油膜自身の特性による油拡散に関する実験と数値計算への適応

Experimental Study on Mechanical Spreading of Oil on the Water Surface and Application of Numerical Simulation

松崎義孝¹・藤田 勇²

Yoshitaka MATSUZAKI and Isamu FUJITA

Spilled oil slicks on the sea surface spread due to buoyancy and surface tension. We had been developing numerical simulation method to calculate spilled oil transport. In this study, we conducted the following studies to develop a mechanical spreading model of oil on the water surface. First, we conducted two-dimensional oil spreading experiments using two different scale tank. We compared its results and Fay's equation (1969). Spreading coefficient in our results was smaller than Fay's results. Next, we developed a numerical model to calculate mechanical spreading by random walk method to use Fay's equation. Finally, we conducted oil spreading experiments in steady flow condition. We compared its results and numerical simulation results using proposed model, its applicability was verified.

1. はじめに

海上に流出した油は自然外力により乱流拡散やシアー拡散するほか、油と海水の密度差や表面張力といった、油膜自身の特性によって拡がる。これを油膜自身の特性による油拡散、もしくは油の拡がりという。著者らは流出油の漂流予測を行うため、油を粒子の集まりで表現した数値計算法を開発しており(松崎・藤田, 2014)、その中で油膜自身の特性による油拡散は油粒子の粗密に対応する拡散速度をFay (1969) のモデルから計算していた。

Fayは、油が流出し拡がる過程で支配的な因子が時間経過に伴い、(a) 重力・慣性領域、(b) 重力・粘性領域、(c) 表面張力・粘性領域と分けられるとして、拡がりに関するモデルを導出した。Fayは(c)における拡がり係数を理論的に求めており(Fay, 1971)、2次元方向の油の拡がりに関する実験を行っていない。他の先行事例の多くは1次元方向の実験を行っており(例えば高橋ら, 1979; Fannelop・Waldman, 1972)、2次元方向は埒口ら(1979)によって行われているけれども、議論が十分にされていない状況にあると考えられる。

また、油膜自身の特性による油拡散を予測できる著者らの数値計算法は、Fayに代表される他の油拡散モデルでは直接の再現が困難である流れの中で移流しながら拡散する様子が再現できる特徴がある。しかし、流れの中で移流しながら拡散する実験や定量的なモデルに関する既

往研究が見当たらず、数値計算の評価は定性的なものにとどまっていた。

一方で、油膜自身の特性による油拡散を予測できる著者らの数値計算法は、着目する油粒子についてその近傍粒子から斥力を受けて移動していくモデルである。この方法は、着目粒子の近傍粒子を検索するため、計算に時間を要するという難点があった。

そこで本研究では以下のことについて明らかにすることを目的とする。まず小型水槽を用いて、油膜自身の特性による油拡散実験を行い、Fayのモデルの検証及び拡がり係数の評価を行う。また、大型水槽を用いて、油膜自身の特性による油拡散実験を行い、小型水槽の実験結果と比較し、モデル及び拡がり係数の汎用性を評価する。次に、実験結果を踏まえて油膜自身の特性による油拡散に関する計算モデルを提案する。さらに、開発した計算モデルを用いた計算結果と、大型水槽を用いた定常流条件下における油拡散実験結果を比較して、数値計算法の評価を行う。

2. 油膜自身の特性による油拡散

(1) 油膜自身の特性による油拡散に関する実験方法

実験は水平方向830×1740mm、水深30mmの小型水槽と、長さ20m、幅6m、水深2.5mの大型水槽を用いて行った。

小型水槽の実験は以下の手順で行う(図-1左参照)。内径26mmの筒状の油投入器で定量の油を静水状態の水槽に静かに投入し、時間とともに油が拡がる様子を水槽天井から鉛直下向きに設置したカメラ(Nikon D5200, 解像度1920×1080pixel)で撮影する。撮影頻度30fpsで撮影した画像から、水槽の外壁の影響が無いと考えられる油膜直径0.6mまでを解析して油膜の面積を求める。実験は

1 正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究チーム研究官
2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 新技術研究開発領域 領域長

図-1 油膜自身の特性による油拡散実験の模式図

左：静水における瞬間流出(小型水槽)
中央：静水における瞬間流出(大型水槽)
右：定常流における連続流出(大型水槽)

図-2 油の投入量と拡がり速度の関係(油種DN002)

表-1 油の種類とその物性

油種 (略称)	密度 kg/m³	粘度 11℃ 10⁻³Pa・s	油-大気 表面 張力 σ_{oa} 10⁻³N/m	油-水 表面 張力 σ_{ow} 10⁻³N/m	正味の 表面 張力 σ 10⁻³N/m
出光興産 ダフニー 2 (DN002)	826	3.8	21.6	13.4	36.1
Mobil VG10 (VG010)	860	28.8	21.9	17.9	31.3
出光興産 ダフニー 460 (DN460)	896	2200	30.0	30.9	10.1

図-3 油種と拡がり速度の関係(油量50ml)

油種ごとに4～10回行った。使用した油の種類とその物性は表-1の通りである。

大型水槽の実験も小型水槽と同様に以下の手順で行う(図-1中央参照)。内径23mmの筒状の油投入器で定量の油を水槽に静かに投入し、時間とともに油が拡がる様子をカメラで撮影する。撮影頻度30fpsで撮影した画像から水槽の外壁の影響が無いと考えられる油膜直径4.0mまでを解析して油膜の面積を求める。大型水槽の場合、油自体と水面のコントラストがはっきりしない。そのため、40×40×3mm程度の発砲ポリスチレン製のトレーサーを油膜の外縁で押されて動くように8個配置して、トレーサーの位置を解析することで油膜の面積を求めた。実験は油種及び油量ごとに1～3回行った。

(2) 油膜自身の特性による油拡散に関する実験結果

まず大型水槽を用いた実験結果について説明する。図-2は油の投入量と拡がり速度の関係を示している。これを見ると油量によって拡がり速度は変化せず、ほぼ一樣であることがわかる。この時の油投入量と拡散面積より、少なくとも油膜厚さ10⁻⁴m以下のオーダーでは油量は拡散速度に大きく影響を及ぼさないことが分かる。

図-3は油種と拡がり速度の関係を示している。これを見ると、物性により油の拡散速度が異なることがわかる。

図-2及び図-3の結果を踏まえて、油の拡がりには支配的な力について考える。まず油投入量と拡がり速度の間に相関がないことから重力(油と水の密度差による浮力)は支配的ではない。また、油の粘性のオーダーが10³倍異なるDN002とDN460で面積の変化が数倍程度であることから、油の粘性も拡がり速度に大きく影響を及ぼさないと考える。

そこでFay (1969) にならい、(c) 表面張力-粘性領域のモデルを小型水槽の実験結果にあてはめ、拡がり係数を評価する。

Fayのモデルは式 (1) のように表される。

$$R = k_c \rho_w^{-\frac{1}{2}} \nu_w^{-\frac{1}{4}} \sigma^{-\frac{1}{2}} t^{\frac{3}{4}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = \sigma_{wa} - (\sigma_{oa} + \sigma_{ow}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここでRは拡がり半径、 k_c は拡がり係数、 ρ_w は水の密度、 ν_w は水の動粘性係数、 σ は正味の表面張力係数、 σ_{wa} 、 σ_{oa} 、 σ_{ow} はそれぞれ水-大気、油-大気、油-水の表面張力係数($\sigma_{wa} = 71.1 \times 10^{-3} \text{N/m}$)、 t は油流出からの経過時間である。なお、式 (1) から明らかな通り、ここでの粘性領域の粘性は水の粘性抵抗を表しており、油の粘性

図-4 拡がり面積の実験結果と近似式の比較の例(油種DN002)

図-5 実験結果に基づく拡がり係数の分布

ではない。

小型水槽で行った実験結果に式(1)が成り立つと仮定して、 t を変数として最小二乗法で近似を行い、拡がり係数 k_c を求める。なお、画像解析に適する画像が実験開始直後から撮影できなかったため、式(3)のように、時間方向に近似式を t_0 秒シフトさせ、 k_c の値のみ評価する。

$$A = k_c^2 \pi \rho_w^{-1} \nu_w^2 \sigma (t + t_a)^3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

近似の結果の例は図-4の通りであり、本実験結果は式(1)とよく一致するものと考えられる。すなわち、油膜厚さが 10^{-4} mオーダー以下における油の拡がり正味の表面張力と経過時間で予測が可能であるといえる。

図-5は式(3)で得られた、拡がり係数 k_c の分布を示している。拡がり係数 k_c にはばらつきがみられるほか、VG010は係数が比較的小さく、DN002は比較的大きいといった傾向がみられた。しかしながら、ここでは油の種類が異なっても油の拡がり速度を拡がり係数と正味の表面張力で説明することを目指すため、結果はほぼ一様であり、油の拡がり係数は油種によって変わらないと考え、3種類の油の実験結果の平均値をとって拡がり係数 $k_c=0.852$ とする。

小型水槽で得られた油の拡がりの理論解及びその拡がり係数の汎用性を評価するため、大型水槽での拡がり実験結果と比較する。図-6は大型水槽で実施した油の拡がり実験結果の平均値と理論解である式(3)の比較である。

図-6 大型水槽での実験結果の平均値と理論解の比較

実験結果は油量では違いがないと考えられることから、油種で平均して比較する。この結果を見ると、VG010の実験結果が図-5の結果と同様に理論解よりもやや小さい傾向にあった。しかしながら、DN002及びDN460の結果は非常に良好であり、Fayのモデルの有効性及び小型水槽で得られた拡がり係数の汎用性が高いと考える。

(3) 考察

本研究で得られた油の拡がり係数 k_c について検討する。Fay (1971) は、拡がり係数を理論的に2.30と求めている。Hoult (1972) も、理論的に拡がり係数を0.128と求めている。埜口ら (1979) は2次元方向の拡がり実験から拡がり係数を0.48と求めている。これらの結果を比較すると係数は本実験結果と大きく異なることがわかる。

一方、本実験においてもVG010を用いた結果については、精度よく再現されているわけではない。また、C重油を用いた同様の実験を行ったが、提案する理論解では拡がりをうまく説明できなかった。そのため、 k_c の取り扱いには慎重に行う必要があり、今後実験回数を増やす等によりそれらの実験結果を考察する必要がある。

Fayは油流出からの経過時間で3つの拡散過程があると示した。しかしながら、油の量と拡散面積から求める油膜厚さを見ると、例えばDN460が 10m^3 流出した時の2時間後の油膜厚さは $8.3 \times 10^{-4}\text{m}$ と試算される。よって、流出した油は比較的流出後すぐに 10^{-4}m オーダーの油膜厚さになると考えられる。したがって、実務の面では油膜自身の特性による油拡散は、Fayのいう(c)表面張力-粘性領域のみを考えて予測計算を行ってもよいと考えることができる。そこで、(c)表面張力-粘性領域の油の拡がりを対象とした計算モデルを3章で導出する。

3. 油膜自身の特性による油拡散に関する計算モデル

式(1)を基に、油膜自身の特性による油拡散について、粒子を用いて計算するモデルを導出する。1章で述

べた松崎・藤田 (2014) の数値計算法のように、着目粒子の近傍粒子からの斥力として計算する方法だと、近傍粒子同士の計算を行う必要があるため、計算時間がかってしまう。

そこで本論文では以下のように、油膜自身の特性による油拡散についてランダムウォークを応用して計算するモデルを考える。2章の結果から、油の拡がり面積は正味の表面張力に比例し、経過時間の3/2乗に比例することが分かった。また、一様乱数を用いて粒子をランダムウォークさせると、粒子の外縁は経過時間の1/2乗に比例して拡がるのがわかっている。そこで式 (4) のように、経過時間 t の1/4乗を拡がり移動速度 u にもたせることを考え、陽解法で粒子 i の位置 X_i を計算する。

$$u_i = k_p \sigma^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{4}} \Delta t^{\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} \cos(2\pi R_{rand}) \\ \sin(2\pi R_{rand}) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

$$X_i^{n+1} = X_i^n + u_i \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

ここで k_p は拡がりモデル係数、 Δt は計算ステップ間隔、 R_{rand} は0から1の一様乱数、 n は着目時間を表す。

k_p は以下のように求める。油粒子10000個を用いて式 (4)、(5) で拡がり計算を実施し、全粒子の95%が収まる半径を経過時間ごとに求める。 X から求めた拡がり半径 R から拡がり面積 A を求め、式 (3) と一致する k_p を最小二乗法で求める。

図-7は提案する計算モデルを用いた油の拡がりの計算例である。油種はDN002、経過時間は60秒である。図より提案するモデルを用いるとランダムウォークであるためばらつきがあるものの、油が円形に拡がる様子をうまく計算できることがわかる。

図-8は油の拡がりに関する理論解と数値計算モデルの比較である。これより、式 (4)、(5) で油の拡がりを計算するモデルは理論解をよく表すことができると考える。この時の式 (4) の拡がりモデル係数 k_p は式 (6) の通りで、次元をもつ。

$$k_p = 0.554 \left(N^{\frac{1}{2}} m^{\frac{3}{2}} s^{\frac{3}{4}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

4. 定常流における油拡散実験とモデルの比較

定常流条件下における油の拡がり実験と導出した油の拡がりの数値計算モデルを比較し、数値計算法の評価を行う。実験は2章で説明した静水時の油膜自身の特性による油拡散実験を行った大型水槽で実施した。この水槽は回流式の定常流を発生させることができる。この水槽の上流側横断方向中央部分に油投入口を設け、モノローポンプで流量1.0L/minでDN002を連続で投入する。同時に流速0.135m/sの定常流を発生させて、流れの中で油が

図-7 モデルを用いた油の拡がりの計算例 (油種DN002, 60秒後の再現)

図-8 油の拡がりに関する理論解と数値計算モデルの比較

拡がる様子をカメラで撮影する (図-1右参照)。2章で述べた通り、油膜位置が判別しにくいので、油膜の外縁を解析するためのトレーサーを上流側中央部から流し、油膜の外縁に沿って移動するトレーサーを解析する。

計算は3章で導出したモデルを用いて行った。これに定常流の影響を加えるため、式 (4) の x 方向を式 (7) のように計算した。

$$u_{xi} = k_p \sigma^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{4}} \Delta t^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi R_{rand}) + U_c \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 U_c は定常流速であり、0.135m/sである。油粒子は1秒間に1000個の割合で連続的に投入した。

まず実験結果について説明する。図-9は定常流において油を連続流出させたときの油膜外縁を移動するトレーサーの軌跡の重ね合わせ画像である。油が流出し、油膜自身の特性によって油が拡がりながら下流方向へ移動していく様子がわかる。

次に計算結果について説明する。図-10は定常流において油を連続流出させたときの数値計算結果である。流れの中で移流しながら拡散の様子がよく再現されていると考えられる。

図-9 定常流における油拡散に関する実験結果

図-10 定常流における油拡散に関する数値計算結果
上：油流出から20秒後，下：油流出から40秒後

実験結果と計算結果の比較を行う。図-11は実験結果と計算結果の比較である。実験結果は x 方向を0.2mで区切り、その範囲のトレーサの y 方向長さの平均値をプロットした。計算結果は油流出から40秒後の結果を用いて、 x 方向を0.2mで区切り、その範囲の油粒子の95%が含まれる y 方向長さをプロットした。これをみると、計算結果は実験結果とよく一致していると考えられる。よって図-9～11の結果から、汎用性、有用性の高い計算モデルを用いて、精度の高い計算結果が得られたと考える。

5. おわりに

実験結果から油膜自身の特性による油拡散は、正味の表面張力によって説明できることが示された。これはFayのモデルの(c)表面張力-粘性領域にあたり、実際の油

図-11 定常流における油拡散に関する実験と数値計算結果の比較

流出事故の予測を行う際はこの領域に着目することが重要であると考えられる。

既往の研究による油の拡がり係数は、提案者によってばらつきがおおきく、著者らの結果はそれらの結果のどれとも一致していない。著者らの実験は精度よく行われたものと考えられるけれども、拡がり係数の取り扱いには慎重に行う必要があり、今後実験回数を増やす等によりそれらの実験結果を考察する必要がある。

また、実験結果との比較から求めた油の拡がりに関する計算モデルは、簡易で計算時間が短く、実装も容易であり汎用性、有用性が高く、計算精度も高いと考える。本計算モデルは定常流条件下においても計算が可能であり、今後の活用が期待される。

さらに、従来検討されていなかった、定常流条件における油の拡がりについて実験を行い、計算結果と定量的に比較を行った。その結果、計算モデルは実験結果を精度よく再現することができた。

謝辞：株式会社エコーの長谷川巖氏、宮里一郎氏に水槽実験及び解析を補助していただいた。

参考文献

- 高橋照男・北村吉朗・中田賢三（1979）：静止水面上での油膜の拡がり，化学工学論文集，Vol.5，No.5，pp.526-531
- 松崎義孝・藤田 勇（2014）：海水面における流出油の拡散・移流に関する数値計算法の開発と油流出事故の再現計算，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70，No.1，pp.15-30
- 埜口英昭，早川典生，橋本英資，山崎宗広（1979）：海上に流出した油の拡がりについて－瞬間放出による実験的研究－，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 628-632
- Fannelpo, T. K. and G. D. Waldman (1972) : Dynamics of Oil Slicks, AIAA Journal, Vol. 10, No.4, pp.506-510
- Fay, J. A. (1969) : The spread of oil on a calm sea, Plenum Press, pp.53-63
- Fay, J. A. (1971) : Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface, Conference on Prevention and Control of Oil Spills, pp.463-467
- Hoult, D. P. (1972) : Oil Spreading on the Sea, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.4, pp.341-368