

## 海岸域での三次元油輸送モデルの構築

### Three dimensional modeling of oil shore interaction

研究代表者 岐阜大学工学部土木工学科 助教授

小林智尚

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gifu University  
Tomonao KOBAYASHI

Laboratory experiments to measure the thickness of oil on the shore were performed, and used to develop a numerical model. The experiments led to the relation between oil thickness and run-up speed and to the rate of oil thickness decrease with elapsed time. A three dimensional model to simulate the oil behavior in the near shore area was developed, based on the experimental results. The numerical results indicated the accumulation of oil on the top of swash zone, which corresponds to the 'oil band' in the field. The numerical model can simulate some phenomena observed in the field, like the oil band, proving its validity.

#### 1. 研究目的

1997 年はじめに起きた日本海でのロシア船籍ナホトカ号事故以降、危機管理の一環として流出した油の拡散を予測する、いわゆる油移流拡散モデルと呼ばれる数値計算モデルが国内でいくつか提案されている。これらのモデルは油の挙動をタンカー事故などの流出元から油が汀線（海岸線）に漂着する直前までを予測できるモデルであり、油流出事故発生後に海岸への油の漂着を阻止するという被害拡散防止上有効なモデルである。しかしこれらのモデルでは海岸域での油の振舞いを再現できないために、海岸での油による汚染状況やさらには一度海岸に付着した油が波に洗われて再流出して他の海岸に再漂着するといった二次汚染災害などを総合的かつ定量的に評価することができない。このような点から海岸域での油の挙動を再現する数値モデルが求められている。しかし実際にこのようなモデルを作成することは従来の移流拡散モデルの場合に比べてきわめて困難である。それは砕波や波の遡上、海岸構造物まわりの流れなど、海岸域では特徴的でありかつ複雑な物理現象を正確に算定しなければならない

からである。

本研究では油の海浜への付着などいまだ明らかにされていない現象については室内実験を通して解析を行い、その結果をもとに海岸・沿岸域での流出油の挙動を詳細に再現する数値計算モデルの構築した。

#### 2. 研究過程

##### 2.1 方法

海洋・海岸での油に関する現象は海岸工学と化学との境界領域に位置しており、数値モデルを構築するにあたって不足している情報が数多くある。とくに海岸への油の付着特性についてはまったく知られていない。そこで本研究ではこの海岸への油の付着特性を室内実験から明らかにする。そしてこの結果をもとに海岸域における油の挙動を再現する数値モデルを構築し、その有用性について検討する。

##### 2.2 海岸付着油に関する室内実験

ここでは海岸への油の付着特性について、波の遡上速度に対する海岸付着油量、海岸に付着した油の波による再流出量の時間変化、という2つの点を室内実験から明らかにする。実験では大型水槽に連続稼働可能

な人工海岸を設置し、この海岸を面と平行に往復運動させることにより相対的に波の遡上を再現した。そしてこの海岸表面への油の付着量を油膜厚として計測した。用いた油は密度  $0.871\text{g/cm}^3$ 、粘性  $104.6\text{cS}$  (実験時) である。また対象海岸には砂浜海岸を想定し、異なる数種類の粒径の砂を用いて検討した。

その結果の一例を図 1, 2 に示す。図 1 は波の遡上速度に対する人工海岸表面への付着油の厚さを示している。図のとおり、付着油の厚さ  $h$  は遡上速度  $U_{\max}$  が增大するにしたがって指数関数的に減少し、ゼロに漸近していることがわかる。図 2 は人工海岸表面に付着した油が波に洗われることによって減少する様子を時系列的に捉えた結果である。これより付着油の厚さは経過時間とともに減少するものの、ほぼ完全に再流出するためにはきわめて長い時間が必

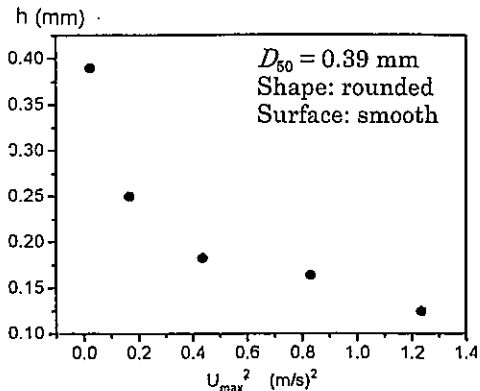


図 1 遡上速度と海岸上の油膜厚の関係

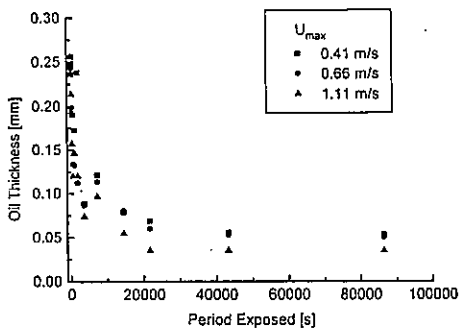


図 2 海岸上の油膜厚の時間変化

要となることがわかる。

以上の室内実験による結果は定式化して次節に述べる数値モデルに組み込んだ。

### 2.3 数値モデルの構成

本研究の数値モデルは、海岸域における波浪や海浜流などの水理特性を再現するモデル、油の移流拡散や海岸での付着や剥離などの油の挙動に関するモデル、の 2 つに大きく分けられる。

このうち波浪などの水理特性に関する数値モデルはさらに次のような構成となっている。(1)波高の平面分布の推定、(2)波浪により生ずる Radiation Stress の推定、(3)Radiation Stress によって生じる平均水位分布の推定、(4)平均水位差より生ずる海浜流の空間流速分布の推定、(5)水位変化に伴う汀線移動量の推定、(6)汀線での波高分布推定、(7)汀線での波高より遡上波の進行速度と距離の推定、である。ここで(1)波高分布の推定では基礎方程式に非定常緩勾配方程式を用いた。これによって単なる波高分布ではなく、時間と共に変動する水位の空間分布を得ることができた。またこれによって海水面に存在する油膜による波高減衰も再現可能となった。(3)海浜流の空間流速分布の推定では平均水位分布より平面二次元内の海浜流速分布を求めた後、波高分布から波の Stokes drift を考慮してその鉛直分布を求めた。

一方油の挙動は、沖合海上など油膜の薄い領域と汀線近傍などの油膜の厚い領域で大きく異なる。ここでは油膜の薄い領域では油を小さな粒子の集合として扱う Lagrangian particle method を用いた。これによって沖合では帯状に広がる油の様子なども再現可能となった。また油膜の厚い領域については油膜層に差分法を適用して解析した。本研究のモデルで再現した油の挙動は、(1)波浪・海浜流による油の移流・拡散、(2)砕波による油の細粒子化と水中への連行、(3)水中の油の浮力による運動、(4)風による油膜の吹寄せ、(5)海岸への油の打上げと再流出、(6)海底面への油の付着や

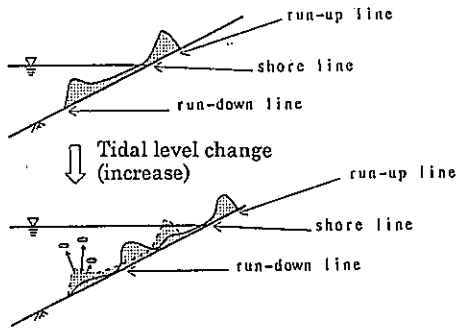


図3 汀線近傍での油の振る舞い

剥離，である。このうち(5)海岸上での油の挙動と(6)海底面上での油の挙動については前節の室内実験の成果を適用した。これによって海岸での油の挙動が詳細に再現可能となった。たとえば図3のような汀線近傍では run-up line から run-down line までの遡上域では波の遡上速度に応じてその両端で海岸に付着する油膜が厚くなる。そして潮位変動により遡上域も変化したとき，新たに打ち上げられる油は移動した遡上域に付着すると共に，水面下に移動した付着油は時間と共に徐々に海中に剥離・再流出する。流出した油が漂着した現地の海岸では一般に Oil band と呼ばれる，打ち上げられた油が海岸上で汀線と平行な帯状に集中する様子が観察されるが，この現象は本研究での数値モデル上では図3の run-up line 付近に見られる油の集中に対応しており，このモデルの妥当性を示す結果の一つである。

以上のモデルを用いて流出油の挙動に関する数値計算を行う。

#### 2.4 シミュレーション結果および考察

ここでは図4に示す，1/50勾配の海底面上に離岸堤が存在する海域を対象に流出油の挙動の再現を試みた。このとき，入射波は沖波波高2.0m，沖波周期10.0s，入射角度 $30^\circ$ とした。また潮位幅は1.2mである。この海域において離岸堤の両端付近で $50.0\text{m}^3$ づつの油が流出したものととして解析を行った。

解析の結果得られた波浪・海浜流場の一例を図5に示す。図5(a)波高分布では離岸堤前面で重複波が発生しており，逆にその背後では静穏域が形成されている。そしてこの波高分布に伴い，図5(b)海浜流の平面分布では汀線近傍に右向きの流れが生じると共に離岸堤の背後両端付近で大規模渦が形成されている。このような波浪・海浜流場での油の挙動の一例を図6に示す。この図では油膜厚さの分布を示している。ただし水中の油については油膜厚に換算した値

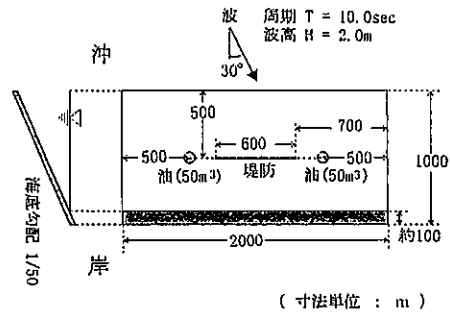
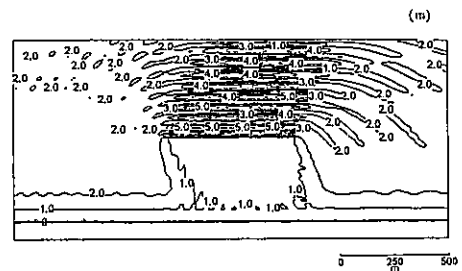
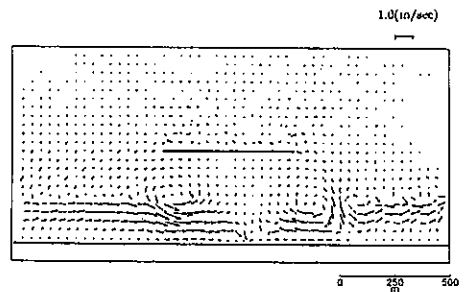


図4 計算対象領域



(a) 波高分布



(b) 海浜流速分布

図5 計算対象領域での水理特性(満潮時)

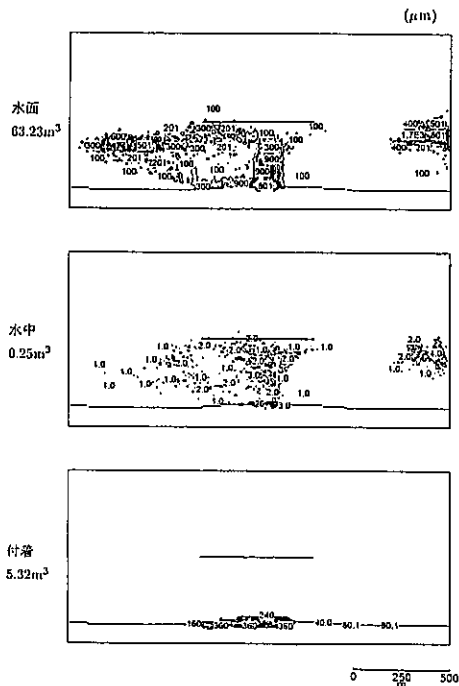


図6 油の空間分布の様子 (流出後 1 時間)

を示している。この図では離岸堤右側で流出した油は右向き海浜流によってすぐに右側境界面より計算領域外に流出している。これに対して離岸堤左側で流出した油は離岸堤背後の大規模渦に一度取り込まれた後、徐々に離岸堤背後の静穏域へと移動し、一部の油が海岸に付着している。砕波によって海中に取り込まれた油粒子はわずかであるが、これらも離岸堤背後の静穏域に移動、集中している。このように海岸域に広がった流出油は離岸堤まわりの波浪や海浜流によりその背後に集中し、限られた領域の海岸に打ち上げられていることがわかる。

図7に油の形態ごとの時間変化を示す。この図より油流出から10時間以内に8割以上の油が計算領域外に流出していることがわかる。また、当初水面上に浮遊している油膜が大部分を占めていたが、20時間後には海岸や海底面上に付着した油が支配的となる。そしてこの付着した油も時間と

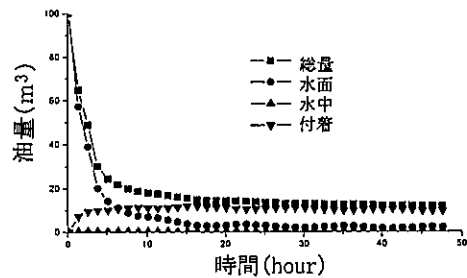


図7 形態別油量の時間変化

共に徐々に再流出して計算対象領域外に移動していることがわかる。このように本研究のモデルにより、海岸域での油の挙動が詳細に再現された。

### 3. 研究成果

本研究では、今まで明らかにされていなかった流出油の海岸への付着量について室内実験を基礎に定式化を行った。そしてその成果を基礎に海岸への波による油の打上や再流出を含めた、海岸域での流出油の挙動を示す数値モデルを構築した。このモデルは計算結果よりほぼ妥当なモデルと判断できた。

### 4. 今後の課題と発展

実際の海岸における流出油は水との混合によるエマルジョンの形成、日射による光化学的質変化、成分の一部の水中への溶解や気化などによる化学的質変化など、さまざまな化学的変化を起し、それに伴って油の挙動も変化する。本研究をさらに発展させるには専門家による知識が必要不可欠である。したがってこの数値モデルのより高精度化を図るために、化学の専門家の知識を導入し、流出油の化学的変化を予測する手法の確立を目指す必要がある。

### 5. 発表論文リスト

Three Dimensional Modeling of Oil Shore Interaction (仮題), Coastal Engineering Journal (投稿準備中)