海水面極近傍における水平乱流拡散に関する研究

Horizontal Turbulent Diffusion at Sea Surface

松崎義孝¹・藤田 勇²

Yoshitaka MATSUZAKI and Isamu FUJITA

In numerical simulation for oil transport at sea surface, we couldn't have known how to decide horizontal turbulent diffusion coefficients of oil. In this study we made a diffusion model at sea surface to predict oil turbulent diffusion coefficient from the results of drift experiments using pseudo oil made with sponge rubber in real sea. Diffusion coefficient at sea surface is larger than under water. Diffusion coefficient doesn't depend on wind velocity and current velocity in these experimental conditions. We conducted numerical simulations using derived diffusion model. The result using derived diffusion model is better than it using traditional method in initial stage of oil spill. Derived diffusion model is very plain, therefore it is easy to incorporate the diffusion model in the other oil transport simulations.

1. はじめに

海上に流出した油の漂流予測計算において、流出した油を粒子の集まりとしラグランジュ的に計算する場合、海表面の流れの乱れによる油拡散はランダムウォークで再現することがほとんどである。すなわち、ある粒子*i*の流れの乱れによる水平拡散速度 U_{di} は式(1)のように計算する。

$$U_{di} = \sqrt{\frac{2D_H}{\Delta t} \left[\frac{R_{n1}}{R_{n2}} \right]} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D_H は水平乱流拡散係数、 Δt は計算時間間隔、 R_{n1} 、 R_{n2} はそれぞれ独立した平均0、分散1の正規乱数である。式(1)のようにランダムウォークの計算は拡散係数 D_H を与える必要があり、現状では定数を与えている。乱流拡散速度 U_{di} は式(1)のように拡散係数 D_H の1/2乗に比例するため、拡散面積は D_H の1乗に比例する。よって拡散係数は計算結果に与える影響が大きいといえる。

しかしながら、現状では経験的に水平乱流拡散係数 D_H を決定しており、具体的にどのように与えればよいかわかっていない。例えばASCE Task Committee(1996)において乱流拡散係数は1~100m²/sとしている。これは設定値により拡散面積計算結果が100倍異なることを意味する。また、乱流モデル(例えばSmagorinsky, 1963)を用いて数値計算で拡散係数を決定する方法も考えられるけれども、現状において適応は難しいと考えられる(松崎ら, 2012)。

一方で、染料や漂流物を用いた実海域における拡散の観測が多く行われており、水平乱流拡散係数の推定方法

が提案されている。例えば、Okubo(1971)は染料を用いた拡散実験を行い、拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係について整理している。柳ら(1982)は海面下1mに抵抗板をつり上げた60cm四方の耐水ベニヤ板を浮子とし、その位置を航空機で観測する方法で拡散実験を行っている。道田ら(2009)は海面からそれぞれ1m, 6m, 11m, 16mの位置にドローグ(抵抗体)をとりつけたGPS搭載漂流ブイの放流実験を行っている。これらの実験は、いずれも水面から数mにおける水平乱流拡散係数を推定している。しかし、油拡散のような海水面極近傍に限った水平乱流拡散係数の推定は従来行われていなかった。道田ら(2009)は水平乱流拡散の水深依存性を指摘しており、特に海面付近では拡散係数が海水中より大きくなることが予想される。

そこで本研究では、疑似油を用いた海水面極近傍における水平乱流拡散の測定実験を行い、水平乱流拡散係数 D_H の推定方法を検証した。また、導出した水平乱流拡散係数推定方法を著者らの開発した流出油漂流シミュレーションに用いて、油拡散の再現計算を行った。さらに、再現計算結果を従来の方法を用いた計算結果との比較を行い、提案する水平乱流拡散係数推定方法の意義について考察した。

2. 疑似油を用いた実海域における水平乱流拡散実験

(1) 実海域乱流拡散実験に用いる疑似油の選定

実海域で海水面極近傍に限った油拡散特有の拡散係数を計測するにあたり、対象となる疑似油は海水面のみを漂い、油と同じ漂流速度でなければならない。流れによる移流速度は疑似油と実際の油と変わらないと考えられるため、油と同じ風係数を持つ疑似油を選定することとした。

---

1 正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 混相流体研究チーム 研究官
2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 混相流体研究チームリーダー

数値計算において、風による油の移動速度は海面高度10mでの風速に風係数をかけて表現する（例えば松崎ら、2009）．風係数は0.03程度であり、例えば海面高度10mで風速が10m/sである場合、海表面の油の移動速度は $10 \times 0.03 = 0.30 \text{ m/s}$ と算出される．今回の実海域拡散実験で用いる疑似油の風係数も0.03である必要がある．

そこで、疑似油の選定実験を国土交通省国土技術政策総合研究所の所有する台風防災実験水路で行った．水路は長さ28.5m、幅1.5m、高さ1.3mで、水深は0.4mとした．疑似油は素材としてスポンジゴム（イアノックEPDM系E-4388、硬度 20 ± 5 度、密度 150 kg/m^3 ）を用いることとした．実海域実験では直径1mの円形を用いるものの、その大きさの疑似油は水槽実験で扱えないため、直径30cm、厚さ10mmの円形とした．また、実海域実験においては、疑似油に小型のGPSロガーを搭載するため、防水のケースにいれてマットにくる必要がある．水槽実験では全体重量（ゴムマットと防水ケースを合わせた比重）を合わせるために防水ケースにいれるGPSロガーの模型重量を調整した．

実験は以下のように行った．送風速度は3通り（送風機回転数：100rpm、200rpm、300rpm）で実施した．送風後、流れが定常状態になってから、疑似油を十分な加速区間をとった風上側から投入し、送風口から19.5mの位置にあるカメラ（DITECT製）で疑似油の移動を撮影した．画像解析ソフト（DITECT製、DIPP-MotionPro）を用いて、疑似油の中心位置の座標を測定し、移動速度を求めた．投入回数は各ケースで30回ずつ行い、その平均値を用いた．

また、カメラ撮影位置を挟む送風口から18.0m及び21.0m地点において風速（熱式風速計：カノマックス製プロープ0962-00）を計測した．漂流予測を行う際は海上10m風速が用いられるため、今回の実験結果も水面から10mに換算した風速で整理する必要がある．そのため、海上10m風速を以下の方法で算出し、2地点の平均値を解析に用いる風速とした．すなわち、風速計が水面（波面）に接しない高さから、静水面より10cmまでを5mm毎の高度で各60秒間の計測を行い、それぞれの高度の平均風速を求めた．平均風速の鉛直分布に対数則が成り立つものと仮定して、最小二乗法によりフィッティングを行い、海上10m風速を算出した．

疑似油選定実験の結果は表-1の通りである．実海域実験時の平均風速は最大で7m/sであるため、今回の室内実験の風速は実海域実験時の風速を含んでいる．風係数は各10m換算風速において0.03に近いと言えるため、この疑似油を用いて実海域実験を行うこととした．

(2) 実海域乱流拡散実験の方法

実験は東京湾入口に位置する神奈川県横須賀市金田湾

表-1 10m換算風速と風係数の関係

送風機 回転数 (rpm)	10m換算 風速 (m/s)	疑似油 移動速度 (m/s)	風係数
100	3.8	0.12	0.032
200	6.3	0.18	0.030
300	9.4	0.25	0.026

図-1 疑似油を用いた水平乱流拡散実験の模式図

写真-1 実験に用いた疑似油とGPSロガー（疑似油の中央）

周辺で行った．図-1は実験の模式図である．疑似油は直径1mの円形、厚さ10mm、重量1.2kgのスポンジゴムにGPSロガーを取り付けたものを用いた（写真-1）．GPSロガーはWintec製WBT-202で、重量55g、平均誤差半径（CEP）はSBAS使用時で2.0m、Stand Aloneで2.5mである．各実験ケースにおいて疑似油を20枚投入し漂流させ、各疑似油の位置をGPSロガーで記録させた．同時にGPSコンパス、風向風速計、ADCPを載せた観測船で疑似油の数十m付近をゆっくり追跡しながら風向風速、流向流速を測定した．各実験ケースの漂流時間は30分～3時間40分で、合計9ケース行った．

(3) 実海域乱流拡散実験の結果

GPSロガーで取得した疑似油20枚の漂流緯度経度から、Richardson(1926)の方法に基づき、式(2)を用いて水平乱流拡散係数 D_H を10分おきに計算した．

$$D_H = \frac{1}{4} \frac{\partial \sigma^2}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ^2 は疑似油の位置の不偏分散、 t は時間である．著者らは、拡散係数は風速もしくは流速と何らかの相関があるものと予想したため、それらの関係を調べることにした．

図-2は風速と水平乱流拡散係数の関係を示している．プロットの違いは解析対象時の疑似油の拡散スケール L の違いを示している．疑似油の拡散スケール L はOkubo

拡散スケール L ◇ 60~90m × 90~150m △ 150~210m

図-2 風速と水平乱流拡散係数の関係

拡散スケール L ◇ 60~90m × 90~150m △ 150~210m

図-3 流速と水平乱流拡散係数の関係

拡散スケール L ◇ 60~90m × 90~150m △ 150~210m

図-4 疑似油の平均移流速度と水平乱流拡散係数の関係

● 実験結果
— 実験結果 $D = 1.47 \times 10^{-4} L^{4/3}$
- - - Okubo(1971) $D = 2.06 \times 10^{-4} L^{1.15}$
- - - 柳ら(1982) $D = 1.23 \times 10^{-4} L^{1.22}$
- - - 道田ら(2009) $D = 3.79 \times 10^{-6} L^{1.94}$

図-5 拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係

(1971)にならい $L=3\sigma$ と定義した。図-2より、風速が大きい時と小さい時で拡散係数の傾向が異なるといった相関関係は特に見られなかった。

図-3は流速と水平乱流拡散係数の関係を示している。また、図-4は疑似油の平均移流速度（流速+風速×0.03）と水平乱流拡散係数の関係を示している。これを見ると図-2と同様に流速及び疑似油の移動速度と水平拡散係数との相関関係は見られなかった。図-2～4の結果から、今回のような気象海象条件及び解析条件においては、海水面の流れの速度と水平乱流拡散係数の相関は見られないといえる。そこで以下では、水平乱流拡散係数は拡散スケールのみに依存すると仮定し、海水面極近傍の水平乱流拡散係数の推定方法を検討する。

(4) 実験結果に基づく水平乱流拡散係数の推定

図-5は本実験結果における拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係である。また、Okubo(1971)、柳ら(1982)、道田ら(2009)の結果もあわせて記載した。本実験結果から、拡散スケールが大きくなるにつれて水平乱流拡散係数は大きくなる傾向がみられた。これは、Richardson(1926)の理論と傾向が一致していると考えられる。そこで実験結果（64組）に水平乱流拡散が拡散スケールの4/3乗に比例するRichardson(1926)の理論を仮定して、縦軸に対数を取り最小二乗法で近似し、拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係を導出した（図-5中の太実線）。なお、4/3乗を仮定せずに拡散スケールの指数も未知数として最小二乗法で近似したとき、 D_H は L の2.22乗に比例すると得られる。これは水平乱流拡散係数が小さい時及び大きい時の数点のデータに大きく引きずられている効果が大きく、これらのデータを除いて求めた D_H は L の1.49乗に比例と導出された。よって近似式は4/3乗とほぼ同等であるため理論の仮定を優先した。

海水面極近傍の水平拡散を表す本実験結果と、水中の水平拡散を表すOkubo(1971)、柳ら(1982)及び道田ら(2009)の結果と比較すると、本実験の水平乱流拡散係数は大きい傾向にあった。これは道田ら(2009)の指摘する水平乱流拡散係数の深度依存によるものと考えられる。

ここで、導出した拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係を数値計算へ導入する際の方法と適応性を考察する。流出油の漂流予測計算におけるランダムウォークによる乱流拡散の計算は、小さいスケールの乱れが再現できていない部分を補完するために行っている。よって考慮する拡散係数は再現する流体場の格子サイズに依存すると考えられる。

また、乱流拡散係数が拡散スケールの4/3乗に比例する乱流構造は、大きな乱れが順次小さな乱れにカスケードダウンし、その乱れエネルギースペクトルが波数 k の-5/3乗に比例する慣性中間領域（擬3次等方性領域）に限られると考えられる（宇野木, 1993）。

そこで、数値計算において水平乱流拡散係数 D_H は、擬3次等方性領域の上限までにおいて、流体場の再現スケールで決定される距離 $L_{\max}$ まで増加し、それ以上の時は一定であると考え、式(3a)及び式(3b)で計算する。

$$D_H = 1.47 \times 10^{-4} l_i^{4/3} \quad l_i < L_{\max} \quad \text{..... (3a)}$$

$$D_H = 1.47 \times 10^{-4} L_{\max}^{4/3} \quad l_i \geq L_{\max} \quad \text{..... (3b)}$$

ここで、 l_i は粒子群全体の重心と着目粒子 i の距離である。

鳥羽(1986)によると擬3次等方性領域の上限は10kmである。よって、式(3a)、(3b)の適応範囲は10kmまでとし、流体場の再現スケールによって L_{max} を設定することとする。

3. 水平乱流拡散係数推定方法の数値計算への導入

(1) 計算方法

2章で導出した水平乱流拡散係数と拡散スケールの関係（以下、乱流拡散モデル）を検証するため、港湾空港技術研究所で開発した油拡散粒子モデル（松崎ら、2012）に、式(3a)、(3b)の拡散モデルを組み込み、再現計算を行う。計算対象は2007年韓国泰安沖油流出事故とする。今回導出した乱流拡散モデルと拡散係数に定数を与える従来の方法の計算結果を比較し、乱流拡散モデルの効果を検証する。

韓国泰安沖である黄海は海流の影響は大きくなく、泰安付近では大河川の流入がないため、移流外力は潮汐流と吹送流のみとした。潮汐流は3次元流体モデルである高潮津波シミュレータSTOC（富田ら、2005）を用いて再現した。潮汐流の計算条件は表-2の通りである。境界条件としてMatsumotoら(2000)のモデルを用い、開境界の仮想セルにおいて水位を与えた。水深データはGEBCOの30秒格子データを用いた。

吹送流は風係数法を用いて再現した。風況データは気象庁全球数値予報モデルGPV（MSM）の再解析データを用いた。2007年12月時点のGPV（MSM）データは計算格子が10kmである。

油拡散粒子モデルの計算において、計算条件は表-3のように設定した。油の水平乱流拡散係数に導出した乱流拡散モデルを用いる際の L_{max} は流体場の再現スケールから $1 \times 10^4 \text{m}$ とした。定数を用いる場合は、後述する導出した乱流拡散モデルで計算された拡散係数の時間平均値である $D_H=22\text{m}^2/\text{s}$ を用いた。

(2) 計算結果

図-6は3つの時刻における油流出範囲の観測結果と、導出した乱流拡散モデルを用いた漂流予測計算結果の比較である。両者はよく一致していると考えられる。

図-7は導出した乱流拡散モデルで計算された各油粒子の乱流拡散係数の平均値の時系列変化である。流出した油が時間経過とともに拡がるため拡散係数が大きくなるのがわかる。なお、10時間前後と22時間前後で拡散係数が小さくなるのは潮流の影響により油粒子が近づくことにより、拡散スケールが小さくなるからである。

導出した乱流拡散モデルの効果を検証するために、導出した乱流拡散モデルと従来行われてきた拡散係数に定数を入力する方法の計算結果の比較を行った（表-4）。従来の方法の定数は、提案した乱流拡散モデルの時系列の

表-2 潮汐流の計算条件

計算範囲		125°10'15"~126°24'45" 36°00'15"~37°19'45"
格子数	nx	70
	ny	112
	nz	10
格子間隔	dx	743m (30秒)
	dy	925m (30秒)
	dz	5m (1~8層) 10m (9, 10層)
時間間隔	dt	10s
底面粗度係数	n	0.0026
水平渦動粘性係数	ν_H	30 m^2/s
鉛直渦動粘性係数	ν_V	0.10 m^2/s

表-3 油拡散粒子モデルの計算条件

計算時間	2007年12月4日0:00~11日11:00
粒子数	1200個
粒子体積	10 $\text{m}^3/\text{個}$
計算時間間隔	10s
油流出時間及び流出流量	12/7 8:00~12/9 0:00 211 m^3/hour
	12/9 0:00~12/11 11:00 61 m^3/hour
油の水平乱流拡散係数	(1): モデル式 (3a), (3b)
	(2) $D_H=22\text{m}^2/\text{s}$

図-6 導出した海水面極近傍の水平乱流拡散モデルを用いた韓国泰安沖油流出事故の再現計算（左：観測結果，右：計算結果）

図-7 乱流拡散モデルで計算された各油粒子の拡散係数の平均値の時系列変化

平均値（図-7）である $D_H=22\text{m}^2/\text{s}$ としている。観測結果の拡散面積は観測位置全面に油があると仮定し、画像のpixel数から面積を求めた。計算結果の面積は、対象海域をメッシュに区切り、粒子が存在するメッシュは油が一

様にあると仮定し油拡散面積とした。表-4より提案した乱流拡散モデルを用いると、主に拡散初期において予測精度が向上しているといえる。

4. 議論

導出した乱流拡散モデルの意義を考える。油流出から長時間経過し大きい面積まで油拡散したとき（表-4 12/11の結果）は、乱流拡散モデルを用いた方法と定数を与える方法とで結果の差は小さい。これは拡散以外に移流による効果が大きくなることによる。一方、油流出からの経過時間が短い時（表-4 12/7の結果）は、乱流拡散モデルを用いた結果の方が再現結果がよいと考える。これは油拡散面積が小さいとき、乱流拡散に影響する乱れスケールも小さいと考えられるけれども、定数を入力する方法ではこの時の拡散スケールを過大に評価していたと考えられる。したがって、今回提案した乱流拡散モデルは、油流出初期において乱流拡散係数が小さいことを正確に再現している効果が大きいと、韓国泰安沖事故の油拡散をよく再現したと考える。

今回提案した乱流拡散モデルは、粒子群の重心と計算対象粒子 i の距離 l_i を求め、式(3a)もしくは(3b)にて計算する。よってコーディングが簡単であるため、提案する乱流拡散モデルを既存のラグランジュ系の漂流予測モデルに導入することは容易であると考えられる。また、定数を入力する必要がなく、自動的に水平方向拡散係数 D_H が決定されるため、経験の少ないユーザーが数値計算を実施しても、設定を誤ることがなく、実務上の利点が大いと考えられる。

5. おわりに

本研究において、疑似油を用いて海水面極近傍における水平乱流拡散を測定した結果、実験時の気象海象条件及び解析条件において風速及び流速と拡散係数の相関は特に見られなかった。海面極近傍の拡散係数は水深数 m の拡散係数よりも大きい傾向にあった。これより海面付近のほうが海水中より乱れの影響を受けやすいことが予想される。

また、実験結果より乱流拡散モデルを導出し、著者らの開発した流出油漂流シミュレーションに組み込み、油流出の再現計算を行い乱流拡散モデルの有効性を検証した。拡散係数に今回開発した乱流拡散モデルと定数を与える従来の方法とで計算を行ったところ、従来の方法と比較して主に油拡散初期において計算精度が向上することが示された。

乱流拡散モデルの特徴は油流出初期の拡散係数をよく再現していることと、モデルが単純で他の数値計算にもコーディングが容易であり、実務面で有利なことが挙げ

表-4 観測結果と計算結果の油拡散面積の比較

日時		12/7 18:00	12/8 18:00	12/11 10:40
油拡散 面積 (km ²)	A: 油流出の観測結果	31	110	1195
	B: 導出した乱流拡散モデルを用いた計算結果	30	110	1168
	C: 水平乱流拡散係数を定数 ($D_H=22\text{m}^2/\text{s}$) で与えた計算結果	34	118	1189
観測と計算結果の面積比	A/B	1.04	1.00	1.02
	A/C	0.91	0.94	1.01

られる。

最後に水槽実験を行う際に国土交通省国土技術政策総合研究所の熊谷兼太郎氏に便宜を図っていただいた。また、実海域実験において株式会社ソニックの高島勝美氏に実験補助をしていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 宇野木早苗(1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 672p.
- 鳥羽良明(1986): 乱流現象の科学, 東京大学出版会, pp.605-625.
- 富田孝史・柿沼太郎(2005): 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, Vol.44, No.2, pp.83-98.
- 松崎義孝・吉江宗生・藤田勇・竹崎健二(2009): 薄い漂流物を用いた漂流実験と漂流推定方法の検討, 海洋開発論文集, pp.33-38.
- 松崎義孝・藤田 勇(2012): 油拡散を考慮した流出油の数値計算法の開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1255, 26p.
- 道田 豊・田中 潔・小松輝久・石神健二・中嶋理人(2009): 海洋の収束・発散・拡散等による表層浮遊物の移動, 海岸海洋研究, 第46巻, 第2号, pp.77-83.
- 柳 哲雄・樋口明生(1982): 現場海域の拡散係数の推定法に関する研究, 海岸工学講演会論文集, Vol.29, pp.580-583.
- ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division (1996): STATE-OF-THE-ART REVIEW OF MODELING TRANSPORT AND FATE OF OIL SPILLS, Journal of Hydraulic Engineering, pp.594-609.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, Journal of Oceanography, Vol.56, pp.567-581.
- Okubo, A. (1971): Oceanic diffusion diagrams, Deep-Sea Research, Vol.18, pp.789-802.
- Richardson, L. F. (1926): Atmospheric Diffusion Shown on a Distance-Neighbor Graph, Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 110, No. 756, pp.709-737.
- Smagorinsky, J. (1963): General circulation experiments with the primitive equations, Monthly Weather Review, Vol.91, No.3, pp.99-164.