

II-63

水・油2層流モデルの遡上域への適用

東北大学大学院 学生員 ○岩淵洋子
東北大学大学院 正 員 越村俊一
東北大学大学院 正 員 今村文彦

1.はじめに

津波による二次的被害のうち、可燃物の漏洩・拡散は、その後の火災誘発の支配要素となり、救援・復旧活動をより困難なものにする。しかしながら、現状は津波氾濫の状況などから被害を推定するに留まっており、港湾に散在して管理される貨物や燃料を取り込んだ被害推定は不十分である。それ故に、遡上によって被害を増大させる漂流物に対処できる実効的な設計や消防体制がほとんど未整備といっても過言ではない。著者らは、これまで明らかにされていない「津波流れと油類の拡散」に着目し、水と油の相互作用を考慮した水・油2層流モデルの基礎的検討を行ってきた。実際の港湾での対策立案につながり、現地に適用しうるモデルとするために、水深が浅くなる場合と油層が薄い先端部での処理が不可欠であると考え、本稿では、特に、上層の打ち切り水深、界面抵抗に着目して浅海や陸上遡上での課題を整理し、今後の研究の展望を示す。

2. 水・油2層流モデルの浅海域での適用

2層流モデルの遡上域での適用性を検討するため、断面2次元数値モデル水槽において、水深変化と油層先端の安定について検討をおこなった。2層流モデルの支配方程式を、式(1)から(6)に示す。

上層（油層）の支配方程式

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

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - f_{int} \sqrt{u^2 + v^2} = - \left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_1^2}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} - f_{int} \sqrt{u^2 + v^2} = - \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

下層（水層）の支配方程式

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

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + g D_2 \left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho_2} + \alpha f_{int} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_2^2}{D_2} \right) + g D_2 \left(\alpha \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho_2} + \alpha f_{int} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (6)$$

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、 $\alpha = (\rho_1 / \rho_2)$: 密度比、 D : 全水深、 τ / ρ : 底面摩擦力、 f_{int} : 界面抵抗係数を示す。

油層の拡がりの非定常数値解析を安定に行なうためには、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

油層先端部での安定条件が必要である。そのため、先端部など水深が小さい地点においては、ある程度の大きさの水深で代用する仮想水深法、あるいは水深をゼロと見なして計算を実行しない打ち切り水深法を導入できる（今津, 1997）。

3. 計算結果及び考察

ここでは、まず対象とする流体（重油）の物性のひとつである密度比 $\alpha=0.91$ を入力した場合の、本モデルにおける特性について検証する。次に、遡上域において特に重要となる打ち切り水深 GX の設定について経験的に最適値を求めていく。最後に、2層界面に作用する抵抗の効果も、油層の鉛直変位の観察によって明らかにする。すべての計算において空間格子幅を $\Delta x=25\text{m}$ 、時間刻みを $\Delta t=0.1\text{s}$ とし、入射波は周期7分の正弦波を右側から入力した。

3-1 密度比 α の効果

水面に厚さ 80cm の油層を設置し、傾斜 1:0.007 の斜面を津波が遡上する。油層の打ち切り水深は、連続式運動の式内でそれぞれ $GXC=0.01\text{m}$ 、 $GXM=1.0 \times 10^{-6}\text{m}$ とした。密度比 α を0.5, 0.7, 0.91と変化させて、図-2にて油層先端付近の界面位置の比較を行なった。密度比 α が高くなる程、先端形状が不安定となる傾向となり、密度比が0.91の水と油の場合工夫が必要であることが示された。今後は、式(5),(6)の密度比 α が関わる項の油層の変化への寄与度を明らかにする。

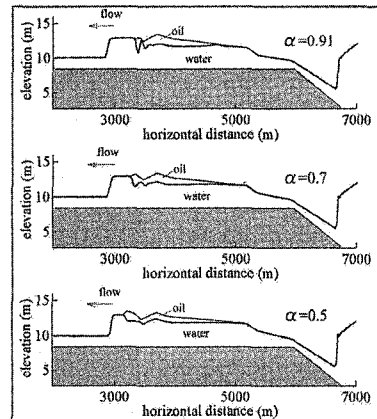


図-2 $t=450$ 秒における密度比毎の油層先端状況 ($GXC=0.01\text{m}$, $GXM=1.0 \times 10^{-6}\text{m}$, $f_{int}=0.01$)

3-2 打ち切り水深による油層先端処理

次に、 G_{xc} と G_{xm} を前述の値に固定し、水平床において下層の水深を 80m から 10m まで変化させて、界面の乱れの強さを観察した。水深が浅いほど、油層先端部直下の界面の乱れが強くなった。このような結果を受けて、打ち切り水深の検討を行なった。水平床で水深 1~80m まで変化させ、表-1 のような G_{xc} と G_{xm} の組み合わせのとき、界面が不安定とならない最小の水深を記録し、これによって経験的に最適値が求まると考える。 $G_{xc}=0.05$, $G_{xm}=0.20$ とした場合に、水深が 1m でも油層先端部の界面の振動を低減することができた。今後は、松富(1990)に倣い上層の流体体積を保存できる適切な大きさの打ち切り水深を採用し、さらに実現象と近づけるための処理を検討する。また、打ち切り水深を導入することによる体積の減少を防ぐ手法も取り入れる。

3-3 界面抵抗による考察

$G_{xc}=0.05m$, $G_{xm}=0.2m$ とし、界面抵抗係数 $f_{inter}=0.0$,

表-1 打ち切り水深および安定となる最小の水位

連続の式の 打ち切り水深 G_{xc} (m)	運動の式の 打ち切り水深 G_{xm} (m)	G_{xc} / G_{xm}	安定となる 最小の水位 (m)
1.0E-02	1.0E-06	10000	150.0
5.0E-02	1.0E-04	500	40.0
5.0E-02	1.0E-02	5	37.5
2.0E-02	1.0E-02	2	37.0
8.0E-02	1.0E-01	0.8	25.0
5.0E-02	1.0E-01	0.5	25.0
7.5E-02	1.5E-01	0.5	23.0
1.0E-01	2.0E-01	0.5	1.0
5.0E-02	2.0E-01	0.25	1.0

0.01, 0.10 と 3 ケース変化させた結果を図-3 に示す。

$f_{inter}=0$ の場合は、1 層のモデルによる水位に油層の厚さ分を加えたものが油層表面位置となっている。 $t=300$ 秒においては f_{inter} の増加に伴い、油層への運動量の伝達量が増え、より高い位置まで油層がリフトアップされている。 $t=500$ 秒では、油層の下を津波が通過している状況であるが、水の遡上先端位置に着目すると、 f_{inter} が小さい場合の方が明らかに水平移動量が大きい。

4. まとめ

- 1, 現状の 2 層流モデルにおいては、密度比が大きくなるほど上層の先端形状の再現が難しいことが示された。
- 2, 水・油 2 層流モデルでは、水深が浅くなる程、特に遡上域では、油層先端部の処理に工夫が必要である。打ち切り水深を操作することで、水深が浅い 1m の場合でも界面の乱れを抑制できた。今後は、下層も上層も薄くなるような場合の各層先端の適切な処理方法について明らかにし、より適用性を高めていく。

<謝辞>

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>

- 1) 今津雄吾(1997)：洪水氾濫先端部での計算安定条件と現地への適用性、東北大学修士論文、72p.
- 2) 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.

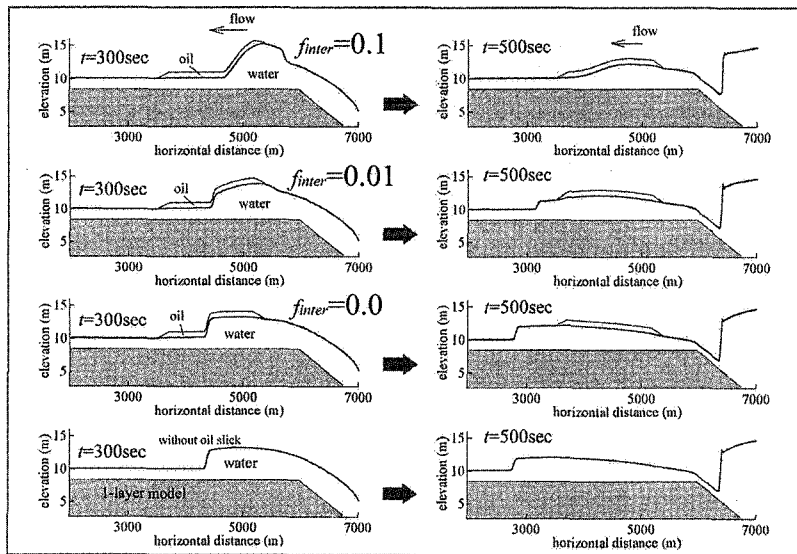


図-3 界面抵抗による下層から上層への運動量の伝達