

流出油の漂流予測に関する研究開発

松崎 義孝

独立行政法人 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 混相流体研究チーム

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

国土交通省では3隻の大型浚渫兼油回収船と11隻の海面清掃兼油回収船を所有し、定期的な訓練を行う等、油流出時の油濁対策に取り組んでいる。海上で油流出が発生した際、流出油の漂流、拡散状況を把握することは油回収船の運用、分散剤の使用等、油濁対策に必要な情報のひとつである。港湾空港技術研究所では流出油の漂流予測に関して、数値計算の開発、漂流・拡散モデルの評価、海象情報収集漂流ブイの開発等を行っており、本論文では油漂流予測に関する研究開発について述べる。

キーワード 油濁対策, 漂流予測, 数値計算, 拡散モデル, 漂流ブイ

1. はじめに

国土交通省では3隻の大型浚渫兼油回収船と11隻の海面清掃兼油回収船を所有し、定期的な訓練を行う等、油流出時の油濁対策に取り組んでいる。海上で油流出が発生した際、流出油の漂流、拡散状況を把握することは油回収船の運用、分散剤の使用等、油濁対策に必要な情報のひとつである。

港湾空港技術研究所では流出油の漂流予測に関して、数値計算の開発、漂流拡散モデルの評価、海象情報収集漂流ブイの開発等を行っており、本論文では油漂流予測に関する研究開発について述べる。構成は2章が流出油の漂流・拡散の数値計算の開発、3章が数値計算を用いた再現計算と各種係数の定量的評価、4章が海象情報収集漂流ブイの開発、5章がまとめである。

2. 流出油の漂流・拡散の数値計算

(1) 数値計算における課題

数値計算を用いた流出油の漂流、拡散の予測において、海表面での流出油の水平拡散・移動は、浮力や粘性といった油膜自身の特性による油拡散(Spreading)、流れの乱れによる油の渦拡散(Diffusion)と、潮汐流、吹送流といった海表面の流況による移流の再現により行われる。油拡散(Spreading)の再現モデルのひとつに、油拡散半径の時間変化を求めるFay¹⁾の式があり、多くの数値計算に採り入れられている(例えば石油連盟²⁾; Chao³⁾)。しかし

Fayの式は油が瞬間流出した時のものであり、ほとんどが連続流出である実際の流出事故には直接利用できない。また、海表面の流況を再現する際の潮汐流計算において、鉛直・水平渦動粘性係数が計算結果に影響を及ぼすが、それらは海域に依存するため、各海域で調べる必要がある。その上、油の渦拡散係数(Diffusion)に関しても検討する必要があるが、調べられている文献は少ない。港湾空港技術研究所ではこれらの課題を解決するため、流出油漂流予測の数値計算を開発している⁴⁾。本論文では、油膜自身の特性による油拡散をFayの式を利用した粒子モデルを紹介し、2007年12月に韓国泰安沖で発生したHebei Spilit号油流出事故の再現計算を行い、観測と比較を行うことで本計算モデルの有効性を検証した。その際、観測より油の渦拡散係数を推測し、水平渦動粘性係数と油の渦拡散係数の適切な設定について考察した。

(2) 油拡散粒子モデル

油膜自身の特性による油拡散のモデルは連続の式より導出した。ある着目粒子周りの粒子密度は連続であることから、油を粒子の集まりと考え着目粒子の移動速度を計算した。

導出した粒子モデルの再現性の検証計算を行った。図-1は $1 \times 10^4 \text{m}^3$ のアラビアンライトが瞬間流出した際の粒子モデルの計算結果で、全粒子の95%が含まれる拡散半径とFayの式による拡散半径の比較である。計算は粒子数1000個で行った。計算結果はFayの式とよく一致しており、油拡散を粒子モデルで再現できている。図-2は粒子モデルによる72時間後の油粒子の拡散状況とFayの式による拡散半径の比較である。油粒子は流出点より円形に拡がっており、Fayの拡散半径と一致してい

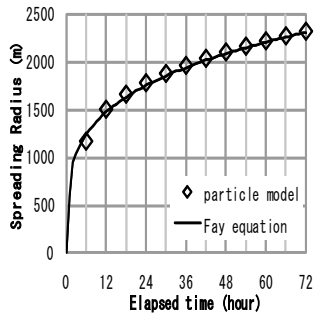


図-1 油拡散粒子モデルの拡散半径と Fay の式の比較

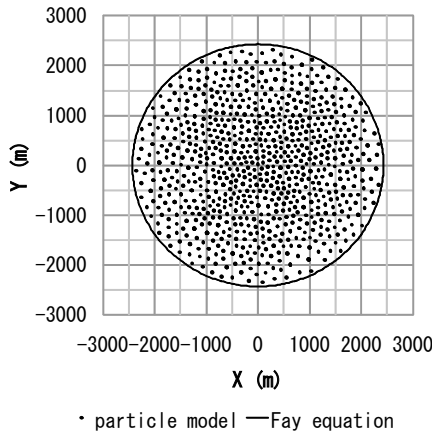


図-2 粒子モデルによる油粒子の拡散状況と Fay の式 (実線円)の比較(72時間後)

る。これより導出した拡散モデルは流出中心点より一様に油粒子が拡がる計算ができることが示された。

3. 流出油の漂流・拡散再現計算

(1) 計算方法

油拡散粒子モデルを用いて韓国泰安沖油流出事故の再現計算を行う。油の漂流は海表面の流況計算と、油拡散粒子モデルとを組み合わせで計算する。

海表面の流況の計算方法は以下の通りである。黄海では海流の流れは大きくなく、泰安付近では大川川の流入がないため、流況は吹送流と潮汐流のみ再現した。吹送流は気象庁全球数値予報モデル GPV の風データと風係数法⁹⁾を用いて再現した。潮汐流は静水圧近似を用いた準3次元モデル⁹⁾を用いて計算した。基礎方程式は連続方程式、Reynolds 方程式、自由表面の式である。計算条件は表-1とした。水平、鉛直渦動粘性係数は定数で与えた。境界条件は計算境界での水位を Matsumoto ら⁷⁾の海洋潮汐モデルを用いて計算し与えた。油拡散粒子モデルには粒子周りの水面の計算セルの値を線形補間して与えた。

油拡散粒子モデルの計算について、計算条件は藤田ら

表-1 潮汐流計算条件

| | | |
|------|----|-------------------------|
| 格子数 | nx | 70 |
| | ny | 112 |
| | nz | 10 |
| 格子間隔 | dx | 743m |
| | dy | 925m |
| | dz | 5m(1~8層) 10m(9, 10層) |
| 時間間隔 | dt | 10sec |

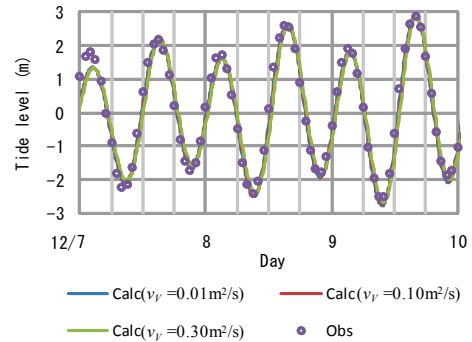


図-3 Anheong での潮汐計算と観測値の比較

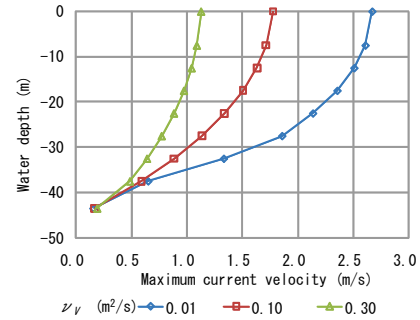


図-4 タンカー事故地点の鉛直渦動粘性係数の変化による計算期間における最大流速の鉛直分布の比較

⁸⁾を参考にした。流出油量は原油 $1.2 \times 10^4 \text{m}^3$ を粒子 1200 個で再現し、流出量と時間は 12/7 8:00 から 12/10 0:00 まで $211 \text{m}^3/\text{hour}$ 、12/10 0:00 から 12/11 11:00 まで $61 \text{m}^3/\text{hour}$ とした。油粒子移動速度は油拡散粒子モデルと潮汐流、吹送流計算値をベクトル合成し、計算した。

(2) 計算結果

まず潮汐流の計算結果について、図-3 は Anheong(図-5 参照)における鉛直渦動粘性係数 0.01, 0.10, $0.30 \text{m}^2/\text{s}$ の潮汐流計算の水位と驗潮記録の比較である。図-3 における観測と計算の誤差の標準偏差は 0.27m であり、計算結果は驗潮記録をよく再現している。また、計算潮位に鉛直渦動粘性係数による差異はない。図-4 は Hebei Spilit 号の事故地点(図-5 参照)での計算期間における鉛直渦動粘性係数の違いによる最大流速の鉛直分布の比較である。鉛直渦動粘性係数が小さい時に水面近傍の流速は大きくなる。これは鉛直渦動粘性係数により底面摩擦の伝達度

が決まることによると考えられる。

図-5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(a)の12/7, 8は目視観測⁹⁾, 12/11はEnvisat ASAR (<http://www.esa.int/>)の観測による。計算は鉛直渦動粘性係数 ν_v , 水平渦動粘性係数 ν_H , 油の拡散係数 D_H を変えて行った。まず図-5(b),(c),(d)より鉛直渦動粘性係数の影響を検証する。Hebei Spilit号の事故地点付近は北東-南西方向に強い潮汐流が存在し、鉛直渦動粘性係数が小さいほど北東-南西方向の油の移動範囲は大きくなる。事故時は北西風が卓越しており、南東方向へ油が移動していくが、図-5(b)は潮汐流により油の移動量が南方に大きく、12/8の様子が一致しない。また、図-5(d)は潮汐流が小さいため、油の移動量が小さく、油の拡がり表現されていない。図-5(c)は油漂流計算をよく再現しており、同様の計算条件では鉛直渦動粘性係数 $0.10\text{m}^2/\text{s}$ 程度で計算するとよい。

次に油の渦拡散係数に関して、ASCE¹⁰⁾では D_H は一般的に $1\sim 100\text{m}^2/\text{s}$ であるとしており、図-5(e),(f),(g)より D_H の違いを検証する。観測と比較すると、図-5(e)より $D_H=1$ では油拡散が小さく、図-5(g)より $D_H=100$ では油拡散が大きい。図-5(f)は(e),(g)より油拡散をよく表わしており、オーダーとして最も近いといえる。松崎ら⁴⁾を考慮すると、韓国泰安沖における油流出時の油の渦拡散係数が $30\text{m}^2/\text{s}$ 程度であると考えられる。

最後に流況計算に用いた水平渦動粘性係数 ν_H と油の渦拡散係数 D_H の関係について考察する。図-5(c),(h)を比較すると、水平渦動粘性係数 ν_H の違いはさほど計算結果に大きく影響を及ぼさないが、図-5(c),(i)より油の渦拡散係数 D_H は結果に大きな違いが出る。今回の計算結果によると、水平渦動粘性係数は流れの計算にはオーダーが異なってもさほど結果に違いが現れないことから、厳密に考える必要はないと考えられる。それに対し、油の拡散は渦拡散係数のオーダーを間違えると、計算結果に大きく影響する。両者は乱れによる渦拡散を表しており、定義は同じであることから、大きく値が異なるものではないと考えられる。よって、実務上は油の漂流する海面近傍の水平渦動粘性係数のオーダーを間違えないよう慎重に決定することが重要となり、流れの計算の水平渦動粘性係数は油の渦拡散係数にオーダーを合わせることを提案する。

4. 海象情報収集漂流ブイを用いた流出油漂流予測

(1) 流出油漂流予測への漂流ブイ活用の課題

海上へ油流出が発生した際、航空機、船舶等による監視や衛星画像による漂流位置の特定が行われる。しかし、夜間は船舶、航空機等による油漂流位置の監視が困難であり、衛星画像は衛星軌道や天候に左右されるなどの制

約があり、翌朝までの漂流位置の把握手法の確立が求められる。油漂流位置に無線機や人工衛星通信を使った送受信機能をもつ漂流ブイを投入し、ブイの位置を知らせることで油の漂流位置を把握する手法¹¹⁾¹²⁾がある。しかしこれらにはいくつか改善すべき点がある。まず、油の漂流を追跡するために、ブイの漂流特性を流出油のものと同等とするか、漂流特性を把握しておく必要があるが、実際に漂流特性を詳細に調べているものは少ない。さらに、このようなブイを全国で事故発生から即時に利用するためには、ブイは多数必要であり、安価でなければ普及が難しい。また、油の位置を数値計算で予測する視点で考えると、油の漂流予測には油が漂流している現地の海象情報が有効であることがわかっている。しかしナウファス等の海象情報観測を行っている個所数は油漂流予測の観点では不足している。漂流ブイに風向風速計が搭載されていると油付近の海象情報も同時に収集でき、データ同化手法を用いた流出油の漂流予測へと発展が可能となってくる。可搬性があり、海象情報を油漂流現場から送信でき、低予算で作成できる観測機があると、この問題を改善できる。港湾空港技術研究所ではこれらの条件をみたす海象情報収集漂流ブイの開発に取り組んでおり、以下でその内容を説明する。

(2) 海象情報収集漂流ブイの試作

図-6は試作した漂流ブイの基本システムである。図-6の子機を写真-1の漂流ブイに搭載した。漂流ブイの計測項目は漂流ブイの緯度経度、風向風速である。風速は熱測温体式風速計¹³⁾, 風向は垂直尾翼(写真-1参照)により漂流ブイが風上を向くよう設計し、地磁気センサと組み合わせて計測できるようにした。GPSモジュールを搭載し、漂流ブイの緯度経度と風向風速が計測できる。特定小電力無線機(送信出力10mW)を用いた通信モジュールが搭載されており、遠隔にある親機(図-6)から計測データを送受信できる。また、子機にも計測データを記録できるようメモリモジュールを搭載した。

漂流ブイ本体は直径780mm, 高さ800mm, 重量約16kgである。一般的に水密性の確保等の理由で特注部分があると、作成費用が高額になってしまう。そこで漂流ブイを安価に作成するために特注の部分を排除し、塩ビ配管材料、鋼板、浮輪等の規格品のみを組み合わせて作成した。

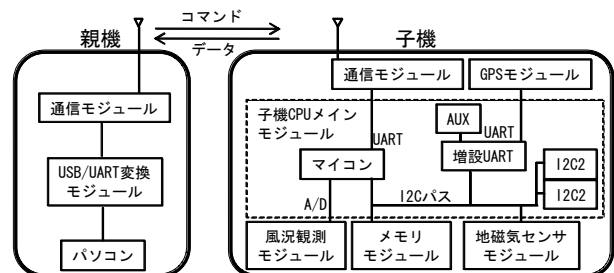


図-6 基本システム



写真-1 漂流ブイ

(2) 漂流ブイの室内・実海域における漂流実験

開発した漂流ブイはその漂流特性をあらかじめ調べるため、室内での吹送実験や、実海域での漂流実験が必要である。

港湾空港技術研究所では油回収実海域再現水槽(L20m×B6.0m×H2.5m、図-7)を所有しており、模型でなく漂流ブイ実機を用いて室内吹送実験が行える。図-8は漂流ブイと油層(油層厚5mm以下)の吹送流場における漂流特性を示している。試作した漂流ブイの漂流特性は油層と一致はしないものの、漂流特性がわかっていることから、流出油の漂流位置を漂流ブイの計測値より逆算することができる。そのため漂流特性を計測する技術は非常に有益である。

また、漂流ブイの漂流特性は実海域実験において確かめる必要がある。図-9、10は2011年3月に神奈川県横須賀市付近海域で行った漂流ブイ漂流実験の際の風況及び流況、漂流ブイの漂流結果及び室内実験で求められた漂流予測式による予測を示している。図-9より実験時は複雑な風況、流況であったことがわかるが、図-10より室内実験で求められた漂流ブイの漂流予測式は漂流ブイの漂流をよく再現しており、室内実験の妥当性を示している。室内実験で漂流ブイの漂流特性を求める手法が確立されたことから、今後は時間と予算のかかる実海域実験に頼ることなく、室内実験で十分な漂流特性を求めることができる。港湾空港技術研究所ではこれらの計測、観測技術をもちいて、海象情報収集漂流ブイのさらなる改良に取り組んでいる。

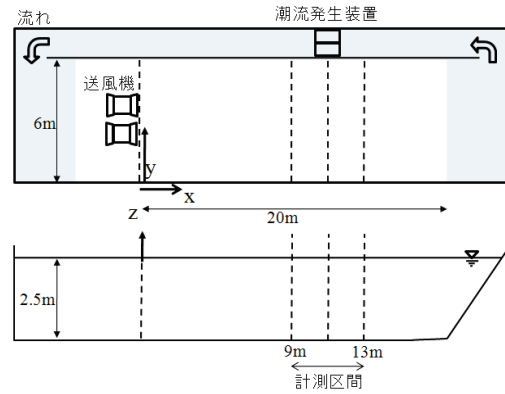


図-7 水槽平面図(上段)と断面図(下段)の概略と計測位置

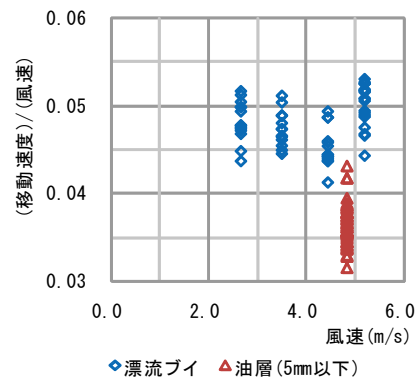


図-8 漂流ブイと油層(油層厚5mm以下)の吹送流場における漂流特性

5. おわりに

本論文では港湾空港技術研究所での油濁対策に関して、漂流予測の研究開発を紹介した。今後の課題として以下の項目が挙げられる。すなわち、油漂流予測の数値計算に必要な各種係数は、海域ごと、季節ごとに異なると考えられるため、対策が必要な海域においてはそれぞれに各種係数を定量的に整理していく必要がある。また、漂流ブイはイリジウム通信を用いた通信距離の遠隔化に取り組んでおり、今後開発された油濁対策技術の活用が期待される。

参考文献

- 1) Fay, J. A. (1969): The spread of oil on a calm sea, Plenum Press, pp.53-64
- 2) 石油連盟(1992): 流出油の拡散予測モデル調査報告書, 107p.
- 3) Chao Xiaobo, N. Jothi Shankar and Sam S. Y. Wang (2003): Development and Application of Oil Spill Model for Singapore Coastal Waters, Journal of Hydraulic Engineering, Volume 129, Issue 7, pp.495-503
- 4) 松崎義孝・藤田勇(2011): 油拡散粒子モデルを用いた韓国泰安沖油流出事故の再現計算, 海岸工学論文集

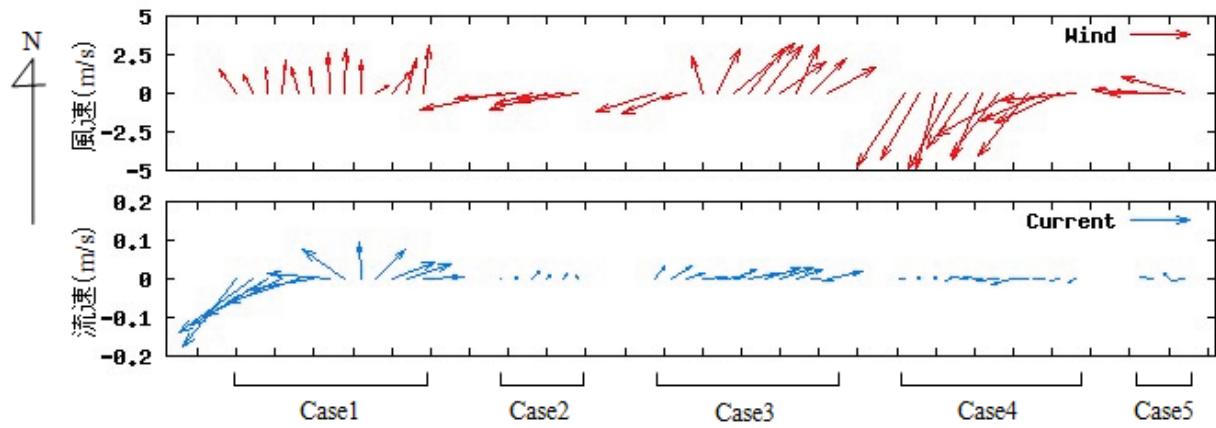


図-9 船上で計測した風況(上段)と流況(下段)

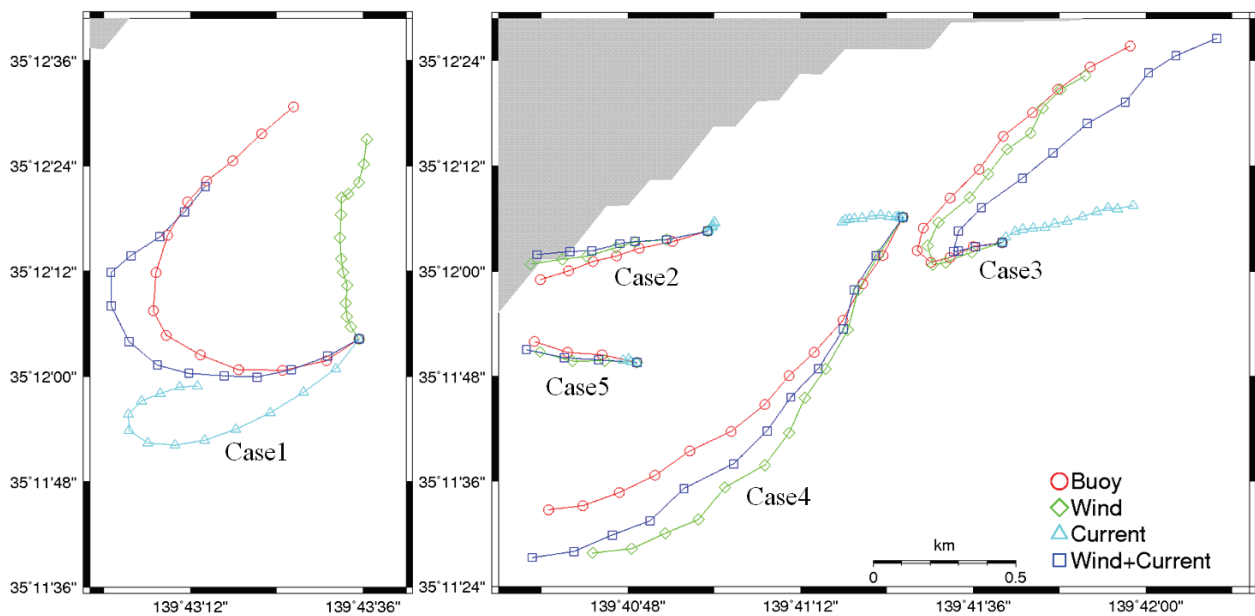
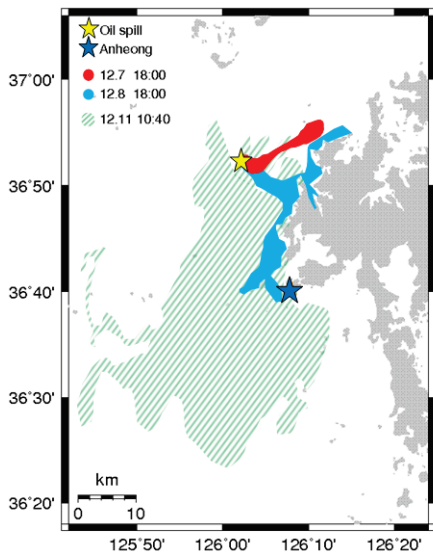


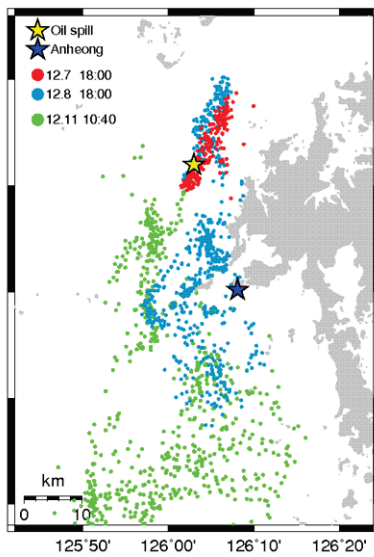
図-10 漂流ブイの漂流の軌跡と予測式による漂流予測

左:Case1 右:Case2~5

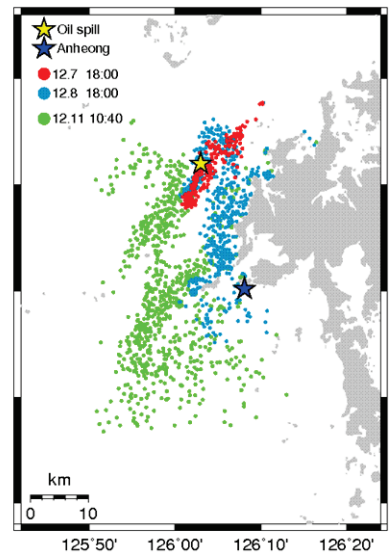
- 5) 松崎義孝・吉江宗生・藤田勇・竹崎健二 (2009) : 薄い漂流物を用いた漂流実験と漂流推定方法の検討, 海洋開発論文集, pp.33-38
- 6) 富田孝史・柿沼太郎(2005) : 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, Vol44.No.2, pp.83-98
- 7) Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000) : Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, Journal of Oceanography, Vol.56, pp.567-581
- 8) 藤田勇・八尋明彦・桑江朝比呂・吉江宗生(2008) : 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, 24p.
- 9) Lee, J.L., D.Y. Lee, I.H. Kim (2009) : The influence of waves on oil spill behavior, Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 4, Issue PART A, pp.683-688
- 10) ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills (1996) : State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills, Journal of hydraulic engineering, pp.594-609
- 11) James M. Price, Mark Reed, Matthew K. Howard, Walter R. Johnson, Zh0en-Gang Ji, Charles F. Marshall, Norman L. Guinasso, Jr. and Gail B. Rainey(2006): Preliminary assessment of an oil-spill trajectory model using satellite-tracked, oil-spill-simulating drifters, Environmental Modelling & Software, pp.258-270
- 12) 濱田誠一・木戸和男(2009) : GPS 漂流ブイを用いた表層流観察, 北海道立地質研究所報告, 第80号, pp.111-114
- 13) 松崎義孝・藤田勇・吉江宗生(2011) : テレメトリシステムを用いた海象情報収集漂流ブイの試作及び実海域実験, 海洋開発論文集



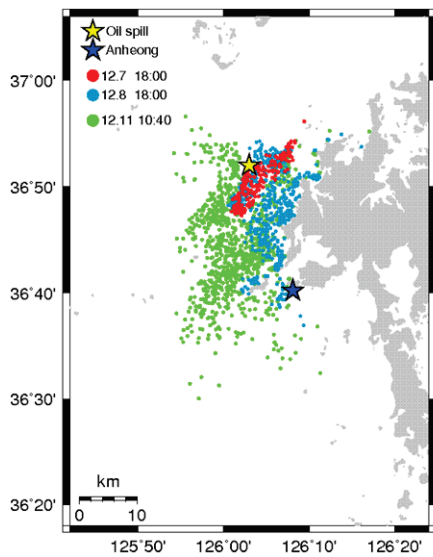
(a)



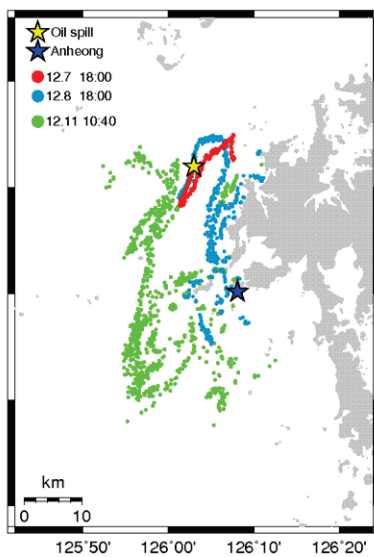
(b) $v_l=0.01\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=30\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=30\text{m}^2/\text{s}$



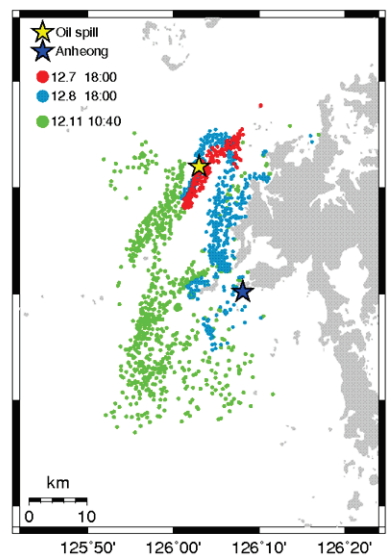
(c) $v_l=0.10\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=30\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=30\text{m}^2/\text{s}$



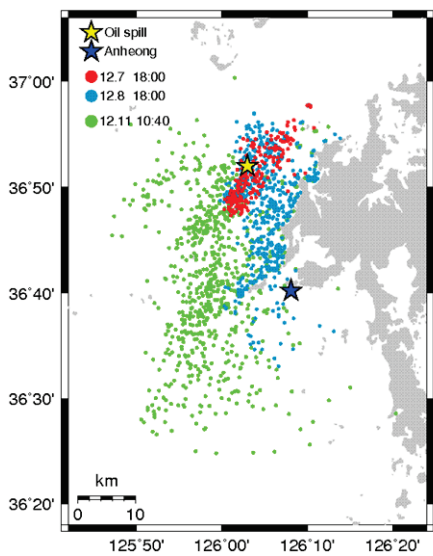
(d) $v_l=0.30\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=30\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=30\text{m}^2/\text{s}$



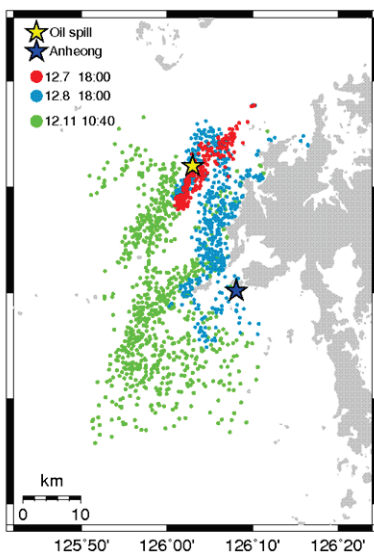
(e) $v_l=0.10\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=1\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=1\text{m}^2/\text{s}$



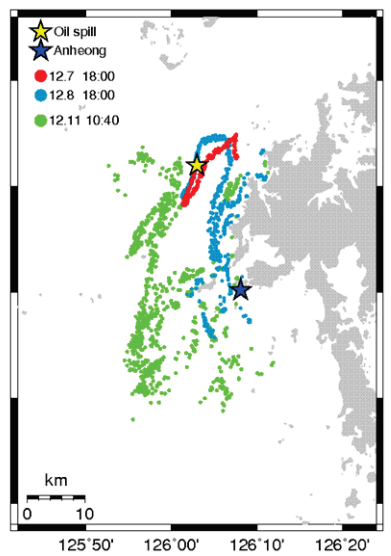
(f) $v_l=0.10\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=10\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=10\text{m}^2/\text{s}$



(g) $v_l=0.10\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=100\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=100\text{m}^2/\text{s}$



(h) $v_l=0.10\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=1\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=30\text{m}^2/\text{s}$



(i) $v_l=0.10\text{m}^2/\text{s}$, $v_T=30\text{m}^2/\text{s}$, $D_T=1\text{m}^2/\text{s}$

図5 韓国泰安沖油流出事故での観測された流出範囲と数値計算結果の比較((a)は観測, (b)~(i)は計算結果)