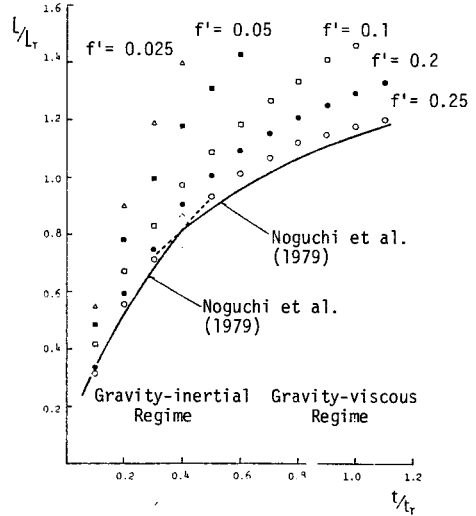


Fig. 2 Comparison of computed results with various resistance coefficient.

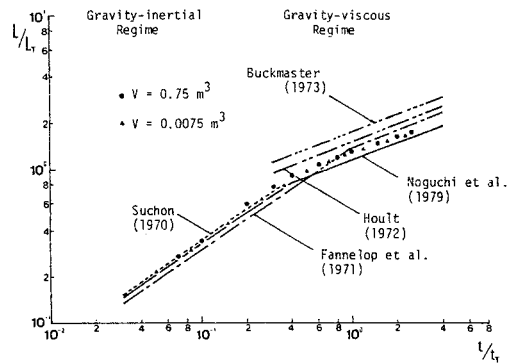


Fig. 3 Comparison of one dimensional oil spread.

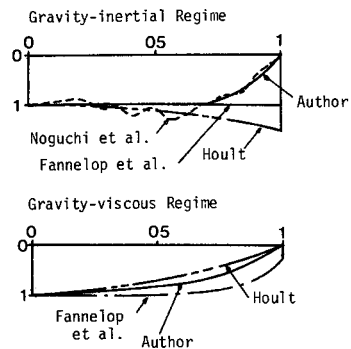


Fig. 4 Comparison of oil slick thickness distribution.

数に  $f=0.2/R_e$  を用いることは当を得ているものと結論づけられる。

Fannelopら<sup>4)</sup>は、このダム決壊形式の一次元拡がりには、重力-慣性力領域になる前の段階として初期成長

(Initial-growth) 領域があることを指摘している。本計算結果からはこの領域に相当する現象を明確にとらえることはできない。これは、油層の急激な進行に伴い前方の水も流動するために起こる現象であり、計算では水の運動を一切考えていないことによる。

Fig. 4 は油層の断面形状に関して従来の研究成果と計算結果を比較したものである。横軸の1が油層先端であり、油層厚さ(縦軸)の基準は放出点の値を用いている。計算結果は放出油量  $0.75 \text{ m}^3$  のもので、重力-慣性力および重力-粘性力の各領域の結果は放出後 2.5 s および 8.0 s のものである。埜口ら<sup>10)</sup>の実験値とは条件が多少異なるため直接比較するのは難しいが、実験値が油層先端がくさび状で内部波が生じた結果になるのに比べ、重力-慣性力領域の計算値は先細りの滑らかなものになる。相似解を仮定した Hoult<sup>3)</sup> や Fanelop ら<sup>4)</sup>の結果は矩形状のものとなっている。重力-粘性力領域では Hoult, Fanelop らの理論解の形状と類似なものとなる。

## (2) 二次元拡がり

ここでは、油の二次元拡がりに関する埜口ら<sup>12)</sup>の水力実験結果と比較する。

埜口らは、幅 12 m、長さ 12 m、深さ 0.3 m の平面水

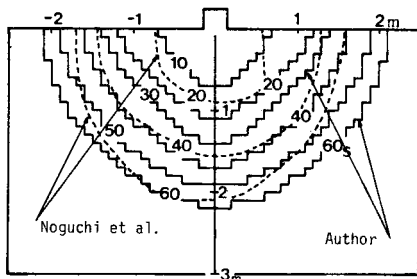


Fig. 5 Comparison with hydraulic experiments.

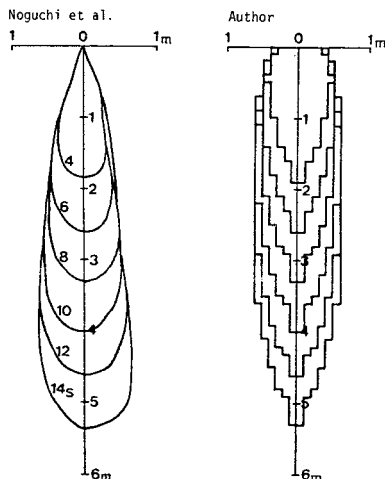


Fig. 6 Comparison of hydraulic experiments.

槽に幅 0.3 m、奥行き 0.5 m の小湾を作り、この湾奥から毎分  $0.0044 \text{ m}^3$  の油を連続的に放出し、静水上の油の二次元拡がりを測定している。使用した油は、動粘性係数 13 cst、比重 0.86 のものである。

Fig. 5 にこの水力実験と同じ諸元で行った計算結果を示す。計算には、10 cm の正方格子および 0.1 s の時間間隔を用いている。計算値は計算格子に沿った階段状の実線で示している。破線で示されている埜口らの実験値に比べ計算値の方が幾分大きめの拡がりとなるが、良好な一致といえよう。

埜口らは、さらに、幅 3.8 m、有効実験区間 40 m、水深 4 m の大型回流水槽を用いて一様流 (30 cm/s) 中に放出した油の二次元拡がりに関する水力実験を行っている。水路の上流の水面直上に幅 5 cm のといを設置し、といから下流に向けて毎分  $0.003 \text{ m}^3$  の油を連続放出している。

Fig. 6 に実験結果と計算結果の比較を示す。放出開始後 2 s ごとの結果である。流れ方向の拡がり長さについては両者は良好な一致を示すが、流れと垂直方向には多少の差がみられる。特に、流れ方向の油層先端幅には大きな差がある。これは、水流の乱れが原因と考えられ、乱流拡散をも考慮した計算が必要なことを示唆する。

## 4. 宮古湾に関する計算

### (1) 津波の計算<sup>13)</sup>

津波の計算は電算機の記憶容量および演算時間の制限のため、発生および外洋での伝播を扱う外海計算と宮古湾内の流動を詳細に扱う近海計算に分離して行う。まず、外海計算を行い、近海計算のための境界値を出力する。近海計算では、この境界値を入力条件とし、宮古湾内の津波の水位および流速分布を出力する。

外海計算は北緯  $38^{\circ}20' \sim 43^{\circ}5'$ 、東経  $140^{\circ}30' \sim 145^{\circ}15'$  の領域で線形長波理論を用いて行う。計算格子は水深分布により  $5910 \text{ m} \sim 657 \text{ m}$  の3種類の正方格子を用い、時間間隔を 3 s とする。対象とした津波は 1968 年の十勝沖地震津波であり、金森<sup>14)</sup>の断層パラメーター、羽鳥<sup>15)</sup>の波源域を用いる。

近海計算では、宮古湾の現況地形を対象とし、天文潮位 T. P. 0 m のときに十勝沖地震津波と同じものが来襲する場合を想定している。Fig. 7 に宮古湾の地形を示す。計算は、50 m の正方格子、1 s の時間間隔を用いて、マンギンの摩擦抵抗則(粗度係数は 0.02)を考慮した浅水理論で行っている。

### (2) 油の拡がりの計算

油の拡がりに関する計算は式(1)~(3)を用いて行う。計算は近海津波計算と同じ 50 m の正方格子、1 s の時間間隔で行う。抵抗係数は  $f = 0.2/R_e$  を用いる。 $f_0$

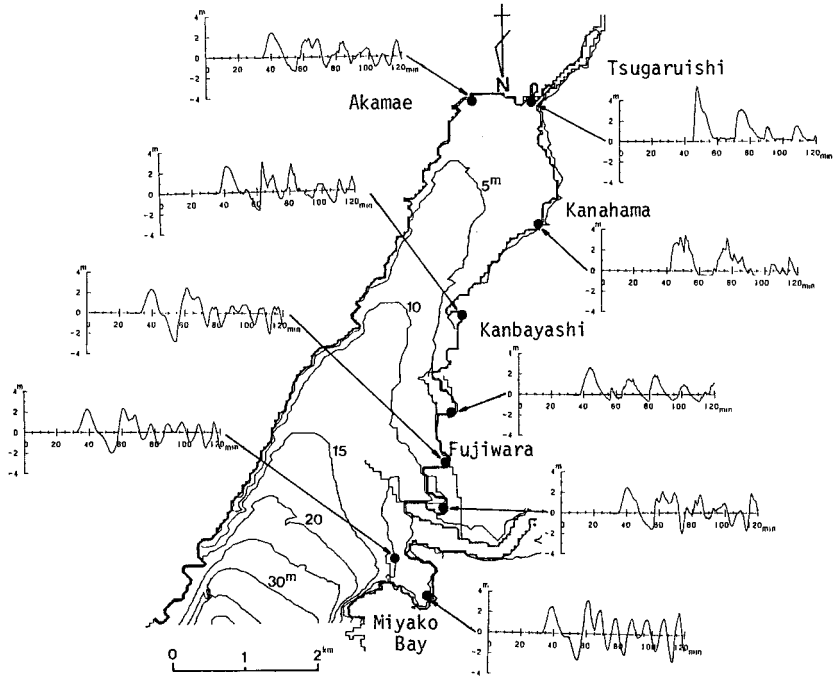


Fig.7 Water depth and computed tsunami wave history in Miyako Bay.

に関しては0.02を仮定する。対象とする油はすべてB重油とし、比重を0.91、動粘性係数を43 cstとおく。

油の初期流出条件としては、宮古港埠頭に2基の石油タンクを想定し、地震動によりタンクが破損したものと仮定する。石油タンクから流出した油は防油堤内に滞油しているものとする。防油堤の高さは地盤上40 cmであり、その形状は計算格子(50 mの正方形格子)に等しいものとする。油量は1石油タンク当たり1000 m<sup>3</sup>とする。

(3) 計算結果

外海津波計算結果と十勝沖地震津波の宮古港検潮記録を比較すると、第1波および第2波は計算値の方が低い水位となり、第3波以降は逆に高い水位となる。そこで、近海津波計算への入力点で波を入射波と反射波の各成分に分離し、入射波成分を補正し近海津波計算に入力することを考える。補正には、予備的な近海計算を数回繰り返すことにより各波峰、波谷ごとに倍率を定める方法を用いる。補正後の計算結果と検潮記録の比較を Fig. 8 に示す。実線が計算結果、黒丸印が検潮記録である。時刻の原点は津波発生時である。

Fig. 9 および Fig. 10 に津波の水流に関する近海津波計算結果を示す。図には10 cm ごとの等水位線と流速ベクトルが描かれている。図中の数字は m 単位の水位を表す。宮古湾内の各地点の水位の経時変化は Fig. 7 に示されている。

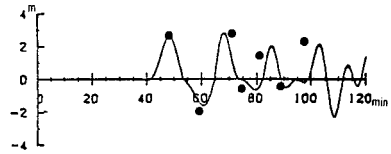


Fig. 8 Comparison with tidal record.

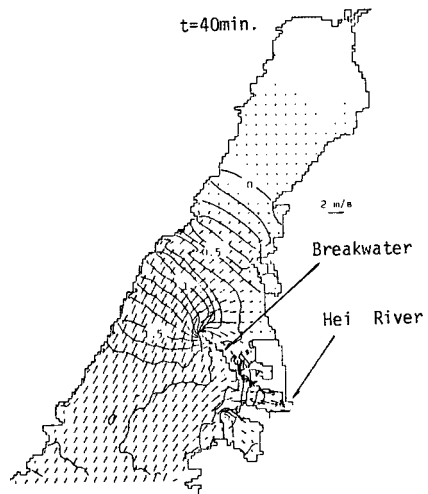


Fig.9 Computed tsunami flow.

Fig. 11 には、津波発生後40分から120分までの10分ごとの油の拡がりに関する計算結果が示されている。図は宮古港の付近を拡大したもので、実線で囲まれた斜

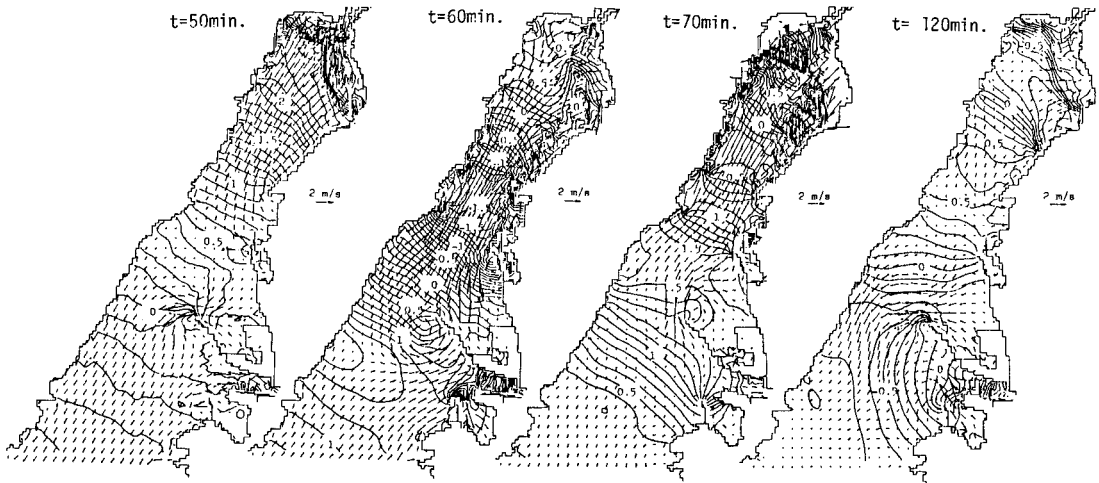


Fig. 10 Computed tsunami flow.

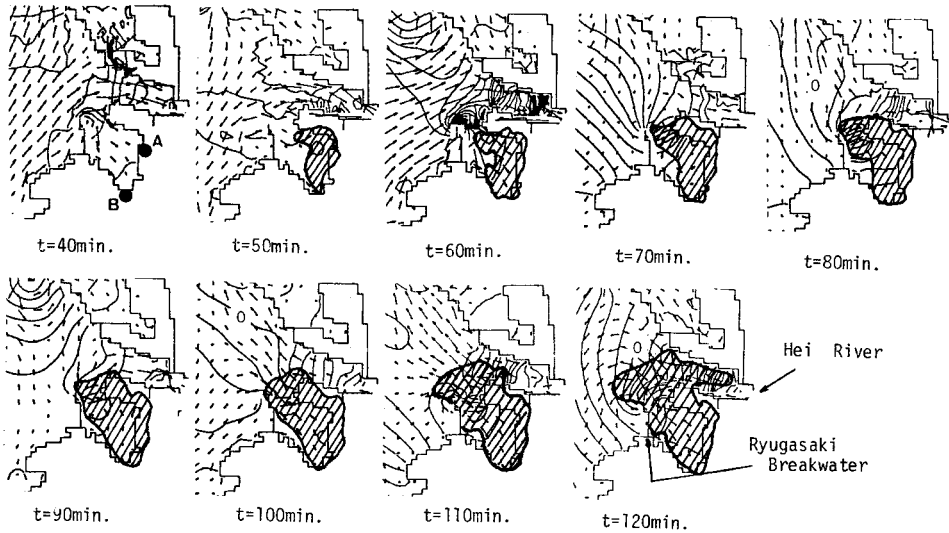


Fig. 11 Computed oil slick distribution.

線部分が油の拡がり範囲である。

津波発生後40分で津波の第1波峰は閉伊川河口からのびた藤原地区防波堤付近まで達している。しかし、この時刻では宮古港埠頭の津波の水位は防油堤天端を越えておらず油の港内への流出は始まっていない。Fig. 11のA, B点は石油タンクの位置を示す。

油の港内への流出は津波発生後42分頃から始まる。最初は押し波のため陸上に向かって流出するが、次の引き波により港内に流される。

津波発生後70分になると、油の拡がり宮古港壱崎防波堤の先端あたりまで達する。100分後では防波堤の開口部を越え、湾中央に向かって一層広範囲に拡がっている。また、110分後からは閉伊川上流へ向かう流れに乗り拡がっていく。

油の拡がり速度は、宮古港壱崎防波堤先端の開口部で津波の流れに乗ったときが最大で2.5 m/sに達する。しかし、津波の転流により引き戻されたりするので、長時間にわたり平均すると10~25 cm/s程度である。

Fig. 12に油の拡がり長さや面積の時間変化を示す。

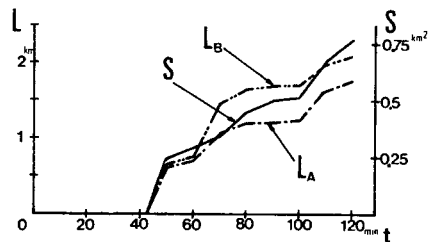


Fig. 12 Computed area and maximum lengths of oil spread.

$L_A$ ,  $L_B$  は石油タンク A, B からの最大拡がり長さ,  $S$  は拡がり面積を表わす. 計算は津波発生後 120 分まで行ったが, 油の拡がり面積はただか 0.8 km<sup>2</sup> である. 実用的には, もう少し長時間にわたる計算が必要となるう.

## 5. 結 論

本研究では, 津波による油の拡がりに関する数値計算法の検討を行ったが, その主要な結論を列挙すると次のとおりである.

- (1) 油の運動の計算は, 式 (1)~(3) と付帯条件 (6), (7) を用いて差分法で安定に計算ができる.
- (2) 油と水の間の抵抗係数としては  $f=0.2/R_e$  を用いればよい.
- (3) 本計算では, 水流の乱れによる拡散を一切考えていないが, 油層が薄くなる場合には拡がりの重要な因子となるので今後何らかの工夫を要する.
- (4) 本計算法を現実問題へ応用する場合には, 津波の水流以外に津波来襲時の風, 気温等の気象条件が油の拡がりに重大な影響を及ぼすものと考えられる. 今後これらの取り扱い方法を検討する必要がある.

謝 辞: 本研究をまとめるにあたり, ご指導, ご助言をいただいた東北大学工学部 首藤伸夫教授に謝意を表わす. また, 貴重な実験データを提供していただいた工業技術院中国技術試験所 埜口英昭氏に感謝する. なお, 本研究の一部は文部省科研費 (代表者: 東京大学工学部 堀川清司教授) によって行われた.

## 参 考 文 献

- 1) Fay, J.A. : The spread of oil slicks on a clam sea,

Plenum Press, 1969.

- 2) Abbot, M.B. : On the spreading of oil fluid over another, *La Houille Blanche*, Nos. 5, 6, 1961.
- 3) Hoult, D.P. : Oil on the sea, *Annual Review of Fluid Mech.*, Vol. 4, 1972.
- 4) Fannelop, T.K. and Waldman, G.D. : Dynamics of oil slicks, *AIAA J.*, Vol. 10, No. 4, 1971.
- 5) Buckmaster, J. : Viscous-gravity spreading of an oil slick, *J. Fluid Mech.*, Vol. 59, 1973.
- 6) Warluzel, A. and Benque, J.P. : Un modele mathematique de transport et d'etatement d'une nappe d'hydrocarbures, *Comptes rendus du colloque, IAHR*, 1981.
- 7) Ambjörn, C. : An operational oil drift model for the Baltic, *Comptes rendus du colloque, IAHR*, 1981.
- 8) 後藤智明・小川由信 : Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大河川研報, 1982.
- 9) 首藤伸夫・大野 稔 : 石油の拡がりの実験, 第 24 回海講論文集, 1977.
- 10) 埜口英昭・早川典生・橋本英資・山崎宗広 : 海上に流出した油の拡がりについて, 第 26 回海講論文集, 1979.
- 11) Suchon, W. : An experimental investigation of oil spreading over water, *MIT Rept.*, 1970.
- 12) 埜口英昭・山崎宗広 : 海面上に連続して放出する油の拡がり, 第 26 回水講論文集, 1979.
- 13) 後藤智明 : 津波による木材の流出に関する計算, 第 30 回海講論文集, 1983.
- 14) Kanamori, H. : Focal mechanism of Tokachi-oki Earthquakes of May 16, 1968, Contortion of the lithosphere at a junction of two trenches, *Tectonophysics*, Vol. 12, 1971.
- 15) 羽鳥徳太郎 : 東北日本太平洋側における津波の波源, 地震, Vol. 27, 1974.

(1984. 9. 13・受付)