

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

岩渕洋子*・今村文彦**

浸水計算による被害推定は、「人・家屋被害」の推定に限定されており、港湾の高度な生産活動地域（工業製品の輸送拠点、エネルギー貯蔵施設）での被害は十分に推定されていない。1964年のアラスカ地震津波、新潟地震津波では、タンクから漏洩した油が津波遡上によって拡がり、その油が火災を助長したため、津波被災地は壊滅状態となった。本研究では、津波遡上域における油流出被害の実態を整理し、数値モデルとしての課題と適用条件をまとめた。その上で、時間及び空間スケールを考慮した適応性の高い各種モデルの分類を行い、現状の精度と課題を検討した。さらに、遡上流れによる漏洩油の拡がりを予測する2層流モデルの基礎的な検討を行なった。

1. はじめに

高度に利用された港湾地域における重大な津波災害として、可燃物の流出による複合被害が挙げられる。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油が津波遡上によって拡がり火災を助長したため、津波被災地は壊滅状態となった。特に新潟地震では、第2火災が発生した構内一帯では、数10 cm 浸水し漏洩油が広範囲に浮遊しており、この油が出火直後の火勢を強めた。津波と可燃物漏洩の複合被害の特徴は、火災面積を大きくすることであり、一旦可燃物に引火した場合には、油拡がり領域全体が焼失してしまうほどの被害を及ぼし得ることである。沿岸域の高度利用が進むなか、このような複合災害のリスクは年々増加しているが、被害実態の整理と被害拡大メカニズムの解明が遅れているのが現状である。

本稿では過去の油流出被害の実態を整理し、被害拡大のメカニズムを明らかにするためのモデル構築の課題と適用条件をまとめ、その上で、油の拡がりの時間及び空間スケールの関連で、既往モデルの適用範囲の分類を行い、現状の精度と課題を検討した。

2. 流出災害の実態整理

油流出災害をもたらした津波の事例として、油タンクからの大規模流出被害のあった1964アラスカ地震津波と同年の新潟地震津波がある。表-1 にその被災地と津波高さを示す。

表-1 津波の来襲に供なって発生した油流出事例

	被災地	震 度	津 波
アラスカ地震 1964.3.27(M9.2)	Whittier		10-13 m
	Seward		遡上高10 m
新潟地震 1964.6.16(M7.5)	新潟西港および 信濃川沿岸一帯	5	海岸：T.P. +3.0 m 港内：+1.3~2.4 m

* 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
 ** 正 会 員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科付属災害制御研究センター

(1) 1964アラスカ地震津波

Whittier では、地震と津波によって13基のタンクが壊滅的な被害を受け、うち11基は津波によって数 m 移動した。タンクは津波によって転覆し燃えた。油は燃えながら陸上や湾内にも流れ、その後の爆発はタンク施設全体を巻き込んだ。ガソリンタンク2基、灯油タンクとディーゼル油タンク各1基が焼失し、火災エリアは8 km²、流出油の総量は2.8×10⁴klであった。

Seward では、地震動によるタンクのパイプやバルブの損傷で油が流出した。油タンクが津波を受けて傾き、海に滑り込み、約70 m の火柱があがった。津波が炎を運び、他のタンクや油槽列車爆発の引き金となったため、数日間の大火災へ拡大し街は全焼した。

(2) 1964新潟地震津波

新潟地震による津波は日本海沿岸に到達し、油流出災害の舞台となった新潟市の海岸部では、T.P. +3.0 m 前後、港内：+1.3~2.4 m であった。信濃川の護岸は地震発生と共にほとんど崩壊しており、河口部沿岸の低地帯への侵入ルートとなった。図-1 に浸水地域と油流出地域を示す。臨港埠頭の被害は潰滅的で、C、D 埠頭の護岸は破壊され、津波の侵入によって倉庫群は完全に水

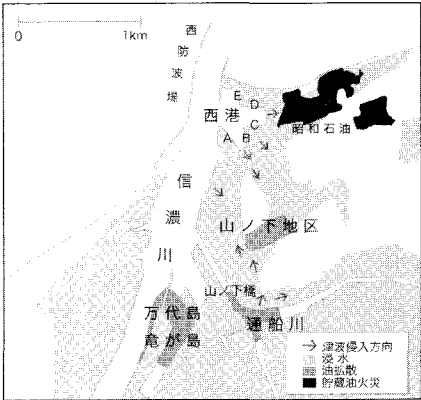


図-1 新潟市内での浸水と油流出被害

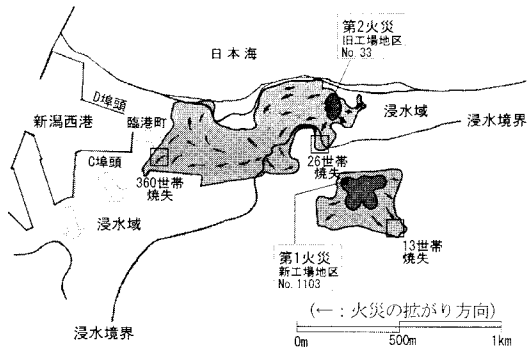


図-2 新潟西港からの浸水域と昭和石油の火災

没し、さらに背後の低地面に侵入して溜水した。新潟市の浸水域は56,000,000 m²に及んだ。

新潟市内の昭和石油では図-2のように、油流出火災が2件報告されている。図からも分かるように、第1火災の延焼には、津波は無関係である。第1火災は地震直後(13:02)、タンク No. 1103で始まり、周辺は地震動によるタンク上部からの油漏れがあり、30,000 kl タンク3基と45,000 kl タンク2基が焼失した。その後の火勢の強まりで防油堤の一部が崩壊し、油は低地へ広がった。

一方、地下水噴出と津波によって、低平地は壊滅的な被害となっていた。山ノ下地区(図-1)は、地震動で100基の油タンクのパイプが損傷し、重油が流出していた。さらに、信濃川河口の新潟西港から遡上した津波と液状化による浸水に助長され、油はさらに広がった。

旧工場地区(図-2)では、地震動のためにNo.33のガソリンタンク下部の配管が接続部において脱落して、タンク側壁に直径約10 cmの孔が開き、2 mの高さに噴き上げ、防油堤の破損部分から流出して付近一帯に広がった。地震後5時間の時点で浸水(地下水と津波)深さが30-50 cmとなっており、油が広域に拡大していた。No. 33から20-30 m離れた地点で第2火災が発生したが、浮遊油に着火したため火災が拡大した。火種は、倉庫内に貯蔵中の金属鉄粉の海水との接触による自然発火であった説が有力である。地震後15時間後に図-2のように延焼エリアが迫っていた臨港町一帯では、西港からの津波によって50-100 cmの浸水と油浮遊があり、民家約300棟が全焼する主要因となった。第2火災による焼失区域面積は235,000 m²、焼失油量は32,380 klであった。

(3) 津波遡上に伴う延焼火災の発生過程

上記の事例から、津波遡上に伴う延焼火災の発生過程を表-2に整理する。

津波の作用として、①漏洩油を拡散させる。②タンクを転覆させ火災となる。③火種(延焼油)を移動させる。の3つがある。本研究で着目する事象は主に①である。

津波来襲後に着火すると、津波遡上による浸水域が広

表-2 津波遡上の作用

[アラスカ]	
地震⇒油漏洩	⇒津波遡上⇒油拡散⇒着火⇒延焼油移動
	⇒津波遡上⇒タンク転覆+着火⇒延焼油移動
[新潟第2火災]	
地震13:02⇒油漏洩	
	⇒津波遡上13:35~18:50(10回以上)⇒広域な油拡散⇒着火18:00

範囲に及んでいた場合は、油も広域に拡がっており、延焼速度は通常の火災よりも早く、風向きと無関係に火面が広がる。着火後に未だ津波遡上が継続すれば、燃えている油が津波と共に陸域や海上へ運ばれる。

(4) 津波による油流出・拡散の特徴

表-3に現象を理解する上で重要な事項をまとめた。Whittierと新潟の事例に関しては、首藤(1987)が、簡略法と後藤(1985)の数値計算結果によって拡がり面積の考察を行っている。油流出の二次災害の実用的な解決を図るには、それらの推移してゆく地域が問題となり、流れが存在することにより、「非等方的な拡がり方」となる上、地形の影響などにより複雑な動きを示すため、拡がり現象と拡がり地域を予測する実用的な数値計算法の開発が必要となる。油の拡がりを予測する数値モデルは、支配力領域に応じて図-3のような適用範囲がある。事例から油の存在ステージを整理し、最適なモデルの検討を行なう。

「Whittier」の事例においては、引き波は着火した油を海上へ運んだ。燃えながら湾内へ移動したことから推測して、油はある程度の厚さがある重力慣性領域または重力粘性力領域であったと推測できる。

次に、1964年新潟地震津波では、遡上による低平地への浸水領域が広く、また、河川へも流出しており浮遊油の拡がり(図-1)過程は、図-3のような4つのステージを経過していったであろう。

「新潟山ノ下地区」での火災は報告されていないが、100基の油タンクからの油が流出拡散しており、火種があれば大火災となる非常に危険な状態であった。図-1から分かるように、津波遡上流れと広域な浸水は油拡散を助長した。浮遊油は着火しなかったため、拡がりの最終段階である表面張力の支配領域まで推移した可能性もある。油膜が水上にレンズ状の断面をもって安定すると考えると、油-水界面に働く表面張力 σ の値が最終厚さを決定し、 σ が正である限り、油膜は拡がりつづける(首藤, 1975)。山ノ下地区における流出災害は、今後他の地域で起こりうる災害に備えるためにも、検証する価値がある。比較検討資料としては、写真と証言記録程度であるが、遡上水流による山ノ下地区での油の拡散現象を明らかにすることが必要である。

「新潟旧工場付近」の油の拡がりでは、第2火災の発生(18:00)後の初期延焼は、「タンク No. 33の漏洩油

の延焼」であり、その油の拡がりには津波による浸水が関与している。18:30までの延焼エリアは図-2の旧工場地区の縦楕円内6,650 m²である。

地震発生と漏洩開始(13:02)から第2火災発生(18:00)までは約5時間であり、一方、津波は13:35~18:50ころまで10回以上断続的に押し寄せた。13:40までにすでに発火地点付近で10 cm程度の浸水があり油が浮遊していたが、第一波来襲は13:35であるから、初期浸水の大半は、液状化による地下水の噴き出しによるものであった可能性もある。図-2で示す通り、No.33タンクは津波の侵入した西港からは1 kmほど東に位置しており、13:40の浸水に関して、遡上流れの浮遊油拡散への寄与度は明らかではない。しかし15:00頃になっても旧工場エリアの浸水高の増加が確認されており、津波は内陸1 kmまで影響し、断続的に来襲した津波による浸水域の拡大は着火前の油の拡がりに寄与していたことを示す。

No.33タンクの流出における油の厚さに関して、北川(1976)は、15時頃の状況からの推測として、流出した964 klのガソリンが、東西約200 m、南北約150 mの冠水面30,000 m²上に拡散したと仮定し、油厚3 cm程度としている。経過時間や状況から考えて、No.33タンクの流出における油の拡がりに関していえば、重力慣性領域または重力粘性力領域であったといえる。水流の状況や油の拡がりに対する津波の寄与度は、今後著者らの陸上遡上計算によって明らかにされるであろう。

(5) モデルの適用性の検討

油の流出開始から港湾内での浮遊までは、重力慣性領域または重力粘性力領域であり、油層厚とそれに依存する力が重要である。防災対策上、津波遡上域の油の拡がり、は、広域な海洋での潮流による拡がりのように、流れや風による油の追跡計算をするだけでなく、油厚の変化も考慮されるべきである。図-3に、体積Vの油が瞬間に放出され、静水中において円形を保ちながら拡がると仮定した場合の油の拡散半径と支配力領域を示す。

後藤(1985)によるモデルは、重力慣性領域のみに適用されている。粒子モデルは、適用範囲は広く計算労力も少ないが、津波遡上による油の拡がりにおいて重要な油の層厚や津波との相互作用を考慮できないという問題があるため、遡上域では推定精度が大きく低下すると思われる。油の拡がり時間として10時間以内が沿岸防災上重要であるため、本研究では、最も適用性の高い2層流モデルを採用する。このモデルは重力粘性力領域まで適用可能なモデルである。さらに、拡がりのファクターである津波による油の拡散、津波と油の相互作用をより正確に取り入れることができるので、有用性が高い。

一方、拡散が数日の時間スケールに及んだ場合、また

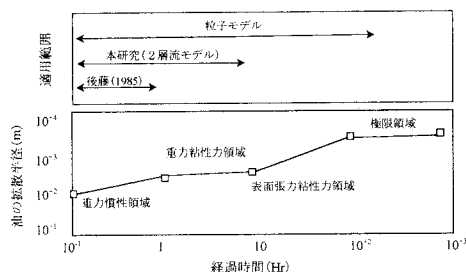


図-3 油の拡がりにおける4つのステージ

表-3 油の拡がりを予測する各モデルの限界

	適用時間	津波による移流	津波による拡散	津波との相互作用	層厚変化
粒子モデル	10 ⁻¹ ~10 ²	△	△	△	×
後藤(1985)	10 ⁻¹ ~1	○	×	×	○
2層流モデル	10 ⁻¹ ~10	○	○	○	○

○:よく再現できる, △:再現できる, ×:再現できない

空間的には港湾内外の海上まで広域に拡がった場合には、表面張力-粘性力領域であり油厚は薄く、Yapa (1994)のランダムウォーク法がより適応性が高い。ただし、設定粒子数と流出油量には物理的普遍的な相関関係が示されていない点が問題である。以上より、津波遡上域に限定すると、拡がりの予測には2層流モデルが有効である。

3. 津波に伴う原油の拡散

(1) 原油の拡散モデル

遡上域に漏洩/浮遊した油の存在形態として様々なパターンを仮定し、各パターンでのモデルが必要である。本稿では、この予備研究として、水上に浮遊して移動する油層というひとつのパターンを選択し、非線形分散波理論の2次元2層流モデル(後藤, 2001; 松本ら, 1998)を用いて、油層の移流拡散の数値計算を行なった。2層流モデルの支配方程式は、Eulerの式を各層毎に積分して、界面及び海表面での境界条件を考慮して求める。この際長波近似を仮定して鉛直加速度を0とすると式(1), (2)が得られる。図-4に座標系と変数、各面に作用する力を示す。

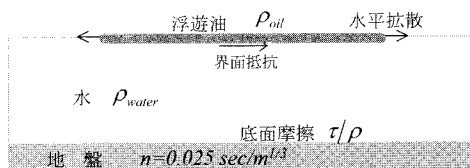


図-4 モデルの概略

上層(油層)の支配方程式

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

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - INTF_x$$

$$= \nu \left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_1^2}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - INTF_y$$

$$= \nu \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (3)$$

下層（水層）の支配方程式

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

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + g D_2$$

$$\left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + \frac{\tau_s}{\rho_2} + \alpha INTF_x = 0 \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_2^2}{D_2} \right) + g D_2$$

$$\left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho_2} + \alpha INTF_y = 0 \dots \dots (6)$$

$$INTF_x = f_{inter} \bar{u} \sqrt{\frac{u^2}{u^2} + \frac{v^2}{v^2}} \dots \dots \dots (7)$$

$$INTF_y = f_{inter} \bar{v} \sqrt{\frac{u^2}{u^2} + \frac{v^2}{v^2}} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、添え字の 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 : 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, $DIFF$: 水平拡散項, ν : 水平拡散係数, f_{inter} : 界面抵抗係数を示す。

また, 水平方向の流速分布は水深方向に一樣と仮定しており, x, y 方向の流量フラックスは x, y 方向の流速を用いて次のように表現される。

$$M = \int_{-h}^{\eta} u_0 dz = \bar{u}_0 D$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v_0 dz = \bar{v}_0 D \dots \dots \dots (8)$$

また, 式 (5), (6) の底面摩擦力に

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{g n^2}{D^{3.7}} M \sqrt{M^2 + N^2}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{g n^2}{D^{3.7}} N \sqrt{M^2 + N^2} \dots \dots \dots (9)$$

で表される Manning 粗度の公式を用いる。

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, 上層の影響は圧力として下層の運動の式にあらわれている。

(2) 断面 2 次元モデル水槽における計算

ここでは基礎検討として, 2 層流モデルを用いた原油の拡散の数値実験を行い, 4000 m × 40 m の仮定の断面 2 次元モデル水槽で原油の移流拡散の再現を試みた。図

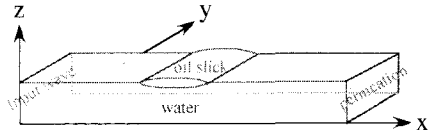


図-5 モデル水槽の概略と境界条件

表-4 計算条件

時間間隔	$\Delta t = 0.01$ 秒
格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 2$ m
入力波形	水槽最左列に正弦関数 (周期 $T = 2.0$ 分, 振幅 = 2 m)
境界条件	壁条件 (全反射, 非透過)

-5 に水槽の概略と境界条件を示す。水深は 100 m で油層は水槽中央部に厚さ 1.0 cm のものを設定した。浮遊の形態は後藤 (1985) と Fannelop・Waldman (1972) を参考にした。表-4 に計算条件を示す。

拡散を見積もる上で重要なファクターとなる界面抵抗係数 f_{inter} は, 後藤 (1985) の B 重油 (比重 0.91, 動粘性係数 43cSt) の値 $f_{inter} = 0.02$ を用いた。埦口ら (1986) においても界抵抗係数 f_{inter} がこのオーダーのとき計算値と実験値の傾向がよく一致することが報告されている。

油膜の先端を含めた油-水界面における抵抗係数を平均的なものと仮定する, 下層の水流は最小の X 座標でのメッシュ列の初期条件として与えられる。表-4 に示すように, 水位変化は振幅高さ = 2 m, 周期 $T = 2.0$ 分で与えた。油層の先端部には, 移動境界問題として, 打ち切り水深と仮想水深を用いた。

4. 計算結果と考察

表-5 に示すように, 界面抵抗係数を固定し, 油層の水平拡散係数 ν を変化させた。図-6 に油層付近の側面図を連続的に示す。水面上に浮遊する油層先端部の移動境界を工夫することで, 現地への適用計算に必要な 1 時間以上の安定した計算を行なうことができた。油層は入射波による水深変化に従い変動し, その振幅は水平拡散項を与えた場合の方が大きくなった。しかし, Case2 では, 拡散係数を与えたにもかかわらず, 油層の拡がり方が確認できなかったため, 界面抵抗係数や水平拡散項についてさらなる検討が必要であることが示された。

表-5 パラメータスタディ

	油層の水平拡散係数 ν [m ² /s]	Δt (s)	界面抵抗係数 f_{inter}
case1	0	0.01	0.02
case2	0.001	0.0001	0.02

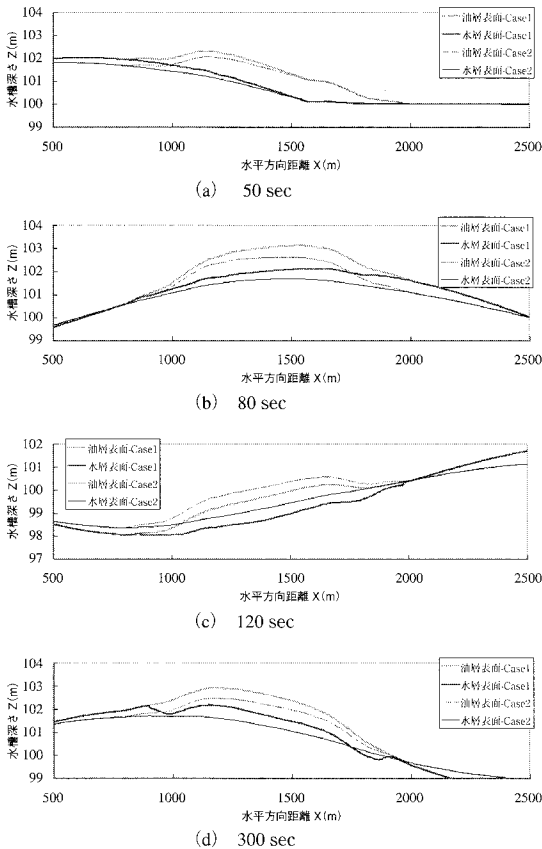


図-6 油層付近の側面図

5. ま と め

本研究では、津波遡上域における油流出被害の実態を整理し、数値モデルとしての課題と適用条件をまとめた。得られた結論を以下に列挙する。

[1] 油の流出源としては、地震動により破損したタンクやパイプから油が漏れた例が最も多い。流出開始後数分から数時間の浮遊の過程については、遡上等による数10 cmの浸水深領域で油が浮遊拡散しており、その油量、拡がり範囲の定量的な記録が残っている。これらから支

配力領域を予測したところ、アラスカ Whittier と新潟 No.33 タンクの油は、重力慣性力領域と重力粘性力領域であった。流出油量と拡がりの様相、時間的経過での油特性の変化を把握できた。この支配領域に関しては、油層厚とそれに依存する力が重要であるため2層流モデルが有効であることが示された。

[2] 断面2次元仮想モデル水槽において、油層先端部での移動境界を工夫することによって、水面上を浮遊する油層の変化を安定に計算できた。水平方向の拡がりについては、さらなる検討が必要であることが示された。

[3] 今後は1964年新潟地震津波による油の拡がりを検証していくが、浸水に関しては液状化の影響が入ってくること、18:00-19:00の遡上流れと浸水による油拡がりの推定では、火面に油が供給されるため、油拡がりの推定精度は低下することが予測できる。第一段階として、13:50から18:00までの遡上による油の拡がりに取り組むことが現実的である。

謝辞：新潟地震津波による油の拡がり領域（図-1）を調査するにあたり、新潟市防災課に協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 後藤大地 (2001)：土石流による津波発生機構に関する基礎検討，海岸工学論文集，第48巻，pp. 321-325.
- 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，第357，II-3，pp. 217-223.
- 埜口英昭ら (1986)：水面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.
- 北川徹三 (1976)：新潟地震における石油精製工場第1火災及び第2火災の原因，安全工学，Vol. 15，No.5，p. 17-330.
- 首藤伸夫 (1975)：海での石油の拡がり，第3回環境問題シンポジウム講演集，p. 82-87.
- 松本智裕ら (1998)：土石流による津波発生モデルの開発，海岸工学論文集，第45巻，pp. 346-350.
- Iwabuchi Y., F. Imamura: Study on the oil spread and fire caused by a tsunami, Asian and Pacific Coasts, September, 2005. (投稿中)
- Fannelop, T.K. G.D. Waldman (1972)：Dynamics of Oil Slicks, American Institute of Aeronautics and Astronauts Journal, Vol.10, No.4, pp. 506-510.
- Yapa, P.D. (1994)：Oil Spill Processes and Model Development, J. Adv. Mar. Tech. Conf., Vol. 11, pp. 1-22.