

津波の陸上遡上域における油・水輸送問題の数値実験

岩渕洋子¹・越村俊一²・今村文彦³

津波の被害は、海水の氾濫によるものに加え、港での可燃物流出が大規模延焼火災を引き起こすといった複合的な被害も報告されている。しかしながら従来は、過去の事例や、津波氾濫特性と港湾施設の状況から、被害を概略的かつ定性的に類推するにとどまっております、実際に可燃物の流出を動的に考慮した被害推定法は少ない。著者らは、水と油の相互作用を考慮した2層流モデルを開発し、津波によって運ばれる重油の動的解析の基礎的検討をおこなった。具体的には、津波遡上域での油層の移流状況について、水・油の界面抵抗や2層の密度比を変化させて観察し、実現象を安定かつ良好に再現するための課題と展望を示した。

1. はじめに

エネルギー集積地としての臨海都市部では、単なる津波の浸水による被害に加え、船舶などの漂流物や可燃物の漏洩等により複合・連鎖的に発生する被害が懸念されている。例えば、1964年に発生したアラスカ地震津波と新潟地震津波では、タンクから漏洩した石油が大規模延焼火災を引き起こし、津波被災地は壊滅状態となった。津波と可燃物漏洩の複合被害の特徴は、延焼面積を大きくすることであり、津波が流出した重油を移流・拡散させるためである。港湾は地域の経済、物流の拠点であり、津波複合被害を軽減するためにも、漂流物となり得るものに対して港湾全体での防災戦略構築が求められている。しかしながら従来は、過去の事例や、津波氾濫特性と港湾施設の状況から、被害を概略的かつ定性的に類推するにとどまっております、実際に可燃物の流出・拡散を動的に考慮した被害推定法は少なく、複合災害についてはその被害過程が明らかになっていない。

著者らは、上記問題意識に立脚し、水と油の相互作用を考慮した非線形長波式に基づく2層流モデルを開発し、津波の陸上遡上過程における油・水の輸送問題を数値実験により検討する。本稿では、津波遡上域での油層の移流状況について、水・油の界面抵抗および2層の密度比に着目して、油層の移流状況を分析する。また、漏洩油に対する現状の防護策である防油堤を考慮し、堤内に滞留する漏洩油に津波が来襲した場合を想定した数値実験を行ない、実際の現象を再現するための課題と展望を示す。

2. 津波に伴う油類の移流拡散

津波遡上域に漏洩した油は、図-1のように、水上に浮遊して輸送される。図-1で示す壁に残る油の痕跡からは、水と油が層をなして市街地へ流れ込んだことを推定できる。ただし、水深が逐次変化するため、痕跡の厚さが油層の厚さではない。このような形態を想定し、適切なモデルを選定する必要がある。本研究では、従来の粒子モデルや後藤(1985)のモデルよりも高精度に再現可能であり、層厚を表現し得る、水・油2層流モデル(岩渕ら, 2005)を選択し、これを津波遡上域における水・油の輸送問題に適用するための改良を行う。

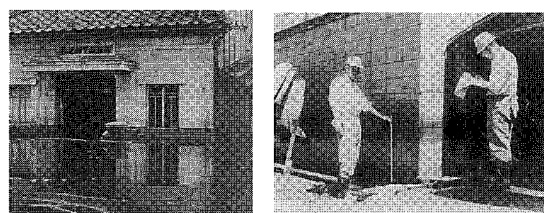


図-1 1964年新潟地震津波における市街地への油類の流出状況
左：浮遊油に没する建物（山の地下地区）
右：ブロック壁に残された油の痕跡

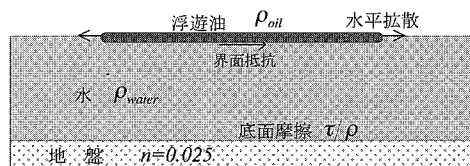


図-2 2層モデルの概略

水・油2層流モデルにおいて、各層の境界面に作用する力などを図-2に示す。支配方程式(1)から(6)は各層で非線形長波理論を適用し、各層の運動方程式中には界面抵抗の項を付加して運動量を受け渡す。下層の影響は界面の変化として上層の連続式に取り入れられ、一方、

1 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正会員 博(工) 東北大学助教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター
3 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

上層の影響は圧力として下層の運動の式にあらわれる。

上層（油層）の支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\eta_1 - \eta_2) + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \\ - INTF_x = \nu \left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_1^2}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \\ - INTF_y = \nu \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

下層（水層）の支配方程式

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + g D_2 \\ \left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho_2} + \alpha INTF_x = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_2^2}{D_2} \right) + g D_2 \\ \left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho_2} + \alpha INTF_y = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} INTF_x = f_{inter} \bar{u} \sqrt{u^2 + v^2} \\ INTF_y = f_{inter} \bar{v} \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、添字の1, 2はそれぞれ上層, 下層での値であることを示し, h : 水深, η_1 : 初期油層表面からの変化量, η_2 : 静水面からの水位変化量, M, N : x, y 方向の流量フラックス, ρ : 密度, $\alpha = (\rho_1/\rho_2)$: 密度比, D : 全水深, g : 重力加速度, τ/ρ : 底面摩擦力, $INTF$: 界面抵抗力, ν : 水平拡散係数, f_{inter} : 界面抵抗係数を示す。また, 式(5), (6)の底面摩擦力に

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_x}{\rho} &= \frac{g n^2}{D^{3/7}} M \sqrt{M^2 + N^2} \\ \frac{\tau_y}{\rho} &= \frac{g n^2}{D^{3/7}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

で表される Manning 粗度の公式を用いる。

ここで, ν や f_{inter} などの係数のパラメータスタディは十分に行なわれていない。

3. 断面2次元仮想数値波動水槽における計算

ここでは基礎検討として, 断面2次元の仮想数値波動水槽で原油の移流拡散の再現を試みた。図-3に水槽の概略と境界条件を示す。

本モデルで最も重要な油層底面に働く界面抵抗力は, 後藤(1985)と同様に, 相対速度の2乗に比例すると仮定し, 本間ら(1980)の密度流の式を適用する。界面抵

抗係数 f_{inter} には, 0.01 を用いた。この値は, 埜口ら(1986, 1991)の検討においてもその妥当性が報告されているものである。ただし, 油層の先端を含めた油・水界面における抵抗係数を平均的なものと仮定する。

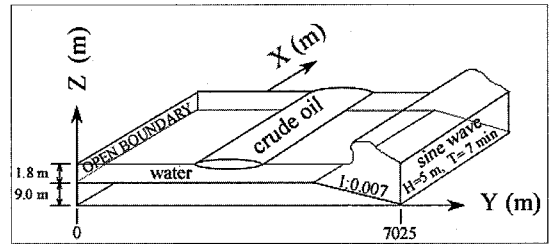


図-3 断面2次元仮想波動水槽と境界条件

本モデルにおいて油層の拡がりの非定常数値解析を安定におこなうためには, 非線形長波の波動方程式に対する C. F. L. 条件に加えて, 移動境界である油層先端での安定条件が必要である。特に, 上層となる油が拡散とともに薄くなってゆくため, 実現象を再現するためには長時間の安定性と精度を確保する必要がある。ここでは, 津波遡上域での油層の移動境界問題処理手法として, 松富ら(1990)が遡上先端で検討をおこなった打ち切り水深の考え方を導入し, 油層の打ち切り水深を, 連続の式, 運動の式においてそれぞれ 1.0×10^{-3} (m), 1.0×10^{-5} (m) とした。

図-3の断面2次元の仮想数値波動水槽の大きさは $6,525 \text{ m} \times 7,025 \text{ m}$ とし, 1:0.007の斜面を遡上した津波が油層に入射する場合を考える。下層の水流は, 水槽最右列 ($Y=7,025 \text{ m}$) の水位変化で与え, 振幅高さ $=5.0 \text{ m}$, 周期 $T=7.0$ 分の正弦関数とした。油層の厚さについては, 今回は基礎検討として安定に計算を実施することを優先するため, 初期値として 0.8 m と設定した。ただし, 流出初期の厚さについては, 防油堤の満水時に最大であると考えられ, 防油堤の損傷状況によっては油の厚さを 1 m 以上と仮定する場合もある。1964年新潟地震津波の事例では, 市街地に流れ込んだ後の重油の厚さは最大 0.3 m であった。表-1に計算条件を示す。

表-1 計算条件

水槽サイズ	$6,525 \text{ m} \times 7,025 \text{ m}$
格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 25 \text{ m}$
計算時間	700 秒 @ 0.1 秒

図-4に, 密度比 $\alpha=0.70$, 界面抵抗係数 $f_{inter}=0.01$ とした場合の計算結果を YZ 断面図で示す。津波第1波が油層を移動させる過程である 100 秒から 600 秒までを示す。200 秒では, 斜面を遡上し段波となって油層に入射しているが, 先端部の適切な処理を行なっているため,

油層の先端部は安定している。300秒以降は、この波の移動と共に油層は波の進行方向に運搬されている。津波入射前後を比較すると、油層先端（左側）は約1,800m移動している。

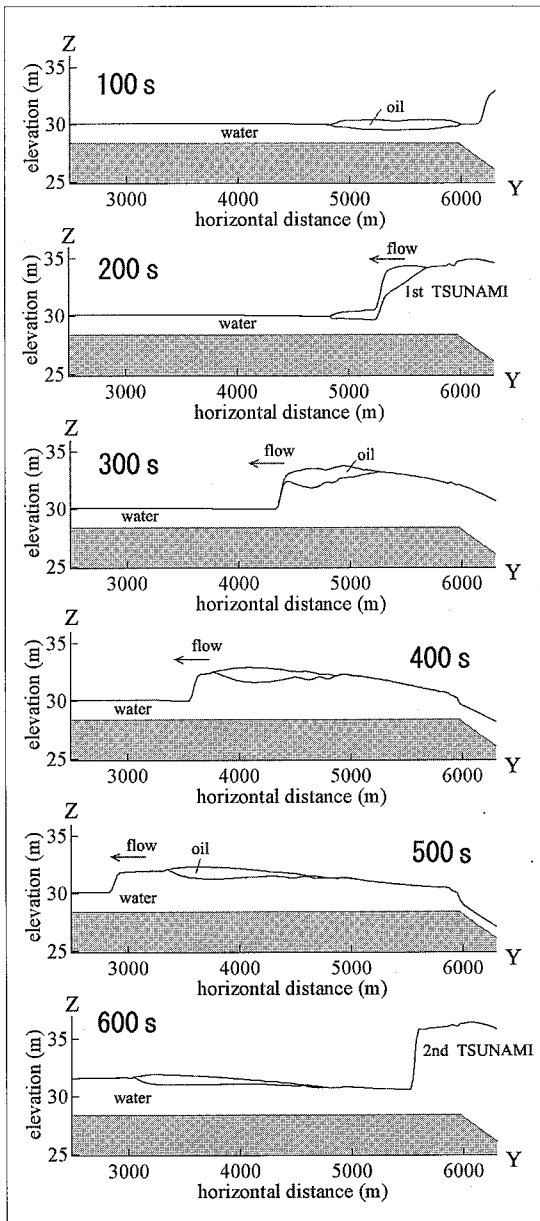


図-4 油層の移動距離
(密度比 $\alpha=0.70$, 界面抵抗係数 $f_{inter}=0.01$)

4. 密度比についての検討

臨海コンビナート施設で貯蔵される油類は原料から製品に至るまでさまざまである。ここでは、2層流モデルの油層の物性を置き換えた場合についての検討をおこな

う。表-2に臨海コンビナート施設で貯蔵されるおもな油類の比重を示す。これに従い、本モデルにおける密度比 α を0.60, 0.70, 0.80, 0.90 および1.00の5種類に設定し、油層の移流状況の差を観察した。図-5に津波第1波が入射した500秒経過後のYZ断面図を示す。油層の先端はいずれのケースにおいても安定している。次に、水と油の界面は、密度比が0.60, 0.70, 0.80では安定しているが、0.90以上の場合、油層の先端部が厚く、後端で緩やかに波打っているのが観察できる。津

表-2 燃料用石油製品の比重

	比重
ガソリン	0.65-0.75
灯油	0.76-0.80
軽油	0.79-0.85
重油	0.90-1.00
A 重油	0.83
B 重油	0.91

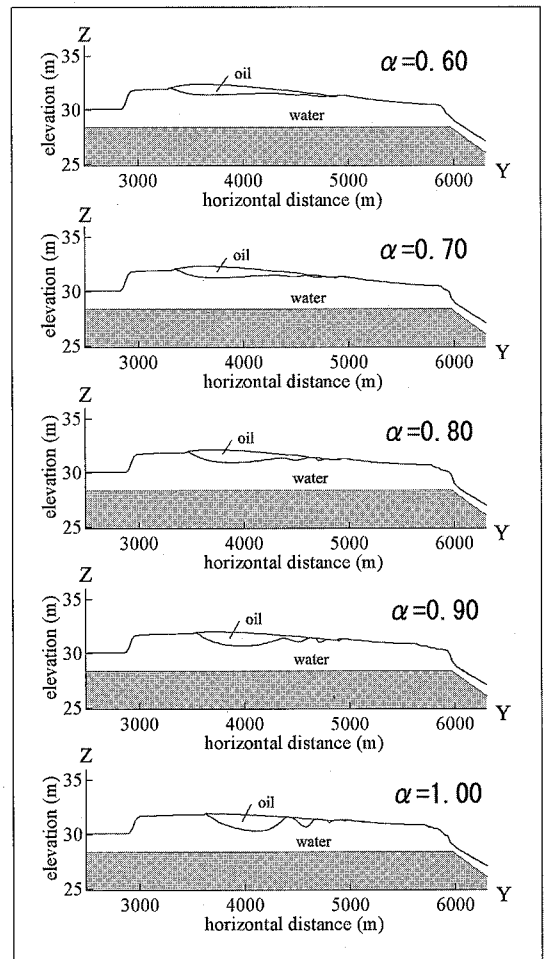


図-5 密度比 α の変化による油層形状の違い
(全て500秒経過後, 界面抵抗係数 $f_{inter}=0.01$)

波の進行方向への油層の移流量は、密度比が小さい程大きくなる傾向がある。

5. 界面抵抗についての検討

次に、油層の移流量を決定づける界面抵抗係数 f_{inter} について検討を行なう。実際の現象では、前述した、 $f_{inter}=0.010$ 以外にも想定されるため、界面抵抗係数の設定は、水理実験で得られた結果などを考慮して慎重に設定する必要がある。ここでは、0.01 以外に $f_{inter}=0.020$ と 0.005 に設定して数値実験を実施した。図-6 はいずれも津波第1波が入射した500秒経過後のYZ平面図を示し、それぞれの界面抵抗における、下層から上層への運動量の伝達状況と油層の移流距離が観察できる。 $f_{inter}=0.020$ と 0.005 を比較すると、油層の先端位置は約500mの差がみられる。界面抵抗が小さくなる程、より遠くまで油層が運搬されており、油層は薄く引き伸

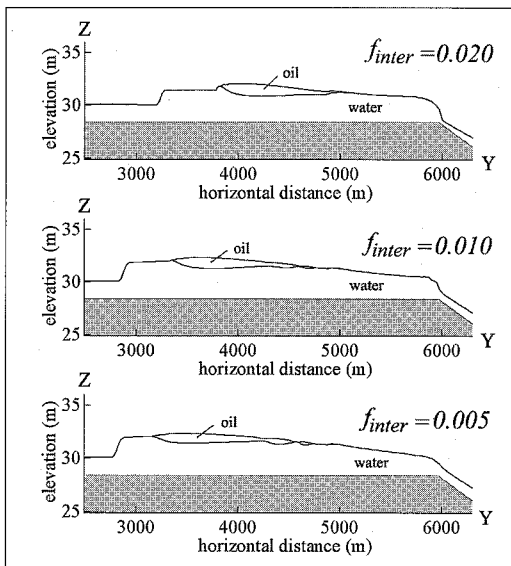


図-6 界面抵抗の違いによる移流量の差の比較
(全て500秒の波形、密度比 $\alpha=0.7$)

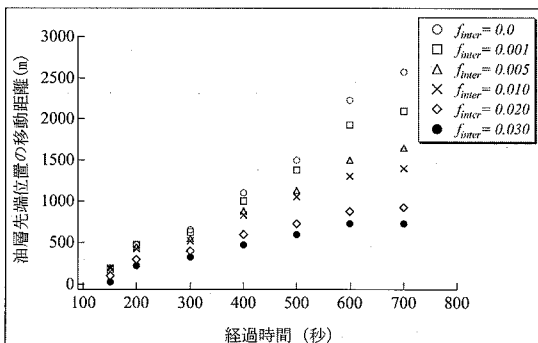


図-7 界面抵抗毎に示した経過時間と移流量の関係

ばされる傾向がある。図-7に同様の計算によって得られた、経過時間と移流量の関係を界面抵抗毎に示した。界面抵抗が油層の移動量に大きく影響を及ぼしていることを示唆している。

6. 防油堤を越流する油層の計算

次に、図-8に示すような、斜面直上に防油堤に見立てた壁で囲まれた貯水池(貯油池)を設置した。津波の入射条件はこれまでと同様のものを適用する。津波1波

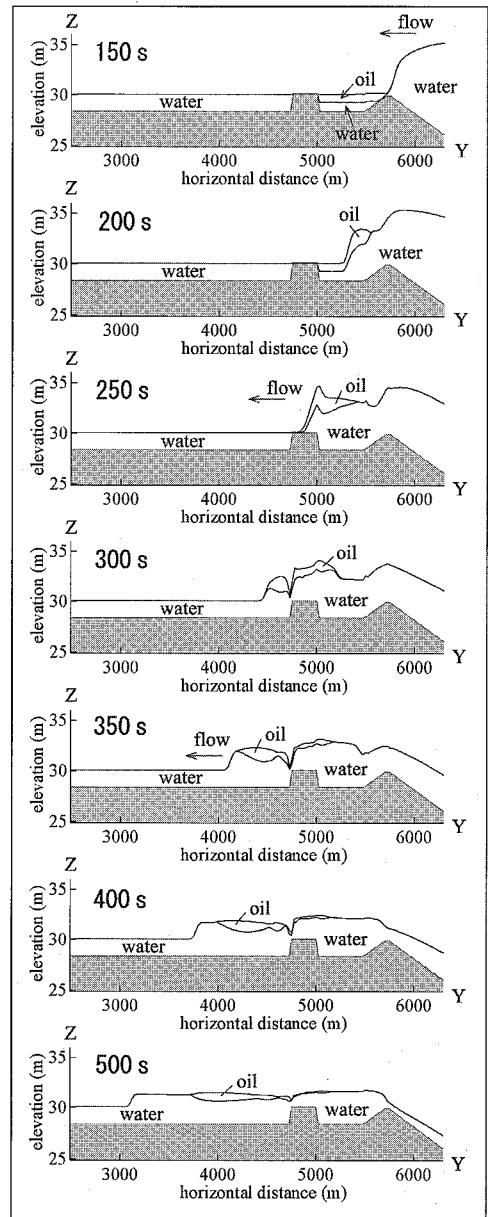


図-8 防油堤上を通過する津波と運搬される油層のシミュレーション ($f_{inter}=0.01$, $\alpha=0.7$)

は斜面を遡上し、100秒で油層に達している。200秒では油層を持ち上げ、300秒以降では、防油堤の外へ運搬している。

これら一連の過程において、計算の安定性が確保されている。防災上重要である油層の移動距離については、約1.5km先まで運搬されることが分かる。

図-8と同様の地形(防油堤あり)で、界面抵抗係数を変化させて、経過時間と油層先端位置の関係を図-9に整理した。界面抵抗係数が0.001から0.02の場合で、500秒経過後の移流量を比較すると、油層先端位置に約1,000mの差がある。このように、界面抵抗の値は、防油堤越流後の移流量、つまり複合災害が波及する領域に大きく影響することから、物性と界面抵抗は、既往の水理実験などに基づいて適切に設定することが、被害を見積る上で重要であることを示唆している。

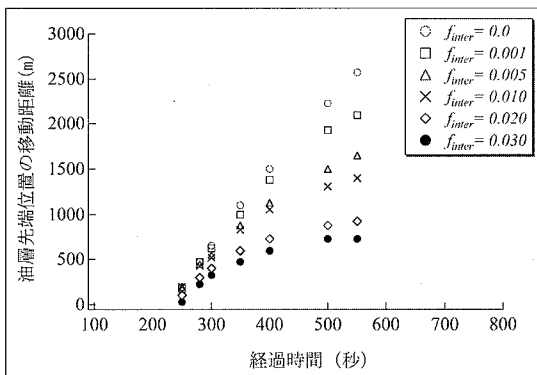


図-9 油層先端の移動距離と経過時間の関係
(防油堤を地形に考慮した場合)

7. ま と め

本稿では、断面2次元の仮想数値波動水槽で油類の移流拡散の動的解析をおこなった。得られた結論を以下に挙げる。

- [1] 油層の打ち切り水深を、連続の式と運動の式でそれぞれ $1.0 \times 10^{-3} \text{m}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ と設定したことによって、油層の移流を長時間、精度よく再現可能となった。
- [2] 水と油の密度比を、臨海コンビナートの漏洩油の場合に相当する、 $\alpha=0.60$ から 0.90 に設定し、油層の移流状況を比較した。水と油の界面は、密度比が 0.60 、 0.70 、 0.80 では安定しているが、 0.90 以上

の場合、油層の先端部が厚くなり、後端部で緩やかに波打つことがわかった。津波の進行方向への油層の移流量は、密度比が小さい程大きくなる傾向があることがわかった。

- [3] 界面抵抗係数 $f_{\text{inter}}=0.020$ と 0.005 とした場合を比較すると、油層の先端位置は約 500m の差がみられた。界面抵抗が小さくなる程、より遠くまで油層が運搬されており、油層は薄く引き伸ばされる傾向がある。界面抵抗が油層の移動量に大きく影響することが確認できた。今後は、計算による移流量の信頼性を高めるためにも、既往の水理実験から得られた結果との比較が必要である。

- [4] 防油堤を設置し漏洩油を滞油させた場合を想定した数値計算を実施した。津波が防油堤を越え、重油が防油堤外に溢れ出す過程を再現できた。この一連の過程において、数値計算の安定性が確保された。さらに、防油堤外に溢れ出し、約 1km 先まで油を運搬するという防災上重要な現象を明らかにした。

以上の結果から、臨海コンビナートにおける津波複合災害の推定手法の確立のための基礎的知見が得られた。今後は、1964年新潟地震津波での大規模油流出災害を例に、港湾域全体の複合被害の推定手法の提案を行っていく。

謝辞：この研究の一部は、科研費基盤(A)，No. 18201033の補助を受けた。また、本研究は、大林都市研究振興財団による助成によって行なわれた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 岩淵洋子・今村文彦(2005)：津波来襲による原油流出・拡散問題の整理と解析手法の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp. 301-305。
- 岩淵洋子・今村文彦・越村俊一(2006)：1964年新潟地震津波にみる港湾域での複合災害の実態と今後の課題，海岸工学論文集，第53巻，(印刷中)。
- 後藤智明(1985)：津波による油の拡がりに関する数値計算，土木学会論文集，No. 357，II-3，pp. 217-223。
- 埜口英昭・平野宗夫・高杉由夫(1986)：水面上に流出した油の拡がりの解析，第30回水理講演会論文集，pp. 739-744。
- 埜口英昭(1991)：水面上に流出した油の拡がりに関する研究，中国工業技術試験所研究報告，第9号，pp. 28-30。
- 本間 仁・林 泰造(1980)：続水理学，丸善出版，pp. 97-98。
- 松富英夫(1990)：仮想水深法，打ち切り水深法による陸上氾濫計算の精度に関する一考察，東北地域災害科学研究，第26巻，pp. 63-65。