

海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法の開発

2014年9月

松崎 義孝

©Copyright 2014

小笠原 敏記 准教授
主 査

船崎 健一 工学部長
副 査

海田 輝之 教授
副 査

堺 茂樹 学長
副 査

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	既往の研究	3
1.2.1	海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法の概要	3
1.2.2	油膜自身の特性による油拡散に関する研究	5
1.2.3	油の乱流拡散に関する研究	6
1.2.4	数値計算法の有用性	7
1.3	本論文の目的と構成	8
	参考文献	10
第 2 章	油拡散粒子モデルの開発及び計算方法	13
2.1	モデル概要	13
2.2	移流外力の計算方法・入力方法	15
2.3	油膜自身の特性による油拡散の計算方法	16
2.4	油の乱流拡散の計算方法	16
2.5	海岸線，構造物等境界における計算方法	18
2.6	結語	19
	参考文献	20
第 3 章	油膜自身の特性による油拡散の推定方法	21
3.1	概要	21
3.2	油膜自身の特性による油拡散に関する Fay のモデル	22
3.3	室内実験による油拡散実験方法	24
3.4	室内実験の結果	27
3.5	油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルの開発	32
3.6	定常流における油拡散実験と数値計算モデルの比較	37
3.7	考察	40

3.8	結語	44
	参考文献	44
第4章	海水面極近傍における水平乱流拡散係数の推定方法	46
4.1	概要	46
4.2	風洞水槽実験による疑似油の選定	47
4.3	実海域における疑似油を用いた水平乱流拡散実験の方法	50
4.4	実海域における疑似油を用いた水平乱流拡散実験の結果	50
4.5	水平乱流拡散係数の推定方法	53
4.6	結語	55
	参考文献	56
第5章	韓国泰安沖 Hebei spirit 号油流出事故の再現計算	58
5.1	事故概要	58
5.2	計算条件	59
5.3	計算結果と観測結果の比較	61
5.4	計算に用いるパラメータの検討	64
5.5	結語	67
	参考文献	68
第6章	東京湾 Diamond Grace 号油流出事故の再現計算	69
6.1	事故概要	69
6.2	計算条件	69
6.3	計算結果と観測結果の比較	72
6.4	結語	75
	参考文献	76
第7章	東京湾 Beagle3 号油流出事故の予測計算	77
7.1	事故概要	77
7.2	計算条件	79
7.3	計算結果と観測結果の比較	80
7.4	結語	82
第8章	議論	83
8.1	既往の研究からの進展	83
8.2	数値計算法の考察	84

8.3	即時の予報体制の構築	86
8.4	油回収船の油回収操船支援を行う漂流油捕捉システムの開発	87
	参考文献	89
第9章	結論	91
	謝辞	95
	記号表	98
付録A	潮汐流の予測方法	101
A.1	潮汐流の数値計算モデル及び境界条件	101
A.2	潮汐流計算結果からの再現方法	102
	参考文献	104

目次

1.1.1	世界のタンカー油流出事故の回数	1
1.1.2	近年の我が国周辺海域における油汚染発生件数	2
1.1.3	国土交通省が所有する大型油回収船	3
1.2.1	流出油の物理的, 化学的, 生物的状态変化過程	4
2.1.1	油拡散粒子モデルの概要	14
2.4.1	ランダムウォークの導出の定義	17
2.5.1	海岸線, 構造物境界での計算方法	19
3.2.1	油膜自身の特性による拡散の定義	22
3.3.1	油膜自身の特性による油拡散実験の模式図	24
3.3.2	油回収実海域再現水槽	25
3.3.3	油回収機性能試験の様子	25
3.3.4	油投入量の測定の様子	26
3.3.5	小型水槽での油投入の様子	26
3.3.6	比重計	27
3.3.7	B 型粘度計	27
3.3.8	接触角計	27
3.3.9	大型水槽で用いた油投入器	28
3.3.10	大型水槽で油が拡がる様子	28
3.4.1	油の投入量と拡がり速度の関係	29
3.4.2	油種と拡がり速度の関係	29
3.4.3	拡がり面積の実験結果と近似式の比較の例	30
3.4.4	実験結果に基づく拡がり係数の分布	31
3.4.5	大型水槽での実験結果の平均値と理論解の比較	31
3.5.1	モデルを用いた油の拡がりの計算例	33
3.5.2	油の拡がりに関する理論解と数値計算モデルの比較	33

3.5.3	粒子の発散の概念図	34
3.5.4	斥力モデルによる油粒子の拡散計算結果	36
3.5.5	斥力モデルによる油粒子の拡散半径と Fay のモデルの比較	37
3.5.6	斥力モデルによる流れ場における油粒子の移流拡散	38
3.6.1	定常流における油拡散実験の模式図	39
3.6.2	定常流における油拡散に関する実験結果	39
3.6.3	定常流における油拡散に関する数値計算結果	40
3.6.4	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	40
4.2.1	台風防災実験水路	48
4.2.2	実験水槽全体図	48
4.2.3	実験の模式図	49
4.2.4	画像計測方法	49
4.2.5	疑似油の風係数の分布	50
4.3.1	疑似油を用いた水平乱流拡散実験を実施した海域	51
4.3.2	疑似油を用いた水平乱流拡散実験の模式図	51
4.3.3	風況及び流況データ計測方法	51
4.3.4	疑似油の例	52
4.3.5	疑似油漂流実験状況（平塚市周辺）	52
4.4.1	風速と水平乱流拡散係数の関係	53
4.4.2	流速と水平乱流拡散係数の関係	53
4.4.3	疑似油の平均移動速度と水平乱流拡散係数の関係	54
4.5.1	拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係	54
4.5.2	時間と空間スケールに対する海の乱流の模式的分類	56
5.1.1	Hebei Spirit 号油流出事故発生場所	58
5.1.2	事故時の風況観測値	59
5.3.1	Anheung の験潮記録と潮汐数値計算の比較	61
5.3.2	流出油の観測結果と計算結果の比較	62
5.4.1	油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散の影響	65
5.4.2	Smagorinsky モデルによる水平渦動粘性係数のオーダーの推定	66
5.4.3	水平乱流拡散係数の推定方法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	66
5.4.4	水平乱流拡散係数と拡散面積計算結果の関係	67
6.1.1	Diamond Grace 号油流出事故発生場所	70

6.1.2	事故時の風況観測値	70
6.3.1	第二海堡の観測値と計算値の各分潮の比較	73
6.3.2	事故時の横浜新港の潮位観測値と計算値の比較	73
6.3.3	流出油の観測結果と計算結果の比較	75
7.1.1	事故時の風況観測値	78
7.1.2	調査地点と油の漂着範囲	78
7.1.3	調査地点 (1)	79
7.1.4	調査地点 (2)	79
7.1.5	調査地点 (3)	79
7.1.6	調査地点 (5)	79
7.3.1	流出油の漂流予測計算結果	81
8.2.1	油膜自身の特性による C 重油の拡散と油の乱流拡散の拡散半径の時間変化	86
8.4.1	漂流油捕捉システムの概要	89
8.4.2	水表面の油の有無と風による水表面の波立ちの関係	89
A.2.1	潮汐流計算範囲	104

表目次

2.2.1	風係数法を用いた流出油漂流予測モデルと風係数	15
3.3.1	油回収実海域再現水槽の仕様	25
3.3.2	油の種類と物性	26
3.7.1	既往の研究と本実験で得られた拡がり係数 k_3	41
4.2.1	10 m 換算風速と風係数の関係	49
5.2.1	潮汐流の計算条件	60
5.2.2	吹送流の直接計算における計算条件	60
5.2.3	油拡散粒子モデルの計算条件	61
5.3.1	観測結果と計算結果における油の移流の比較	63
5.3.2	観測結果と計算結果における油の拡散の比較	63
6.2.1	潮汐流の計算条件	71
6.2.2	計算に使用した風向風速観測点の位置と高度	71
6.2.3	油拡散粒子モデルの計算条件	72
6.3.1	油膜の厚さと油膜の外見の関係	74
7.2.1	油拡散粒子モデルの計算条件	80
8.3.1	移流外力の概要	88
A.2.1	潮汐流の計算条件	103
A.2.2	主要 8 分潮の定数表	105

第 1 章

序論

1.1 背景

タンカーの海難事故や油井の事故による油流出は従来に比較して減っているけれども、依然日本及び世界各地において発生している。図 1.1.1 は、年ごとの世界のタンカー油流出事故の回数 [1] を示す。これを見ると 1970 年代から 2000 年代にかけて、大規模な油流出事故の回数は減ってきている。しかしながら、大規模な油流出が完全になくなったわけではなく、今後も油流出が発生すると予想される。

2000 年代に入ってから、2002 年にスペイン沖で **Prestige** 号の油流出事故が発生し、約 63,000 kL もの油が流出した。また、2007 年に韓国西岸の泰安沖で **Hebei spirit** 号とクレーン台船の衝突による油流出事故が発生し、約 12,000 kL もの原油が流出した。流出した油は韓国西海岸の広範囲に拡散し、大きな環境被害を及ぼした。

タンカー以外の油流出では、2010 年にメキシコ湾の MC252 において油井 **Deep Water Horizon** が爆発炎上し、水深約 1,500 m の海底から油が流出した。油の流出量は約 779,100

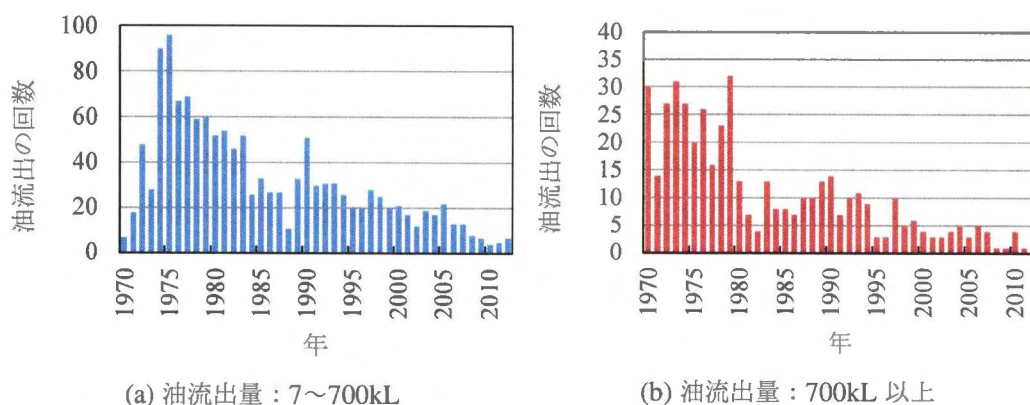


図 1.1.1: 世界のタンカー油流出事故の回数 [1]

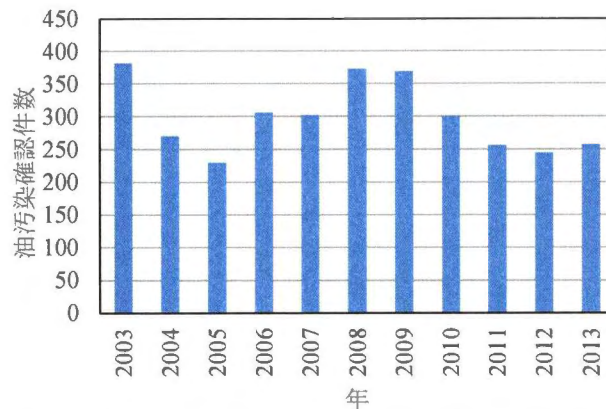


図 1.1.2: 近年の我が国周辺海域における油汚染発生件数 [4]

kL といわれており世界最大級の油流出事故となった。

我が国近海においてもタンカーからの油流出が発生している。1997年1月に日本海でナホトカ号の油流出事故があった。油の流出量は約 6,240 kL であり、日本海沿岸の広い範囲で被害があった。ナホトカ号事故のときは風浪が強く、洋上での油回収作業が困難であった。また流出した油が C 重油であり、流出した油がエマルジョン化し高粘度となったため、油回収作業は困難を極めた [2]。同じく 1997 年の 7 月には東京湾においてダイヤモンドグレース号の油流出事故があり、約 1,550 kL の油が流出している。

タンカー以外の油流出では、2011 年の東日本大震災の際に各地で大きな被害があり、発電所、工場、船舶、自動車等からの油流出が多数発生している。消防庁が行ったアンケート結果（畑山 [3]）によると、屋外タンク貯蔵所からの油流出量は確認されているだけで 46,000 kL を超えている。これはナホトカ号重油流出事故の油流出量の約 10 倍である。

災害時に油流出が発生し港湾内に拡がると、船舶の港への入港や係留ができないため、緊急物資の運搬に大きな影響を及ぼす。また、油が陸上にまで運ばれると、港湾施設が使用できない、悪臭、毒性による人体への影響が懸念される等といった問題が発生するほか、火災が発生する可能性がある。さらに、津波の濁水中の土粒子に重油が付着し、海底に沈降することで、長期的な環境問題、風評被害を引き起こすと考えられる。

今後も日本近海において大規模油流出事故が発生する可能性があると考えられる。図 1.1.2 は近年の我が国周辺における油汚染発生件数 [4] である。油汚染報告件数は年間約 300 件程度と非常に多い。これらは小規模な油流出がほとんどであるけれども、小さな事故に大きな事故の要因が隠れており、今後も大規模油流出のリスクがあると考えられる。そのため、油流出に関する十分な準備が必要となる。

油流出災害が発生した際は初動体制の構築、防除計画の策定が行われ、その際に数値計算を用いた流出油の漂流シミュレーションが情報として用いられる。詳細な防除計画の策



図 1.1.3: 国土交通省が所有する大型油回収船 [5]

定のためには油の漂流位置を高精度に予測できることが望ましい。また、地震、津波等自然災害による港湾での油流出被害を予測するツールとして、高精度に予測できる数値計算の開発が望まれている。

国土交通省では図 1.1.3 のような大型の油回収船を所有し、外洋を含む日本近海において油流出が発生した際は 48 時間以内に油回収作業を行える 3 船体制をとっている。また、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海といった内湾を対象とした小型の油回収船を所有しており、海上保安庁の要請により油回収作業を行う。そのため、油流出事故が発生した際に流出油の拡散や移流を予測し、効率的に油回収を行うために、流出油の漂流シミュレーションを用いることが期待されている。また、平時においては油回収船による防除訓練を行っており、訓練の想定として流出油の漂流シミュレーションの活用も期待されている。

そこで、著者が所属する独立行政法人港湾空港技術研究所では 2007 年度から油回収船による油回収作業の支援を目的とした、漂流予測に関する数値計算法の開発に取り組んできた。

1.2 既往の研究

1.2.1 海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法の概要

海上に流出した油は、流れ、風、波等の物理的な過程、気温、水温、紫外線等の化学的な過程、生物分解等の生物的な過程により様々な状態を変化させる。また、油の種類（軽質油、重油、原油等）の違いによりその過程が異なる。図 1.2.1 は流出油の物理的、化学的、生物的な状態変化過程を示す。移流、拡散、蒸発、沈降、溶解、エマルジョン化（乳化、もしくはエマルジョン化ともいう）、堆積、生物分解といった変化が生じる。

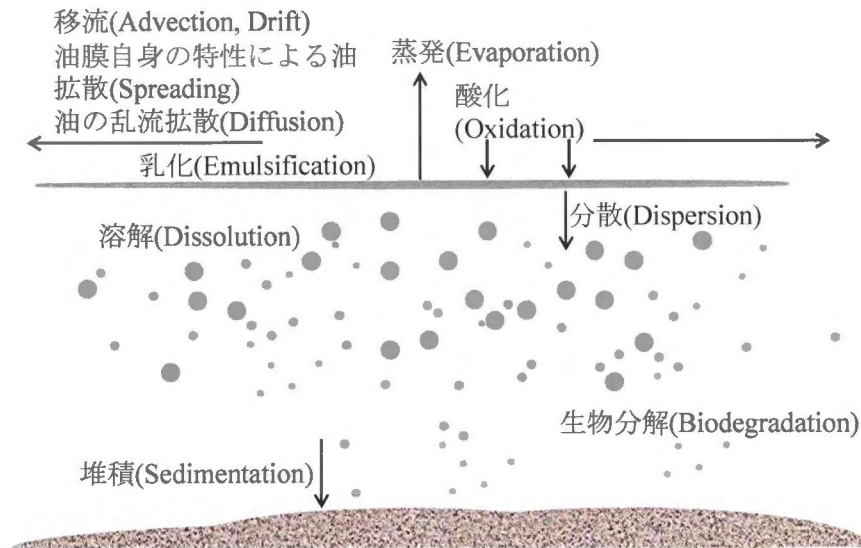


図 1.2.1: 流出油の物理的, 化学的, 生物的状态変化過程

流出油の物理的, 化学的, 生物的状态変化過程の予測するモデルとして, 主に移流と拡散を予測するモデル (Transport model) と, 蒸発, 分散, 溶解, エマルジョン化, 堆積, 生物分解等の状態変化を予測するモデル (Fate model) がある. 拡散と移流を予測するモデルは油回収位置の選定, 環境脆弱性の高い海域でのオイルブームの展張位置の決定, 季節別油漂着リスクの評価の指標等に用いられる. 状態変化を予測するモデルは油回収資機材の選定, 環境影響評価等の指標に用いられる. 数値計算においては移流と拡散を予測するモデル (例えば, AL-Rabeh[6]; Wu and Wang[7]), 状態変化を予測するモデル (例えば, ADIOS2, http://archive.orr.noaa.gov/book_shelf/538_adios.pdf), 両者を同時に計算するモデル (例えば, Johansen[8]; 石油連盟 [9]; Chao ら [10]; Wang ら [11]) がある.

移流と拡散を予測するモデルには平面 2 次元の挙動を対象としたモデル (例えば, Johansen[8]; AL-Rabeh[6]; Wu and Wang[7]) と, 水中の挙動を含めた 3 次元の移動を対象としたモデル (例えば, 石油連盟 [9]; Chao ら [10]; Wang ら [11]) がある. タンカー事故等のように, 油の流出元が海上にある場合, 油の移流及び拡散は平面 2 次元の挙動が支配的である.

数値計算を用いた流出油の漂流予測において, 平面 2 次元の移動を対象とした海表面での流出油の移流と水平拡散は, 3 つの効果を検討する必要がある. 1 つ目は海流, 潮汐流, 風による表面流といった, 海表面の流況による移流, 2 つ目は重力 (油と海水の密度差による浮力) や表面張力による油拡散 (Spreading), 3 つ目は風や流れの乱れによる油の乱流拡散 (Diffusion, 渦拡散ともいう) である.

数値計算の手法は, 流出油を粒子の集まりと考える Lagrange 的計算手法 (例えば, 石

油連盟 [9]; Chao ら [10]; Wang ら [11]) と, 計算領域を格子で区切り, 油の位置を Euler 的に計算する手法 (例えば, Tkalich ら [12]) がある. 第 2 章で述べるとおり, 移流及び拡散の効果はそれぞれ速度として求めて, それらをベクトル合成して計算する方法が合理的で, 計算方法として有効であり, その場合 Lagrange 的計算手法が適している.

流出油を粒子の集まりと考える Lagrange 的計算手法を用いた数値計算法は, 数多く提案されている. 既往の数値計算法の多くは第 2 章で述べるとおり, 移流及び拡散の効果を各粒子ごとの移動速度として求め, それらの速度を合成して油の移動速度を計算している. 既往の Lagrange 的計算手法を用いた数値計算法における問題点は以下の 3 項目であると考えられる.

1.2.2 油膜自身の特性による油拡散に関する研究

油は流れがない静かな水面においても拡がる. 静水面上の油は重力 (油と水の密度差による浮力) と, 正味の表面張力によって拡がっており, この効果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い, 英語では Spreading や Mechanical Spreading という.

油膜自身の特性による油拡散の再現モデルはいくつか提案されている. まず最も有名なものと思われるのは油拡散半径の時間変化を求める Fay [13], [14] のモデルであり, 多くの数値計算法に採り入れられている (例えば, 石油連盟 [9]; Wang ら [15]). Fay は, 水面の油は重力と表面張力によって拡がり, 慣性力, 粘性力によって拡がりが抑えられると考えた. また, 油流出からの時間経過に伴い, それぞれの力の大きさの相対的な関係が変化すると考えた. そこで, Fay は油が流出し拡がる過程において, 支配的な因子は時間経過に伴い (a) 重力-慣性領域, (b) 重力-粘性領域, (c) 表面張力-粘性領域の 3 つに分けられるとし, 3 つの領域についてそれぞれ油流出からの経過時間と拡散距離 (拡散面積) の関係を導出した.

また, Fay のモデルを改良し, 風の影響を考慮した油拡散モデルが Lehr ら [16] から提案されており, こちらも数値計算に広く採り入れられている (例えば Chao ら [10]; Guo and Wang [17]).

Fay に代表されるモデルは油流出からの経過時間と拡散距離の関係を求めているため, 粒子モデルを用いた数値計算においてどのように計算すればよいか, 既往の研究では未解明のままである. そのため Fay のモデルを粒子を用いた数値計算法に適応するには数値計算モデルが必要となる. また, Fay に代表されるモデルにおいて, 油は瞬間的に流出すると考えている. しかしながら, タンカーやパイプラインから油流出事故が発生すると, 油は連続的に流出するため, 瞬間流出を対象としたモデルをそのまま用いることができない. また, 海上には海流, 潮汐流, 風の影響による表面流があるため, 油が流れの中で連

続流出するといった複雑な現象について再現できる数値計算モデルであることが求められる。

また、Fay のモデルで経過時間から拡散距離を求める際には拡がり係数が必要である。Fay は 1 次元方向の油膜自身の特性による油拡散については実験結果と比較して拡がり係数を求めているけれども、軸対象（平面 2 次元）方向については実験を行っておらず、理論的に拡がり係数を求めている。そのため、平面 2 次元方向の油膜自身の特性による油拡散に関する実験を行う必要がある。

油膜自身の特性による油拡散実験の既往の研究はいくつか行われている（例えば、高橋ら [18] ; Akiyama ら [19] ; Buist[20]）けれども、それらはいずれも 1 次元方向を対象としており、平面 2 次元方向の油膜自身の特性による油拡散に関する実験は著者らの知る限りでは、埜口ら [21] のみである。

埜口らは、重油を用いて静水面上での 1 次元及び平面 2 次元方向の拡がり実験を行い、実験結果と Fay の理論解との比較検証を行った。平面 2 次元方向の実験は水平方向に 6×6 m、水深 50～70 cm の平面水槽において行った。埜口らは、(a) 重力-慣性領域、及び (b) 重力-粘性領域において、実験結果は Fay のモデルと良好に一致し、(c) 表面張力-粘性領域において、実験結果は Fay のモデルと一致しないことを示した。また、実験において周辺部が薄い層になった際の油膜形状の観察が困難で、詳細な運動の機構は検討できなかったとしている。

以上のことから、油膜自身の特性による油拡散に関する Fay のモデルにおける拡がり係数及び数値計算モデルについて、十分な議論がなされていない状況にある。

1.2.3 油の乱流拡散に関する研究

海には潮汐流、海流、風等の影響による大小様々な乱れ（渦）が存在し、この乱れにより海上に流出した油は拡散していく。これを乱流拡散といい、英語では Diffusion という。

油の乱流拡散の計算について、既往の多くの数値計算法では 2.4 節で説明するランダムウォークモデルを用いている（例えば、石油連盟 [9] ; Chao ら [10] ; Wang ら [15] ; Guo and Wang[17]）。ランダムウォークモデルを用いた方法においては水平乱流拡散係数のみが油の拡がりの大きさを決定するため、拡散係数は計算結果に大きく影響を及ぼす。けれども、流出油の数値計算に用いる係数の設定方法について、十分な議論がなされていないままであった。

例えば ASCE Task Committee[22] は水平乱流拡散係数を $1\sim 100\text{ m}^2/\text{s}$ として計算することを提案している。しかしながら、これは設定値により拡散面積の計算結果が 100 倍異なることを意味する。

ケーススタディを見ると、Chao ら [10] はシンガポール海峡での油流出の再現計算にお

いて、水平乱流拡散係数を $10 \text{ m}^2/\text{s}$ として油の乱流拡散を計算している。

しかしながら、他の既往研究には具体的な水平乱流拡散係数の記載が見つからなかった。よって油拡散を精度よく計算するために、拡散係数を適切に見積もる方法が求められていた。

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[23] 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・樋口 [24] は海面下 1 m に抵抗板をつりさげた 60 cm 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 [25] は海面からそれぞれ 1 m, 6 m, 11 m, 16 m の位置にドロッグ (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、特に海面付近では風などの影響が大きいと考えられるため、水平乱流拡散係数が海水中より大きくなることが予想される。

以上のことから、海上流出油の乱流拡散を予測するためのランダムウォークモデルを用いた計算に必要となる、海水面極近傍の水平乱流拡散係数について、その導出方法が求められている。

1.2.4 数値計算法の有用性

既に紹介しているように、海上に流出した油の拡散、移流に関する数値計算法は多くの事例がある（例えば、石油連盟 [9] ; Proctor ら [26] ; Varlamov ら [27] ; Chao ら [10] ; Castanedo ら [28] ; Wang ら [11] ; Sotillo ら [29] ; Guo and Wang[17]）。

既往の数値計算法の概要と、実際の油流出事故の予測計算や再現計算に関して、以下の事例が挙げられる。

石油連盟 [9] は 1991 年から流出油の漂流予測を行う”流出油の拡散・漂流予測モデル”を開発しており、現在に至るまで改良を行っている。流出油の挙動について、移流、油膜自身の特性による拡散、流れの乱れによる乱流拡散、蒸発、鉛直分散、乳化、海面下での挙動について予測対象としている。予測モデルを初めて扱うユーザーでも操作が簡易であり、非常に使いやすい GUI となっている特徴がある。石油連盟は本モデルを用いて 1997 年 1 月に日本海で発生したナホトカ号の油流出事故の再現計算を行っている。その際に海流と風を考慮して再現計算を行い、油の移流と拡散の計算結果を説明している。特に海上での分布状況の比較は行われず、府県ごとの油回収量を示している。また、1997 年 7

月に東京湾で発生したダイヤモンドグレース号油流出事故（第6章参照）の流出油漂流シミュレーションを実施しているけれども、計算結果と観測結果との比較は行われておらず、計算結果が示されているのみである。

Varlamov ら [27] は日本海を対象とした流出油の漂流予測モデルを開発している。Varlamov らもまた日本海で発生したナホトカ号の油流出事故の再現計算を行っている。ここでは海流と風を考慮して再現計算を行い、油の移流と拡散の計算結果を説明しているけれども、海上での分布状況の比較は明示されていない。また、他の海域における適応性については明らかではない。

Wang ら [11] は1990年6月に渤海で発生した油流出事故との比較計算を行っている。ここでは潮汐流と風を考慮して再現計算を行い、油の移流と拡散について観測結果と比較している。

Proctor ら [26] は1991年1月に Arabian Gulf において発生した油流出に関して観測結果と数値計算の比較を行っている。

Chao ら [10] はシンガポール海峡周辺で発生した油流出事故との比較計算を行っている。ここでも潮汐流と風を考慮して再現計算を行い、油の移流と拡散について観測結果と比較している。

Guo and Wang [17] は2005年に発生した中国大連沖の油流出の再現計算を行っており、観測結果と計算結果はよく一致している。

しかしながら、実際の油流出の再現計算及び精度検証を複数の海域や油流出事例について行っている既往研究は見当たらず、上述したように1つの油流出の再現計算を行っているか、再現計算を行わずモデルを提案するのみにとどまっている。海上での油流出事故は日本近海において内湾、外洋のいずれにおいても発生する可能性がある。そのため、開発する数値計算法は、油回収船での作業に必要となる日本近海のいずれにおいても計算ができることが求められる。すなわち、特定の海域、油流出事故のみでなく、複数の海域及び油流出事故を同じ数値計算法を用いて、同様の計算方法で再現できることを確認することによって、有用性を示すことができると考える。

1.3 本論文の目的と構成

本論文は、以上のような背景と既往の研究を踏まえて、海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法を開発することを目的とする。

まず、基本方針について、本論文で開発する数値計算法は、油回収船において流出油の効率的な回収を支援するためのものとする。そこで、開発する数値計算法は以下の通りとする。まず、海上流出油の移流及び拡散のみを予測対象とするため、油の挙動は平面2次元を対象とする。予測海域は油回収船の油回収作業範囲となりうる、日本近海の閉鎖性海

域及び外洋とする。予測期間は油流出から1~2日後について精緻に予測できることとする。また、流出油の漂流予測を行う数値計算はLagrange的に行う方がよいと考えられるため、数値計算法の構築にはLagrange的な計算手法を採用する。

次に1.2.2項において示した油膜自身の特性による油拡散に関する既往の研究の問題点である、Fay[13], [14]のモデルのモデルの適応性について検討を行うとともに、Fayのモデルに基づいた数値計算モデルを新たに開発する。

次に1.2.3項において示した油の乱流拡散に関する既往の研究の問題点である、ランダムウォークモデルにおける水平乱流拡散係数の導出方法について検討する。

さらに、1.2.4項において示した数値計算法の有用性について、開発した数値計算法に関して、2つの油流出事例に関する再現計算と1つの油流出事例に関する予測計算の結果を示し、議論する。

本論文は9章より構成されており、以下では各章の概要を示す。

第2章では海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法である、油拡散粒子モデルの内容と計算方法について説明する。まず海流、潮汐流、風による表面流による油の移流の計算方法について説明する。次に、粒子を用いた数値計算モデルの概要を示す。次に、水平方向の油の拡がりを支配する油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散について計算方法を説明する。最後に、海岸線、構造物等境界における計算方法について説明する。

第3章では油膜自身の特性による油拡散に関する新しい数値計算モデルを提案する。まず、Fayの油拡散の考え方を用いて、粒子間の斥力を考慮した数値計算モデルを新たに導出する。次に、平面水槽を用いた室内実験により油膜自身の特性による油拡散実験を実施し、Fayの式との比較を行うとともに、拡がり係数を求める。また、油拡散に関する支配的な力について考察する。次に、室内実験結果を踏まえて、ランダムウォークの考え方に基づいた新しい数値計算モデルを構築する。最後に、定常流条件下における油の連続流出拡散実験を行うとともに、数値計算の結果と比較し、数値計算モデルの妥当性について検証する。

第4章では油の乱流拡散に関して、従来は検討されていなかった海水面極近傍の水平乱流拡散係数を導出する方法について検討する。そのために、実海域において疑似油の拡散実験を実施し、実験結果に基づき、数値計算に導入するための水平乱流拡散係数の導出方法について考察する。

第5章から7章では実際の油流出事故を対象として数値計算を実施し、観測結果と比較することで、開発した数値計算法の妥当性について検証する。まず、第5章では2007年に韓国西岸の泰安沖で発生したHebei Spirit号油流出事故を対象に再現計算を行い、観測結果と比較する。また、計算に用いるパラメータについて検討を行う。

第6章では1997年に東京湾で発生したDiamond Grace号油流出事故を対象に再現計算を行い、観測結果と比較する。

第7章では2014年に東京湾で発生したBeagle3号油流出事故を対象に予測計算を行い、観測結果と比較する。

第8章では本研究で得られた海上流出油の移流及び拡散に関する研究成果を考察し、既往の研究から進展させた点について述べる。次に、開発した数値計算法について考察を行う。また、本論文で提案する油拡散粒子モデルを用いた即時の流出油漂流予測体制について説明する。さらに、油拡散粒子モデルを応用した油回収船における油回収の操船を支援する、漂流油捕捉システムについて説明する。

第9章では本論文で得られた研究成果を総括するとともに、今後の展望について述べる。

参考文献

- [1] S. Musk. Trends in Oil Spills from Tankers and ITOPF Non-tanker Attended Incidents. *Paper Presented at AMOP*, 2012.
- [2] 佐尾和子. 重油汚染・明日のために-「ナホトカ」は日本を変えられるか-. 海洋工学研究所出版部, 1998.
- [3] 畑山健. 石油タンクの津波被害について. 第15回消防防災研究講演会資料, pp. 85-104, 2012.
- [4] 海上保安庁警備救難部環境防災課. 海洋汚染の現状(平成25年1月~12月). 海上防災, 2014.
- [5] 新保修, 土市進, 野田登, 伊賀浩之, 羽田広希. 大型油浚渫船「白山」の油回収システムについて. 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 37-42, 2003.
- [6] A. H. AL-Rabeh. Estimating Surface Oil Spill Transport due to Wind in the Arabian Gulf. *Ocean Engineering*, Vol. 21, pp. 461-465, 1994.
- [7] Z. Wu and D. Wang. Simulation of the Oil Slick Movement in Tidal Waterways. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, pp. 96-102, 2010.
- [8] O. Johansen. DOOSIM - A New Simulation Model for Oil Spill Management. *Proceedings of International Oil Spill Conference*, pp. 529-532, 1987.
- [9] 石油連盟. 流出油の拡散予測モデル調査報告書, 1992.
- [10] X. Chao, N. J. Shankar, and S. S. Y. Wang. Development and Application of Oil Spill Model for Singapore Coastal Waters. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, pp. 495-503, 2003.
- [11] S. Wang, Y. Shen, Y. Guo, and J. Tang. Three-Dimensional Numerical Simulation for Transport of Oil Spills in Seas. *Ocean Engineering*, Vol. 35, pp. 503-510, 2008.
- [12] P. Tkalich, MD. K. Huda, and K. H. Gin. A Multiphase Oil Spill Model. *Journal of*

- Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 2, pp. 115–125, 2003.
- [13] J. A. Fay. The Spread of Oil on a Calm Sea. *Plenum Press*, pp. 53–64, 1969.
- [14] J. A. Fay. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. *Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, pp. 463–467, 1971.
- [15] W. D. Wang, Y. M. Shen, and Y. H. Zheng. Two-Dimensional Numerical Simulation for Transport and Fate of Oil Spills in Seas. *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp. 1556–1571, 2005.
- [16] W. J. Lehr, R. J. Fraga, M. S. Belen, and H. M. Cekirge. A New Technique to Estimate Initial Spill Size Using a Modified Fay-Type Spreading Formula. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 15, pp. 326–329, 1984.
- [17] W. J. Guo and Y. X. Wang. A Numerical Oil Spill Model Based on a Hybrid Method. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 58, pp. 726–734, 2009.
- [18] 高橋照男, 北村吉朗, 中田賢三. 静止水面上での油膜の拡がり-油膜内の粘性抵抗の拡がり速度に及ぼす影響-. 化学工学論文集, Vol. 5, No. 5, pp. 526–531, 1979.
- [19] T. Akiyama, S. Mitsumori, T. Terada, and K. Koide. A Study of the Initial Stage of Oil Spreading on Calm Water through Methods of both Instantaneous and Constant Rate of Oil Release. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 16, No. 6, pp. 502–507, 1983.
- [20] I. Buist, S. Potter, D. Mackay, and M. Charles. Laboratory Studies on the Behavior and Cleanup of Waxy Crude Oil Spills. *Proceedings of International Oil Spill Conference*, pp. 105–113, 1989.
- [21] 埜口英昭, 早川典生, 橋本英資, 山崎宗広. 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, 1979.
- [22] ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, pp. 594–609, 1996.
- [23] A. Okubo. Oceanic Diffusion Diagrams. *Deep-Sea Research*, Vol. 18, pp. 789–802, 1971.
- [24] 柳哲雄, 樋口明生. 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, 1982.
- [25] 道田豊, 田中潔, 小松輝久, 石神健二, 中嶋理人. 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, Vol. 46, No. 2, pp. 77–83, 2009.
- [26] R. Proctor, R. A. Flather, and A. J. Elliott. Modelling Tides and Surface Drift in the Arabian Gulf -Application to the Gulf Oil Spill. *Continental Shelf Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 531–545, 1994.

- [27] S. M. Varlamov, J. Yoon, N. Hirose, H. Kawamura, and K. Shiohara. Simulation of the Oil Spill Processes in the Sea of Japan with Regional Ocean Circulation Model. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 94–107, 1999.
- [28] S. Castanedo, R. Medina, I. J. Losada, C. Vidal, F. J. Mendez, A. Osorio, J. A. Juanes, and A. Puente. The Prestige Oil Spill in Cantabria (Bay of Biscay). Part I: Operational Forecasting System for Quick Response, Risk Assessment and Protection of Natural Resources. *Journal of Coastal Research*, Vol. 22, No. 6, pp. 1474–1489, 2006.
- [29] M. G. Sotillo, E. A. Fanjul, S. Castanedo, A. J. Abascal, J. Menendez, M. Emelianov, R. Olivella, E. Garcia-Ladona, M. Ruiz-Villarreal, J. Conde, M. Gomez, P. Conde, A. D. Gutierrez, and R. Medina. Towards an Operational System for Oil-Spill Forecast over Spanish Waters: Initial Developments and Implementation Test. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 56, pp. 686–703, 2008.

第 2 章

油拡散粒子モデルの開発及び計算方法

2.1 モデル概要

第 1 章で述べた通り，海上に流出した油は流れ，風，波等の物理的な過程，気温，紫外線，生物分解等の化学的，生物的な過程により様々に状態を変化させる．今回開発する数値計算は海表面の流況による移流，油膜自身の特性による油拡散及び流れの乱れによる油の乱流拡散を予測の対象とする．

海面上の油は流れ，風，波の影響により移流する．移流外力のうち，流出油の漂流予測に影響が大きいのは海流，潮汐流及び風による表面流である．海流は定性的には予測できるものの，漂流予測の観点では定量的な予測は難しい．潮汐流は往復流で，移流のほか油の拡散範囲に大きく影響を与える．海上における風速は陸上と比較して大きいため，風によって発生する表面流は，油の移流と拡散に大きく影響を与える．油拡散に与える波の影響は，波の質量輸送による移流，水中分散等が考えられるが，今回のモデルでは波の影響を考慮していない．

流出した油は重力，表面張力といった油膜自身の特性による油拡散と，流れの乱れによる油の乱流拡散との影響により拡がる．英語ではそれぞれ Spreading（もしくは Mechanical Spreading）及び Diffusion と表現される．海上での油流出の場合，流れの乱れによる油の乱流拡散のほうが支配的である場合が多いけれども，流れの乱れの少ない湾や大量の油流出の場合は油膜自身の特性による油拡散も無視できないと考えられる．

図 2.1.1 は油拡散粒子モデルの概要を示している．流出油の移流及び拡散は，油を粒子の集合体に見立て，ラグランジュ的に計算する．すなわち，各々の粒子 i の位置 X_i は，移動速度 U_i に対して，

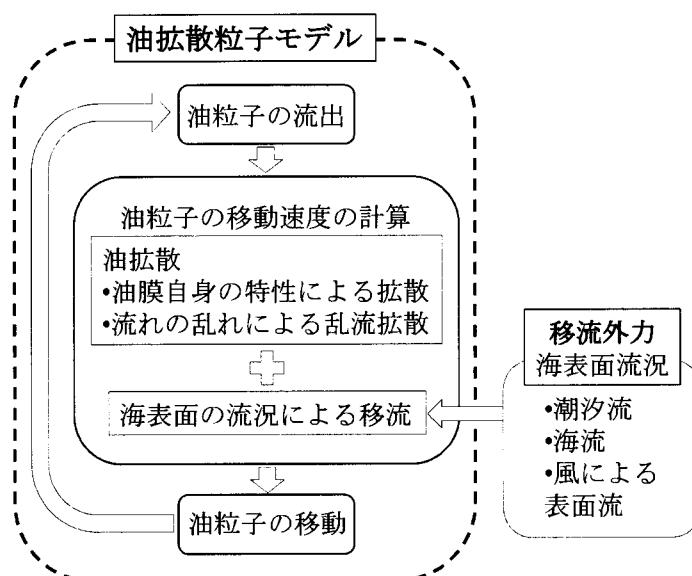


図 2.1.1: 油拡散粒子モデルの概要

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = U_i \quad (2.1.1)$$

で表わされる。ここで、 t は時間を表す。時間積分は、Euler 陽解法とし、着目時間 t の次の計算ステップにおいて、

$$X_i^{t+1} = X_i^{nt} + U_i \Delta t \quad (2.1.2)$$

とする。ここで Δt は計算時間刻みである。この計算方法は 1 次精度の陽解法であるため、精度の低い計算手法である。しかしながら、数値計算法の精度よりも、風や流れの移流外力の再現精度のほうが数値計算結果に与える影響が大きいため、数値計算法が 1 次精度であることについて特に議論しない。

油粒子の移動速度 U_i は水平 2 次元のみを考慮する。粒子の移動速度は海表面の流れに追従し、海表面の流れは各流れのベクトル合成で求めると考え、 U_i を、

$$U_i = U_{oi} + U_{ti} + U_{wi} + U_{si} + U_{di} + U_{bi} \quad (2.1.3)$$

と計算する。ここで、 U_{oi} は海流による移流速度、 U_{ti} は潮汐流による移流速度、 U_{wi} は風による移流速度、 U_{si} は油膜自身の特性による油拡散速度、 U_{di} は油の乱流拡散速度、 U_{bi} は境界からの距離に依存して付加した強制流速ベクトルを表わす。次節以降において、それぞれの取り扱いについて説明する。

表 2.2.1: 風係数法を用いた流出油漂流予測モデルと風係数

開発者	年	風係数 (%)
Wang and Hwang[2]	1974	3.0
Johansen[3]	1987	3.0
Shen and Yapa[4]	1988	3.0 (1.0~6.0 で 変化する)
Reed and Gundlach[5]	1989	3.0
AL-Rabeh[6]	1994	3.1
Sotillo ら [7]	2008	2.6
Wang ら [8]	2008	3.0
Guo and Wang[9]	2009	3.0
Wu and Wang[10]	2010	3.0

2.2 移流外力の計算方法・入力方法

油拡散粒子モデルにおいて、移流外力は海表面の流れである。海表面の流れは対馬海流、日本海流、千島海流といった海流、潮汐によって発生する潮汐流及び風による表面流を対象としている。移流外力は数値計算、現地観測等から作成したデータを油拡散粒子モデルに入力する。

海流及び潮汐流の流速は、海水面において流れに対する油の滑りや遅れはないと考えて、移流速度としてそのまま与える。

油の風による移流を計算する方法は2通りあると考えられ、一つは風係数法による表面流の推定法、もう一つは3次元流体計算モデル（例えば、富田・柿沼 [1]）を用いて直接海表面の吹送流を計算する方法である。以下でそれぞれの計算方法について説明する。

風係数法は表 2.2.1 の通り、従来から流出油の漂流予測に多く使われてきた手法であり、近年も用いられている。水面近傍の風速 W と風による表面流 U_w の関係は、大気から見た海面への接線応力と海面から見た大気への接線応力の釣り合いから、式 (2.2.1) のように求められる。

$$\tau = \rho_a C_{da} W^2 = \rho_w C_{dw} U_w^2 \quad (2.2.1)$$

ここで τ は接線応力、 ρ_a 、 ρ_w はそれぞれ大気、水の密度、 C_{da} 、 C_{dw} はそれぞれ大気か

ら海面，海面から大気の抵抗係数である． C_{da} と C_{dw} が等しいと仮定すると，

$$U_w = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} W \cong 0.035W \quad (2.2.2)$$

となり，水面近傍の風速 W の 0.035 倍の吹送流が発生することがわかる．本計算モデルでは風による油粒子の移流速度 U_{wi} は式 (2.2.3) で計算する．

$$U_{wi} = C_w W_{10i} \quad (2.2.3)$$

ここで， C_w は風係数， W_{10i} は粒子 i の位置における海上 10 m での風速を表わす．海面近傍より海上 10 m での風速のほうが大きくなることから，本計算モデルでは風係数 C_w を 0.03 とする．

次に，3次元流体計算モデルである STOC-ML [1] (付録 A 参照) を用いた吹送流の直接推定方法について説明する．計算において水面上で式 (2.2.4) のように風応力 τ を与える．

$$\tau = \rho_a C_{da} W_{10}^2 \quad (2.2.4)$$

ここで， W_{10} は海上 10 m における風速である．海面抵抗係数 C_{da} は，本多・光易 [11] の式を用いて，以下のように与える．

$$C_{da} = \begin{cases} (1.29 - 0.024|W_{10}|) \times 10^{-3} & W_{10} < 8 \text{ m/s} \\ (0.581 + 0.063|W_{10}|) \times 10^{-3} & W_{10} \geq 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.2.5)$$

風係数法と直接海表面の吹送流を計算する方法を用いた流出油の移流予測については，第 5 章において検証を行う．

2.3 油膜自身の特性による油拡散の計算方法

油膜自身の特性による油拡散は，重力（油と海水の密度差）及び表面張力によって拡がる現象のことをいう．最も有名なモデルとして Fay[12] のモデルがある．Fay のモデルと本論文で提案する新しい数値計算モデルは第 3 章で詳しく説明する．

2.4 油の乱流拡散の計算方法

海には大小様々な乱れ（渦）が存在し，この乱れにより海上に流出した油は拡散していく．数値計算で求めた流況データのメッシュ間の流況や，観測値の計測点間の流況は不明なため，線形補間するなどして対応するけれども，メッシュ間や計測点間の再現できていない流れ（乱れ）によっても油は移流，拡散する．このような，再現できているグリッド

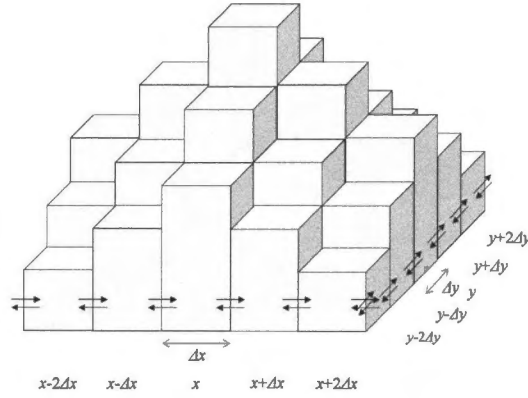


図 2.4.1: ランダムウォークの導出の定義

スケールの流れのみで再現できない，サブグリッドスケールの流れによって生じる油の移流及び拡散を乱流拡散として補間している。

本数値計算モデルにおいて，乱流拡散を考慮する際はランダムウォークで計算する．ランダムウォークは拡散方程式を計算していることと同義であり，それは以下の通りに説明できる。

2次元空間を図 2.4.1 のように， Δx ， Δy の空間格子で定義し，ある濃度 C が拡散する場合を考える．ある時間から Δt 後に濃度がとなりに進む確率は $1/4$ とする。

ある時刻 t から次の時間ステップへ進むとき，

$$C_{x,y}^{t+\Delta t} = \frac{1}{4} (C_{x-1,y}^t + C_{x+1,y}^t + C_{x,y-1}^t + C_{x,y+1}^t) \quad (2.4.1)$$

となる．ここで，以下のようにテイラー展開を行う。

$$C_{x,y}^{t+\Delta t} = C_{x,y}^t + \Delta t \frac{\partial C_{x,y}^t}{\partial t} \quad (2.4.2)$$

$$C_{x\pm 1,y}^t = C_{x,y}^t \pm \Delta x \frac{\partial C_{x,y}^t}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 C_{x,y}^t}{\partial x^2} \quad (2.4.3)$$

$$C_{x,y\pm 1}^t = C_{x,y}^t \pm \Delta y \frac{\partial C_{x,y}^t}{\partial y} + \frac{\Delta y^2}{2} \frac{\partial^2 C_{x,y}^t}{\partial y^2} \quad (2.4.4)$$

よって，式 (2.4.1) は以下のように書ける。

$$\frac{\partial C_{x,y}^t}{\partial t} = D_H \left(\frac{\partial^2 C_{x,y}^t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{x,y}^t}{\partial y^2} \right) \quad (2.4.5)$$

ここで， $\Delta = \Delta x = \Delta y$ として，

$$D_H = \frac{1}{4} \frac{\Delta^2}{\Delta t} \quad (2.4.6)$$

である。拡散速度 V_C は距離 Δ を時間 Δt で移動することから、

$$V_C = \frac{\Delta}{\Delta t} \quad (2.4.7)$$

と表される。式 (2.4.6) から得られる Δ を用いると、式 (2.4.7) は、

$$V_C = \sqrt{\frac{4D_H}{\Delta t}} \quad (2.4.8)$$

となる。したがって、平面 2 次元方向における油の乱流拡散速度 U_{di} は、式 (2.4.6) 及び式 (2.4.7) から、

$$U_{di} = \sqrt{\frac{2D_H}{\Delta t}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cos(2\pi R_{rand}) \\ \sqrt{2} \sin(2\pi R_{rand}) \end{bmatrix} \quad (2.4.9)$$

と書ける。ここで D_H は海水面極近傍の水平乱流拡散係数 (m^2/s)、 R_{rand} は 0 から 1 の一様乱数である。 D_H の求め方は、第 4 章で新しく提案しており、そちらで詳しく説明する。また、 \sin 、 \cos は平均 0、分散 0.5 の乱数であることから、式 (2.4.9) は式 (2.4.10) と書き換えることができる。

$$U_{di} = \sqrt{\frac{2D_H}{\Delta t}} \begin{bmatrix} R_{n1} \\ R_{n2} \end{bmatrix} \quad (2.4.10)$$

ここで、 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。

2.5 海岸線、構造物等境界における計算方法

海岸線や構造物等を考慮した計算を行えるように、海岸位置の緯度・経度を点情報として入力し、海岸位置（点とその線分）を漂流境界とした。油粒子は各海岸位置との距離ベクトル r_{bi} に応じて、以下のように処理した（図 2.5.1 参照）。すなわち、境界から r_{b1} 離れている場合は境界による影響なし（式 (2.5.1)）、境界から r_{b1} より近づくと境界からの距離に応じた斥力（強制流速ベクトル）を与える（式 (2.5.2)）、境界から r_{b2} より近づくと海岸あるいは構造物に漂着したとして粒子の移動を停止する（式 (2.5.3)）。

$$U_{bi} = 0 \quad r_{bi} > r_{b1} \quad (2.5.1)$$

$$U_{bi} = k_{br} \frac{r_{bi}}{|r_{bi}|^s} \quad r_{b1} \geq r_{bi} > r_{b2} \quad (2.5.2)$$

$$U_i = 0 \quad r_{b2} \geq r_{bi} \quad (2.5.3)$$

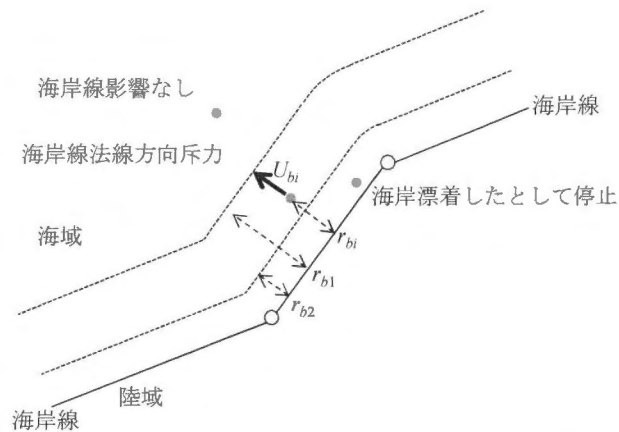


図 2.5.1: 海岸線，構造物境界での計算方法

ここで， s ， k_{br} は入力パラメータである．式 (2.5.2) は海岸付近では波の反射等の影響で，海岸法線に向かって移流しにくくなる効果を想定している．また，式 (2.5.3) は r_{b2} より油粒子が近付いた場合，粒子は漂着し再流出しないとしている．

2.6 結語

本章は海上に流出した油について，移流及び拡散を予測するための数値計算法である，油拡散粒子モデルの開発に向けて，その計算方法を示したものである．以下では，本章で得られた主要な結論を要約する．

まず初めに，海上に流出した油の挙動を予測するためには，自然外力による移流，重力，表面張力といった油膜自身の特性による油拡散，油の乱流拡散をそれぞれ速度ベクトルで求め，それらをベクトル合成して再現することを説明した．

次に，それぞれの速度ベクトルの計算方法について説明した．まず，移流外力の導入方法について述べた．移流外力は海流，潮汐流，風による表面流を考慮する必要があることを示した．その中で風による表面流の再現方法は 2 通り考えられ，一つは風係数法による表面流の推定法，もう一つは 3 次元流体計算モデルを用いて直接海表面の吹送流を計算する方法を説明した．風係数法と直接海表面の吹送流を計算する方法のどちらが有効であるかの具体的な考察は，第 5 章において検証を行うことを述べた．

続いて，油膜自身の特性による油拡散の速度ベクトルを計算する新しい数値計算モデルについて示した．また，数値計算モデルの詳細については第 3 章で紹介することを述べた．

さらに，油の乱流拡散の速度ベクトルの計算方法を示した．また，乱流拡散速度の計算に必要な海面極近傍の水平乱流拡散係数の新しい導出方法については第 4 章で説明

すると述べた。

最後に、海岸線、構造物等境界における計算方法について示した。海岸線、構造物等境界では、境界からの距離に応じて強制流速（強制流速ベクトル）を与えて、油の漂着を計算する方法を示した。

参考文献

- [1] 富田孝史, 柿沼太郎. 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. 港湾空港技術研究所報告, Vol. 44, No. 2, pp. 83–98, 2005.
- [2] S. Wang and L. Hwang. Numerical Simulation of Oil Slick Transport in Bays. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*, Vol. 14, pp. 2227–2244, 1974.
- [3] O. Johansen. DOOSIM - A New Simulation Model for Oil Spill Management. *Proceedings of International Oil Spill Conference*, pp. 529–532, 1987.
- [4] H. T. Shen and P. D. Yapa. Oil Slick Transport in Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, pp. 529–543, 1988.
- [5] M. Reed and E. Gundlach. A Coastal Zone Oil Spill Model Development and Sensitivity Studies. *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 5, pp. 411–449, 1989.
- [6] A. H. AL-Rabeh. Estimating Surface Oil Spill Transport due to Wind in the Arabian Gulf. *Ocean Engineering*, Vol. 21, pp. 461–465, 1994.
- [7] M. G. Sotillo, E. A. Fanjul, S. Castanedo, A. J. Abascal, J. Menendez, M. Emelianov, R. Olivella, E. Garcia-Ladona, M. Ruiz-Villarreal, J. Conde, M. Gomez, P. Conde, A. D. Gutierrez, and R. Medina. Towards an Operational System for Oil-Spill Forecast over Spanish Waters: Initial Developments and Implementation Test. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 56, pp. 686–703, 2008.
- [8] S. Wang, Y. Shen, Y. Guo, and J. Tang. Three-Dimensional Numerical Simulation for Transport of Oil Spills in Seas. *Ocean Engineering*, Vol. 35, pp. 503–510, 2008.
- [9] W. J. Guo and Y. X. Wang. A Numerical Oil Spill Model Based on a Hybrid Method. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 58, pp. 726–734, 2009.
- [10] Z. Wu and D. Wang. Simulation of the Oil Slick Movement in Tidal Waterways. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, pp. 96–102, 2010.
- [11] 本多忠夫, 光易恒. 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究. 海岸工学講演会論文集, Vol. 27, pp. 90–93, 1980.
- [12] J. A. Fay. The Spread of Oil on a Calm Sea. *Plenum Press*, pp. 53–64, 1969.

第 3 章

油膜自身の特性による油拡散の推定方法

3.1 概要

海上に流出した油は、海表面の流れや風により油が乱流拡散し、重力（油と海水の密度差による浮力）や表面張力といった、油膜のもつ特性によって拡がる。油膜のもつ特性によって拡がる効果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。

第 1 章で述べたとおり、油膜自身の特性による油拡散について、最も有名なモデルとして Fay[1], [2] のモデルが挙げられる。Fay は、油膜自身の特性による油拡散は重力、慣性力、粘性力、表面張力によって拡がり速度が決まり、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 のモデルは拡散半径と経過時間の関係について定式化しているため、粒子を用いたモデルに Fay のモデルを当てはめるには数値計算の上で工夫が必要となる。すなわち、Fay のモデルは油が瞬間流出した時からの時間の関数となっているけれども、タンカーやパイプラインから油流出事故が発生すると、油流出は連続的に発生するため、Fay のモデルをそのまま用いることはできない。また、油が流れの中で連続流出するといった複雑な現象について、どのように計算すればよいかよくわかっていなかった。

一方、Fay は後述する拡散半径を求める式 (3.2.6), (3.2.7), (3.2.8) の係数を理論的に導出しており [2], 2 次元方向の油の拡がりに関する実験を行っていない。Fay は 2 次元の係数は実海域での油流出事故における油の拡がりと比較して求めているけれども、油の乱流拡散及び移流の効果も含まれるため、再現精度に疑問が残る。

そこで本章において、以下のことについて検討を行う。まず、Fay のモデルについて簡単に紹介する。次に、油膜自身の特性による油拡散に関する実験を行い、Fay のモデルの

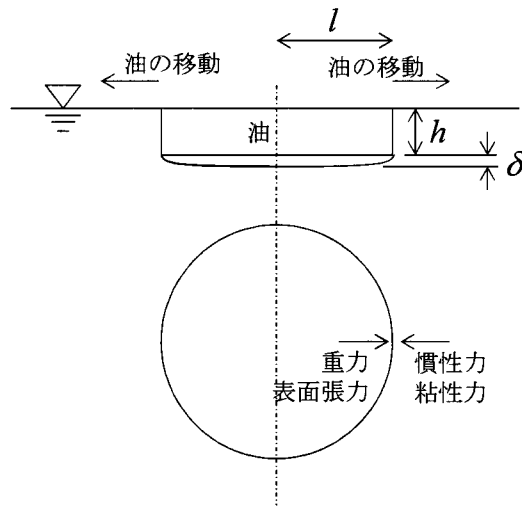


図 3.2.1: 油膜自身の特性による拡散の定義

適応性を評価するとともに、Fay のモデルにおける拡がり係数を評価する。次に、Fay のモデルを基に、数値計算において粒子の拡がり速度をランダムウォークを用いた方法で求めるモデルと、粒子間の斥力で求めるモデルを開発する。最後に、定常流条件下における油拡散の実験結果と、開発した数値計算モデルによる計算結果を比較し、計算結果の妥当性を検証する。

3.2 油膜自身の特性による油拡散に関する Fay のモデル

本節では、Fay[1], [2] のモデルについて簡単に紹介する。Fay は瞬間的に流出した水面の油膜を円柱として考え、それが時間経過とともに拡がっていく現象を考えた。その際に、水面の油は重力と表面張力によって拡がり、慣性力、粘性力によって拡がりや抑えられると考え、単位体積当たりにかかる力を図 3.2.1 のように定義し、それぞれモデル化を行った。また、油流出からの時間経過に伴い、それぞれの力の大きさの相対的な関係が変化すると考えた。そこで、Fay は油が流出し拡がる過程において、支配的な因子は時間経過に伴い (a) 重力-慣性領域、(b) 重力-粘性領域、(c) 表面張力-粘性領域の 3 つに分けられるとし、3 つの領域についてそれぞれ油流出からの経過時間と拡散距離（拡散面積）の関係を導出した。この場合において、Fay は以下の仮定を用いている。すなわち、(1) 油の拡がりには方向を持たず一様に水平方向に拡がり、油層厚の分布は考慮しない、(2) 油の粘性は水の粘性に比べて大きい、(3) 油の状態変化（粘性の変化、蒸発、溶解）はない。

以下で、油に働く力について説明する。まず、重力は油と水の密度差による浮力のことを表わしており、圧力勾配は式 (3.2.1) で表わされる。

$$\frac{\Delta\rho gh}{l} = \frac{\Delta\rho gV}{l^3} \quad (3.2.1)$$

ここで $\Delta\rho$ は水と油の密度差, g は重力加速度, l は拡散半径, h は油層厚, V は油層の体積で, $V = l^2 h$ で表わす. 慣性力は経過時間を t , 加速度を l/t^2 とすると, 式 (3.2.2) で表わされる.

$$\frac{\rho_w l}{t^2} \quad (3.2.2)$$

ここで, ρ_w は水の密度である. 粘性力は速度を l/t , 水の動粘性係数を ν_w , 水の境界層厚さを $\delta = (\nu_w t)^{1/2}$ とすると, 式 (3.2.3) で表わされる.

$$\rho_w \nu_w \frac{l/t}{\delta h} = \frac{\rho_w \nu_w^{1/2} l^3}{V t^{3/2}} \quad (3.2.3)$$

なお, 式 (3.2.3) から明らかな通り, ここでの粘性は水の粘性抵抗を表しており, 油の粘性ではない.

表面張力は式 (3.2.4) で表わされる.

$$\frac{\sigma_n}{lh} = \frac{\sigma_n l}{V} \quad (3.2.4)$$

ここで σ_n は正味の表面張力係数 (英語で Net Surface Tension) であり, 式 (3.2.5) で表される.

$$\sigma_n = \sigma_{wa} - (\sigma_{oa} + \sigma_{ow}) \quad (3.2.5)$$

ここで σ_{wa} , σ_{oa} , σ_{ow} はそれぞれ水-大気間, 油-大気間, 油-水間の表面張力係数である.

流出開始から約 1 時間後までを第 1 段階と呼ぶことにし, 重力と慣性力が卓越する時間帯とした. 重力 (式 (3.2.1)) と慣性力 (式 (3.2.2)) の釣り合いから油層半径 l は式 (3.2.6) で表わされる.

$$l = k_1 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_w} g V \right)^{1/4} t^{1/2} \quad (3.2.6)$$

それから約 1 週間後までを第 2 段階と呼ぶことにし, 重力と粘性力が卓越する期間とした. 重力と粘性力 (式 (3.2.3)) の釣り合いから, 油層半径 l は式 (3.2.7) で表わされる.

$$l = k_2 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_w} g V^2 \nu_w^{-1/2} \right)^{1/6} t^{1/4} \quad (3.2.7)$$

約 1 週間後以降は第 3 段階と呼ぶことにし, 粘性力と表面張力 (式 (3.2.4)) が卓越する期間とした. 粘性力と表面張力の釣り合いから, 油層半径 l は式 (3.2.8) で表わされる.

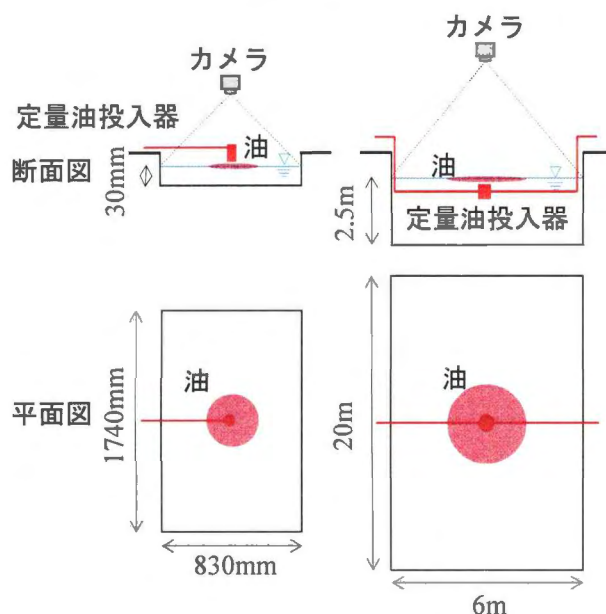


図 3.3.1: 油膜自身の特性による油拡散実験の模式図（左：小型水槽，右：大型水槽）

$$l = k_3 \left(\frac{\sigma_n^2}{\rho_w^2 \nu_w} \right)^{1/4} t^{3/4} \quad (3.2.8)$$

k_1 , k_2 , k_3 は拡がり係数である。Fay は拡がり係数を理論的に求めており， $k_1 = 1.14$ ， $k_2 = 1.45$ ， $k_3 = 2.30$ としている。

3.3 室内実験による油拡散実験方法

本節では，油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルを開発するための前段階として，油膜自身の特性による油拡散に関する実験を行い，Fay のモデルの適応性を評価するとともに，Fay のモデルにおける拡がり係数を評価する。

実験は水平方向 830×1,740 mm，水深 30 mm の小型水槽と（図 3.3.1 左参照），長さ 20 m，幅 6 m，水深 2.5 m の大型水槽（図 3.3.1 右参照）を用いて行った。なお，大型水槽は油回収実海域再現水槽といい，英語では Simulation Tank for Oil Recovery in Marine Situations，略して STORMS という。水槽の写真を図 3.3.2 に，仕様を表 3.3.1 に示す。油回収実海域再現水槽は平成 16 年度から供用されている，海水仕様としたわが国初の油回収機器類実験用の大型造波回流水槽である。実際の重油を散布し，波，流速，風を与えて，海水温を管理し，図 3.3.3 のように油回収に関する機器類の性能の試験を行うことができる。

小型水槽の実験は以下の手順で行う。



図 3.3.2: 油回収実海域再現水槽



図 3.3.3: 油回収機性能試験の様子

表 3.3.1: 油回収実海域再現水槽の仕様

規模 (m)	幅 13, 長さ 32, 高さ 3.5
計測水面 (m)	幅 6, 長さ 20, 水深 2.5
造波	最大波高 0.5 m, 周期 1~5 秒
流速	最大 1 m/s (2 knots)
水温調整	5~30 °C 調整可
使用水	海水
供試油	機械油, 重油 (A~C)

- (1) 油投入量を精密に測るため、投入用の油および油投入用容器の重量を測定する (図 3.3.4).
- (2) 内径 26 mm の筒状の油投入器を水槽中央に設置する (図 3.3.5). 設置後、投入容器内に油を注入する.
- (3) 水槽天井から鉛直下向きに設置したカメラ (Nikon D5200) で動画撮影をスタートする.
- (4) 動画撮影スタートから約 3 秒後に油投入器を水面を乱さないように気を付けて持ち上げる. 持ち上げると油投入器内の油が時間とともに拡がる.
- (5) 油膜が水槽壁に到達したら動画撮影をストップする.
- (6) 投入用の油および油投入用容器の重量を再度測定し、重量の差から油投入量を求める.

カメラは PC と USB ケーブル接続し、ソフトウェア Camera Control Pro2 (Nikon 製) で操作した。撮影頻度 30 fps で撮影した画像から水槽の外壁の影響が無い範囲のみを解

表 3.3.2: 油の種類と物性

油種 (略称)	密度 ρ_o kg/m ³	粘度 (温度 11 °C) μ_o ×10 ⁻³ Pa·s	油-大気間 表面張力 σ_{oa} ×10 ⁻³ N/s	油-水間 表面張力 σ_{ow} ×10 ⁻³ N/s	正味の 表面張力 * σ_n ×10 ⁻³ N/s
出光興産 ダフニー 2 (DN002)	826	3.8	21.0	13.4	36.7
Mobil VG10 (VG010)	860	28.8	22.8	15.1	33.3
出光興産 ダフニー 460 (DN460)	896	2200	29.4	27.8	13.9

* 水-大気間表面張力 $\sigma_{wa}=71.1$ mN/m

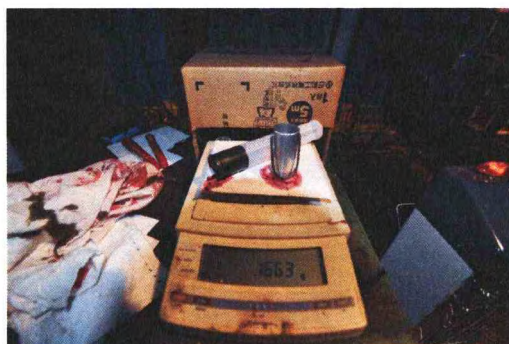


図 3.3.4: 油投入量の測定の様子



図 3.3.5: 小型水槽での油投入の様子

析して油膜の面積を求める。実験は油種ごとに4~10回行った。使用した油の種類とその物性は表 3.3.2 の通りである。油の密度は図 3.3.6 の比重計、油の粘度は Brookfield 社の B 型粘度計 (型番 HBDV-3 ULTRA, 図 3.3.7), 表面張力は Data physics 社の接触角計 (型番 OCA15Plus, 図 3.3.8) を用いて計測した。油は視認性をよくするために油用染色剤 (シラド化学製 V タイプ Liquid Neutral Red SST-D) を用いて染色したものを使用した。

大型水槽の実験は以下の手順で行う。

- (1) 定量の油を内径 23 mm の 2 重円筒状の油投入器に注ぎ、水槽中央に設置する (図 3.3.9)。



図 3.3.6: 比重計

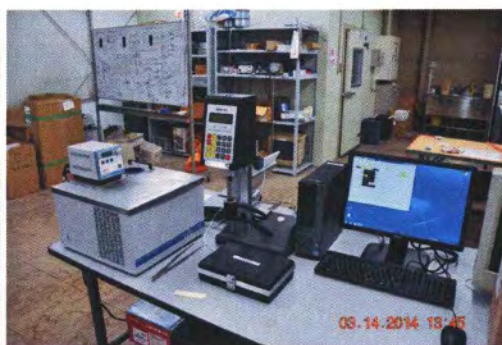


図 3.3.7: B 型粘度計



図 3.3.8: 接触角計（左：装置，右：液膜作成用シリンジ）

- (2) 水槽天井から鉛直下向きに設置したカメラ（Nikon D5200）で動画撮影をスタートする。
- (3) 動画撮影スタートから約 3 秒後に油投入器を水面を乱さないように気を付けて水中に下げる。それと共に、油投入器内の油が時間とともに拡がる。
- (4) 油膜が水槽壁に到達したら動画撮影をストップする。

大型水槽の場合、油自体は画像解析に適するほどの画質で撮れない。そのため、 $40 \times 40 \times 3$ mm 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（図 3.3.10 参照）、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。トレーサーの位置は画像解析ソフト（DITECT 製、DIPPMotionPro）を用いた。実験は油種及び油量ごとに 1~3 回行った。

3.4 室内実験の結果

まず、大型水槽を用いた実験結果について説明する。図 3.4.1 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、ほぼ一様であ



図 3.3.9: 大型水槽で用いた油投入器（左：全体図，右：2重円筒の油投入器）



図 3.3.10: 大型水槽で油が拡がる様子（時間経過と共に 1 から 4 の順番）

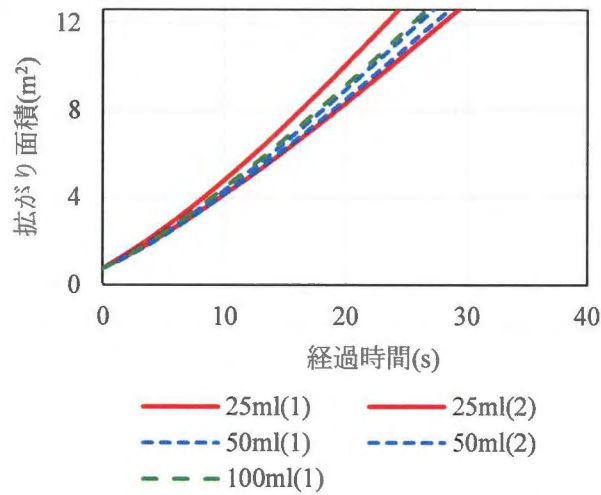


図 3.4.1: 油の投入量と拡がり速度の関係（油種 DN002）

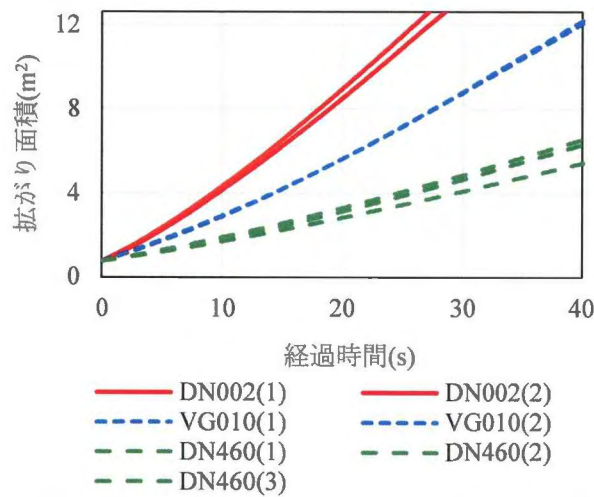


図 3.4.2: 油種と拡がり速度の関係（油量 50 ml）

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^{-4} m 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。

次に、図 3.4.2 は油種と拡がり速度の関係を示している。これを見ると油の量が等しくても、物性により拡散速度は異なることがわかる。

図 3.4.1 及び図 3.4.2 の結果を踏まえて、油の拡がりに支配的な力について考察する。まず油投入量と拡がり速度の関係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 10^3 倍異なる DN002 と DN460 で面積の時間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られる。そのため、本実験のように、油膜厚さが 10^{-4} m オーダー以下においては油の

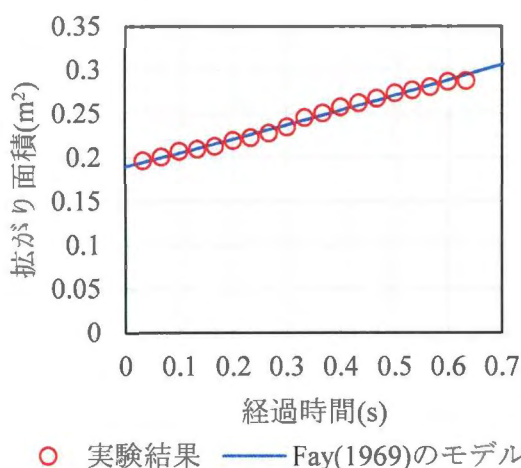


図 3.4.3: 拡がり面積の実験結果と近似式の比較の例 (油種 DN002)

拡がりについて正味の表面張力が支配的であると考えられる。

そこで, Fay[1] にならい, 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。また, 大型水槽の実験結果と比較してその汎用性を評価する。

小型水槽で行った実験結果に式 (3.2.8) が成り立つと仮定して, t を変数として最小二乗法で拡散面積 A の近似を行い, 拡がり係数 k_3 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 (3.4.1) のように, 時間方向に近似式を t_a 秒シフトさせ, k_3 の値のみ評価する。

$$A = k_3^2 \pi \rho_w^{-1} \nu_w^{-\frac{1}{2}} \sigma_n (t + t_a)^{\frac{3}{2}} \quad (3.4.1)$$

近似の結果の例は図 3.4.3 の通りであり, 本実験結果は式 (3.4.1) 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には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 3.4.4 は式 (3.4.1) で得られた拡がり係数 k_3 の分布を示している。拡がり係数 k_3 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 $k_3=0.852$ 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 3.4.5 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 (3.4.1) の比較である。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

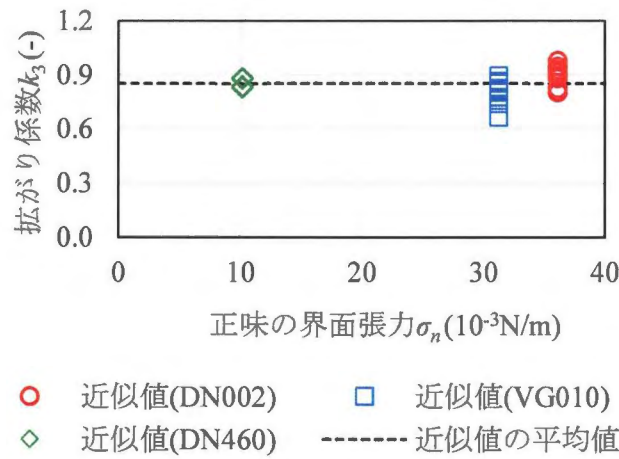


図 3.4.4: 実験結果に基づく拡がり係数の分布

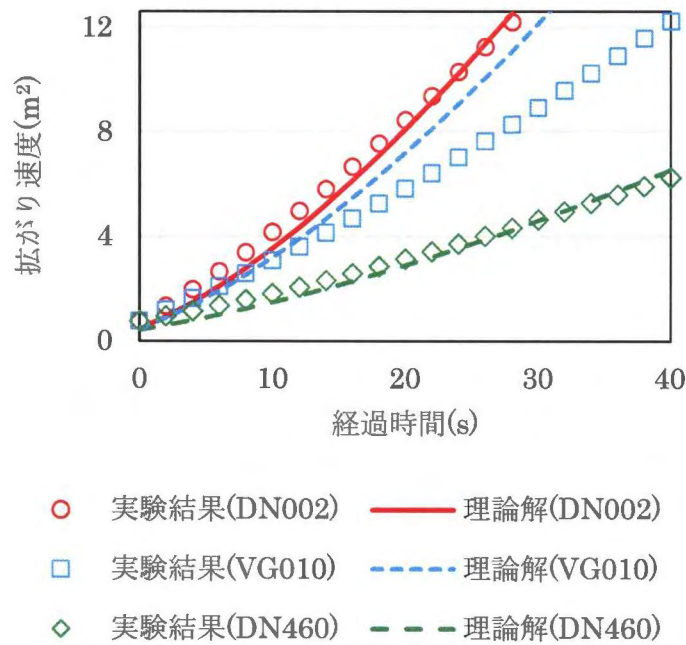


図 3.4.5: 大型水槽での実験結果の平均値と理論解の比較

が図 3.4.4 の結果と同様に、理論解よりも小さい傾向にあった。しかしながら、DN002 及び DN460 の実験結果は理論解と一致しているように考えられる。そのため、Fay のモデルが油の拡がりのモデルとして有効であり、小型水槽で得られた拡がり係数は妥当であると考えられる。

3.5 油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルの開発

本節では Fay[1], [2] のモデルに基づき、油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルを導出する。

まず、Fay の第3段階である表面張力-粘性領域について、ランダムウォークの考え方に基づいた数値計算モデルを導出する。Fay の考え方に基づくと、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。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、粒子の外縁半径は経過時間の $1/2$ 乗に比例して拡がる。そこで式 (3.5.1) のように、経過時間 t の $1/4$ 乗を拡がり移動速度 U_{si} にもたせることを考える。

$$U_{si} = k_{3m} \sigma_n^{1/2} t_i^{1/4} \Delta t^{-1/2} \begin{pmatrix} \cos(2\pi R_{rand}) \\ \sin(2\pi R_{rand}) \end{pmatrix} \quad (3.5.1)$$

ここで k_{3m} は 3.4 節で説明した実験結果から導出した拡がり係数を用いた Fay のモデルとの比較で求まる拡がりモデル係数、 t_i は粒子 i を投入してからの経過時間を表す。具体的には、油粒子 10,000 個を用いて式 (2.1.3) において、 U_{si} 以外の速度ベクトルをゼロとして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。求めた拡がり半径 R から拡がり面積 A を求め、式 (3.4.1) と一致する k_{3m} を最小二乗法で求める。

図 3.5.1 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、ランダムウォークのため油膜外縁はばらつくけれども、円形に拡がる様子を計算できることがわかる。

図 3.5.2 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 (3.5.1) で油の拡がりを計算するモデルは理論解を表すことができると考える。この時の式 (3.5.1) の拡がりモデル係数 k_{3m} は式 (3.5.2) の通りで次元をもつ。

$$k_{3m} = 0.554 [\text{N}^{-1/2} \text{m}^{3/2} \text{s}^{-3/4}] \quad (3.5.2)$$

次に Fay[1] のモデルに基づき、近傍粒子から受ける斥力を計算して粒子の移動を決定する斥力モデルを導出する。前述した Fay のモデルは油膜が円形に拡がるモデルであるけれども、実際の油拡散は乱流拡散、移流の効果もあるため、円形に拡がることがほとんどない。そのため、Fay のモデルを粒子モデルに適用するには工夫が必要となる。例えば Guo and Wang[3] は以下のように取り扱っている。すなわち、拡がった油の重心からの平均半径が l の時の拡がり速度 U_{si} を以下のように計算する。

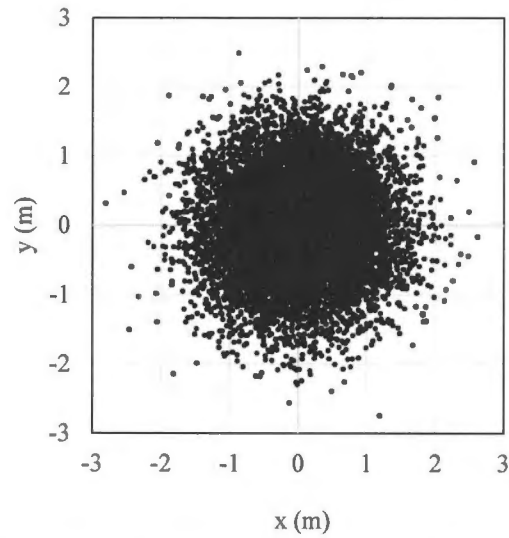


図 3.5.1: モデルを用いた油の拡がりの計算例 (油種 DN002, 60 秒後の再現)

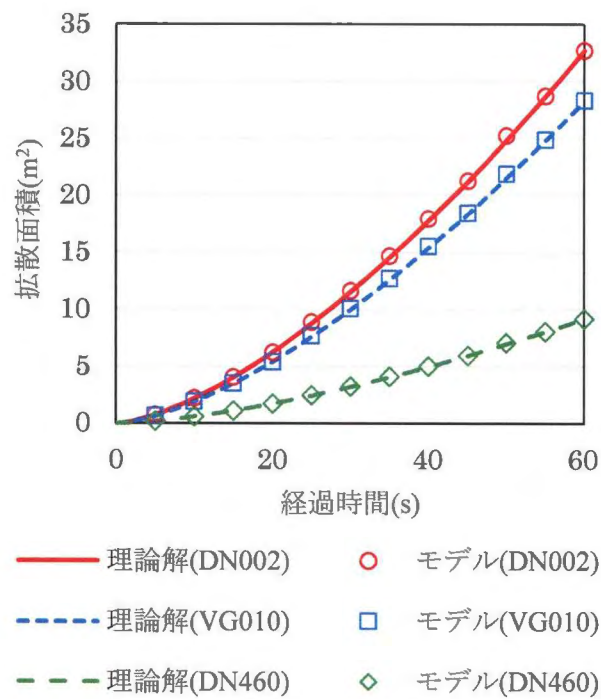


図 3.5.2: 油の拡がりに関する理論解と数値計算モデルの比較

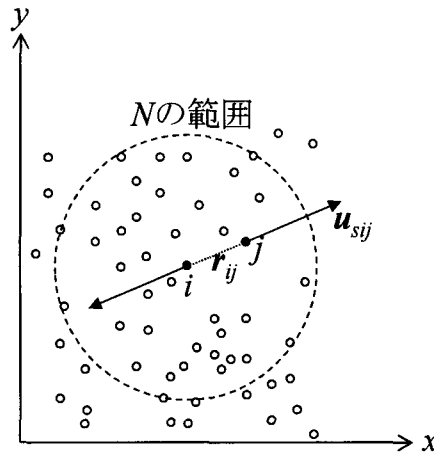


図 3.5.3: 粒子の発散の概念図

$$U_{si} = \frac{r_{oi}}{l} \frac{dl}{dt} \quad (3.5.3)$$

ここで、 r_{oi} は油膜の重心と着目粒子 i の距離ベクトル、 dl/dt は Fay のモデルから求まる半径 l における拡がり速度である。

著者はこの考え方の難点は以下のとおりであると考えている。式 (3.5.3) は油膜の重心から遠い粒子ほど速い移動速度を持つことを意味している。しかし、これでは粒子の間隔が粗であっても速い移動速度を持つことになる。粒子が密であるとき、つまり油膜の厚さが厚い時、強い発散を持ち、速い粒子移動速度を持つはずであると考えられる。

そこで著者は粒子の集合が円形であるかに由らず、粒子の粗密により粒子の移動速度を計算する方法を導出することとした。

モデルは連続の式より導出する。ある着目粒子周りの粒子密度 n_o は連続であることから、油を粒子の集まりと考え、ラグランジュ的に連続式で表わすと、

$$\frac{Dn_o}{Dt} + n_o \nabla \cdot \mathbf{U}_s = 0 \quad (3.5.4)$$

となる。ここで \mathbf{U}_s は着目する油膜位置の油拡散速度を表す。式 (3.5.4) の左辺をそれぞれ離散化する。まず式 (3.5.4) 左辺第 2 項について、発散の概念を表したのが図 3.5.3 である。

粒子の移動速度をラグランジュ的に考えると、着目粒子 i から r_{ij} 離れた粒子 j の速度は u_{sij} 、着目粒子の相対速度はゼロとおくと、式 (3.5.4) 左辺第 2 項は、

$$n_o \nabla \cdot \mathbf{U}_s = n_o \frac{u_{sij}}{r_{ij}} \quad (3.5.5)$$

となる。次に、式 (3.5.4) 左辺第 1 項の粒子密度の時間変化を求める。粒子密度が高いほど時間変化が大きいと考え、式 (3.5.6) を仮定する。

$$\frac{Dn_o}{Dt} = -Cn_o^\alpha \quad (3.5.6)$$

ここで C_{n_o} は係数、 α は指数である。式 (3.5.6) を積分すると、

$$\frac{1}{1-\alpha} n_o^{-\alpha+1} = -Ct + K \quad (3.5.7)$$

である。ここで、 K は積分定数である。油層の体積が一定のとき、Fay のモデルの重力と慣性力が卓越する第 1 段階において、式 (3.2.6) から式 (3.5.8) が導かれる。

$$h \propto l^{-2} \propto \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_w} gV \right)^{-1/2} t^{-1} \quad (3.5.8)$$

油を粒子の集まりと考えており、 n_o は h に比例することから、 n_o は t^{-1} に比例する。この関係を式 (3.5.7) に用いると、 $\alpha = 2$ を得る。よって、式 (3.5.4) に式 (3.5.5) 及び式 (3.5.6) を代入すると、 l と r_{ij} は比例することから、

$$u_{sij} \propto r_{ij}^{-1} \quad (3.5.9)$$

である。すなわち、油拡散初期において粒子の移動速度は粒子間距離の-1 乗に比例する。

Fay のモデルの重力と粘性力が卓越する第 2 段階も同様に式 (3.2.7) から粒子の移動速度を求めると、粒子の移動速度は粒子間距離の-3 乗に比例することが導出される。

数値計算の際は粒子の移動速度を以下のように求める。粒子 i の拡がり速度 U_{si} は周囲の粒子 j から受ける速度 u_{sij} をベクトル合成して計算する。

$$U_{si} = \sum_j^N u_{sij} = \sum k_{1m} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \quad (3.5.10)$$

$$U_{si} = \sum_j^N u_{sij} = \sum k_{2m} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^4} \quad (3.5.11)$$

ここで、 k_{1m} 、 k_{2m} は Fay のモデルとの比較で求まる拡がり係数（単位はそれぞれ m^2/s 、 m^4/s ）で、計算方法は後述する。式 (3.5.10) は Fay の第 1 段階、式 (3.5.11) は第 2 段階を表わす。

導出した油膜自身の特性による油拡散の計算モデルに関する検証計算を行った。油の種類は原油アラビアンライトとし、計算は粒子数 1000 個、粒子体積 $10 \text{ m}^3/\text{個}$ 、

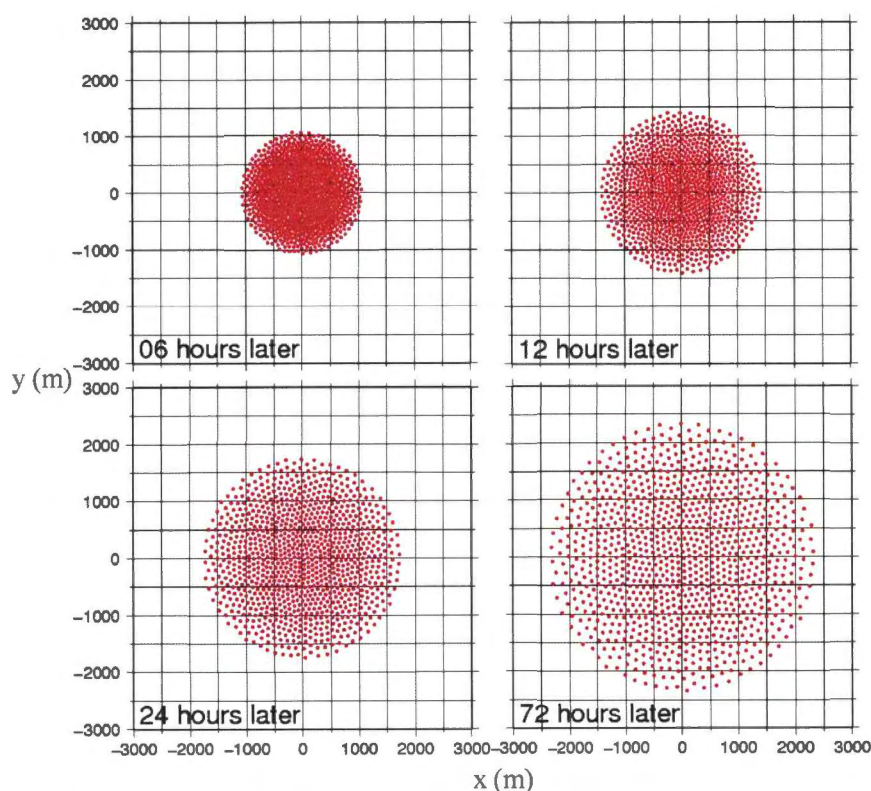


図 3.5.4: 斥力モデルによる油粒子の拡散計算結果（6, 12, 24, 72 時間後）

$k_{1m} = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, $k_{2m} = 2.0 \times 10^3 \text{ m}^4/\text{s}$ で行い、着目粒子周りの油層厚 h_1 が 3.2 mm 以上のとき式 (3.5.10), それ以外のとき式 (3.5.11) を用いた。

図 3.5.4 は原油 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ が静水中に瞬間流出した際の粒子モデルの計算結果で、6, 12, 24, 72 時間後の拡散を表わしている。油粒子は流出点より円形に拡がっており本計算において油が拡がる様子を再現できていると考える。

図 3.5.5 は本モデルを用いた計算結果と Fay のモデルの比較である。計算は瞬間流出（図 3.5.4 の結果）と、連続流出を対象とした。連続流出は $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ の原油を流出総時間に応じて一定流量で流出させて計算した。流出時間はそれぞれ 6 時間, 24 時間, 72 時間とした。解析に用いる拡散半径は全粒子の 95% が含まれる半径と定義した。瞬間流出の計算結果は Fay のモデルとよく一致しており、図 3.5.4, 3.5.5 より油拡散半径を本モデルで再現できていると言える。また、瞬間流出と連続流出を比較すると、連続流出の場合は瞬間流出に比較して初期の油量が少ないため拡散半径が小さく、時間が経過し油量が多くなるにつれて瞬間流出のときの拡散半径と近くなっていく。本モデルにおける油膜自身の特性による油拡散速度は、水面に存在する油の集まり具合に大きく影響を受けるため、このような計算結果になると考える。

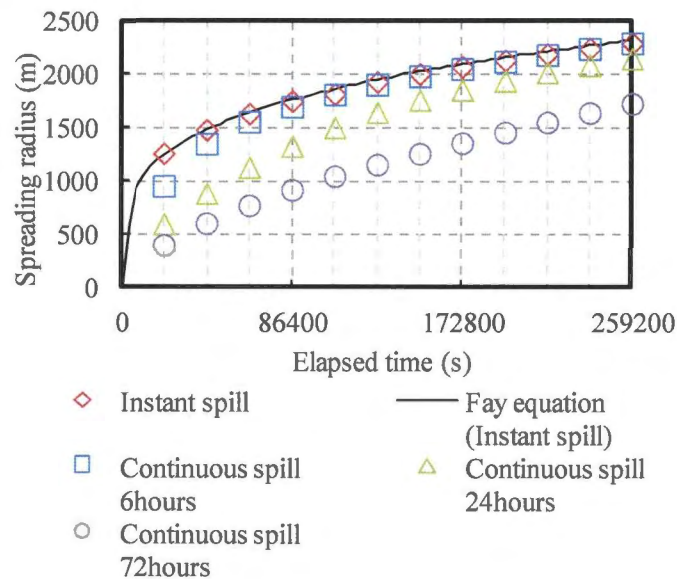


図 3.5.5: 斥力モデルによる油粒子の拡散半径と Fay のモデルの比較

図 3.5.6 は x 方向に 0.1 m/s の流れがある状況で油が流量 $2 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{hour}$ で流出した際の油の移流拡散を再現している。Fay のモデルを直接用いた式 (3.5.3) の計算では表現が困難であった連続流出を計算できている。

3.6 定常流における油拡散実験と数値計算モデルの比較

本節では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計算モデルを比較し、数値計算法の評価を行う。実験は 3.3 節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のと同じ大型水槽で実施した。図 3.6.1 は実験の模式図である。

定常流において油の連続流出拡散実験は以下の手順で行う。

- (1) 初期画像データを読み込む。
- (2) 流速 0.135 m/s の定常流を発生させる。
- (3) 水槽の上流側横断方向中央部分に油投入口を設け、モンローポンプで流量 1.0 L/min で油 DN002 を連続で投入する。
- (4) 水槽天井から鉛直下向きに設置したカメラ (Nikon D5200) で動画撮影をスタートする。
- (5) 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す。
- (6) 1 分程度撮影し、動画撮影をストップする。

計算は 3.5 節で説明したランダムウォークモデルを用いて速度ベクトルを求める。式

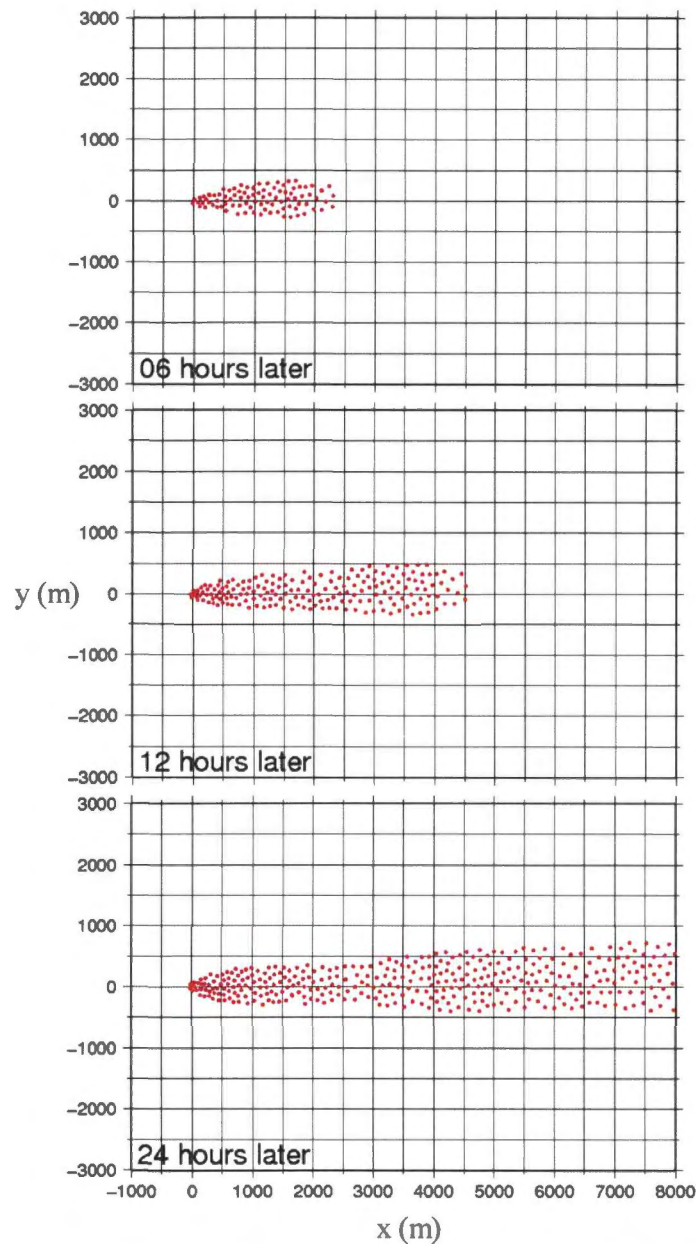


図 3.5.6: 斥力モデルによる流れ場における油粒子の移流拡散（6, 12, 24 時間後）

(2.1.3) の U_{oi} に水槽の定常流速である 0.135 m/s を与える。油粒子は 1 秒間に 200 個の割合で連続的に投入した。

実験及び計算の結果について説明する。まず、実験結果について説明する。図 3.6.2 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見られる。

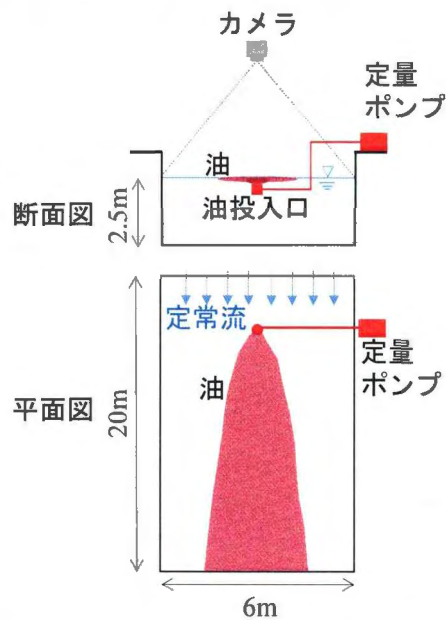


図 3.6.1: 定常流における油拡散実験の模式図

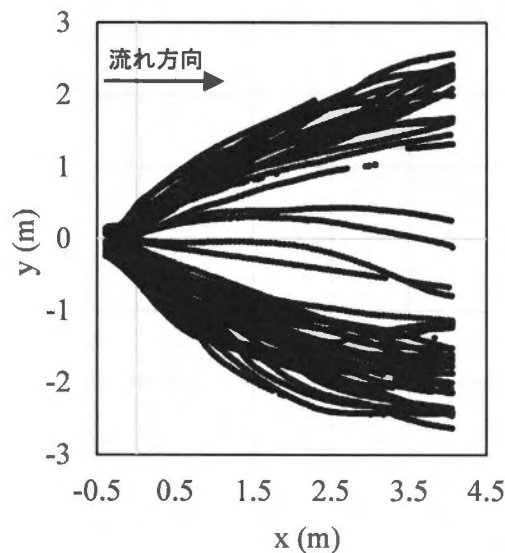


図 3.6.2: 定常流における油拡散に関する実験結果

次に、計算結果について説明する。図 3.6.3 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する様子がよく再現されていると考えられる。

実験結果と計算結果の比較を行う。図 3.6.4 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 0.2 m 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 0.2 m で区切り、その範

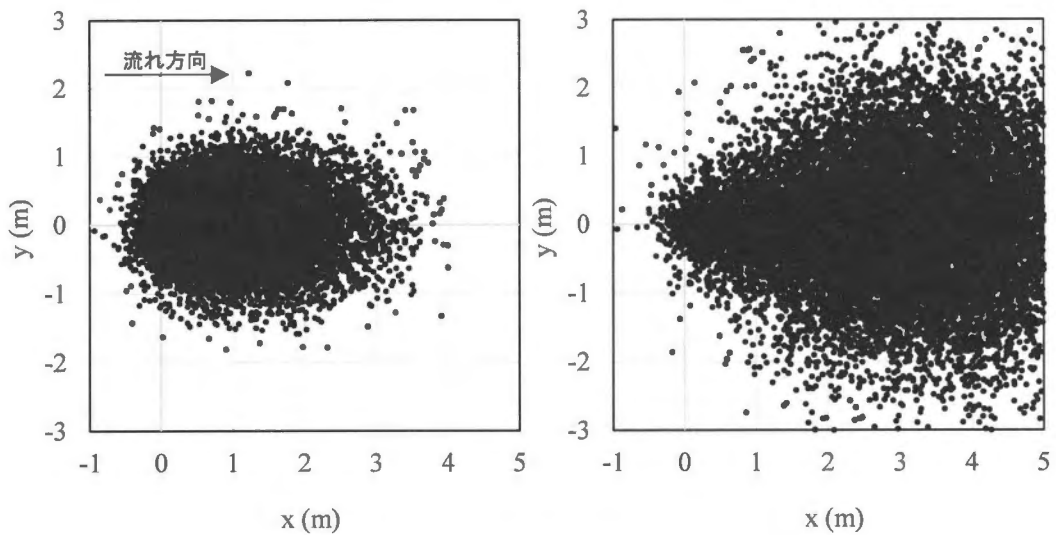


図 3.6.3: 定常流における油拡散に関する数値計算結果（左：油流出から 20 秒後，右：油流出から 40 秒後）

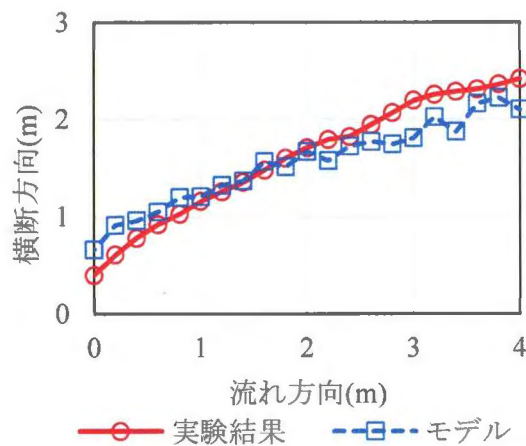


図 3.6.4: 定常流における油拡散に関する実験と数値計算結果の比較

囲の油粒子の 95% が含まれる y 方向長さをプロットした。実験と計算の標準偏差は 0.26 m である。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。よってこれらの結果から、汎用性の高い計算モデルを用いて、計算結果が得られたと考える。

3.7 考察

本節では油膜自身の特性による油拡散に関する、実験結果及び数値計算モデルの開発を踏まえて考察する。まず、実験で得られた表面張力-粘性領域の油の拡がり係数 k_3 について、表 3.7.1 は既往の研究と本実験で得られた拡がり係数を比較している。これらの結果

表 3.7.1: 既往の研究と本実験で得られた拡がり係数 k_3

	拡がり係数 k_3	実験/理論
Fay[2]	2.30	理論
Hoult[4]	0.128	理論
埜口ら [5]	0.48	実験
本実験	0.852	実験

を比較すると、拡がり係数は本実験結果と大きく異なることがわかる。埜口らの実験は、“油層先端部の形状の観察が困難で、詳細な運動の機構は検討でき”なかったとあるため、油膜の外縁を観測できた本実験の拡がり係数のほうが埜口らの結果より大きい値となることは妥当であると考えられる。

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けれども、提案する理論解では拡がり方をうまく説明できなかった。そのため、本実験で得られた拡がり係数 k_3 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、Fay[1], [2] 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。本実験で得られた結果は表面張力が卓越した拡がりに関するものであると考えられる。よって、Fay の示す重力が卓越した拡がりについて検討するには、投入する油量を多くした実験を行う必要がある。特に、Fay のモデルには油の粘性の効果が含まれていないけれども、重力が卓越する状況における油拡散速度は油の粘性の影響が大きいと考えられることから、実験により確かめる必要があると考えられる。

ここで、実際の油流出が発生した際の注意点について述べておく。表面張力が卓越する際の油拡散を予測する式 (3.4.1) において、正味の表面張力係数が拡がり速度を決定する。正味の表面張力は水-大気、油-大気、油-水の表面張力から決定されるけれども、水-大気の表面張力は油分散剤のような界面活性剤によって小さくなる。例えば、著者が行った試験では、精製水に SC1000 という分散剤をまぜると、水-大気の表面張力係数は 72 mN/m から 29 mN/m に下がった。すると、油-大気及び油-水の表面張力の合力が水-大気の表面張力よりも大きくなり、正味の表面張力係数は負の値をとるため、表面張力は油の拡散面積を縮める方向に作用した。界面活性剤以外にも何らかの影響で油流出海域の海水が変質をうけていると、水-大気の表面張力係数が下がることもある。そのため、油膜自身の特性による油拡散は、理論的には計算が可能でも、実際の油流出の状況を考えると、精緻に予測することは困難であることを念頭に数値計算を実施することが望まれる。

次に、開発した油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルについて考察する。ランダムウォークモデルを用いた数値計算モデルは、粒子間に斥力を与える数値計算モデルと比較して、モデルが簡易であるため実装が容易であるという利点がある。油回収船で油回収作業を行う際に、流出油の漂流予測結果は即時に出力、表示できる必要があり、船舶に搭載するようなパソコンは特に高速な CPU を持たないものを想定しているため、計算負荷が小さいランダムウォークモデルは有利である。ランダムウォークモデルの問題点は油が拡がる際の油層厚分布がランダムウォークを用いているため、正規分布を仮定しているけれども、実際の油拡散は正規分布になるか確認されていないことが挙げられる。

一方、粒子間に斥力を与えて計算する数値計算モデルは、油が大量に流出した際の重力による拡がりをよく再現できると考えられる。しかしながら、着目粒子 i の近傍粒子 j それぞれから受ける移動速度 u_{sij} をベクトル合成して計算するため、近傍粒子数の分だけ計算時間がかかることが難点である。

以上の数値計算モデルの特徴を踏まえて、ランダムウォークモデルと斥力モデルの使い分けは以下のように行う。まず、即時に結果を得たい場合や、特に高速な CPU を持たない PC で計算を実施する際はランダムウォークモデルのみを用いて、油膜自身の特性による油拡散を計算する。

次に、計算に時間がかかってもよい場合で、大量の油流出が発生し、油の拡がりに重力領域が重要であると考えられる場合には、ランダムウォークモデルと斥力モデルを組み合わせ使い分ける。Fay の第 1 段階の式 (3.5.10)、第 2 段階の式 (3.5.11) 及び第 3 段階の式 (3.5.1) の使い分けは以下のように判断する。まず、第 1 段階の式 (3.5.10) と第 2 段階の式 (3.5.11) においては、以下のように計算する。各計算ステップ、着目粒子ごとに、粒子 i から近傍粒子検索半径 R 以内にある粒子の個数 N_o を数え、粒子体積 V_i から油層厚 h を、

$$h = \frac{N_o V_i}{\pi R^2} \quad (3.7.1)$$

と計算し、Fay のモデルから求まる油層厚判定値 h_1 と h を比較して決定する。 h が h_1 より大きいとき、Fay の第 1 段階である式 (3.5.10) を用い、 h が h_1 より小さいとき、Fay の第 2 段階である式 (3.5.11) を用いる。 k_{1m} 、 k_{2m} 、 h_1 は想定している油の密度と粒子の体積による。 k_{1m} 、 k_{2m} の決定は以下のように行う。まず、油の拡がりの第 1 段階を表す式 (3.2.6) と第 2 段階を表す式 (3.2.7) が等しくなるときの l を求め、 l から h_1 を求める。次に h_1 を用いて k_{1m} を変えて式 (3.5.10) の計算を行い、結果と式 (3.2.6) を比較し、誤差が最も小さい時の k_{1m} を求める。最後に h_1 を用いて k_{2m} を変えて式 (3.5.11) の計算を行い、結果と式 (3.2.7) を比較し、誤差が最も小さい時の k_{2m} を求める。

次に、第 2 段階の式 (3.5.11) と第 3 段階の式 (3.5.1) においても同様に、油層厚 h を計

算し、油層厚判定値 h_2 と比較して決定する。 h が h_2 より大きいとき、Fay の第 2 段階である式 (3.5.11) を用い、 h が h_2 より小さいとき、Fay の第 3 段階である式 (3.5.1) を用いる。 h_2 は油膜の厚さで決まるとして、3.4 節の結果を考慮し $h_2=1.0 \times 10^{-4}$ m とする。

近傍粒子検索半径 R の与え方に関して、特に理論的な検討は行っていないけれども、試行錯誤的に検証を行った結果によると、 $V_i=1$ から 10 m^3 のとき、 $R=200$ m 程度で計算を行うとよい。

次に油膜の拡がりの終端について考察する。時間経過と共に油膜は拡がり、最終的に油膜の拡がりは停止する。正味の表面張力は水-大気間の表面張力が油-大気間及び油-水間の表面張力の合力より大きい場合に油膜が拡がる方向に作用する。そのため、油膜の拡がりが停止するのは油膜が単分子層まで拡がった時と考えられる。例えば、本章で説明した小型水槽実験では、油膜は厚さ 10^{-6} から 10^{-7} m のオーダーにおいても拡がっている。

しかしながら、前述の通り、正味の表面張力は実海域において変化する場合がある他、Hoult[4] は、以下のことを指摘している。

すなわち、原油のように様々な構成要素からなる油は、それぞれの構成要素ごとに表面張力係数をもつため、表面張力の値を正確に見積もることが困難である。また、海水の温度、塩分濃度、生物学的物性による違いが正味の表面張力の大きさを変化させる要因となる。そこで、実務面の有益性から 2 つの考え方が提案されている。1 つは Blokker[6] 及び Allen and Estes[7] に提案される、油膜が一定の厚さ以下になると停止するという考え方である。この時の油膜厚さの値は経験的に 2.5×10^{-5} m とされている。もう 1 つは Fay の提案する油流出時から時間経過に伴い界面活性物質が水中に溶解し、表面張力が低下して、拡がりが停止するという考え方であり、最終拡がり面積は式 (3.7.2) のように求められる。

$$A \approx \left(\frac{\sigma_n^2 V^6}{\rho_w^2 \nu_w D_o^3 s_d^6} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (3.7.2)$$

ここで、 D_o は界面活性物質の水中での拡散係数、 s_d は界面活性物質の水中への溶解度である。なお、Fay の提案するモデルについて、実際に水中に界面活性物質が溶解することを確認しておらず、モデルの物理的意味は不明瞭であると考えられる。

海上災害防止センター [8] によると、水面が銀色にキラキラ光って見える状態のとき、油膜厚さは 1.0×10^{-7} m であり、光線の条件が最も良い時にかろうじてキラキラ光る油膜が見える状態のとき、油膜厚さは 5.0×10^{-8} m である。

そこで、本数値計算において、油膜の拡がりの終了については以下のように考える。すなわち、粒子密度から式 (3.7.1) で求める油層厚が 1.0×10^{-7} m よりも薄くなったとき、式 (3.5.1) の計算を停止する。

3.8 結語

本章では油膜自身の特性による油拡散について、室内実験による油の拡がりの評価、数値計算モデルの導出、実験結果と数値計算モデルの比較を行った。以下では本章で得られた主要な結論を要約する。

まず、油膜自身の特性による油拡散について有名なモデルである Fay のモデルについて紹介した。Fay は油膜自身の特性による油拡散は重力及び表面張力によって拡がり、慣性力及び粘性力によって拡がりが増えられ、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、第1段階；重力-慣性領域、第2段階；重力-粘性領域、第3段階；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ことを説明した。

次に、小型水槽及び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った。その結果、実験結果の拡がり速度は Fay のモデルの第3段階；表面張力-粘性領域とよく一致した。拡がり係数は Fay の提案する値よりも低い値となり、埜口らの結果より大きい値となった。拡がり係数は油の拡がりの予測に大きく影響を与えるため、その決定は慎重に行われる必要がある。また、実験時の油膜厚さから、油膜厚さが 10^{-4} m オーダーの場合、油の拡がり速度は正味の表面張力によって決定されることがわかった。

次に、開発した数値計算モデルについて説明した。まず、ランダムウォークを用いた油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルについて説明した。計算対象は第3段階；表面張力-粘性領域とし、油の拡散面積が正味の表面張力の1乗、経過時間の3/2乗に比例する数値計算モデルを導出した。導出したモデルは静水時の油膜自身の特性による油拡散実験結果から得られた拡がり係数を用いた理論解とよく一致した。これは油の種類が異なっても統一のモデルを用いて計算ができるため、有効なモデルであると考えられる。

次に、斥力の考え方を用いた油膜自身の特性による油拡散の数値計算モデルの導出を行った。計算結果は Fay のモデルの第1段階；重力-慣性領域、第2段階；重力-粘性領域と一致するように拡がり係数を求めた。導出した数値計算モデルは油拡散について計算できることを示した。また、静水時のほか、流れがある場合の油の連続流出に関する数値計算を自然な表現で行えるようになった。

次に、大型水槽を用いた定常流条件下の油拡散実験結果と導出したランダムウォークモデルの計算結果を比較した。計算結果は実験結果をよく再現していることが示された。

最後に、2つの数値計算モデルの使い分けと、油の拡がりの終端について考察した。

参考文献

- [1] J. A. Fay. The Spread of Oil on a Calm Sea. *Plenum Press*, pp. 53–64, 1969.

-
- [2] J. A. Fay. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. *Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, pp. 463–467, 1971.
- [3] W. J. Guo and Y. X. Wang. A Numerical Oil Spill Model Based on a Hybrid Method. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 58, pp. 726–734, 2009.
- [4] D. P. Hoult. Oil Spreading on the Sea. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 4, pp. 341–368, 1972.
- [5] 埜口英昭, 早川典生, 橋本英資, 山崎宗広. 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, 1979.
- [6] P. C. Blokker. Spreading and Evaporation of Petroleum Products on Water. *Proc. 4th Int. Harbour Conf.*, pp. 911–919, 1964.
- [7] A. A. Allen and J. E. Estes. Detection and Measurement of Oil Films. *Santa Barbara Oil Symposium*, 1970.
- [8] 海上災害防止センター. 流出油事故対応防除マニュアル, 2000.

第 4 章

海水面極近傍における水平乱流拡散係数の推定方法

4.1 概要

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てラグランジュ的に計算する場合、海表面の乱れによる油の乱流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 2.4 節で述べたとおり、式 (2.4.10) で計算する。

式 (2.4.9) の通りランダムウォークの計算は水平乱流拡散係数 D_H を与える必要があり、従来は定数を与えていた。乱流拡散速度 U_{di} は 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。そのため、水平乱流拡散係数が計算結果に与える影響は大きいといえる。

しかしながら、従来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かった。例えば ASCE Task Committee[1] において乱流拡散係数は 1 から 100 m²/s としている。これで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[2]）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、従来その適応はよく検討されていなかった。

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[3] 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・樋口 [4] は海面下 1m に抵抗板をつりさげた 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 [5] は海面からそれぞれ 1 m, 6 m, 11 m, 16 m の位置にドロッグ（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と考えられる。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 [5] は水平乱流拡散の水深依存性を指摘している。また、海面付近のほうが水中よりも乱れが大きく、拡散係数が海水中より大きくなるのではないかと予想される。

以上の問題を解決するため、本章では実海域において海水面極近傍の乱流拡散を測定することを試みる。そのためにまず、海上流出油と同等の漂流特性を持つ疑似油を風洞水槽において選定する。次に、実海域において海水面極近傍における水平乱流拡散の測定実験を行う。また、実験結果から、水平乱流拡散係数 D_H の推定方法を考察する。

4.2 風洞水槽実験による疑似油の選定

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と考えられる。流れによる移流速度は疑似油と実際の油とで変わりが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が必要であると考えた。

2.2 節で述べた通り、数値計算において風による油の移動速度は海面高度 10 m での風速に風係数をかけて表現する。風係数は 0.03 程度であり、例えば海面高度 10 m で風速が 10 m/s である場合、海表面の油の移動速度は $10 \times 0.03 = 0.30$ m/s と算出される。今回行う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（図 4.2.1 参照）で行った。図 4.2.2 は実験水槽の全体図である。水路は長さ 28.5 m、幅 1.5 m、高さ 1.3 m である。実験は水深を 0.4 m として行った。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 1 m 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 30 cm、厚さ 10 mm の円形の模型を用いた。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、防水のケースに入れてマットにくくる必要がある。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入れる 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。図 4.2.3 は実験の模式図である。送風速度は 3 通り（送風機回転数：100 rpm, 200 rpm, 300 rpm）で実施した。送風後、水槽内の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 19.5 m の位置にあるカメラ（DITECT 製）で疑似油の移動を撮影した（図 4.2.4 参照）。撮影画像は画像解析ソフト（DITECT 製、DIPPMotionPro）を用いて、疑似油の中心位置の座標を



図 4.2.1: 台風防災実験水路

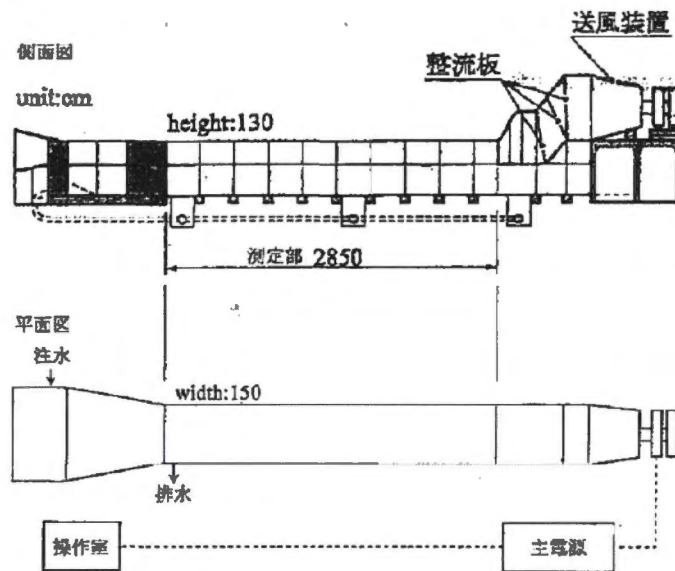


図 4.2.2: 実験水槽全体図

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、その平均値を解析に用いた。

また、カメラ撮影位置を挟む送風口から 18.0 m 及び 21.0 m 地点において風速（熱式風速計：カノマックス製プローブ 0962-00）を計測した。漂流予測を行う際は海上 10 m 風速が用いられるため、今回の実験結果も水面から 10 m に換算した風速で整理する必要がある。そのため、海上 10 m 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 10 cm までを 5 mm 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 10 m 風速を算出した。

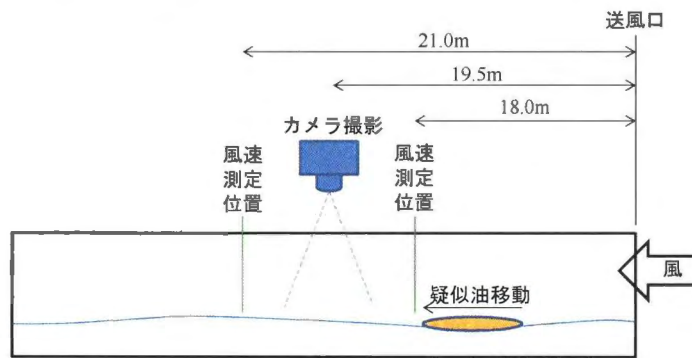


図 4.2.3: 実験の模式図



図 4.2.4: 画像計測方法

表 4.2.1: 10 m 換算風速と風係数の関係

送風機 回転数 (rpm)	海上 10 m 換算風速 (m/s)	疑似油 移動速度 (m/s)	風係数	風係数の 標準偏差
100	3.8	0.12	0.032	0.0011
200	6.3	0.18	0.030	0.0022
300	9.4	0.25	0.026	0.0021

疑似油選定実験の結果は表 4.2.1 及び図 4.2.5 の通りである。次節以降で述べる実海域実験時の平均風速は最大でも 10 m/s 以下であるため、今回の室内実験の風速は実海域実験時の風速が含まれている。風係数は風速が大きくなると小さくなる傾向がみられるが、ここでは風速 10 m/s よりも小さい時を対象とするため、風係数は 0.03 に近いと考え、この疑似油を用いて実海域実験を行うこととした。

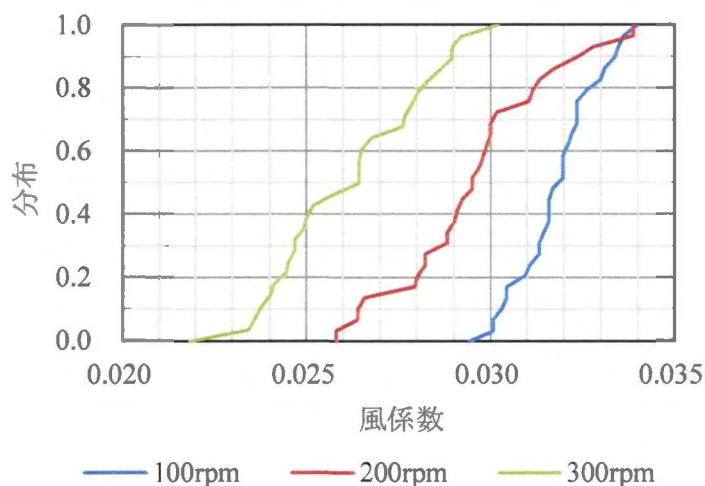


図 4.2.5: 疑似油の風係数の分布

4.3 実海域における疑似油を用いた水平乱流拡散実験の方法

実験は図 4.3.1 に示す海域で 1 回ずつ行った。1 つは 2012 年 10 月及び 11 月に東京湾入口に位置する神奈川県三浦市沿岸周辺で、もう 1 つは 2013 年 12 月及び 2014 年 1 月に神奈川県平塚市沿岸周辺で行った。図 4.3.2 は実験の模式図である。疑似油は直径 1 m の円形、厚さ 10 mm、重量 1.2 kg のスポンジゴムに GPS ロガーを取り付けたものを用いた (図 4.3.4 参照)。GPS ロガーは Wintec 製 WBT-202 で、重量 55 g、平均誤差半径 (CEP) は SBAS 使用時で 2.0 m、Stand Alone で 2.5 m である。各実験ケースにおいて疑似油を 20 枚程度同時刻に投入し漂流させ、各疑似油の位置を GPS ロガーで記録した (図 4.3.5 参照)。同時に図 4.3.3 のように、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三浦市周辺の実験においては、30 分から 3 時間 40 分で、合計 9 ケース行い、平塚市周辺の実験においては、2 時間から 5 時間で、合計 7 ケース行った。

4.4 実海域における疑似油を用いた水平乱流拡散実験の結果

GPS ロガーで取得した疑似油約 20 枚の漂流緯度経度から、Richardson[6] の方法に基づき、式 (4.4.1) を用いて水平乱流拡散係数 D_H を 10 分おきに計算した。

$$D_H = \frac{1}{4} \frac{\partial \sigma^2}{\partial t} \quad (4.4.1)$$

ここで、 σ^2 は疑似油の位置の不偏分散、 t は時間である。 σ^2 は式 (4.4.2) を用いて計算

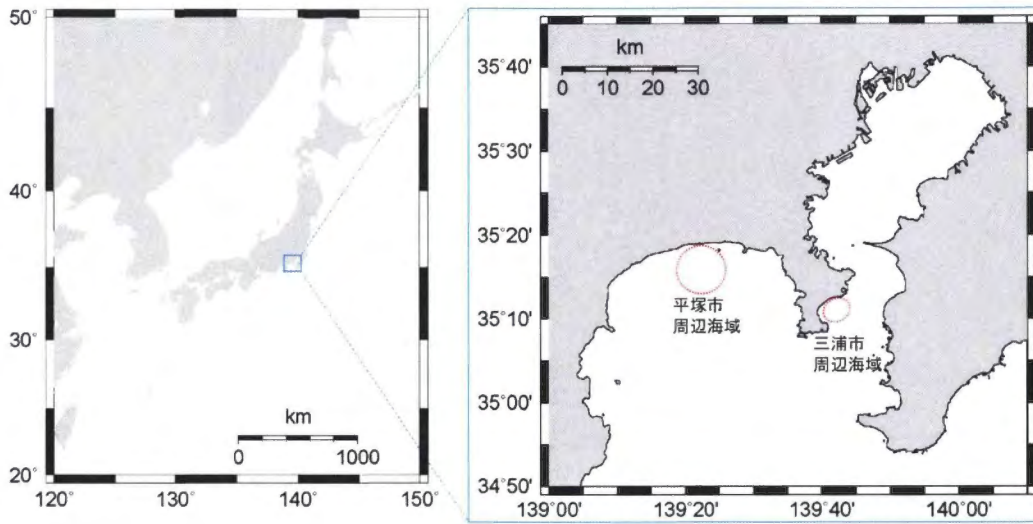


図 4.3.1: 疑似油を用いた水平乱流拡散実験を実施した海域

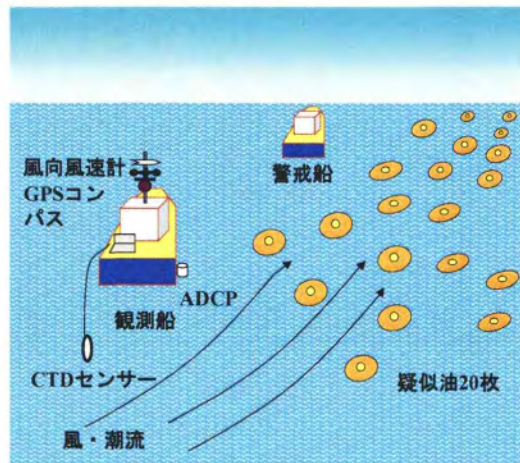


図 4.3.2: 疑似油を用いた水平乱流拡散実験の模式図



図 4.3.3: 風況及び流況データ計測方法

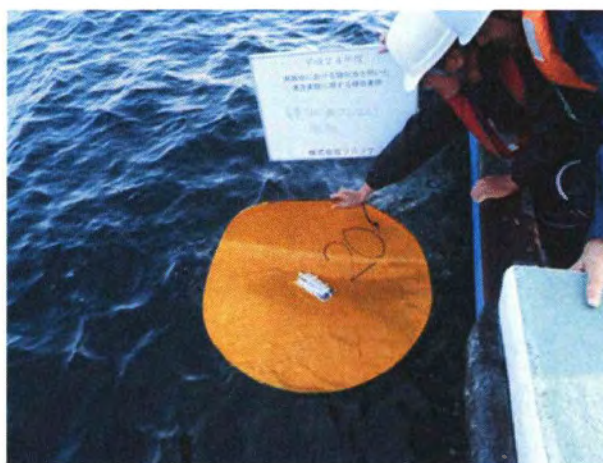


図 4.3.4: 疑似油の例



図 4.3.5: 疑似油漂流実験状況（平塚市周辺）

した。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{in=1}^N \left((x_{in} - \bar{x})^2 + (y_{in} - \bar{y})^2 \right) \quad (4.4.2)$$

ここで、 N は計算に用いる疑似油の個数、 in は着目する疑似油、 x_{in} 、 y_{in} は疑似油 in の位置、 \bar{x} 、 \bar{y} は疑似油の位置の平均を示す。

次に結果について説明する。まず、風速、流速、移流速度と水平乱流拡散係数を比較した。図 4.4.1 は風速と水平乱流拡散係数の関係を示している。図 4.4.2 は流速と水平乱流拡散係数の関係を示している。また、図 4.4.3 は疑似油の平均移流速度（流速 + 風速 $\times 0.03$ ）と水平乱流拡散係数の関係を示している。これをみると、いずれのケースにおいても顕著な相関は見られない。これらの結果から、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。極

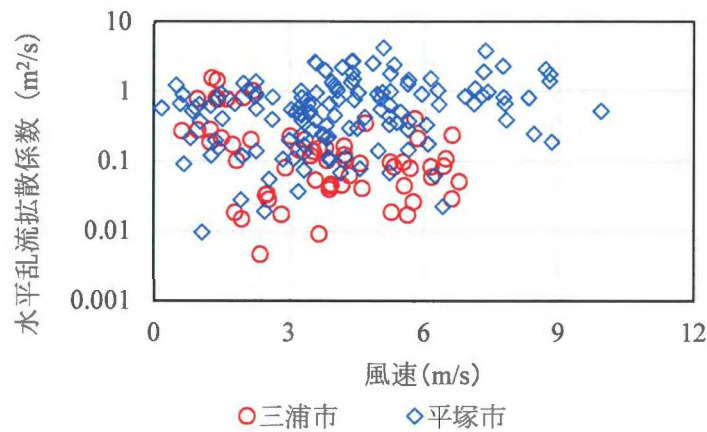


図 4.4.1: 風速と水平乱流拡散係数の関係

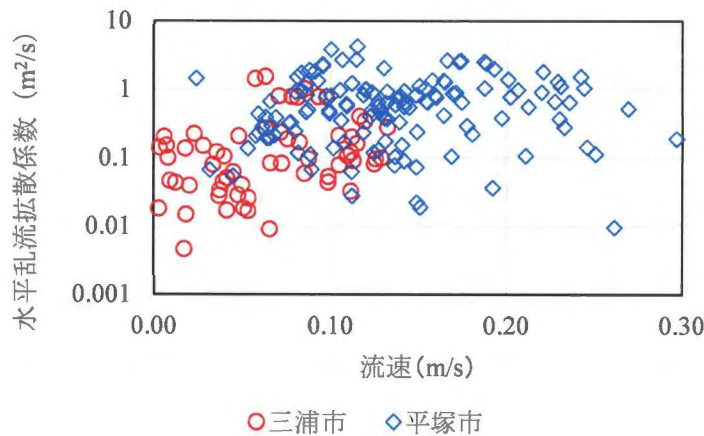


図 4.4.2: 流速と水平乱流拡散係数の関係

端な条件を考えると、流れと風がない条件において乱流拡散は起こらないと考えることが自然であり、実験結果のように風速及び流速ともに拡散に影響を及ぼさないのは不自然であると考えられる。よって、海水面の流れの速度と水平乱流拡散係数の相関がみられない理由として、風や流れに対する相関よりも計測誤差範囲のほうが大きく、風や流れの大きさの影響は隠れてしまう程度の違いであったと考える。以下では、水平乱流拡散係数は拡散スケールだけ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。

4.5 水平乱流拡散係数の推定方法

図 4.5.1 は三浦市周辺及び平塚市周辺の疑似油漂流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を示している。疑似油の拡散スケール L は Okubo[3] になら

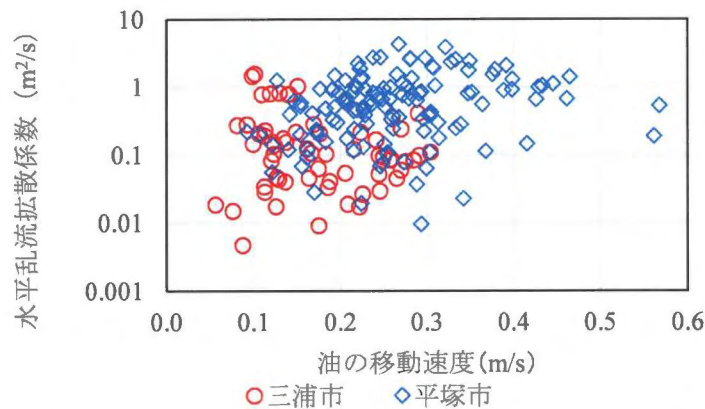


図 4.4.3: 疑似油の平均移動速度と水平乱流拡散係数の関係

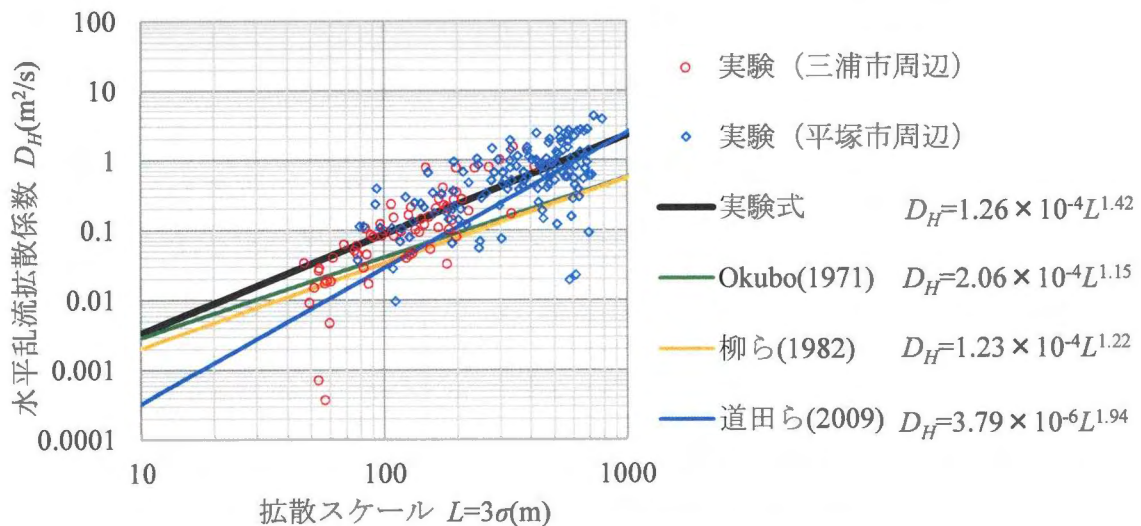


図 4.5.1: 拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係

$L=3\sigma$ と定義した。また、Okubo[3]、柳・樋口 [4]、道田ら [5] 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。この結果は、Richardson[6] の理論と傾向が一致していると考えられるけれども、傾きは拡散スケールの $4/3$ 乗よりも大きい傾向にある。

そこで、実験結果に水平乱流拡散係数が拡散スケールのべき乗に比例すると仮定して、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。導出結果が図 4.5.1 の太線である。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[3]、柳・樋口 [4] 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。道田ら [5] と比較すると、傾きが道田らの結果が大きいため、拡散スケールが大きくなると水平乱流拡散係数の大小が逆転する。道田らの傾きが正しく、拡散スケールの 1.94 乗に比例すると仮定すると、係数は 7.20×10^{-6} となり、道田

らの結果よりも大きいことがわかる。よって、海水面極近傍では水中に比べて流れの乱れが大きく、水平乱流拡散係数も大きく取る必要があると考えられる。

また、図 4.5.1 を見ると三浦市周辺は東京湾の湾口、平塚市周辺は相模湾で外洋であり海域が異なっているけれども、拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係が同様であるとの結果が得られた。これより本実験結果を基に水平乱流拡散係数の推定を行った結果を他の海域での油流出に関する数値計算に用いても適応性が高いと考える。

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（Toba ら [7]）。

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 (4.5.1) で計算する。

$$D_H = \begin{cases} 1.26 \times 10^{-4} (l_i)^{1.42} & l_i < L_{max} \\ 1.26 \times 10^{-4} (L_{max})^{1.42} & l_i \geq L_{max} \end{cases} \quad (4.5.1)$$

ここで、 l_i は粒子群全体の重心と着目粒子 i の距離、 L_{max} は拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係が一様に成り立つ範囲である。 L_{max} は流体場の再現スケールで決定される距離であり、擬 3 次等方性領域の上限までと考えられる。Toba ら [7] によると図 4.5.2 のように 10 km が擬 3 次等方性領域の上限である。したがって、10 km を上限として、流体場の再現スケールに応じて小さくすればよいと考える。

8.3 節で説明する、港湾空港技術研究所で構築している即時の予報体制においては、風データのメッシュサイズは 5 km である。よって、 L_{max} は 5 km から 10 km で設定すればよいと考えられる。ここでは $L_{max}=6$ km とすることを提案する。

4.6 結語

本章では海表面の流れの乱れによる油の乱流拡散をランダムウォークで計算する際に重要となる水平乱流拡散係数について、従来は具体的な数値が不明であったことを説明した。また、海水面極近傍の乱流拡散を計測した実験は従来行われておらず、水中より拡散係数が大きくなることが予想されることを説明した。そこで、実海域実験を行い油の拡散スケールから水平乱流拡散係数を導出する方法について検討した。以下では、本章で得ら

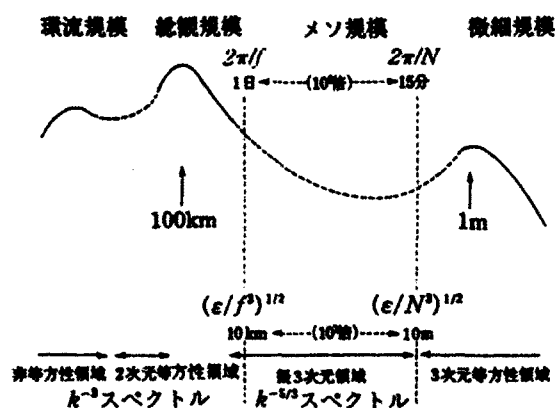


図 4.5.2: 時間と空間スケールに対する海の乱流の模式的分類 (Toba ら [7])

れた主要な結論を要約する。

まず実海域において乱流拡散計測実験を行うにあたり、風洞水槽実験により油の代わりとなる疑似油の選定を行い、スポンジゴムシートが油と同等の漂流特性を持っており、疑似油として使用できることを説明した。

次に実海域実験の方法について説明した。実海域実験では疑似油を 20 枚程度投入し、それらの拡がりを小型 GPS ロガーで計測した。疑似油の拡がりから求めた海水面極近傍の水平乱流拡散係数と風速、流速との間に特別な相関関係は見られなかった。また、海水面極近傍の水平乱流拡散と係数拡散スケールとの相関があることを説明した。既存の水中よりも海水面極近傍の水平乱流拡散係数が大きい傾向にあることを説明した。

また、実験結果について、拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係について最小二乗法で近似線を求めた。さらに拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係が成り立つ空間スケールと自然外力の再現空間スケールについて考察し、水平乱流拡散係数を導出する方法を求めた。

参考文献

- [1] ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, pp. 594–609, 1996.
- [2] J. Smagorinsky. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99–164, 1963.
- [3] A. Okubo. Oceanic Diffusion Diagrams. *Deep-Sea Research*, Vol. 18, pp. 789–802, 1971.

-
- [4] 柳哲雄, 樋口明生. 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, 1982.
- [5] 道田豊, 田中潔, 小松輝久, 石神健二, 中嶋理人. 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, Vol. 46, No. 2, pp. 77–83, 2009.
- [6] L. F. Richardson. Atmospheric Diffusion Shown on a Distance-Neighbor Graph. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 110, No. 756, pp. 709–737, 1926.
- [7] Y. Toba, H. Kawamura, F. Yamashita, and K. Hanawa. Structure of Horizontal Turbulence in the Japan Sea. *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, Vol. 39, pp. 317–332, 1984. Elsevier.

第 5 章

韓国泰安沖 Hebei spirit 号油流出事故の再現計算

5.1 事故概要

2007 年 12 月 7 日 6:50 頃，韓国忠清南道泰安沖約 8 km（図 5.1.1 参照）において錨泊中であったタンカー Hebei Spirit 号（香港船籍，146,848 GT）にクレーン台船が衝突した。この衝突によりタンカーのタンク（1 番，3 番，5 番）が破口し，積み荷の原油，12,547 kL が黄海に流出した。油の流出時間は 5 番タンクが一番短く 12 月 7 日の 12:00 で止まった。破口寸法の小さい 1 番タンクは長時間に渡り油の漏出が続き，翌日深夜 23:40 頃に流出が止まった。

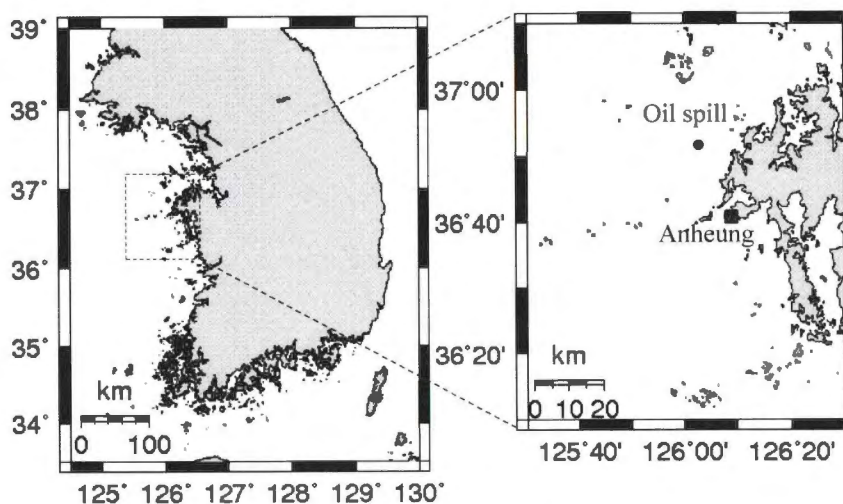


図 5.1.1: Hebei Spirit 号油流出事故発生場所

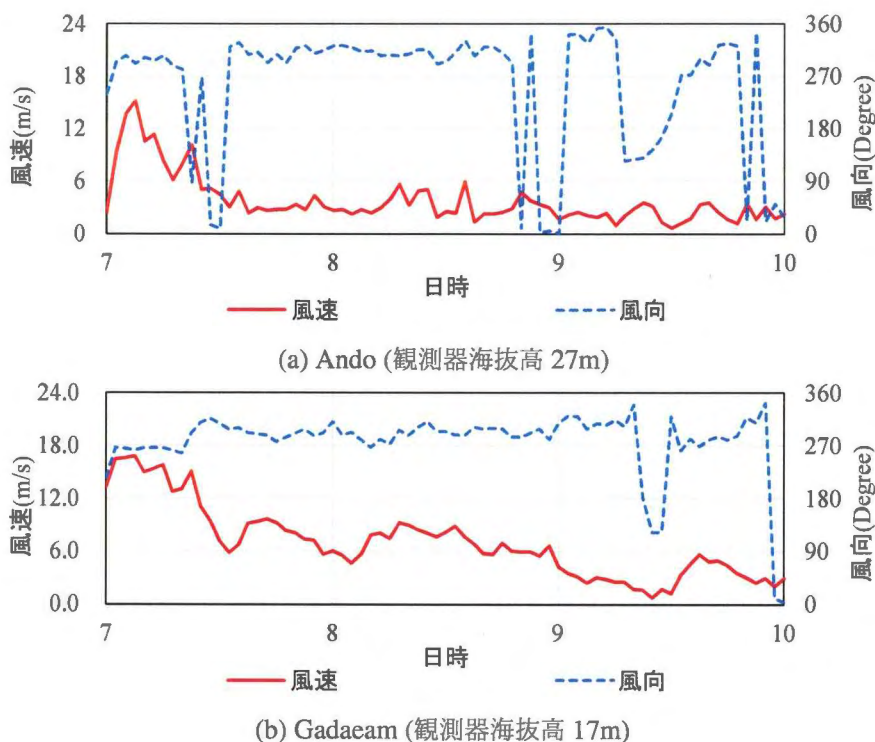


図 5.1.2: 事故時の風況観測値

韓国泰安沖の沿岸は海岸線方向に潮汐流が強い海域であり、流出油は広い範囲に移流した。また、事故当時は強い北西風が吹いており、流出した油は12月7日深夜から12月8日未明に泰安郡の海岸線に漂着した。そのため環境及び地域経済に多大な打撃を与える、韓国史上最大の油流出事故となった。なお、事故の詳細については藤田ら [1] に詳しい記載がある。

5.2 計算条件

第2章で説明した油拡散粒子モデルを用いて、流出油の移流、拡散の再現計算を行った。移流外力は、次のように取り扱った。まず、韓国泰安沖である黄海は海流の影響は大きくないと考えられる。また、泰安付近では大河川の流入がない。そのため、海流と密度流の影響を無視し、潮汐流と風による表面流のみを再現した。

潮汐流は STOC-ML[2] を用いて計算した。潮汐流の計算条件は表 5.2.1 の通りである。境界条件は Matsumoto ら [3] のモデルで求めた水位を開境界で与えた。水深データは GEBCO (大洋水深総図, General Bathymetric Chart of the Oceans) の 30 秒格子データ (<http://www.gebco.net/>) を用いた。密度場は $1,026 \text{ kg/m}^3$ で一様に与えた。初期流速場は 0 m/s とした。

表 5.2.1: 潮汐流の計算条件

計算範囲		125° 10' 15'' E~126° 24' 45'' E 36° 00' 15'' N~37° 19' 45'' N
計算時間		2007 年 12 月 4 日 0:00~ 11 日 11:00
格子数		70 × 112 × 10
格子間隔	Δx	743 m (30 秒)
	Δy	925 m (30 秒)
	Δz	5 m(1~8 層) 10 m(9, 10 層)
時間間隔	Δt	10 s
海底粗度係数	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 5.2.2: 吹送流の直接計算における計算条件

格子間隔	Δz	1 m(1~10 層)
		2.5 m(11,12 層)
		5 m(13~19 層)
		20 m(20 層)
時間間隔	Δt	2.0 s

風による油の移流は風係数法と数値計算による直接推定で再現し、計算結果を比較した。吹送流の直接推定は潮汐流計算と同じく STOC-ML[2] で潮汐流と同時に計算を行った。計算条件について、鉛直方向の格子間隔は吹送流を再現するために細かく設定する必要があると考えられるけれども、リアルタイムで計算する時間も考慮し、表 5.2.2 の通り海表面近傍で $\Delta z=1$ m に設定した。それに伴い計算時間間隔 Δt も短くした。それ以外の計算条件は表 5.2.1 と同じである。風況データは気象業務視線センターの提供する GPV メソ客観解析データ (MSM) の再解析データを用いた。

油拡散粒子モデルの計算条件は表 5.2.3 の通りである。油の流出位置は藤田ら [1]、油の流出流量は Lee[4] を参考に設定した。粒子数、計算時間間隔は計算機の制約、計算時間の兼ね合いを考えて決定した。粒子体積は油流出量と粒子数から逆算して決定した。

表 5.2.3: 油拡散粒子モデルの計算条件

油流出位置	126° 03.01' E, 36° 52.01' N
粒子数	1,200 個
粒子体積	10 m ³ /個
時間間隔	10 s
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

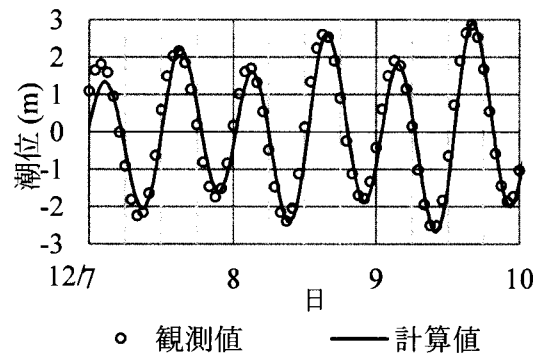


図 5.3.1: Anheung の験潮記録と潮汐数値計算の比較

5.3 計算結果と観測結果の比較

潮汐流の計算結果について、図 5.3.1 は Anheung (図 5.1.1 参照) で観測された験潮記録と潮汐の数値計算結果の比較である。図 5.3.1 における観測と計算の誤差の標準偏差は 0.27 m である。油流出地点周辺の潮汐流観測記録を見つけることができなかつたため、潮汐だけの比較にとどまるものの、潮汐の計算結果は験潮記録をよく再現していると考えられる。

図 5.3.2 は 3 つの時刻における油流出範囲の観測結果と漂流予測計算結果の比較である。図 5.3.2 の観測結果において、12/7, 8 は目視観測 [5]、12/11 は衛星 Envisat ASAR (<http://www.esa.int/>) の観測による。数値計算は油の風による移流の再現に風係数を用いたものと、STOC-ML [2] を用いて吹送流の直接推定を行ったものを示している。

観測結果と風係数法を用いた計算結果を比較すると、韓国泰安沖では北東～南西方向の潮汐流が卓越しており、12/7, 8 において潮汐流により北東～南西方向に油が移動している。また、事故時は北西風が卓越していたことから、風により南東方向に油が移動している様子が再現されている。また、12/11 の油拡散範囲は観測結果と一致していると考えら

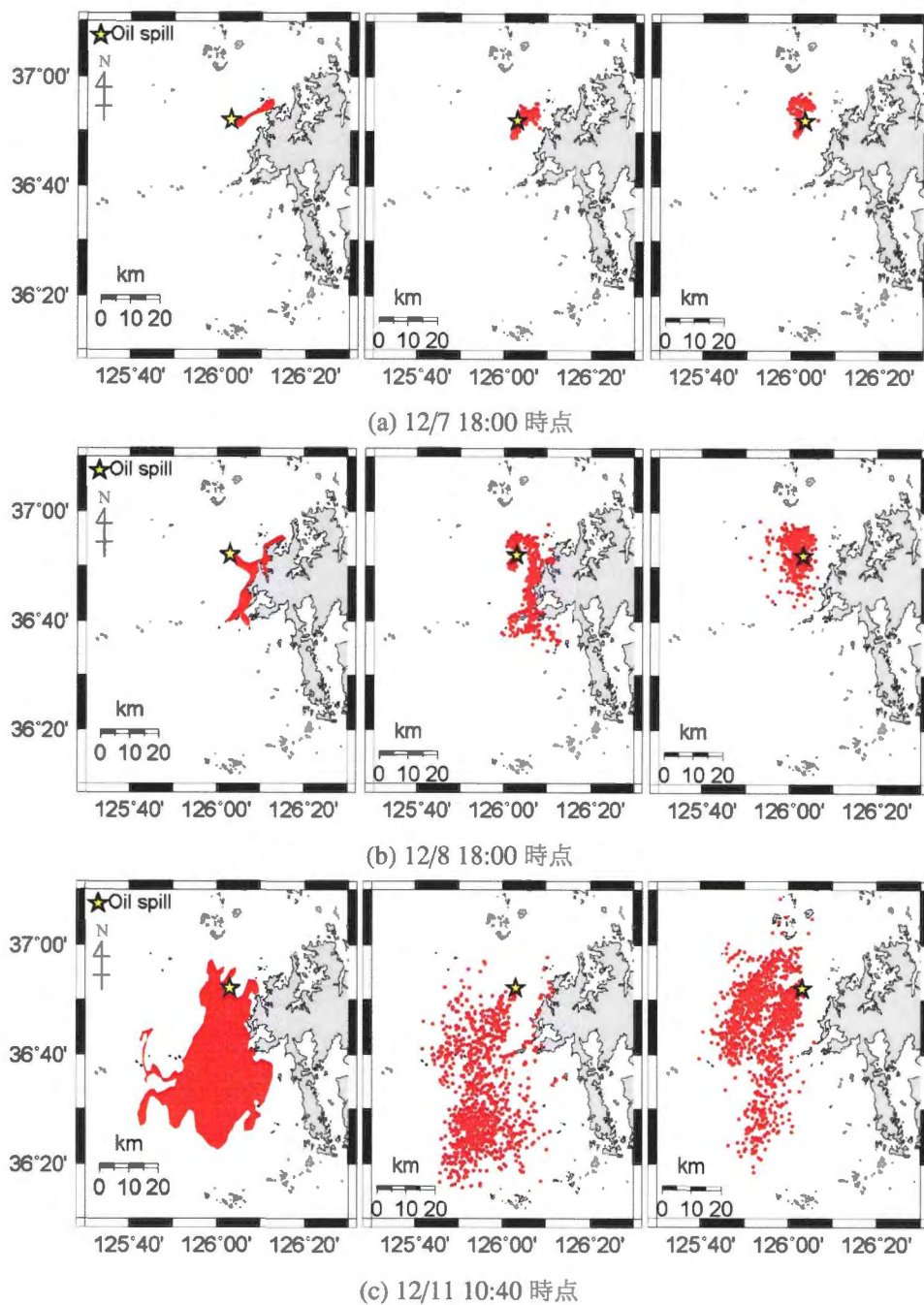


図 5.3.2: 流出油の観測結果（左）と計算結果（中央：風係数法，右：吹送流の直接推定）の比較

表 5.3.1: 観測結果と計算結果における油の移流の比較

日時	12/7 18:00	12/8 18:00	12/11 10:40
(観測：画像重心位置)-(数値計算：油粒子平均位置) (km)	7.6	13.4	17.5
時間当たりの両者のずれ (cm/s)	2.0	2.8	2.5

表 5.3.2: 観測結果と計算結果における油の拡散の比較

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	1,195
B:計算結果	30	110	1,168
観測と計算結果の面積比	A/B 1.04	1.00	1.02

れる。

計算結果を検証するために、表 5.3.1 及び表 5.3.2 のように観測結果と計算結果の比較を行った。解析方法について、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 数から重心及び面積を求めた。計算結果の重心は粒子位置から求めた。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。

まず、油の移流について、表 5.3.1 のように観測結果は時間経過と共に誤差が大きくなる。しかしながら、時間当たりで考えると、2~3 cm/s 程度と、大きな移流速度を持つ海域においても十分な精度で計算ができていると考える。

次に、油の拡散面積について、表 5.3.2 より提案した数値計算法は実験結果をよく再現できていると考えられる。

次に観測結果と吹送流を直接推定した計算結果を比較する。図 5.3.2 より吹送流を直接推定した場合、南東方向へ向かう風による油の移流がほとんど再現されていないことがわかる。本数値計算では水面近傍の鉛直方向計算格子を 1 m で計算している。少なくともこの程度の格子間隔では水面極近傍の吹送流を再現できていないと考えられる。しかしながら、水面近傍の吹送流を再現するために格子間隔を細かくすると、時間間隔も小さくする必要があるのであるため、計算機の能力等を考慮すると実用的でない。この結果より、現状では油の風による移流の評価は、数値計算により直接吹送流を再現するよりも風係数法によっ

て再現するほうが適している。吹送流の直接計算により漂流予測を行う場合は、計算機の性能向上、コーディングの改良等の対策が必要であり、今後の課題であると言える。

5.4 計算に用いるパラメータの検討

ここでは本数値計算法における油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散の計算結果に及ぼす影響について検証する。油流出事故の観測結果から油膜自身の特性による油拡散、油の乱流拡散及び移流による見かけ上の油の拡散の影響を分けることができないため、ここでは数値計算結果における油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散の考慮の有無と数値計算結果の違いを比較し、各項の影響の大きさを検証する。

図 5.4.1 は油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散に関して、数値計算における考慮の有無と計算結果を比較したものである。計算結果の時間は油流出から 7 時間後である。計算は油膜自身の特性による油拡散及び油の乱流拡散の両方を考慮した場合、どちらかのみ考慮した場合、どちらも考慮しない場合で行った。

計算結果をみると両方を考慮した場合と比較して、油膜自身の特性による油拡散のみを考慮した場合（図 5.4.1 右上）は、帯状に移流するのみで油粒子がほとんど拡散していない。また、乱流拡散のみを考慮した場合（図 5.4.1 左下）を見てわかるように、ほとんどが乱流拡散の影響で油が拡がっている。油膜自身の特性による油拡散、油の乱流拡散の両者とも考慮しない場合（図 5.4.1 右下）も帯状に移流するのみであった。計算対象海域では潮流による移流の影響が強く、このような海域においては油膜自身の特性による油拡散の効果は相対的に小さくなく、乱流拡散の効果が大きいということがわかった。

次に、水平乱流拡散係数 D_H の設定方法に関して検討する。第 4 章において海水面極近傍における水平乱流拡散の推定方法の提案を行っている。このほかに、乱流モデルを用いて流況を数値計算する際に計算される水平渦動粘性係数 ν_H が、油の乱流拡散係数 D_H と等しいとして、計算に用いることも可能である。そこで、Smagorinsky[6] のモデルを用いた水平渦動粘性係数 ν_H の空間分布を示し、著者らの水平方向乱流拡散の推定方法との比較を行い、Smagorinsky モデルの活用について考察を行った。

本計算においては水平方向等方乱流を仮定し、 Δ は計算格子に依存するとして、Smagorinsky モデルに基づき、式 (5.4.1) のように拡散係数の算出を試みた。

$$\nu_H = C_s^2 \Delta x \Delta y \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.4.1)$$

ここで、 C_s は Smagorinsky 定数、 u 、 v は付録 A で説明する x 、 y 方向の流速である。

Smagorinsky モデルを用いて水平渦動粘性係数を求めた結果が図 5.4.2 である。この時の C_s は 0.20 とし、その他の計算条件は表 5.2.1 と同じである。なお C_s の理論値は 0.173

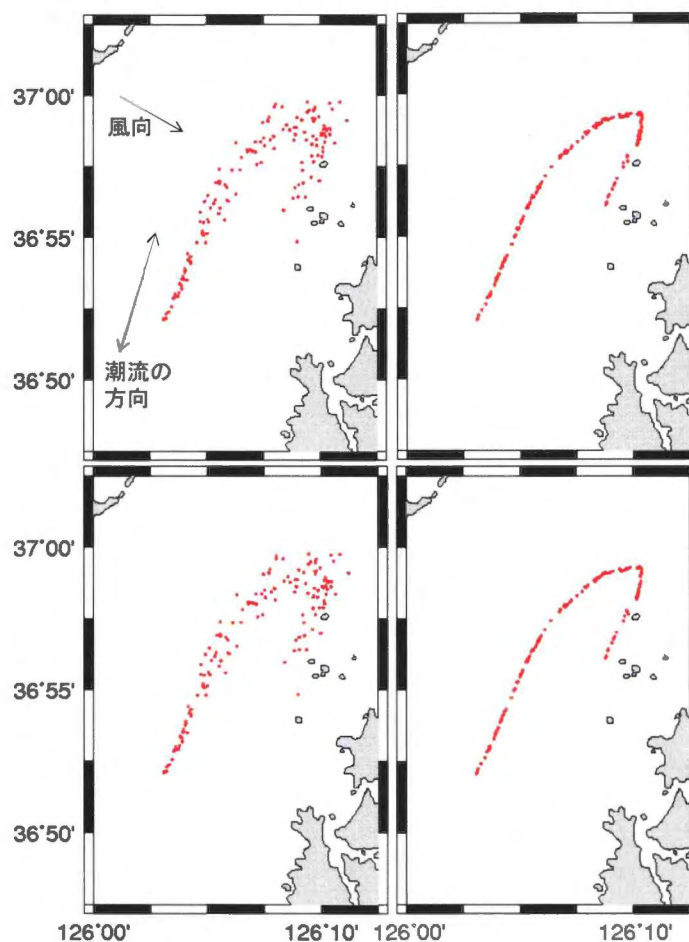


図 5.4.1: 油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散の影響。時間 12/7 15:00 (油流出から 7 時間後)

- 左上：油膜自身の特性による油拡散有り，油の乱流拡散有り。
- 右上：油膜自身の特性による油拡散有り，油の乱流拡散無し。
- 左下：油膜自身の特性による油拡散無し，油の乱流拡散有り。
- 右下：油膜自身の特性による油拡散無し，油の乱流拡散無し。

である。時間は 12/7 8:00 の結果で、潮位変化が大きく、潮汐流が早い時間帯を取り出している。水平渦動粘性係数は局所的には $10^1 \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーであるけれども、ほとんどが $10^0 \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーである。ここで、図 5.4.3 は第 4 章で提案する拡散係数を求める手法で計算された、各油粒子の拡散係数の平均値の時系列変化である。これをみると水平乱流拡散係数は $20 \sim 30 \text{ m}^2/\text{s}$ で推移しており、平均は $22 \text{ m}^2/\text{s}$ である。また、韓国泰安沖の水平渦動粘性係数は $10^1 \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーであるとの結果を得ている(松崎・藤田 [7])。よって、今回の計算条件では Smagorinsky モデルを油の乱流拡散の決定に用いることは適さなく、海水面極近傍における水平方向乱流拡散の推定方法を用いるとよいと考えられる。

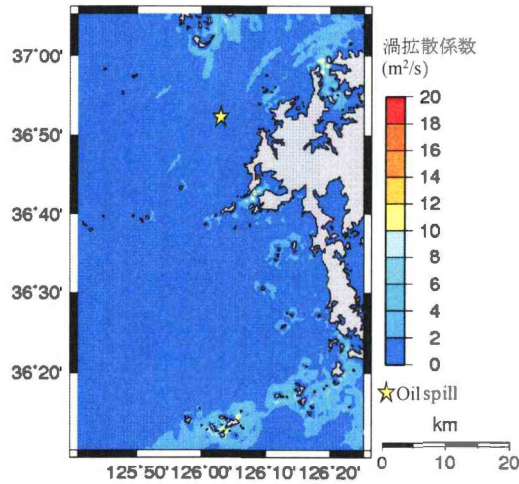


図 5.4.2: Smagorinsky モデルを用いた水平渦動粘性係数 $\nu_H(m^2/s)$ の推定 (2007 年 12 月 7 日 8:00 時点)

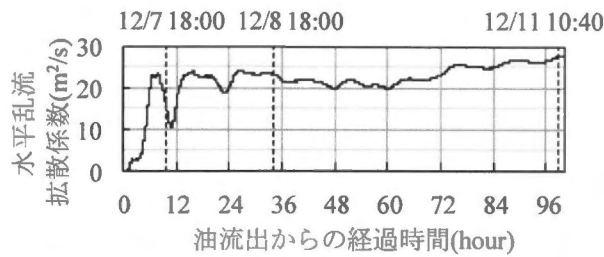


図 5.4.3: 水平乱流拡散係数の推定方法で計算された各油粒子の拡散係数の平均値の時系列変化

最後に、導入した水平乱流拡散係数の導出方法の意義について考察する。図 5.4.4 は水平乱流拡散係数と拡散面積計算結果の関係を示している。これを見ると、提案する水平乱流拡散係数の導出方法を用いても、適切な定数である $D_H=22 \text{ m}^2/\text{s}$ を入力しても結果は大きく変わらない。しかしながら、定数を適切に見積もれなかった場合は、結果が大きく異なることがわかる。したがって、提案する水平乱流拡散係数の導出方法を用いるメリットとして、定数を入力することなく、自動的に計算ができるほか、定数の見積もり誤りがなく、不慣れな計算者が計算を行っても適切に水平乱流拡散係数を設定できることが挙げられる。

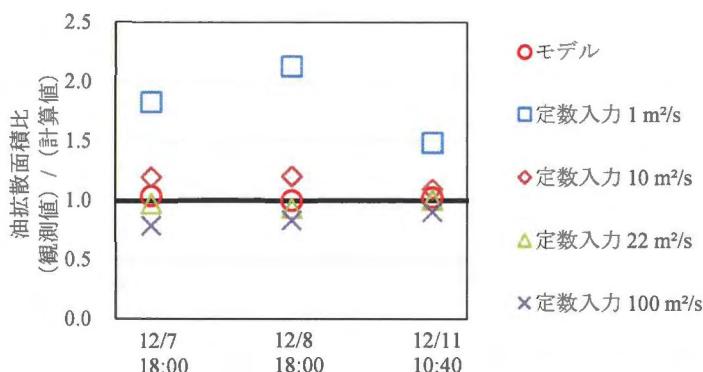


図 5.4.4: 水平乱流拡散係数と拡散面積計算結果の関係

5.5 結語

本章は開発した油拡散粒子モデルを用いて、2007年に韓国泰安沖で発生したタンカー事故に伴う油流出について再現計算を行い、数値計算法の妥当性を検証した。本章で得られた主要な結論を要約する。

まず、事故の概要について説明した。事故の発生した海域では潮汐流が強く、事故時は北西風が強く吹いていたため、これらの自然外力を再現する必要があることを説明した。

次に、計算条件について説明した。自然外力は潮汐流と風による表面流を考慮し、それぞれの計算方法について説明した。

続いて、計算結果について説明した。まず、再現した潮汐は観測結果とよく一致していることを説明した。次に、計算結果について観測結果とよく一致していることを説明した。また、風による表面流について、現状では3次元流体モデルで再現することは困難であり、風係数を用いて再現するとよいことを示した。

また、計算に用いるパラメータの検討を行った。まず、油膜自身の特性による油拡散と流れの乱れによる油の乱流拡散について、その効果の検証を行い、今回のように流れが大きく乱流が大きいと考えられる海域では油の漂流の中で乱流拡散が支配的であることを示した。さらに、開発した数値計算法について、水平乱流拡散係数は第4章で説明した導出方法で計算すると、観測結果とよく一致し、乱流モデルで有名な Smagorinsky モデルを用いた再現では、乱流拡散を説明できないことを示した。最後に、導入した水平乱流拡散係数の導出方法の意義について説明した。

参考文献

- [1] 藤田勇, 八尋明彦, 桑江朝比呂, 吉江宗生. 韓国泰安沖油流出事故に関する現地調査報告. 港湾空港技術研究所資料, No. 1186, p. 24, 2008.
- [2] 富田孝史, 柿沼太郎. 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. 港湾空港技術研究所報告, Vol. 44, No. 2, pp. 83–98, 2005.
- [3] K. Matsumoto, T. Takanezawa, and M. Ooe. 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, 2000.
- [4] B. Lee. Hebei Spilit 号汚染事故防除現状及び今後の計画. 2008 年度韓国海洋科学技術協議会共同学術大会 (韓国語), Vol. 56, pp. 10–20, 2008.
- [5] J. L. Lee, D. Y. Lee, and I. H. Kim. The Influence of Waves on Oil Spill Behavior. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 4, pp. 683–688, 2009.
- [6] J. Smagorinsky. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99–164, 1963.
- [7] 松崎義孝, 藤田勇. 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, p. 26, 2012.

第 6 章

東京湾 Diamond Grace 号油流出事故の再現計算

6.1 事故概要

1997 年 7 月 2 日 10 時 5 分に東京湾中ノ瀬付近（北緯 $35^{\circ} 21'$ ，東経 $139^{\circ} 43'$ ，図 6.1.1 参照）において，油送船ダイヤモンドグレース号の座礁事故が発生し，約 1,550 kL の Umm Shaif 原油が流出した．事故当時の気象は快晴で，波高は 0.5 m であった．図 6.1.2 は，事故時の現場海域の風況観測値である．事故発生時は南南西の風が約 9 m/s 程度吹いており，その後は南-南南東の風が 3~8 m/s 程度吹いていた．

流出油は 3 日早朝に大黒埠頭，本牧埠頭，扇島護岸，東扇島防波堤の全域に漂着した．流出油のほとんどが 4 日 21 時 30 分までに回収されており，東京港，千葉港，木更津港，横須賀港では流出油の漂着は確認されなかった．

事故当初から約 170 kL の油処理剤が散布されている．閉じた系での実験から求められた流出油に対する使用基準量は原油の 10~20% であり，今回の事故で散布された油処理剤は原油 850~1,700 kL が流出した場合に散布する量に相当する．なお，事故の詳細については鶴谷ら [2] に詳しい記載がある．

6.2 計算条件

移流外力は次のように取り扱った．まず，油の流出位置及び移流，拡散の位置が東京湾の横須賀から富津以北のため，海流の影響は大きくないと考えられる．また，河川流入等による密度流に関して，鈴木 [3] の資料によると，HF レーダーによって計測された湾中央から湾口の湾軸方向（北東-南西方向）表層流速の潮汐残差流の 7 月平均値は南西向きに 0.05 m/s である．同様に鈴木 [3] の資料によると，最も密度流の影響が強い位置の一つ

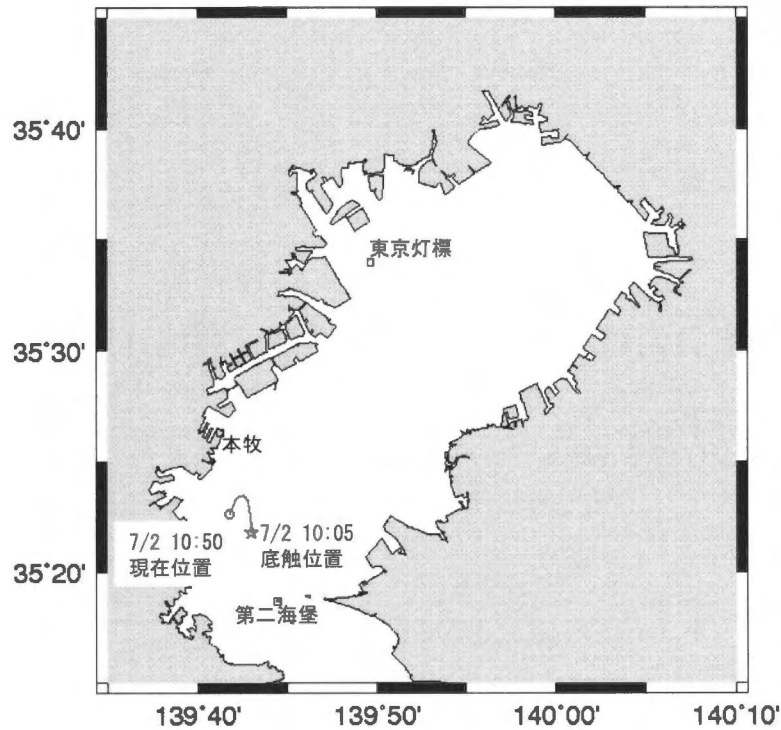


図 6.1.1: Diamond Grace 号油流出事故発生場所 [1]

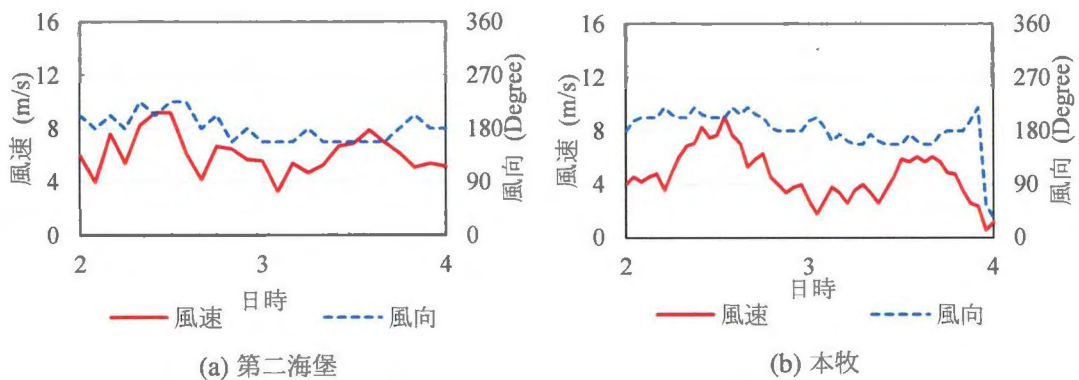


図 6.1.2: 事故時の風況観測値

と考えられる羽田における無風時，すなわち主に密度流による湾軸方向表層流速は 0.078 m/s と見積もられている．それに対して，事故時の第二海堡における潮流は 0.30 m/s であり，海上 10 m 風速が 8.0 m/s であることから，風による表面流の平均値は 0.24 m/s と見積もられる．これに従うと事故発生時の海表面の流況に与える密度流の影響は $8\sim 13\%$ 程度であり，潮流と風による表面流が卓越している．そこで，本計算では計算の簡便性を優先し，移流外力は潮流と風による表面流のみとした．

潮流は 5.2 節と同様に STOC-ML[4] を用いて計算した．潮流の計算条件は表 6.2.1

表 6.2.1: 潮汐流の計算条件

計算時間		1997年6月28日10:00~ 7月4日11日10:00
格子数		128 × 188 × 10
格子間隔	Δx	500 m
	Δy	500 m
	Δz	5 m(1~8層) 10 m(9層) 50 m(10層)
時間間隔	Δt	10 s
海底粗度係数	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	0.01 m ² /s

表 6.2.2: 計算に使用した風向風速観測点の位置と高度

観測地点名	緯度		経度		T.P. からの 風速計高度 (m)
	度	分	度	分	
東京灯標	35	33.97	139	49.68	25.0
第二海堡	35	18.75	139	44.63	29.0
本牧船舶通航信号所	35	26.33	139	41.38	56.0

の通りである。境界条件は Matsumoto ら [5] のモデルで求めた水位を東京湾口で与えた。水深データは日本海洋データセンターの提供する 500 m 格子データ (J-EGG500) を用いた。密度場は 1,026 kg/m³ で一様に与えた。初期流速場は 0 m/s とした。

風による油の移流は風係数法を用いて再現した。風況データは観測値を用いて以下のように作成した。風は海上と陸上では全く異なることから、海上にある東京灯標、第二海堡と本牧船舶通航信号所 (図 6.1.1, 表 6.2.2 参照) の計 3 地点における 1 時間ごとの観測値を用いた。また計測高度から式 (6.2.1) のように 1/7 乗則を用いて、海上 10 m 風速に換算した。風速の空間分布は式 (6.2.2) から式 (6.2.4) を用いて、距離の逆数に比例するよう重みをつけて風速場 $W_{x,y}$ を再現した。

表 6.2.3: 油拡散粒子モデルの計算条件

粒子数	1,500 個
粒子体積	1 m ³ /個
計算時間間隔	10 s
油流出時間及び 流出流量	7/2 10:05~10:50 1,333 m ³ /hour 7/2 10:50~13:05 222 m ³ /hour

$$W_{10} = \left(\frac{10}{z}\right)^{\frac{1}{7}} W_z \quad (6.2.1)$$

$$W_{x,y} = \sum_{m=1}^3 W_m \frac{R_m}{R_{sum}} \quad (6.2.2)$$

$$R_m = \frac{1}{\sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}} \quad (6.2.3)$$

$$R_{sum} = \sum_{m=1}^3 R_m \quad (6.2.4)$$

ここで、 m は観測地点、 x 、 y はそれぞれ東西、南北の座標、 x_m 、 y_m は観測地点 m の座標、 W_m は観測地点 m における風速、 R_m は観測地点 m と対象地点の距離の逆数、 R_{sum} は 3 つの R_m の和である。

油拡散粒子モデルの計算条件は表 6.2.3 の通りである。油の流出位置は渡辺ら [1] を参考に設定した。流出流量は事故時の記録 [6] を参考に設定した。粒子数、計算時間間隔は計算機の制約、計算時間の兼ね合いを考慮して決定した。粒子体積は油流出量と粒子数から逆算して決定した。

6.3 計算結果と観測結果の比較

潮汐流計算の再現精度について検討する。事故当日の連続した潮汐流の計測データは見つからなかったため、1 年間の東京湾の潮汐流計算を行い、第二海堡での観測値と計算値の分潮を比較することで、潮汐流計算の精度を検証する。

図 6.3.1 は第二海堡における観測値と計算値の各分潮の比較である。観測値は関東地方整備局東京湾口航路事務所の設置する海象計の 2009 年 1 年間で測定された測定水深 10 m の流速データを用いた。計算値は海象計の設置されている位置で、測定水深が同じ計算メッシュのデータを用いた。観測値及び計算値の各分潮は、田中 [7] の方法を用いて主要

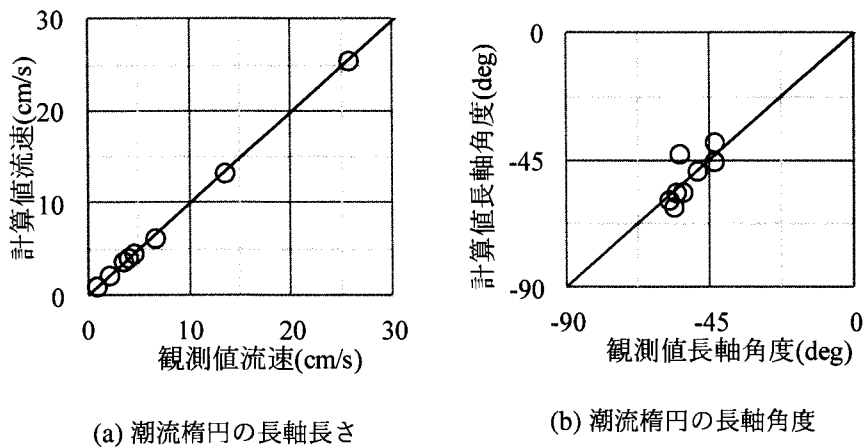


図 6.3.1: 第二海堡の観測値と計算値の各分潮の比較

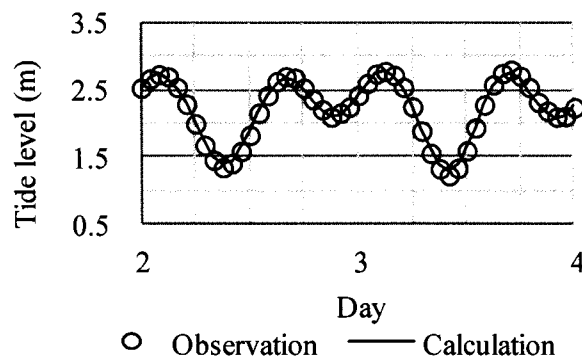


図 6.3.2: 事故時の横浜新港の潮位観測値と計算値の比較

8分潮 (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2) の潮流楕円の長軸の長さおよび長軸の角度の結果を示した。図より計算値は観測値とよく一致していると考えられる。

図 6.3.2 は事故時の横浜新港の潮位観測値と計算値の比較である。計算結果と観測結果の誤差の標準偏差は 0.03 m であり、計算結果は観測結果とよく一致している。図 6.3.1 及び図 6.3.2 より、潮汐流と潮位の再現結果は良好であることから、同じ計算条件で行った事故時の潮汐流計算も精度よく行われているものと考えられる。

次に、流出油の拡散観測結果と計算結果を比較する。ここで精度検証においていくつかの問題がある。まず、関係各機関の油濁対応が早かったことから、3 日間の防除活動により浮遊油の大部分が回収された [8]。また 6.1 節で述べた通り油処理剤による対処も行われており、原油のみの状況と異なり流出油が水中分散をしやすい状況にあったと考えられる。さらにダイヤモンドグレース号から流出した Umm Shaif 原油は揮発性が高い。NOAA の提供する流出油の性状変化ソフトウェア ADIOS2 (http://archive.orr.noaa.gov/book_shelf/538_adios.pdf) によると、Umm Shaif 原油

表 6.3.1: 油膜の厚さと油膜の外見の関係 [10]

油膜の厚さ (μm)	油膜の外見	標示
2.0	油膜の色が黒ずんで見える状態	A
1.0	油膜がくすんだ褐色を呈する状態	B
0.3	水面に明るい褐色の帯がはっきり見える状態	C
0.15	水面がほんの少し褐色に色づいて見える状態	D
0.1	水面が銀色にキラキラ光って見える状態	E
0.05	光線の条件が最も良い時にかろうじてキラキラ光る油膜が見える状態	-

の海水温 25 °C, 波高 0.5 m, 風速 10 m/s, 海域流速 0.25 m/s の条件下における, 24 時間後の油の蒸発率は約 37% である. 蒸発を考慮していない本モデルでは油の量を単純に比較することはできない. 今回の計算結果はこれらの影響について考慮されていない.

以上のことから, 観測結果と計算結果との比較は, 油回収作業等の影響が大きいと考えられる油量や拡散面積の評価は行わず, 油回収作業等の影響が比較的小さいと考えられる移流のみで行うこととする.

図 6.3.3 は 7 月 2 日 14:30 時点及び 7 月 3 日 12:00 時点の油流出範囲の観測結果と同時刻の計算結果の比較である. 海面の油膜の観測結果はいくつか発表されており (例えば, 坂本 [8]; 市橋・赤松 [9]), その中で海上保安庁が発表した拡散結果 [6] は拡散範囲のほか, 油膜の外見による油膜の分類も図示されているため, この資料と比較した. 図 6.3.3 の観測結果で示される油膜の厚さは, 表 6.3.1 の油膜の外見との対応を元に作成した.

図 6.3.3 の 7 月 2 日 14:30 時点において, 事故当時は南南西風が卓越しており, 潮汐が上げ潮であったことから, 油層が北東方向への移流がよく一致しており, 拡散する様子もよく再現されている. また, 7 月 3 日 12:00 時点において, 大黒埠頭, 本牧埠頭, 扇島護岸, 東扇島防波堤といった東京湾西側沿岸に油が移流し, 漂着する様子が再現されている. 特に油膜の厚い部分が沿岸部にある様子がよく一致していると考えられる. 鶴谷ら [2] や坂本 [8] によると, 蒸発せず, 回収されなかった流出油の大半が大黒埠頭, 本牧埠頭, 扇島護岸, 東扇島防波堤といった, 川崎市, 横浜市の沿岸部に移流, 拡散したとあり, 計算結果はそれをよく再現していると考えられる.

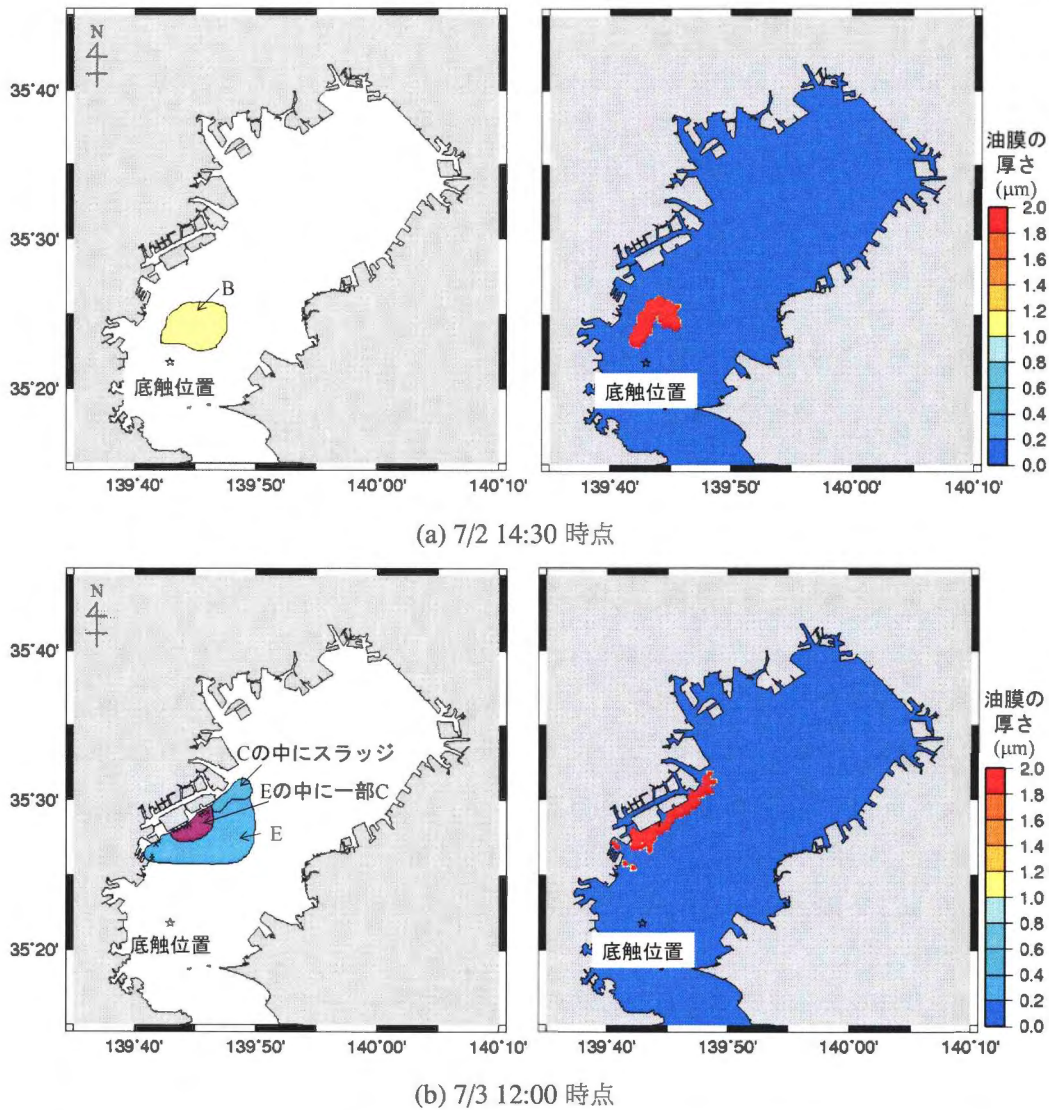


図 6.3.3: 油流出範囲の観測結果（左）[6] と同時刻の計算結果（右）の比較

6.4 結語

本章は開発した油拡散粒子モデルを用いて、1997年に東京湾で発生したタンカー事故に伴う油流出について再現計算を行い、数値計算法の妥当性を検証した。本章で得られた主要な結論を要約する。

まず、事故の概要について説明した。事故の発生した海域では潮汐流が強く、事故時は南風が強く吹いていたため、これらの自然外力を再現する必要性があることを説明した。

次に、計算条件について説明した。自然外力は潮汐流と風による表面流を考慮し、それ

ぞれの計算方法について説明した。

続いて、計算結果について説明した。まず、再現した潮汐流は観測結果とよく一致していることを説明した。最後に、計算結果の油の移流位置が観測結果とよく一致していることを説明した。

参考文献

- [1] 渡辺正孝, 天野邦彦, 石川裕二, 田村正行, 村上正吾, 木幡邦男. 東京湾におけるタンカー事故による原油流出解析. 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 926–930, 1998.
- [2] 鶴谷広一, 細川恭史, 日比野忠史, 三好英一. 東京湾ダイヤモンドグレース号油流出事故の浮遊・漂着状況の把握と水域への影響調査. 港湾技研資料, No. 882, p. 21, 1997.
- [3] 鈴木高二朗. 東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響について. 港湾空港技術研究所資料, No. 1276, p. 97, 2013.
- [4] 富田孝史, 柿沼太郎. 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. 港湾空港技術研究所報告, Vol. 44, No. 2, pp. 83–98, 2005.
- [5] K. Matsumoto, T. Takanezawa, and M. Ooe. 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, 2000.
- [6] 横浜市港湾局. 東京湾原油流出事故による影響調査（横浜港編）. 1998.
- [7] 田中陽二. 最尤法による潮流の調和解析と最適な分潮の組み合わせの探索方法. 海岸工学論文集, Vol. 55, pp. 381–385, 2008.
- [8] 坂本茂宏. ダイヤモンドグレース号原油流出事故への対応. 海上防災, No. 96, pp. 3–14, 1998.
- [9] 市橋理, 赤松幸生. ダイヤモンドグレース号流出油の漂流状況. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 36, pp. 2–4, 1997.
- [10] 海上災害防止センター. 流出油事故対応防除マニュアル, 2000.

第 7 章

東京湾 Beagle3 号油流出事故の予測計算

7.1 事故概要

2014 年 3 月 18 日午前 3:20 頃、神奈川県三浦市の沖合約 6 km の浦賀水道において、パナマ船籍貨物船 BEAGLE3 号 (12,630 t) と韓国船籍貨物船 PEGASUS PRIME (7,406 t) が衝突する事故が発生した。衝突により BEAGLE3 号が水深約 100m の海底に沈没し、中国人乗組員 7 人が死亡、2 人が行方不明となっている。また、同船より燃料油の一部が流出した。第三管区海上保安部によると沈没時に船内に残存したと思われる油の量は C 重油約 357 kL、A 重油約 42 kL であった。事故時の天候は晴れで波も穏やかであり、視程は観音崎において 10,000 m であった。図 7.1.1 のように事故後は現場付近においておよそ 5~20 m/s 程度の強い南西風が吹いていた。

著者は油拡散初期の海岸線の油漂着状況調査を目的として、事故の翌日である 3 月 19 日の午後に千葉県において調査を実施した。図 7.1.2 は調査地点と油の漂着を確認できた範囲を示している。図中の (1) から (4) の海岸線において油の漂着が確認できた。また、(5)、(6) において油の漂着が確認できなかった。(1) 以南の海岸線は未調査であったけれども、(1) 地点において千葉県館山から車で北上しながら油被害状況調査中の千葉県職員から、(1) の地点より南側では油の漂着は確認できず、(1) の地点において初めて漂着を確認したとの情報を得た。よって、3 月 19 日午後時点の油の漂着範囲は図 7.1.2 の線で示す 10 km 程度と考えられる。

油が漂着した時間に関して、東京湾フェリーの職員から 18 日の夕刻にフェリーの入出港である金谷港に油が漂着したとの情報を得た。

図 7.1.3 から図 7.1.6 は現地調査時の現地の様子である。18 日の午前中より風浪が強くなり、図 7.1.3 のように護岸を超えて陸上に油が拡がっているところもあった。図 7.1.4

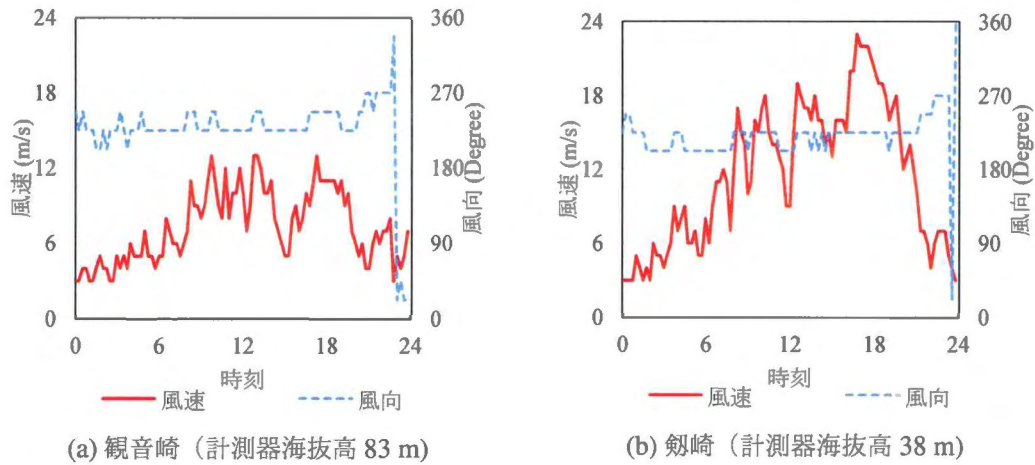


図 7.1.1: 事故時の風況観測値

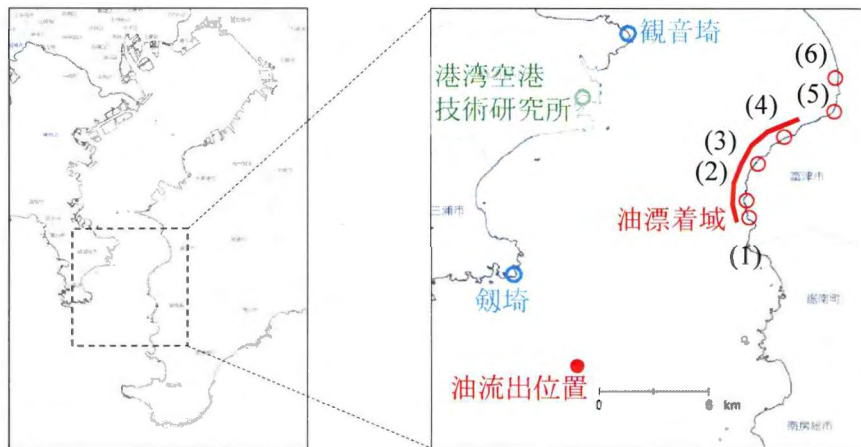


図 7.1.2: 調査地点と油の漂着範囲。地点 (1) から (4) は油確認, (5), (6) は油確認されず。
(地図出典: 国土地理院)

は油防除中の千葉県職員の様子である。なお、保険会社の雇った業者により流出油や流出物のほとんどが回収された。図 7.1.5 のように漂着油はエマルジョン化しており、Beagle3 号から C 重油が流出したものと考えられる。地点 (5) では油の漂着は確認されなかったけれども、図 7.1.6 のように油に汚染された鳥が何羽もいた。

なお海上保安庁の報告によると、Beagle3 号からの油の流出は 3 月 19 日以降も継続しており、20 日以降は今回示した漂着範囲以外にも油の漂着が確認されている。しかしながら、著者が 3 月 25 日午後には神奈川県三浦市の沿岸で行った現地調査によると、漂着量はタールボールやごく薄い油膜が点在する程度であった。そのため、図 7.1.2 で示した漂着範囲以外では、千葉県沿岸のように大量の油は漂着しなかったと考えられる。



図 7.1.3: 調査地点 (1)



図 7.1.4: 調査地点 (2)



図 7.1.5: 調査地点 (3)



図 7.1.6: 調査地点 (5)

7.2 計算条件

本計算は 5.2 節及び 6.2 節と異なり，8.3 節で説明するように，即時に予報できる方法で行った．移流外力は，海流，潮汐流及び風による表面流のみとした．

計算は油拡散粒子モデルを GUI に組み込んだシミュレータ（名称：漂流油捕捉システム）で行われた．基本的な計算方法は 5.2 節及び 6.2 節と変わらない．潮汐流の再現方法のみ異なり，付録 A でその方法を説明する．

油の風による移流は風係数法を用いて再現した．風況データは気象業務支援センターの配信するメソ数値予報モデル GPV(MSM) の予報値を用いた．

油拡散粒子モデルの計算条件は表 7.2.1 の通りである．油の流出位置は AIS 情報（Automatic Identification System, 自動船舶識別装置, AIS 情報出典: <https://www.marinetraffic.com/jp/>）を基に決定した．なお，後日得られた情報から，AIS 情報が正確であったことが確認できた．油の流出流量は不明であったため，表 7.2.1 の通り粒子数のみを設定した．流出時間も不明であったため，表 7.2.1 の通りに仮想して設定した．粒子数，計算時間間隔は計算機の制約，計算時間の兼ね合いを考えて決定した．

表 7.2.1: 油拡散粒子モデルの計算条件

油流出位置	139.71590° E, 35.09753° N
粒子数	100 個
時間間隔	60s
油流出時間	3/18 3:20 から 3 時間一定量連続流出

7.3 計算結果と観測結果の比較

調和定数から再現した潮汐流の精度について検証する。東京湾の第二海堡の 2010 年 1 年間の 20 分間隔の流況観測結果と再現結果について、流速の相関係数 R_{vel} を式 (7.3.1)、流向の内積 R_{dir} を式 (7.3.2) にて評価した

$$R_{vel} = \frac{\sum_{it=1}^{n_t} (U_{oit} - \overline{Uo})(U_{cit} - \overline{Uc})}{\sqrt{\sum_{it=1}^{n_t} (U_{oit} - \overline{Uo})^2} \sqrt{\sum_{it=1}^{n_t} (U_{cit} - \overline{Uc})^2}} \quad (7.3.1)$$

$$R_{dir} = \frac{\sum_{it=1}^{n_t} |U_{oit}| |U_{cit}| \cos \theta_{it}}{\sum_{it=1}^{n_t} |U_{oit}| |U_{cit}|} \quad (7.3.2)$$

ここで、 n_t は解析データ個数、 U_{oit} 、 U_{cit} はそれぞれ時間 it の際の潮汐流の観測値及び計算値、 \overline{Uo} 、 \overline{Uc} はそれぞれ潮汐流の観測値及び計算値の平均値、 θ_{it} は時間 it の観測値と計算値のベクトルのなす角である。解析結果はそれぞれ $R_{vel} = 0.920$ 及び $R_{dir} = 0.959$ であった。これより、潮汐流の再現結果は高いと考える。

次に、図 7.3.1 は油の漂流予測計算結果である。これを見ると、漂流位置が 1 km から 2 km ほど北方にずれている程度で、漂着位置の観測結果と計算結果はよく一致している。また、漂着時間について、夕刻であったとの目撃証言とよく一致している。これより、計算結果は実際の油の移動とよく一致していることがわかる。

また、本計算結果は 8.3 節で説明する移流外力のデータベースを用いて、事故後に即時に行ったものである。油流出事故が発生してから計算に必要なデータを用意するのではなく、事故の連絡、情報の入手と共にすぐに数値計算を実施できる予報体制が整ったことは大きな成果であると考えられる。



図 7.3.1: 流出油の漂流予測計算結果

7.4 結語

本章は、開発した油拡散粒子モデルを用いて、2014年3月に東京湾浦賀水道で発生した貨物船衝突沈没事故に伴う油流出について再現計算を行い、数値計算法の妥当性を検証した。本章で得られた主要な結論を要約する。

まず、事故の概要について説明した。著者が行った海岸線への油漂着状況調査の結果、事故の当日に油が多く漂着したのは千葉県沿岸の10 km程度の海岸線であったことを説明した。また、漂着した時間は夕刻であったことを説明した。

次に、計算条件について説明した。自然外力は海流、潮汐流及び風による表面流を考慮し、それぞれの計算方法について説明した。本計算は即時の予報を目的としているため、潮汐流の再現方法について説明した。

続いて、計算結果について説明した。まず、潮汐流を精度よく再現できたことを示した。次に計算結果について油の位置が観測結果とよく一致していることを説明した。また、油漂着時間についても実際とよく一致していることを説明した。

また、本計算結果により、油流出事故が発生してからすぐに計算を実施できる予報体制が整ったことが示された。

第 8 章

議論

8.1 既往の研究からの進展

本論文において既往の研究から進展させた内容は、油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散の予測方法についてである。

油膜自身の特性による油拡散について、Fay[1], [2] のモデルの適応を平面 2 次元油拡散の室内実験結果から議論した。実験において油膜は厚さが 10^{-4} m オーダー以下で拡がっており、その際の平面 2 次元方向の拡がり速度は Fay の提案する第 3 段階の表面張力-粘性領域のモデルで説明できることを示した。また、従来行われていなかった、Fay の第 3 段階の表面張力-粘性領域における拡がり係数を実験結果から導出した。

次に、油膜自身の特性による油拡散について、Fay のモデルに基づいた新しい数値計算モデルを開発した。開発したモデルは、表面張力によって拡がる効果を計算するランダムウォークモデルと、重力によって拡がる効果を計算する斥力モデルの 2 種類である。ランダムウォークモデルについて、静水及び定常流条件下における油の拡がりの実験結果と比較を行った。斥力モデルについて、Fay のモデルが成り立つと仮定し比較を行った。

乱流拡散について、数値計算モデルを用いた計算で必要となる水平乱流拡散係数について、導出した方法は擬似油を用いた実海域実験を行い、流出油のように海水面極近傍に限った水平乱流拡散係数を導出する方法を開発した。また、導出した拡散係数の計算方法について、その適応範囲を議論した。

本論文において既往の研究と異なる点としては、実際の油流出事例 3 件と数値計算結果の比較を行い、数値計算法の有効性を検証している点である。本論文では、2007 年に韓国泰安沖で発生した油流出事故の再現計算を行い、油の移流重心及び拡散面積について比較を行っている。また、1997 年に東京湾で発生した油流出事故の再現計算を行い、油の移流位置と観測結果の関係について議論している。さらに、2014 年 3 月に東京湾で発生した油流出事故の予測計算を行い、移流重心が 1~2 km の誤差に収まっており、移流速度

がほぼ一致していることを確認した。

8.2 数値計算法の考察

第 5, 6 章の結果から, 必要な移流外力を再現し, 開発した油拡散粒子モデルを用いて計算することで, 海表面の流出油の移流及び拡散を再現できることを示した。韓国泰安沖と東京湾の油流出に関して, 同じモデルを用いて同様の計算条件で数値計算を行い, 共に精度のよい再現結果が得られたことから, 本計算モデルは有用性が高いと考える。また, 第 7 章の結果から, 即時の漂流予測を行える状況であることが示された。またその計算精度も十分に高く, 本計算モデルの有用性が示されたと考える。

海上に流出した油の風による移流に関して, 海表面の油は海表面極近傍の吹送流の影響を大きく受ける。3次元流体モデルを用いて海表面極近傍の吹送流を再現するためには, 鉛直方向の計算格子を小さくとる必要がある。その場合 CFL 条件により計算時間が膨大になるため, 実務に適應できない。海表面の油の移流は海表面の極近傍の海水の動きに大きく影響を受けるため, 油の移動を予測する際は, 表層数 mm から数 cm オーダーの表面流を考慮する必要がある。そこで本研究では油の風による移流の再現に風係数法を採用した。風係数法は簡易な方法であるものの実際の油の移動をよく再現しており, 現場における有用性が高く, 有効な計算方法であると言える。

本計算においては風による移流におけるコリオリ力の評価をしていない。コリオリ力を評価しなくても計算結果は観測結果とよく一致しているため, その影響は大きくないものと考えられる。しかしながら, 予測精度の向上, 特にコリオリ力の影響の大きいと思われる外洋においては, コリオリ力の評価方法を検討する必要があると考える。数値計算による予測においてコリオリ力を評価する方法として, 例えば 3次元流体モデルで鉛直方向に可能な限り細かく格子をとり, 吹送流場を計算した際の計算結果をコリオリ力として油拡散粒子モデルに与える方法が考えられる。どのように計算をすべきか今後検討していく必要がある。

本論文で提案する数値計算法の適應範囲について述べておく。本数値計算法の検証において, 風速は大きくても 15~16 m/s 程度であり, それ以上の風速条件下における油の移流及び拡散の再現性について検証を行っていない。実海域実験における疑似油を用いた乱流拡散実験においても, 平均風速は 10 m/s 以下で行っている。そのため, 本数値計算法において確認の取れている適應範囲は 10 m/s であり, それ以上の強風条件下における適應性は検討されていない。

次に波の影響についてである。本数値計算法では波の影響は考慮されていない。波による質量輸送(ストークスドリフト)を予測するには, 波の周期, 波高, 波長及び波向のスペクトルと現場海域の水深の情報が必要であり, 即時の予測を行うためには, データベ-

スを構築する必要がある。また、風波と風による移流の関係について明らかとなっていない。波が発達するにつれて波の質量輸送の影響が大きくなるけれども、その際に風係数は 0.03 を維持するのか、波の発達にエネルギーが用いられ、風係数が小さくなるか、といった考察が現状では不十分である。この点については、検討が必要であると考え。一方で、第 5 章で説明した韓国泰安沖 Hebei spirit 号油流出事故の際は、波高が 3~4 m 程度であった [3]。しかしながら、計算結果は観測結果とよく一致している。このことから、波による輸送の影響は風係数に含まれていると考えられる。よって即時の予報を目的とする際には波の影響を無視してしまっても、大きな問題はないといえる。

油拡散粒子モデルを用いた計算を行う場合、計算対象とする海域がどういった移流外力が支配的であるか、十分考慮する必要がある。海上では陸上と比較して風が強いため、ほとんどのケースで風の影響を考慮する必要があると考え。また、今回再現計算対象とした韓国西岸や東京湾といった潮位変化が大きいところでは、潮汐流を精度よく再現することが必要である。さらに、河川流も海域に応じて再現する必要がある。例えば 2010 年のメキシコ湾油流出事故の際は、ミシシッピ川河口において、風によって岸方向へ移動する流出油が河川流により妨げられたという事例がある [4]。第 6 章で示した東京湾のケースにおいて、密度流が海表面の流れ場に与える影響は約 1 割であるとして考慮しなかったけれども、密度流が卓越する海域ではこれを考慮する必要がある。

本計算において海岸線等における境界条件は前述の通り、海岸線に近づいた際は動きにくくし、漂着した際は油を再流出させないようにしている。しかしながら、防波堤、砂浜、礫海岸など、海岸線の状況により漂着後の再流出の度合いが異なることが考えられる。これらを考慮した各パラメータの設定は現状ではできていない。本論文では油回収船による油回収支援を目的としており、特定の海域に絞らず日本全国で計算が可能であることを目的としており、沿岸域付近の流れについて個別に検討はしていない。そのため、特定の海域において特に精緻に計算を行いたい場合は、密度流及び海岸線の境界等の影響について、数値計算モデルに組み込む必要があると考えられる。

次に、油膜自身の特性による拡散と乱流拡散のオーダーについて考察する。油膜自身の特性による油拡散については、第 3 章で述べた通り、油が薄くなった状態においては正味の表面張力によって拡がる。正味の表面張力は式 (3.2.5) で表される通り、水-大気、油-大気、油-水の表面張力によって決定される。油回収の主な対象となるのは、性質が安定していて蒸発しにくい C 重油であり、著者が試験した結果によると、C 重油の油-大気、油-水の表面張力はそれぞれ 26.8, 26.2 mN/m であるため、正味の表面張力は 18.1 mN/m である。乱流拡散については、ASCE[5] に従い、水平乱流拡散係数を $D=1, 10, 100 \text{ m}^2/\text{s}$ として流れの乱れスケールを表現した。図 8.2.1 は油膜自身の特性による C 重油の拡散と油の乱流拡散の時間変化を示している。これを見ると、乱れの小さい $D=1 \text{ m}^2/\text{s}$ のときの乱流拡散と油膜自身の特性による油拡散のオーダーがほぼ同程度である。そのため、外洋など

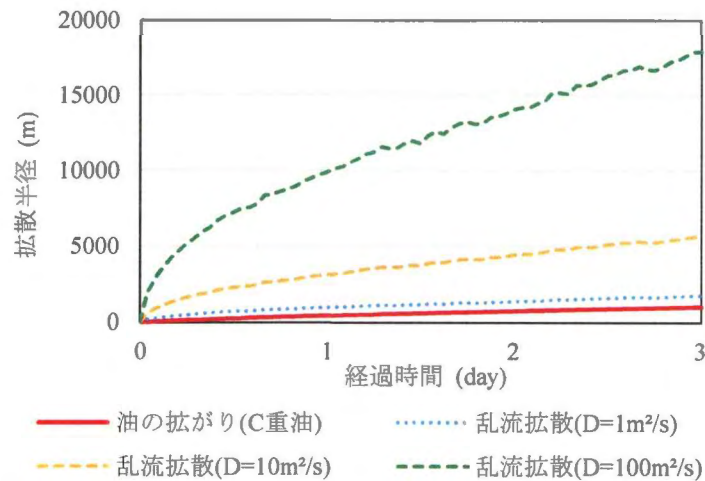


図 8.2.1: 油膜自身の特性による C 重油の拡散と油の乱流拡散の拡散半径の時間変化

のように流れの乱れスケールが大きい海域においては乱流拡散が卓越すると考えられる。一方、港湾内のように流れの乱れスケールが小さいときは油膜自身の特性による油拡散の影響も無視できない大きさであり、その影響を考慮した予測が必要となると考えられる。

最後に、油膜自身の特性による油拡散の計算モデルの効果に関して考察する。油流出事故の観測結果から、これらの効果を切り分けることができない。また、韓国と東京湾の事例はいずれも潮流と風が強い条件で油が連続流出しているため、見かけ上の拡散の影響が大きく、油膜自身の特性による油拡散の影響が小さくなっている。そのため今回の油流出事例は油膜自身の特性による油拡散のモデルの有効性を示しにくい状況であり、実海域の現象と比較した定量的な評価ができていない。

今回の3つの油流出事例以外に、風や流れの小さい海域における油流出事故の観測事例があれば、再現計算を行い観測結果と比較できるけれども、そのような油流出の観測事例が見つからず、本計算モデルのさらなる有効性を示すことができない状況にある。そのため今後そのような事故事例を収集し比較することで、モデルの妥当性を評価する必要がある。

8.3 即時の予報体制の構築

海上において油流出事故が発生した際に、開発した油拡散粒子モデルを用いてすみやかに移流及び拡散の予測を行うためには、移流外力のデータベースを構築しておく必要がある。

2014年9月時点の港湾空港技術研究所における、流出油の移流に影響する海流、潮汐流、風のデータベース構築状況は表 8.3.1 の通りである。潮汐流は海域の場所ごとに周期

的に変化しているので、付録 A で説明する通り、一度対象海域の潮汐流をシミュレーションし、位置（緯度、経度）、時刻及び流速の関係から、潮汐流による移流速度が再現できるシステムを構築している。流出油の漂流シミュレーションを即時に行える海域は、東経 120-150 度、北緯 22.4-47.6 度の範囲である。これは表 8.3.1 の通り、海流、潮流、風のなかでデータ配信領域が最も狭い風によるものである。

シミュレーションは WindowsOS で動作するコンピュータにおいて、GUI で操作及び設定を行うことができるようソフトウェアを作成しており、Windows の PC を操作できる者であれば、数値計算を実施できるような状況にある。なお、数値計算の実施は LinuxOS で動作するコンピュータでも可能である。

8.4 油回収船の油回収操船支援を行う漂流油捕捉システムの開発

漂流油は海上において見えにくく、遠方の油を目視で確認することは困難である。油をすぐに発見できずに海上を航行していると、回収作業開始までに時間がかかり、その間に流出油はさらに広範囲に拡がってしまう。よって、油回収船が現地付近に到着した後に、自船で海上漂流油を検出する技術が求められていた。また、流出油の検出情報を基にシミュレーションを行うことで、精度の高い予測結果が得られることも期待される。

そこで、国土交通省北陸地方整備局の所有する大型油回収船「白山」を対象に漂流油捕捉システムを開発した。漂流油捕捉システムは、図 8.4.1 のように船舶用レーダーを用いた流出油検出装置と、油拡散粒子モデルを統合し、リアルタイムに処理、表示することにより油回収時の操船支援が可能となるシステムである。

漂流油検出装置は船舶レーダーの受信信号をレーダー信号解析装置で解析することで、海表面の油膜を検出することができる。レーダー信号解析装置はノルウェーの Miros 社の製品である [8]。流出油の検出範囲はレーダーの性能（最大 4 km）とレーダーアンテナ設置高さで決まり、大型油回収船「白山」のアンテナ設置高さ（29 m）だと、半径約 3.3 km の流出油の検出が可能である。

流出油の検出原理について簡単に説明する。この装置は風により発生するさざ波からの反射波を解析して流出油の位置を判定している。波長が約 3 cm である X バンド帯レーダーの電波の場合、1.5 cm 程度の波長の波が発生している場合に強い後方散乱波を受信することが出来る。波長が 1.5 cm 程度の波は、図 8.4.2(a) のように海面を吹く風により発生するさざ波に多く含まれているので、さざ波の発生時に後方散乱波を受信することが出来る。そのため、油膜のない海面においてはさざ波によりレーダーの方向に反射して明るく写る。

表 8.3.1: 移流外力の概要

	海流 U_{oi}	潮汐流（東京湾, 伊勢湾, 瀬戸内海） U_{ti}	潮汐流（左の海域以外） U_{li}	風 U_{wi}
データ名	日本近海海流予報格子点資料	富田ら [6] のモデル	Matsumoto ら [7] のモデル	メソ数値予報モデル GPV (MSM)
データ配信元	気象業務支援センター	モデルを用いて独自に計算.	Matsumoto ら [7] のモデルを用いて再現.	気象業務支援センター
配信領域	東経 120 ~160 度, 北緯 20 ~50 度	東京湾, 伊勢湾, 瀬戸内海	東経 110 ~165 度, 北緯 20 ~65 度	東経 120 ~150 度, 北緯 22.4 ~47.6 度
格子間隔	1/4 度	270 m	1/12 度	東西方向 1/20 度, 南北方向 1/16 度
配信日時	月に 3 回, 1 か月先までの予報値を港湾空港技術研究所のサーバーで受信.	ソフトウェアに組み込んである.	ソフトウェアに組み込んである.	1 日に 8 回, 39 時間先までの, 1 時間ごとの予報値を港湾空港技術研究所のサーバーに配信.

一方、油膜の存在する海面では図 8.4.2(b) のように油膜によりさざ波の発生が抑制されるため海面が平らになる。そのため油膜のある海面においては鏡面反射によりレーダーの方向に返ってくる反射波が少ないので暗く写る。これを画像処理により、より鮮明にして油膜の有無を判別している。

以上で説明した漂流油捕捉システムを用いると、広大な洋上を常に移動する漂流油の位置を捕捉し、風や海流等の自然条件を基にした漂流油の位置予測をリアルタイムで一元的に行うことができる。そのため、船長が針路と船速を決定するのに役立ち、油回収開始までの時間を短縮できる。また、漂流油捕捉システムを利用した油回収訓練により、実際の

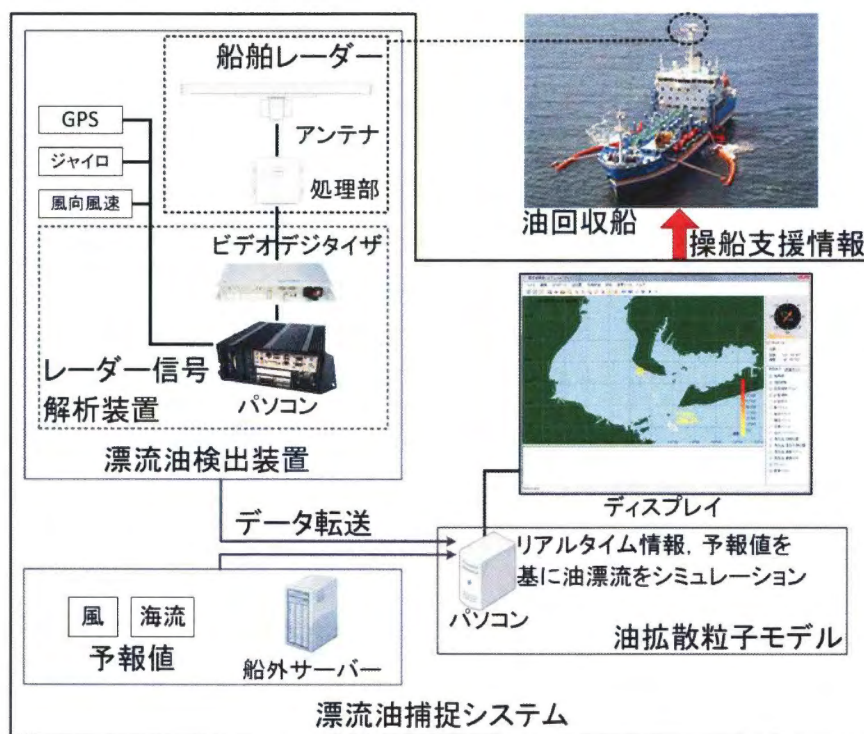
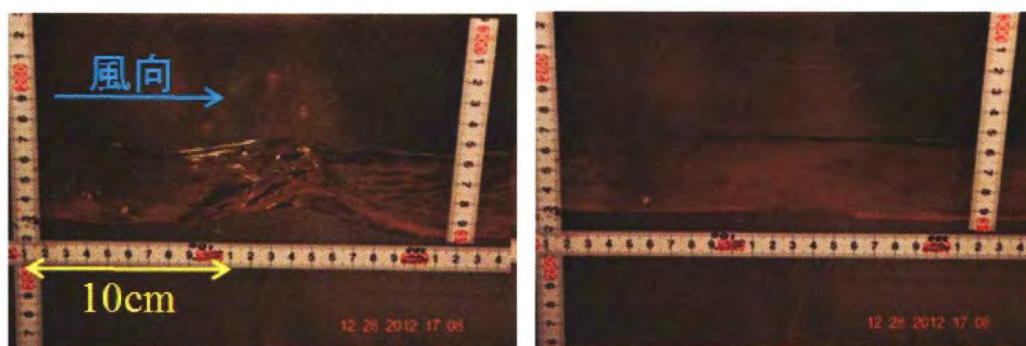


図 8.4.1: 漂流油捕捉システムの概要



(a) 水表面に油がない状態

(b) 水表面に油を投入した直後

図 8.4.2: 水表面の油の有無と風による水表面の波立ちの関係 (風速 9.3 m/s)

油の挙動を想定した訓練が可能となるといった利点がある。なお、漂流油捕捉システムは 2014 年度に北陸地方整備局大型油回収船「白山」に搭載される予定である。

参考文献

[1] J. A. Fay. The Spread of Oil on a Calm Sea. *Plenum Press*, pp. 53–64, 1969.

- [2] J. A. Fay. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface. *Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, pp. 463–467, 1971.
- [3] 藤田勇, 八尋明彦, 桑江朝比呂, 吉江宗生. 韓国泰安沖油流出事故に関する現地調査報告. 港湾空港技術研究所資料, No. 1186, p. 24, 2008.
- [4] 白石哲也, 藤田勇, 松崎義孝. メキシコ湾油流出事故現地調査報告. 港湾空港技術研究所資料, No. 1239, p. 44, 2011.
- [5] ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, pp. 594–609, 1996.
- [6] 富田孝史, 柿沼太郎. 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. 港湾空港技術研究所報告, Vol. 44, No. 2, pp. 83–98, 2005.
- [7] K. Matsumoto, T. Takanezawa, and M. Ooe. 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, 2000.
- [8] C. N. Egset, E. Nost, 原裕英. X バンドレーダーを用いた漂流油検出. 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 8–13, 2007.

第9章

結論

本研究では、油回収船の油回収操船支援を目的とした、海上に流出した油の漂流予測を行う油拡散粒子モデル、OIL-PARIを開発した。油拡散粒子モデルは海表面の油に関して、海表面の流れによる油の移流、油膜自身の特性による油拡散、油の乱流拡散を計算できる。

以下に、各章で得られた主要な結論を総括し、本論文の結論とする。

第1章では、本論文の背景と既往の研究のレビューを行い、本論文の目的と構成を述べた。

第2章では、海上流出油の移流及び拡散を計算する数値計算法である、油拡散粒子モデルの開発に向けて、その計算方法を示した。

海上に流出した油の挙動を予測するためには、自然外力による油の移流、重力、表面張力といった油膜自身の特性による油拡散、油の乱流拡散の影響を、速度としてそれぞれ求め、それらの効果をベクトル合成して再現する必要がある。

移流外力は海流、潮汐流、風による表面流を考慮する必要がある。その中で風による表面流の再現方法は2通り考えられ、一つは風係数法による表面流の推定法、もう一つは3次元流体計算モデルを用いて直接海表面の吹送流を計算する方法である。風係数法は簡易なモデルでありながらも、多くの流出油漂流予測の数値計算法に取り入れられているモデルである。3次元流体計算モデルを用いて直接海表面の吹送流を計算する方法は流体モデルを用いて計算することができる。

海岸線、構造物等境界では、境界からの距離に応じて強制流速（強制流速ベクトル）を与えて、油の漂着を計算する方法を示した。

第3章では、油膜自身の特性による油拡散について、数値計算モデルの導出、室内実験による油の拡がりの評価、実験結果と数値計算モデルの比較及び考察を行った。

まず、油膜自身の特性による油拡散について有名なモデルであるFayのモデルについて紹介した。Fayは油膜自身の特性による油拡散は、重力及び表面張力によって拡がり、慣

性力及び粘性力によって拡がりや抑えられるとし、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、第1段階；重力-慣性領域，第2段階；重力-粘性領域，第3段階；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ことを説明した。

次に、小型水槽及び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った。その結果、実験結果の拡がり速度はFayのモデルの第3段階；表面張力-粘性領域とよく一致した。拡がり係数はFayの提案する値よりも低い値となり、埜口らの結果より大きい値となった。拡がり係数は油の拡がりの予測に大きく影響を与えるため、その決定は慎重に行われる必要があることを示した。また、実験時の油膜厚さから、油膜厚さが 10^{-4} mオーダーの場合、油の拡がり速度は正味の表面張力によって決定されることがわかった。

次に、開発した数値計算モデルについて説明した。まず、ランダムウォークを用いた油膜自身の特性による油拡散に関する数値計算モデルについて説明した。計算対象は第3段階；表面張力-粘性領域とし、油の拡散面積が正味の表面張力の1乗、経過時間の $3/2$ 乗に比例する数値計算モデルを導出した。導出したモデルは静水時の油膜自身の特性による油拡散実験結果から得られた拡がり係数を用いた理論解とよく一致した。これは油の種類が異なっても統一のモデルを用いて計算ができるため、有効なモデルであると考えられる。

次に、斥力の考え方を用いた油膜自身の特性による油拡散の数値計算モデルの導出を行った。計算結果はFayのモデルの第1段階；重力-慣性領域，第2段階；重力-粘性領域と一致するように拡がり係数を求めた。導出した数値計算モデルは油拡散について計算できることを示した。また、静水時のほか、流れがある場合の油の連続流出に関する数値計算を自然な表現で行えるようになった。

次に、大型水槽を用いた定常流条件下の油拡散実験結果と導出したランダムウォークモデルの計算結果を比較した。計算結果は実験結果をよく再現していることが示された。

最後に、2つの数値計算モデルの使い分けと、油の拡がりの終端について考察した。

第4章では海表面の乱れによる油拡散をランダムウォークで計算する際に重要となる水平乱流拡散係数について、従来は具体的な数値が不明であったことを説明した。また、海水面極近傍の乱流拡散を計測した実験は従来行われておらず、水中より拡散係数が大きくなることが予想されることを説明した。そこで、実海域実験を行い油の拡散スケールから海水面極近傍の水平乱流拡散係数を導出する方法について検討し、以下の結論を得た。

まず、実海域において油の乱流拡散に関する計測実験を行うにあたり、油の代わりとなる疑似油の選定を風洞水槽を用いて行った。その結果、スポンジゴムシートが油と同等の漂流特性を持っており、疑似油として使用できることを示した。

次に、実海域漂流実験の方法について説明した。実海域実験では疑似油を20枚程度投入し、それらの拡がりをGPSロガーで計測した。疑似油の拡がりから求めた海水面極近傍の水平乱流拡散係数と風速、流速との間に特別な相関関係は見られなかった。水平乱流拡散係数は拡散スケールと相関があることを示した。水中よりも海水面極近傍の水平乱流

拡散係数が大きい傾向にあることを示した。

また、実験結果について、拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係について最小二乗法で近似線を求めた。さらに拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係が成り立つ空間スケールと自然外力の再現空間スケールについて考察し、水平乱流拡散係数を導出する方法を求めた。

第5章では、開発した油拡散粒子モデルを用いて、2007年に韓国泰安沖で発生したタンカー事故に伴う油流出について再現計算を行い、数値計算法の妥当性を検証し、以下の結論を得た。

まず、事故の概要について説明した。事故の発生した海域では潮汐流が強く、事故時は北西風が強く吹いていたため、これらの自然外力を再現する必要性があることを説明した。

次に、計算条件について説明した。自然外力は潮汐流と風による表面流を考慮し、それぞれの計算方法について説明した。

続いて、計算結果について説明した。まず、再現した潮汐は観測結果とよく一致していることを説明した。次に計算結果について観測結果とよく一致していることを説明した。また、風による表面流について、現状では3次元流体モデルで再現することは困難であり、風係数を用いて再現するとよいことを示した。

また、計算に用いるパラメータの検討を行った。まず、油膜自身の特性による油拡散と油の乱流拡散について、その効果の検証を行い、今回のように流れが大きく乱流が大きいと考えられる海域では油の漂流の中で乱流拡散が支配的であることを示した。さらに、開発した数値計算法について、水平乱流拡散係数を提案した導出方法で計算すると、観測結果とよく一致し、乱流モデルで有名な Smagorinsky モデルを用いた再現では、乱流拡散を説明できないことを示した。

第6章では、開発した油拡散粒子モデルを用いて、1997年に東京湾で発生したタンカー事故に伴う油流出について再現計算を行い、数値計算法の妥当性を検証し、以下の結論を得た。

まず、事故の概要について説明した。事故の発生した海域では潮汐流が強く、事故時は南風が強く吹いていたため、これらの自然外力を再現する必要性があることを説明した。

次に、計算条件について説明した。自然外力は潮汐流と風による表面流を考慮し、それぞれの計算方法について説明した。

続いて、計算結果について説明した。まず、再現した潮汐流は観測結果とよく一致していることを説明した。最後に、計算結果の油の移流位置が観測結果とよく一致していることを説明した。

第7章では、開発した油拡散粒子モデルを用いて、2014年3月に東京湾浦賀水道で発生した貨物船衝突沈没事故に伴う油流出について再現計算を行い、数値計算法の妥当性を

検証し、以下の結論を得た。

まず、事故の概要について説明した。著者が行った海岸線への油漂着状況調査の結果、事故の当日に油が多く漂着したのは千葉県沿岸の10 km程度の海岸線であったことを説明した。また、漂着した時間は夕刻であったことを説明した。

次に、計算条件について説明した。自然外力は海流、潮汐流及び風による表面流を考慮し、それぞれの計算方法について説明した。本計算は即時の予報を目的としているため、潮汐流の再現方法について説明した。

続いて、計算結果について説明した。まず、潮汐流を精度よく再現できたことを示した。次に計算結果について油の位置が観測結果とよく一致していることを説明した。また、油漂着時間についても実際とよく一致していることを説明した。

また、本計算結果により、油流出事故が発生してからすぐに計算を実施できることを示した。

第8章では、開発した数値計算法について考察を加えた。また、即時の予報体制の構築状況について示した。さらに、開発した数値計算法を応用して、油回収船の油回収操船支援を行う漂流油捕捉システムを開発したことを示した。

以上、本論文では、海上に流出した油の移流及び拡散に関する数値計算法の開発、油膜自身の特性による油拡散の新しい数値計算モデルの構築、海水面極近傍の水平乱流拡散係数の導出方法の検討、数値計算法の有用性の検証を行い、研究目標が達成された。しかしながら、本数値計算法のみで流出油の挙動が全て予測できるわけではない。本数値計算モデルは流出油の平面2次元の挙動を予測できるけれども、3次元の挙動は予測できない。そのため、沈船や海底油井からの油流出の漂流予測が困難である。また、第6章の再現計算で示した通り、本計算モデルでは流出油の蒸発や、水中に分散、溶解する現象を計算できない。海外では分散剤を用いた流出油対策が主流になりつつあり、分散剤による油の水中分散やその環境影響の評価なども行う必要が出てくる可能性がある。さらに、2011年の東日本大震災で顕著であった、自然災害による港湾施設からの油流出に伴う被害予測について、今後取り組んでいく必要がある。今回の研究成果はそれら応用的な対策へ欠かせない基礎的研究とも位置づけられ、海水面の油の挙動の解明が少なからずできたのではないかと考える。

謝辞

本論文は、私が2008年3月に岩手大学大学院を卒業した後、2008年4月に独立行政法人港湾空港技術研究所に採用され、現在に至るまで行ってきた研究開発業務についてとりまとめたものです。研究を通じて数多くの方々に御指導、御協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

私は課程博士ではなく、論文提出による博士学位の申請を行いました。申請に当たり、岩手大学工学部社会環境工学科 小笠原敏記准教授に大変お世話になりました。小笠原先生は課程博士ではない私にも、親切に指導をしてくださいました。また、小笠原先生は私が岩手大学及び岩手大学大学院博士前期課程在学中において研究室の助教の先生であり、数値計算の基礎をはじめとして、論文の書き方、研究発表の仕方等、多くの指導をしていただきました。ここに感謝の意を表します。

岩手大学 船崎健一工学部長には、大変お忙しい中、審査を通じて有益な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

岩手大学工学部社会環境工学科 海田輝之教授には、学生時代に隣の研究室の先生ということもあり、様々な面でお世話になりました。また、大変お忙しい中、審査を通じて有益な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

岩手大学 堺茂樹学長には、岩手大学及び岩手大学大学院博士前期課程在学中の頃から研究室の指導教官として、多くのことを指導していただきました。堺先生には私が大学生、大学院生時代、氷盤下の油の変形及び移動に関する数値計算の研究課題を与えていただき、縁あって現在も流出油対策に関する研究開発に取り組んでいるところです。堺先生の指導のおかげで国際水理学会のシンポジウムにおいて学生論文賞いただき、大変うれしかったことを思い出します。また、就職活動においても厳しくも温かい指導、助言があり、現在に至ります。ここに書ききれないほど感謝しています。ありがとうございました。

研究開発業務を行っていくうえで、民間企業の皆様には大変お世話になりました。皆様のおかげで研究を進めることができたと思います。ここに感謝の意を表します。

みずほ情報総研株式会社 世古千博氏、山崎昇氏、荒木和博氏、石井隆氏には油拡散粒子モデルのプログラム開発、潮汐流の数値計算、漂流油捕捉システムの開発等に関しまし

て、補助及び指導していただきました。皆様のおかげで研究開発を行ってこられたと思っております。大変ありがとうございました。

株式会社エコー 長谷川巖氏、宮里一郎氏、小玉芳秀氏には油膜自身の特性による油拡散に関する水槽実験及び解析を補助していただきました。冬の寒い季節、実際の油を使った過酷な作業環境の中、丁寧な仕事をしていただきました。大変ありがとうございました。

株式会社ソニック 高島勝美氏（現在は退職されています。）、磯部憲雄氏には、疑似油を用いた実海域における乱流拡散実験を補助していただきました。高島さんには2011年3月の震災直後の混乱期にもかかわらず、船を出して実験補助をしていただきました。また、2013年度に極寒の平塚で年末及び新年早々に実験補助をしていただきました。本当にうれしく、大変感謝した次第です。ありがとうございました。

一般財団法人日本気象協会 宇都宮好博氏、前田正裕氏、田中秀雄氏には、潮汐流計算の実施及び潮汐流データベースの構築を補助していただきました。大変ありがとうございました。

東洋建設株式会社 嶋本孝氏、橋本光壽氏、大塚昌光氏、佐藤真一氏、斉脇伸英氏には、油拡散の室内実験や実海域でのレーダー油膜検出システムの検証実験の補助をしていただきました。皆様には様々な場面で本当にお世話になりました。大変感謝しております。ありがとうございました。

本論文の研究開発成果の一部は国土交通省港湾局及び国土交通省北陸地方整備局の受託研究で行われたものです。特に元国土交通省港湾局技術企画課技術監理室 宮田正史氏、北陸地方整備局 柿崎慶治氏、齋藤英治氏に大変お世話になりました。皆様のおかげで研究をスタートさせることができました。ありがとうございました。

港湾空港技術研究所の職員及び関係者の皆様には、研究開発業務を行っていくうえで大変お世話になりました。

港湾空港技術研究所新技術研究開発領域 藤田勇領域長（油濁対策研究チームリーダー併任）には、油濁対策研究チームのチームリーダーとして、流出油の漂流予測に関する研究テーマを与えてくださり、研究に関する様々な面でお世話になりました。特に数値計算や数値解析に必要なLinuxの使い方、シェルプログラムの書き方、実験に必要な工作の方法や電気関係の配線の方法、論文作成等の指導をしていただきました。本当にお世話になりました。ありがとうございました。

港湾空港技術研究所 吉江宗生研究計画官は、元油濁対策研究室長（チームリーダー）であり、藤田領域長とともに流出油の漂流予測に関する研究テーマを与えてくださり、油濁対策に関する研究や周辺情報について、多くの指導をしていただきました。また、研究初期において資金面等の研究環境を整えていただくなど、様々なご支援をしていただき、深く感謝いたします。

港湾空港技術研究所 高橋重雄理事長には本当にお世話になりました。様々な場面にお

いて気にかけていただきまして、大変感謝しております。ありがとうございました。

港湾空港技術研究所 栗山善昭特別研究官は私が入所2年目である2010年3月から研究部の長となられ、現在に至るまで研究の方向性や論文のまとめ方等を親切に指導していただきました。栗山特別研究官に研究内容を見ていただくようになってから、土木学会論文集B2(海岸工学)に研究成果を投稿できるようになりました。また、平成24年度水路技術奨励賞を受賞するなど、自分なりではありますけれども、研究活動が行えるようになりました。大変感謝しております。ありがとうございました。

元港湾空港技術研究所の研究主監で、横浜国立大学 中村由行教授には、研究内容の取りまとめに関して助言をしていただくなど、声をかけていただきました。論文作成において稚拙な内容と感じ、なかなか論文を書けずにおりましたけれども、中村先生に声をかけていただいたおかげで、積極的に論文投稿等に取り組むことができました。大変ありがとうございました。

元港湾空港技術研究所で東京都市大学 田中陽二講師には調和解析の方法、潮汐流の数値計算等について指導していただきました。大変お世話になりました。ありがとうございました。

港湾空港技術研究所新技術研究開発領域 白井一洋主任研究官、田中敏成主任研究官、松本さゆり主任研究官、平林丈嗣研究官の皆様には機械、電気電子、コンピュータ関係といった、私がよく知らないことを教えていただき、大変参考になりました。ありがとうございました。

港湾空港技術研究所 鈴木高二朗チームリーダー、本多和彦主任研究官、元港湾空港技術研究所で国土交通省 辰巳大介課長補佐には、研究を進めに当たり、大変貴重なご意見をいただき、ご指導をしていただきました。深く感謝いたします。

港湾空港技術研究所 井上徹教チームリーダー、細川真也主任研究官には、本論文を取りまとめるに当たり、大変貴重なご意見をいただきました。また、有川 太郎 上席研究官、高川智博研究官、関克己研究官、茂木博匡専任研究員には、公聴会の発表内容について貴重なご意見をいただきました。深く感謝いたします。

最後に、育てていただいた父と、楽しい時間を共有してくれている妻に感謝いたします。これからもよろしく願いいたします。

皆様、本当にありがとうございました。感謝しています。まだまだ未熟な自分ではありますが、今後ともどうぞよろしく願いいたします。

記号表

A	: 油層面積
C	: 濃度
C_{no}	: 斥力モデル導出における係数
C_{da}, C_{dw}	: それぞれ大気から海面, 海面から大気の抵抗係数
C_s	: Smagorinsky 定数
C_w	: 風係数
D_H	: 水平乱流拡散係数 (m^2/s)
D_o	: 界面活性物質の水中での拡散係数
g	: 重力加速度
h	: 油層厚
h_1, h_2	: 数値計算モデルの油層厚判別値
i	: 着目する油粒子
in	: 実海域実験における着目する疑似油
j	: 着目する油粒子 i の近傍粒子
K	: 積分定数
k_1, k_2, k_3	: それぞれ Fay(1969) の第 1, 第 2, 第 3 段階における拡がり係数
k_{1m}, k_{2m}, k_{3m}	: それぞれ第 1, 第 2, 第 3 段階の拡がりモデル係数
k_{br}	: 強制流速ベクトルの係数
L	: 疑似油の拡散スケール
l	: 油層の拡散半径
l_i	: 粒子群全体の重心と着目粒子 i の距離
L_{max}	: 拡散スケールと水平乱流拡散係数の関係が一様に成り立つ範囲
N	: 実海域実験結果の解析における疑似油の個数
n	: 潮汐流計算における海底粗度計数
N_o	: 斥力モデルにおける近傍粒子数
n_o	: ある着目粒子周りの粒子密度

n_t	: 潮汐流精度検証に用いた, 潮汐解析データ個数
R	: 近傍粒子検索半径
r_{bi}	: 油粒子 i と各海岸位置との距離ベクトル
r_{b1}, r_{b2}	: 強制流速ベクトル U_{bi} の判定距離
R_{dir}, R_{vel}	: それぞれ潮汐流の流速及び流向の相関係数
r_{ij}	: 粒子 i, j 間の距離
r_{ij}	: 粒子 i, j 間の距離ベクトル
R_m	: 風況観測地点 m と対象地点の距離の逆数
R_{n1}, R_{n2}	: それぞれ独立した平均 0, 分散 1 の正規乱数
r_{oi}	: 油膜の重心と着目粒子 i の距離ベクトル
R_{rand}	: 0 から 1 の一様乱数
R_{sum}	: R_m の和
s	: 強制流速ベクトル計算パラメータ
s_d	: 界面活性物質の水中への溶解度
t	: 時間
t_a	: 油膜拡散面積の解析における時間のシフト
t_i	: 油粒子 i の投入からの経過時間
U_{bi}	: 海岸線, 構造物等境界における強制流速ベクトル
U_{Cit}, U_{Oit}	: それぞれ潮汐流精度検証における it 時の潮汐流の計算値及び観測値
$\overline{U_c}, \overline{U_o}$: それぞれ潮汐流精度検証における潮汐流の計算値及び観測値の平均値
U_{di}	: 油粒子の乱流拡散速度ベクトル
U_i	: 着目する油粒子 i の速度ベクトル
U_{oi}	: 海流による油粒子の移流速度ベクトル
U_s	: 着目する油膜位置の油拡散速度ベクトル
U_{si}	: 油膜自身の特性による油粒子の拡散速度ベクトル
u_{sij}	: 粒子 j による粒子 i の油膜自身の特性による油拡散速度
u_{sij}	: 粒子 j による粒子 i の油膜自身の特性による油拡散速度ベクトル
U_{ti}	: 潮汐流による油粒子の移流速度ベクトル
U_{wi}	: 風による油粒子の移流速度ベクトル
U_w	: 風による表面流
V	: 油層の体積
V_C	: 濃度 C の拡散速度
V_i	: 粒子体積

W	: 水面近傍の風速
W_{10}	: 海上 10 m での風速ベクトル
W_{10i}	: 粒子 i の位置における海上 10 m での風速ベクトル
X_i	: 着目する油粒子 i の位置
x, y, z	: 方向
x_{in}, y_{in}	: 実海域実験結果の解析における疑似油 in の位置
\bar{x}, \bar{y}	: 実海域実験結果の解析における疑似油の位置の平均
δ	: 油層下面の水の境界層厚さ
Δ	: 空間刻み
Δt	: 計算時間刻み
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: x, y, z 方向空間格子
$\Delta \rho$: 水と油の密度差
θ	: 潮汐流精度検証における流速観測結果と計算結果のなす角
μ_o	: 油の粘性係数
ν_H, ν_V	: それぞれ水平渦動粘性係数, 鉛直渦動粘性係数
ν_w	: 水の動粘性係数
ρ_a, ρ_o, ρ_w	: それぞれ大気, 油, 水の密度
σ^2	: 疑似油の位置の不偏分散
σ_n	: 正味の表面張力係数 (N/m)
$\sigma_{oa}, \sigma_{ow}, \sigma_{wa}$: それぞれ油-大気間, 油-水間, 水-大気間の表面張力係数 (N/m)
τ	: 接線応力

付録 A

潮汐流の予測方法

ここでは、油拡散粒子モデルにおいて用いている潮汐流の予測方法について、用いている数値計算モデルの概要及び計算の境界条件と、計算結果からの潮汐流の再現方法について説明する。

A.1 潮汐流の数値計算モデル及び境界条件

潮汐流の数値計算モデルは高潮・津波数値シミュレータ (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas, 通称 STOC) を用いている。

STOC の基礎方程式は、porous モデル (榊山ら [1]) を適用した 3 次元の連続方程式；式 (A.1.1) と、Reynolds 方程式；式 (A.1.2) である。なお、このモデルでは、水面位置を鉛直方向に積分した連続方程式；式 (A.1.3) から算出するため、碎波のように水面形が鉛直方向に多価になる場合には適用できない。

$$\frac{\partial \gamma_i u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{A.1.1})$$

$$\gamma_v \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j u_i u_j}{\partial x_j} + C_i = -\frac{\gamma_v}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \gamma_v \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_0} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\gamma_j \nu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (\text{A.1.2})$$

$$\gamma_z \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \gamma_x u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \gamma_y v dz = 0 \quad (\text{A.1.3})$$

ここで、 x_i はデカルト座標系 (x, y, z)、 u_i は x_i 方向の流速 (u, v, w)、 γ_i は x_i 方向の有効面透過率 ($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z, 0 \leq \gamma_i \leq 1$)、 γ_v は有効体積多孔率 (メッシュ内を占める液相の体積率, $0 \leq \gamma_v \leq 1$)、 t は時間、 C_i は Coriolis 項、 ρ_0 は基準密度、 p は圧力、 ρ_w は流体密度、 g_i は各方向の重力加速度 ($0, 0, g$)、 ν_e は実効動粘性係数 (動粘性係数と渦動粘性係数の和)、 η は水面変動、 h は基準水面からの水深である。 C_i は f_0 を Coriolis のパラメータとすると、 C_i は x 及び y 方向でそれぞれ $-f_0 v$ 及び $f_0 u$ となる。渦動粘性

係数は本編の通り、定数で与えられている。なお、乱流モデル（SGS 渦動粘性係数）を使用することも可能である。

これらを基礎方程式として、Staggerd メッシュで空間を離散化し、leapfrog 法により時間発展させる。圧力について、連立 1 次方程式を解いて求める方法を STOC-IC といい、静水圧近似を適応して求める方法を STOC-ML という。油拡散粒子モデルでは STOC-ML を用いて潮汐流を計算している。

潮位の境界入力条件は Matsumoto[2] の NAO.99Jb モデルを用いた。NAO.99Jb モデルは日本周辺海域の任意の海洋上の点において主要 16 分潮 (M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1, M1, J1, OO1, 2N2, Mu2, Nu2, L2, T2) を予測するモデルである。このモデルは約 5 年分の TOPEX/POSEIDON 海面高度計データを潮汐解析し、流体力学数値モデルに同化して構築されている。

A.2 潮汐流計算結果からの再現方法

潮汐流は異常潮汐を除けば周期的に変化しているので、ある地点における潮汐流の振幅及び位相（遅角）が既知の場合、それらから流速の時系列を求めることができる。そこで、あらかじめ STOC-ML を用いて 1 か月間の潮汐流計算を実施し、その結果から各格子における振幅及び位相のデータベースを構築した。潮汐流データベースの構築範囲は、8.3 節で説明した東京湾、伊勢湾、瀬戸内海である (図 A.2.1 参照)。境界条件は前述の Matsumoto らのモデルで求めた水位を図 A.2.1 の開境界で与えた。水深データは内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会の提供する 270m メッシュのデータを用いた。なお、水深が深くなると波速が大きくなり、 Δt を大きく取る必要がある (CFL 条件)。そのため水深を 200m までとして、それ以上の水深を打ち切った。初期密度場は $1,026\text{kg/m}^3$ で一様に与えた。初期流速場は 0m/s とした。その他の計算条件は表 A.2.1 の通りである。

次に計算結果から主要 8 分潮 (Q1、O1、P1、K1、N2、M2、S2、K2) の調和解析を行い、潮流に関する振幅、遅角を算出した。調和解析は日本沿岸潮汐調和定数表 [4] の潮汐計算略説に記された考え方にに基づき、最小二乗法により解析を行った。以下に調和解析の概要を示す。観測されたある時刻の潮流 $U_{ot}(t)$ は、式 (A.2.1) で表すことができる。

$$U_{ot}(t) = U_0 + \sum_{tk} f_{tk} U_{tk} \cos(V_{tk}t + u_{tk} - \kappa_{tk}) \quad (\text{A.2.1})$$

ここで、添え字 tk は各分潮を表し、 U_0 は潮汐残差流、 f_{tk} 、 V_{tk} 、 u_{tk} は天体の運動から求まる定数、 U_{tk} 、 κ_{tk} は分潮の振幅と位相を表す。

式 (A.2.1) の余弦関数を余弦関数と正弦関数の和によって表すと、式 (A.2.2) となる。

表 A.2.1: 潮汐流の計算条件

格子数	東京湾	750 × 930 × 5
	伊勢湾	600 × 540 × 5
	瀬戸内海	1680 × 990 × 5
座標系	東京湾	IX 系
	伊勢湾	VII 系
	瀬戸内海	IV 系
格子間隔	Δx	270m
	Δy	270m
	Δz	10m(1,2 層)
		15m(3 層)
		20m(4 層)
		150m(5 層)
時間間隔	Δt	3s
海底粗度係数	n	0.0026
水平渦動粘性係数	ν_H	Smagorinsky[3] モデル
鉛直渦動粘性係数	ν_V	1cm ² /s

$$U_{or}(t) = U_0 + \sum_{tk} A_{tk} \cos(V_{tk}t + u_{tk}) + \sum_{tk} B_{tk} \sin(V_{tk}t + u_{tk}) \quad (\text{A.2.2})$$

式 (A.2.2) の左辺と右辺の差の二乗和が最小となる A_{tk} , B_{tk} を差の総和の偏微分にて求められる。

調和解析により求めた潮流に関する振幅, 遅角から潮流を求める方法は松本 [5] の方法に基づき行った。ある地点 (緯度 ϕ , 経度 λ (西経は+, 東経は-)) の, 時刻 t の潮流 $U_t(\phi, \lambda, t)$ は式 (A.2.3) で表すことができる。

$$U_t(\phi, \lambda, t) = \sum_{i=1}^8 U_{tk}(\phi, \lambda) \cos[V_{tk}t + \chi_{tk} - \kappa_{tk}(\phi, \lambda) - n_{tk}\lambda] \quad (\text{A.2.3})$$

ここで, 添え字 tk は分潮の番号, $U_{tk}(\phi, \lambda)$, $\kappa_{tk}(\phi, \lambda)$ はそれぞれ調和解析で求めた流速の振幅と位相, t は 2000 年 1 月 1 日 00 時 00 分 00 秒 (UTC) から起算した時間 (hour), V_{tk} は分潮の角速度, χ_{tk} は天文引数と呼ばれる初期位相, n_{tk} は分潮の波数である。主要 8 分潮の角速度, 天文引数及び波数を表 A.2.2 に示す。

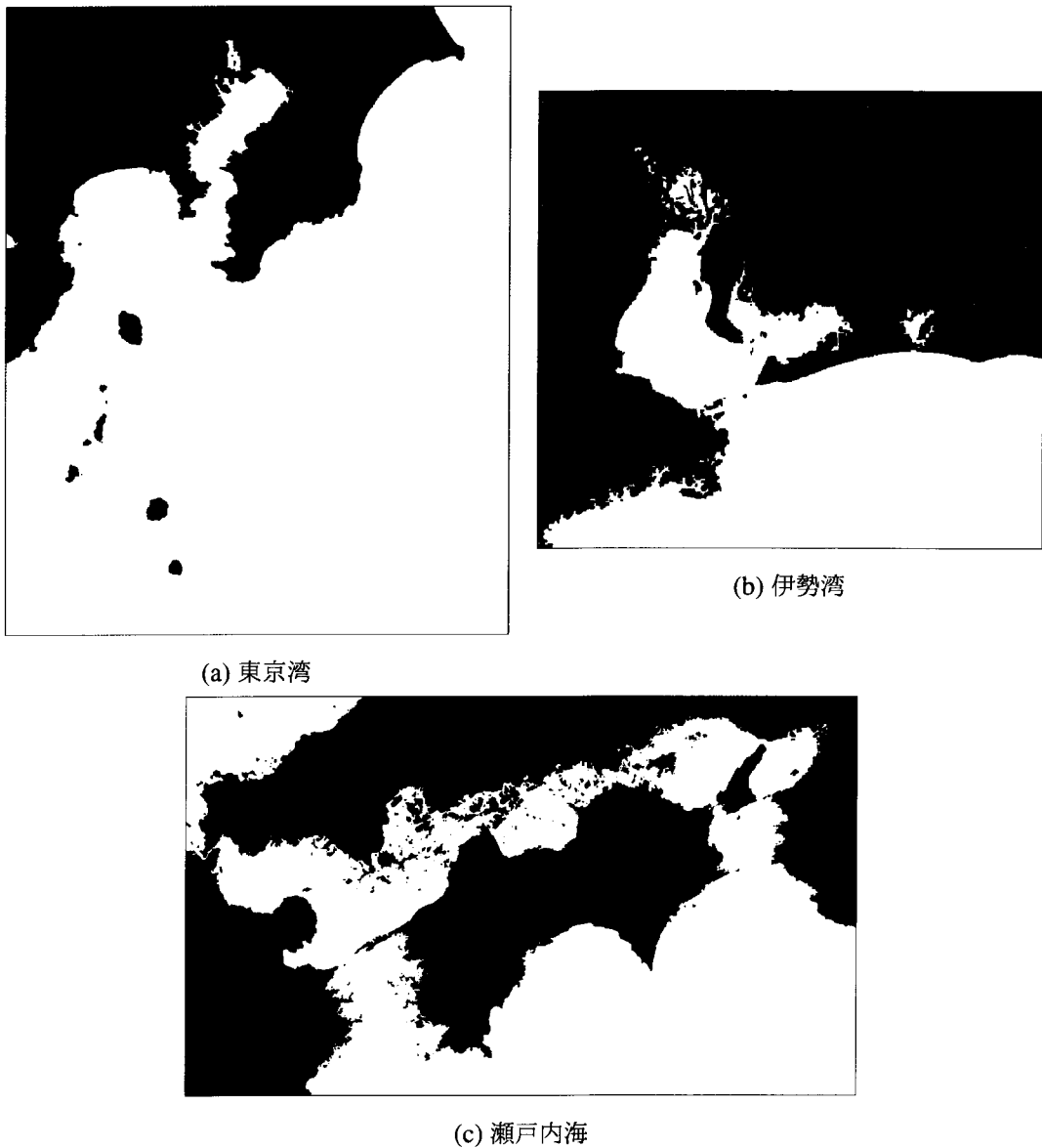


図 A.2.1: 潮汐流計算範囲（地盤高が T.P. より低いところが白，陸地が黒）

参考文献

- [1] 榊山勉, 阿部宣行, 鹿島遼一. ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析. 海岸工学論文集, Vol. 37, pp. 554-558, 1990.
- [2] K. Matsumoto, T. Takanezawa, and M. Ooe. 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-

表 A.2.2: 主要 8 分潮の定数表 [5]

分潮名	角速度 V_{tk} (deg/hour)	天文引数 χ_{tk} (deg)	波数 n_{tk} (無次元)	備考
Q1	13.3986609	358.039995	1	主太陰惰率潮
O1	13.9430356	126.4841785	1	主太陰日周潮
P1	14.9589314	350.0224311	1	主太陽日周潮
K1	15.0410686	9.9677947	1	日月合成日周潮
N2	28.4397295	8.0077897	2	主太陰惰率潮
M2	28.9841042	136.4519732	2	主太陰半日周潮
S2	30.0000000	359.9902258	2	主太陽半日周潮
K2	30.0821373	199.9355894	2	日月合成半日周潮

581, 2000.

- [3] J. Smagorinsky. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99–164, 1963.
- [4] 海上保安庁. 日本沿岸潮汐調和定数表, 1992.
- [5] 松本晃治. やさしい海洋潮汐モデリング. 東京大学地震研究所研究集会 地球の「流れ」を見る衛星重力ミッション, pp. 41–50, 2004.