ＩＳＳＮ１３４６－７８４０

港湾空港技術研究所資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1255 September 2012

油拡散を考慮した流出油の数値計算法の開発

松崎　義孝
藤田　　勇

独立行政法人　港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目　　次

要　旨 …… 3

1. 序論 …… 4

2. 油拡散粒子モデルの開発及び計算方法 …… 4
  2.1　モデル概要 …… 4
  2.2　油膜自身の特性による拡散（Spreading）に関する粒子モデルの開発 …… 5
  2.3　流れの乱れによる渦拡散（Diffusion）の計算方法 …… 8
  2.4　海岸線，構造物等境界における計算方法 …… 9
  2.5　移流外力の計算方法・入力方法 …… 9
    2.5.1　海流 …… 9
    2.5.2　潮汐流 …… 9
    2.5.3　吹送流 …… 9
  2.6　油粒子のパラメータの計算方法 …… 11

3. 韓国泰安沖油流出事故の再現計算 …… 11
  3.1　事故概要 …… 11
  3.2　計算条件 …… 11
  3.3　計算結果 …… 13
  3.4　感度分析 …… 13
  3.5　吹送流の再現方法 …… 15

4. 結論 …… 16

謝辞 …… 17
参考文献 …… 17
記号表 …… 17
付録A.　韓国泰安沖付近の風況 …… 19

A Numerical Simulation Method of Oil Transport Considering Oil Spreading

Yoshitaka MATSUZAKI*
Isamu FUJITA**

Synopsis

Oil movement to horizontal direction at sea surface is predicted to consider the following three effects in numerical simulation. First is spreading by oil slick itself characteristics. Second is eddy diffusion by current turbulence. Third is transport by current at sea surface like tidal current, ocean current, wind current and so on.

In this study, we developed a particle model to simulate oil transport at sea surface. The oil particle model can treat spreading, diffusion and transport. We developed a new calculation model using particle model about spreading by oil slick itself characteristics. The model can treat instantaneous oil spill.

We conducted hindcast simulations of oil spill incident off the Taean Coast in South Korea in 2007, and the validity of the model was verified by comparing to observation. The results were similar to observation area of oil slick. We conducted sensitivity analysis of eddy diffusion coefficient, horizontal eddy kinematic viscosity coefficient and vertical eddy kinematic viscosity coefficient.

Calculation results was better when oil eddy coefficient and horizontal eddy kinematic coefficient are equal to $30m^2/s$ and vertical eddy kinematic coefficient is equal to $0.10m^2/s$ in this weather condition, marine condition and calculation condition.

It is necessary to take small calculation mesh vertically near the water surface to reproduce a wind current by numerical simulation. But calculation time is longer to calculate in small mesh condition, it is not good for use at real time oil spill prediction. Therefore, we propose wind coefficient method is better for prediction of oil transport.

Key Words: oil spill, numerical simulation, particle model, tidal current, wind current, Hebei Spilit

* Researcher, Multiphase Flow Group, Coastal and Estuarine Environment Field
** Group Leader, Multiphase Flow Group, Coastal and Estuarine Environment Field
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5065 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:matsuzaki-y@pari.go.jp

油拡散を考慮した流出油の数値計算法の開発

松﨑　義孝*・藤田　勇**

要　　旨

本研究では海上に流出した油の漂流予測を行う，油拡散粒子モデルを開発した．油拡散粒子モデルは海表面の油に関して，油膜自身の特性による油拡散(Spreading)，流れの乱れによる渦拡散(Diffusion)，海表面流れによる移流を計算できる．油膜自身の特性による油拡散は，粒子を用いて計算するモデルを新たに導出し，連続的な油流出の計算も取り扱えるようにした．開発した油拡散粒子モデルを用いて，2007 年に発生した韓国泰安沖油流出事故の再現計算を行い，観測と同様の結果が得られた．また，油拡散粒子モデル計算に必要な油の渦拡散係数，潮汐流計算に必要な水平渦動粘性係数，鉛直渦動粘性係数に関して感度分析を行った．今回の気象，海象条件,計算条件下では油の渦拡散係数，水平渦動粘性係数は 30m^2/s 程度，鉛直渦動粘性係数は 0.10 m^2/s 程度で計算すると油拡散をよく予測できた．さらに，吹送流を数値計算で求めるには水面近傍の空間刻みを小さくとる必要があり，計算時間が長くなることから実務上適さないことがわかった．吹送流による油の移流を計算するには風係数法を用いることを提案する．

キーワード：油流出，数値計算，粒子モデル，潮汐流，吹送流，Hebei Spilit

*　沿岸環境研究領域混相流体研究チーム研究官　新技術研究開発領域油濁対策研究チーム併任
**　沿岸環境研究領域混相流体研究チームリーダー　新技術研究開発領域油濁対策研究チーム併任
〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　港湾空港技術研究所
電話：046-844-5065　Fax：046-844-0575　　e-mail:matsuzaki-y@pari.go.jp

1. 序論

タンカーの海難事故や油井の事故による油流出は従来よりも減少してきているとはいえ，依然世界各地において発生している．海外においては2007年の韓国泰安沖Hebei Spilit号油流出, 2012年ニュージーランド沖コンテナ船Rena号油流出などの海難事故，2010年メキシコ湾MC252での油井から油流出などの大規模油流出があった．我が国においても，ナホトカ号，ダイヤモンドグレース号の事故があり，今後も事故の危険性がある．

油流出が発生した際は数値計算を用いた流出油の漂流予測を行い，初動体制の構築，防除計画の策定が行われる．また平時においては油回収船の防除訓練や季節別の流出油漂着リスクの算定に数値計算を用いることが期待される．さらに2011年の東日本大震災では各地で大きな被害があり，石油コンビナートや船舶からの油流出が多数発生している．同様の被害が東海，東南海，南海地震でも発生が予測される．これらの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．

数値計算を用いた流出油の漂流予測において，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，乱流拡散ともいう)と，海流，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計算される．

油膜自身の特性による油拡散(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Fay(1969)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，1992；Wangら，2005)．また，Fay(1969)を改良した油拡散モデルがLehrら(1984)から提案されており，こちらも数値計算に採り入れられている(Chaoら，2003；Guoら，2009)．しかしFayやLehr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．また変形，分裂した状態の油拡散計算にも適応が難しい．

流れの乱れによる渦拡散，海表面流れによる移流は，2章で述べるとおり，従来から提案されている計算手法があり，石油連盟（1992)，Chaoら（2003)，Wangら（2005)，Guoら（2009）などのモデルに組み込まれている．

そこで本研究では，海上に流出した油の漂流予測を行うための，油拡散粒子モデルの開発を行った．油拡散粒子モデルは，海表面の油に関して，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)，海表面流れによる移流を計算できるものとした．油膜自身の特性による油拡散は，粒子を用いて拡散現象を計算するモデルを新たに導出し，連続的な油流出の計算も取り扱えるようにした．さらに流れの乱れによる渦拡散と海表面流れによる移流の計算モデルを組み込んだ．

次に，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．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．本論文では開発した数値計算を用いて感度分析を行い，適切なパラメータの設定について考察した．

2. 油拡散粒子モデルの開発及び計算方法

2.1 モデル概要

海上に流出した油は流れ，風，波等の物理的な過程，気温，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．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-2.1.1は流出油の物理的，化学的，生物的な状態変化過程を示した図である．拡散，移流，蒸発，沈降，溶解，乳化（エマルション化），堆積，生物分解といった変化が生じる．

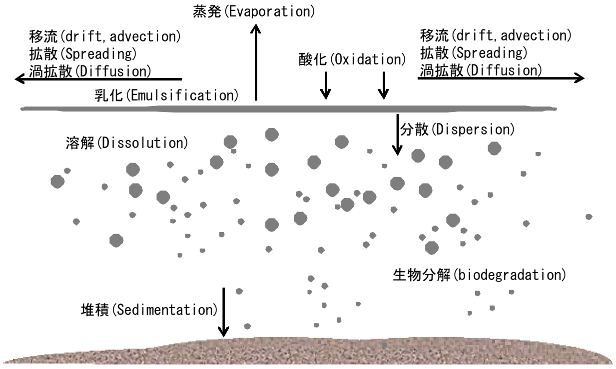


図-2.1.1　流出油の物理的，化学的，生物的状態変化過程

今回開発する数値計算は油回収船の効率的運用を目指したものであり，計算期間は数時間から数日程度を想定している．この程度の期間で油回収に重要となる過程は拡散，移流，蒸発，乳化であると考えられる．蒸発，乳化による油の状態変化は拡散，移流の過程にも影響を与

えるが，計算の簡素化を図るため，今回は拡散と移流(Transport)のみを計算対象とした．なお，蒸発，乳化といった性状変化(Fate)に関しては石油連盟やNOAA(National Ocean and Atmosphere Administration)により流出油の性状変化シミュレーションソフトウェアが公開されているので，そちらを参考にしていただきたい（石油連盟 ： http://www.pcs.gr.jp/doc/jteikyo/joiltool-sim.html ，NOAA：http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/adios.html）．

流出した油の拡散は重力，粘性力といった油膜自身の特性による拡がりと，流れの乱れによる渦拡散があり，英語ではそれぞれ Spreading と Diffusion と表現される．海上での油流出の場合，流れの乱れによる渦拡散のほうが支配的である場合が多いが，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拡がりも無視できない．

海面上の油は流れ，風，波の影響により移流する．流れには**表-2.1.1** のような種類・特徴がある．このうち流出油の漂流予測に影響が大きいのは潮汐流と海流である．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．海流は定性的には予測できるものの，漂流予測の観点での定量的な予測は難しく，不確実性が高い特徴がある．

表-2.1.1　流れの種類とその特性

（NOAA（2011）を元に作成）

流れの種類	空間スケール	時間スケール	予測の不確実性
河川	数10km	数時間～数日	低
潮流	数km	数時間	低
密度流	数10km	1～2日	中
海流	数100km	数週間	高
海洋循環	数1000km	数ヶ月～数年	低～高

風によって発生する流れである吹送流は後述する風係数法で見積もることができ，水面流速は水面から 10m の風速のおよそ 0.03 倍である．例えば水面から 10m の風速が 10m/s のとき，油の移流速度は約 0.30m/s と見積もられる．流出油の移流において風による影響は大きい．

油拡散に与える波の影響として，波の質量輸送による移流，水中分散等が考えられるが，今回のモデルには波の影響を考慮していない．

図-2.1.2 は油拡散粒子モデルの概要を示している．油の移動は，油を粒子の集合体に見立て，ラグランジュ的に移動を解く．すなわち，各々の粒子 i の位置 $\mathbf{X}_i$ は，移動速度 $\mathbf{U}_i$ に対して，

$$\frac{\partial \mathbf{X}_i}{\partial t} = \mathbf{U}_i \tag{2.1.1}$$

で表される．時間積分は，Euler 陽解法とし，

$$\mathbf{X}_i^{n+1} = \mathbf{X}_i^n + \mathbf{U}_i \Delta t \tag{2.1.2}$$

とする．ここで Δt は計算時間刻みである．

油粒子の移動速度 $\mathbf{U}_i$ 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まると考え，$\mathbf{U}_i$ を，

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_{si} + \mathbf{U}_{di} + \mathbf{U}_{oi} + \mathbf{U}_{ti} + \mathbf{U}_{wi} \tag{2.1.3}$$

と計算する．ここで，$\mathbf{U}_{si}$ は油膜自身の特性による油拡散速度，$\mathbf{U}_{di}$ は流れの乱れによる渦拡散速度，$\mathbf{U}_{oi}$ は海流による移流速度，$\mathbf{U}_{ti}$ は潮汐流による移流速度，$\mathbf{U}_{wi}$ は風による流れである吹送流による移流速度を表わす．それぞれの計算方法に関して，以下の節で説明する．

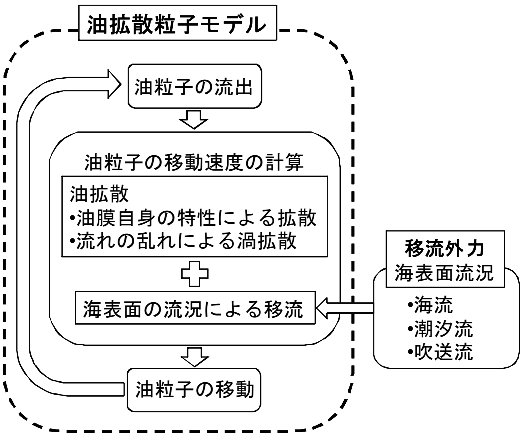


図-2.1.2　油拡散粒子モデルの概要

2.2　油膜自身の特性による拡散（Spreading）に関する粒子モデルの開発

油膜自身の性質による拡がりは油と海水の密度差(重力)，慣性力，粘性力，表面張力が作用していると考えられる．最も有名なモデルとしてFay(1969)の式がある．

Fay の式を簡単に紹介する．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．この油膜にかかる力は重力，慣性力，粘性力，表面張力とし，体積当たりにかかる力を**図-2.2.1** のように定義し，それぞれモデル化を行った．さらに，モデル化した各力を流出後の時間経過により支配的な力が変わると考え，釣り合いの条件を以下のように次元解析的に定式化した．

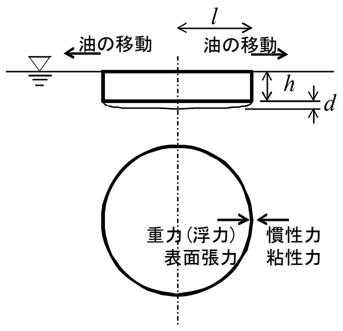


図-2.2.1　Fayによる油膜自身の特性の定義

モデル化は以下のように行った．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，

$$\frac{\Delta\rho gh \times 2\pi l h}{V} = \frac{2\pi\Delta\rho g h^2 l}{V} \tag{2.2.1}$$

である．ここで $\Delta\rho$ は水と油の密度差，g は重力加速度，h は油層厚，l は油層の半径，V は油層の体積である．慣性力は加速度を l/t^2 とすると，

$$\frac{\rho_o l}{t^2} \tag{2.2.2}$$

となる．ここで，ρ_o は油の密度である．粘性力は速度を l/t，水の境界層厚さを $\delta=(\nu_w t)^{1/2}$ とすると，

$$\frac{\tau_w A}{V} \approx \rho_w \upsilon_w \frac{l/t}{(\upsilon_w t)^{1/2}} \frac{\pi l^2}{V} = \frac{\pi\rho_w \upsilon_w^{1/2} l^3}{V t^{3/2}} \tag{2.2.3}$$

と表わされる．ここで，τ_w は油層面にかかるせん断力，A は油層の水平方向断面積，μ_w は水の粘性係数，ρ_w は水の密度，v_w は水の動粘性係数である．表面張力は，

$$\frac{\sigma_o \times 2\pi l}{V} = \frac{2\pi\sigma_o l}{V} \tag{2.2.4}$$

とした．　ここで，σ_o は界面張力係数である．

流出開始から約1時間後までを第1段階とよび，重力と慣性力が卓越するとした．重力と慣性力の釣り合いから油層半径 l は，

$$l = k_a\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o} g V\right)^{1/4} t^{1/2} \tag{2.2.5}$$

と表される．それから約1週間後までを第2段階とよび，重力と粘性力が卓越するとした．重力と粘性力の釣り合いから油層半径 l は，

$$l = k_b\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o} g V^2 \upsilon_w^{-1/2}\right)^{1/6} t^{1/4} \tag{2.2.6}$$

と表される．それから約1週間後以降は第3段階とよび，粘性力と表面張力が卓越するとした．粘性力と表面張力の釣り合いから油層半径 l は，

$$l = k_c\left(\frac{\sigma_o}{\rho_w} \upsilon_w^{-1/2}\right)^{1/2} t^{3/4} \tag{2.2.7}$$

と表される．k_a，k_b，k_c は実験結果と比較し求められる係数である．

Fayの式は油膜が円形に拡がるモデルであるが，実際の油拡散は乱流拡散，移流の効果があるため，円形に拡がることがほとんどない．そのため，Fayの式を粒子モデルに適応するには工夫が必要となる．例えば石油連盟(1992)やGuoら(2009)では以下のように取り扱っている．

拡がった油を**図-2.2.2**のようにいくつかのパイ状の領域に分割する．各領域の重心からの平均半径がr_oの時の拡がり速度を以下のように計算する．

$$U_{si} = \frac{r_{oi}}{r_o}\frac{dr_o}{dt} \tag{2.2.8}$$

dr_o/dtは半径r_oにおける拡がり速度を表わしており，これはFayの式より求める．

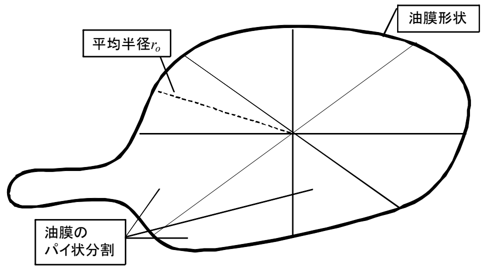


図-2.2.2　油膜分割して拡散速度を求める方法の模式図

著者ら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．(2.2.8)式は油膜の分割中心から遠い粒子ほど速い移動速度を持つことになる．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，速い流速を持つはずである．

そこで著者ら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．

油拡散粒子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，

$$\frac{Dn}{Dt} + n\nabla \cdot \mathbf{U}_s = 0 \tag{2.2.9}$$

となる．式(2.2.9)左辺をそれぞれ離散化する．まず式(2.2.9)左辺第2項について，発散の概念を表したのが**図-2.2.3**である．

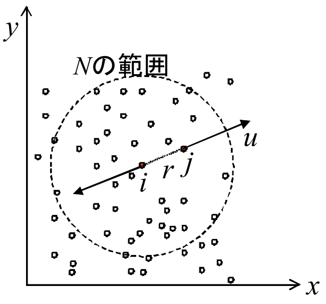


図-2.2.3　油拡散粒子モデルの概念図

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}（スカラー量），着目粒子の相対速度はゼロとおくと，この場合式(2.2.9)左辺第2項は，

$$n\nabla\cdot\mathbf{U}_s = n\frac{u_{sij}}{r_{ij}} \qquad (2.2.10)$$

となる．次に，式(2.2.9)左辺第1項の粒子密度の時間変化を求める．粒子密度は密度が高いほど密度の時間変化が大きいと考え，

$$\frac{Dn}{Dt} = -Cn^{\alpha} \qquad (2.2.11)$$

を仮定する．ここでCは係数である．(2.2.11)式を時間で積分すると，

$$\frac{1}{1-\alpha}n^{-\alpha+1} = -Ct + K \qquad (2.2.12)$$

である．ここで，Kは積分定数である．油膜の形状が円柱であると仮定すると$V=\pi l^2 h$である．油層の体積が一定のとき，Fayモデルの重力と慣性力が卓越するときにおいては式(2.2.5)から式(2.2.13)が導かれる．

$$h \propto l^{-2} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}gV\right)^{-1/2} t^{-1} \qquad (2.2.13)$$

油を粒子の集まりと考えており，nはhに比例することから，nはt^{-1}に比例する．この関係を式(2.2.12)に用いると，α=2を得る．よって，式(2.2.9)に式(2.2.10)及び(2.2.11)を代入すると，lとr_{ij}は比例することから，

$$-Cn^2 + n\frac{u_{Sij}}{r_{ij}} = 0 \qquad (2.2.14)$$

を得る．$n \propto h \propto l^{-2} \propto r^{-2}$の関係から，

$$u_{Sij} \propto r_{ij}^{-1} \qquad (2.2.15)$$

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モデルの重力と粘性力が卓越する時も同様に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．なお，Fayモデルの粘性力と表面張力が卓越する時は界面張力が拡がる方向に作用し，粘性が拡がりを抑える方向に作用するとし釣り合い式をたてている．しかし余ら(1998)によると界面張力は油の拡がりを抑える方向に作用すると主張している．そこで著者らは本計算モデルでは，第2段階が引き続くとし，第3段階は考慮しないこととした．

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の拡がり速度は周囲の粒子jから受ける速度$\mathbf{U}_{Si}$をベクトル合成で計算する．

$$\mathbf{U}_{Si} = \sum_j^N \mathbf{u}_{Sij} = \sum k_1 \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} \qquad h \geq h_1 \qquad (2.2.16)$$

$$\mathbf{U}_{Si} = \sum_j^N \mathbf{u}_{Sij} = \sum k_2 \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^4} \qquad h < h_1 \qquad (2.2.17)$$

ここで，k_1, k_2はFayの式との比較で求まる係数で，計算方法は後述する．また移動速度はベクトル量となる．式(2.2.16), (2.2.17)のどちらを用いるかは各計算ステップ，着目粒子ごとに，近傍粒子検索半径Rに対して，粒子iからの半径R以内にある粒子の個数Nを数え，油層厚hを，

$$h = \frac{NV_i}{\pi R^2} \qquad (2.2.18)$$

と求める．Fayの式から求まる油層厚判定値h_1と比較し決定する．k_1，k_2，h_1は想定している油の密度と粒子の体積による．k_1，k_2の決定方法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(2.2.5)と第2段階を表わす式(2.2.6)が等しくなるときのlを求める．次に$V=\pi l^2 h$の関係からh_1を求める．次にh_1を用いてk_1を変えて式(2.2.16)の計算を行い，結果と式(2.2.5)を比較し，誤差が最も小さい時のk_1を求める．最後にh_1，k_1を用いてk_2を変えて式(2.2.17)の計算を行い，結果と式(2.2.6)を比較し，誤差が最も小さい時のk_2を求める．実際に数値計算を行う際は，油の密度（6種類）：780，820，860，900，940，980[kg/m^3]，粒子体積（4種類）：0.2，1.0，10，50[m^3/個]，粒子数各1000個のときのh_1，k_1及びk_2をデータベースとして求めておき，それを使用する．

導出した油膜自身の特性による油拡散計算モデルに関する検証計算を行った．計算は粒子数1000個，k_1=1.2×10^{-2}m^2/s，k_2=2.0×10^{3}m^4/sで行い，着目粒子周りの油層厚が3.2mm以上のとき式(2.2.16)，それ以外のとき式(2.2.17)を用いた．**図-2.2.4**は油粒子の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

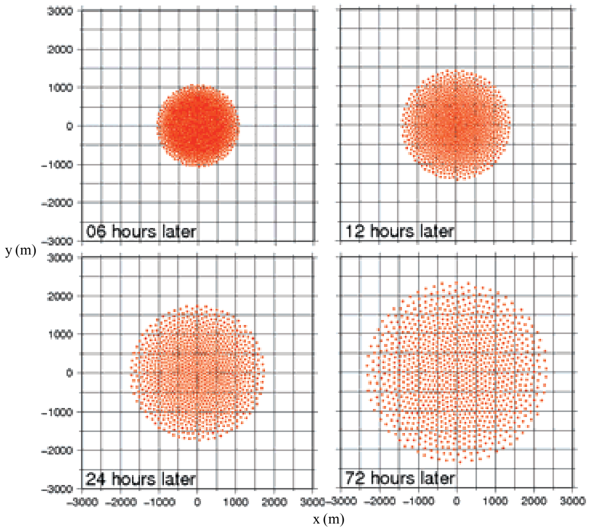


図-2.2.4　粒子モデルによる油粒子の拡散
（6,12,24,72時間後）

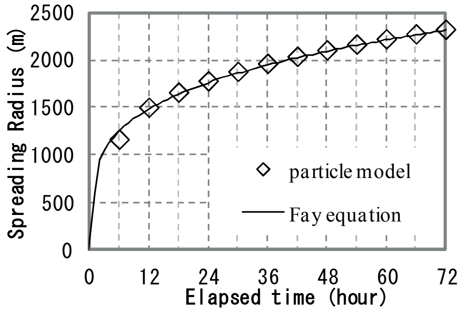


図-2.2.5　粒子モデルによる油粒子の拡散半径と
Fayの式の比較

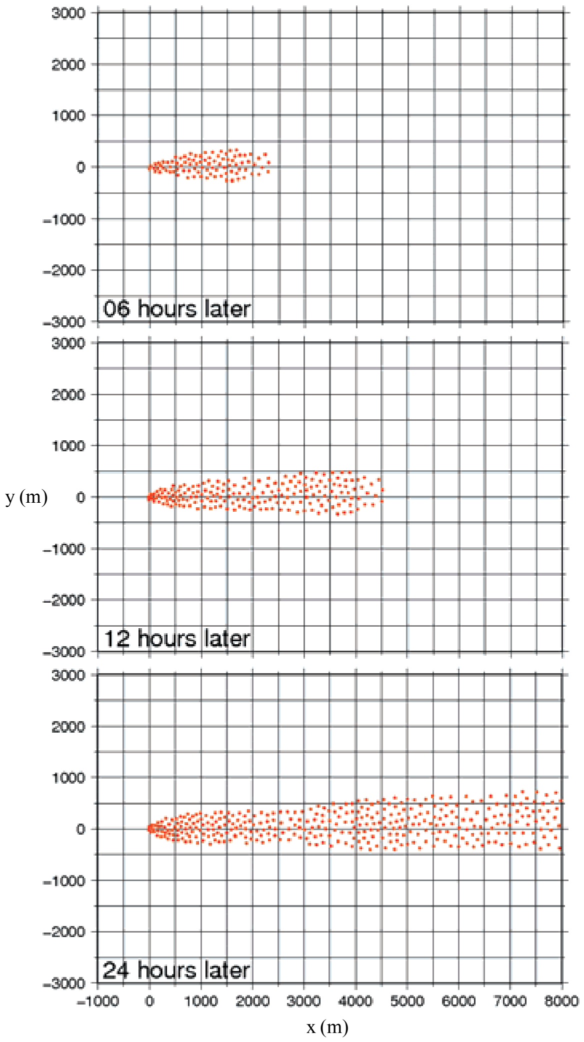


図-2.2.6　流れ場における油粒子の移流拡散
（6,12,24時間後）

っており，油が拡がる様子を再現できていると考えられる．

図-2.2.5は1×10^4m^{3}のアラビアンライトが静水中に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．計算結果はFayの式とよく一致しており，これより油拡散半径を粒子モデルで再現できていると言える．

図-2.2.6はx方向に0.1m/sの流れ場に油が2×10^2m^3/hourで流出したものを再現している．Fayの式を直接用いた式(2.2.8)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．

2.3　流れの乱れによる渦拡散（Diffusion）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．漂流予測に用いる流況データのメッシュ間の流況情報，観測値，予報値の計測点間の流況情報は不明なため平均化するなどして対応するが，メッシュ間，計測点間にも再現できない乱れは存在する．その乱れによって生じる拡散を乱流拡散や渦拡散などという．流出油の数値計算において乱流拡散を考慮する際は，拡散方程式から求まるランダムウォークで計算する方法が一般的である．水平渦拡散による油拡散速度は以下の通りに計算する．

$$\mathbf{U}_d = \begin{bmatrix} \cos(2\pi R_n) \\ \sin(2\pi R_n) \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2D_H}{\Delta t}} \quad (2.3.1)$$

D_Hは海域に依存し，乱れの大きいところでは大きくとる必要がある．またD_Hは流れ，風データの空間密度，時間密度に依存し，基本的には空間密度，時間密度が高いほど小さくなる．例えば差分を用いた数値計算で潮汐流を計算した場合，計算メッシュ，時間刻みが細かいほど，

渦の小さい流れを再現できるようになる．そのとき油の渦拡散速度はより小さい渦の乱れを反映させるため小さくする必要がある．

2.4　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・経度を入力し，その線分を漂流境界とした．油粒子は各線分との距離 r_{bi} に応じて，以下のように処理した(**図-2.4.1** 参照)．すなわち，境界から離れている場合は境界による影響なし(式(2.4.1a))，境界にある程度近づくと境界からの距離に応じた斥力を与える(式(2.4.1b))，境界に近い場合は海岸，構造物に漂着したとして粒子の移動を停止する(式(2.8.1c))という条件である．

$$\mathbf{U}_b = 0 \qquad r_{bi} > r_{b1} \qquad (2.4.1a)$$

$$\mathbf{U}_b = k_{br} \frac{\mathbf{r}_{bi}}{r^s} \qquad r_{b1} \geq r_{bi} > r_{b2} \qquad (2.4.1b)$$

$$\mathbf{U}_i = 0 \qquad r_{b2} \geq r_{bi} \qquad (2.4.1c)$$

ここで，s, k_b, $r_{b1,}$ r_{b2} は入力パラメータである．式(2.4.1b)は海岸付近では戻り流れが発生し，海岸法線に向かって移流しにくくなると想定しているが,物理的根拠はない．また式(2.4.1c)は r_{b2} より油粒子が近付いた場合粒子は漂着し，再流出しないこととしている．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，モデル化も試みられている（例えば Torgrimson,1984）．ここでは再流出しないことを考えているが，これらのモデルを組み込むことも可能であるため，今後モデル検討が必要であると考えている．

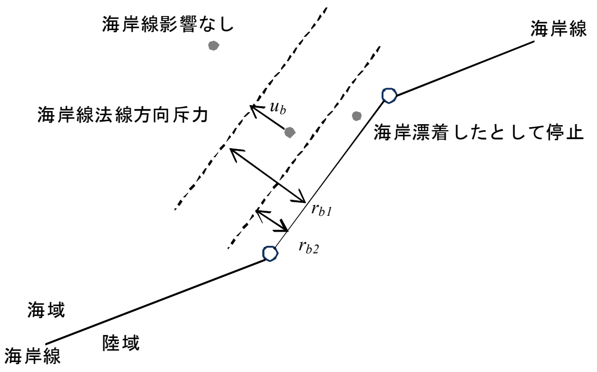


図-2.4.1　海岸線，構造物境界での処理

2.5　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り発生する吹送流を対象としている．移流外力はユーザーが数値計算，現地観測等により作成した格子データファイルを数値計算モデルに入力する．油拡散粒子モデルでは粒子の位置の流速は線形補間にて与えている．移流外力に関して具体的には以下のように取り扱う．

2.5.1　海流

漂流計算に必要となる海流データは研究機関等によりインターネット上で公開されているものがある．それには将来予測（現在も含む）と，観測値を利用した過去の再解析値がある．今のところ油流出が発生した際の即時の予報には将来予測を用い，季節的な油流出リスク評価等には再解析値を利用することが考えている．油拡散粒子モデルでは将来予測のデータとして米国立海洋大気省(NOAA)による計算結果，再解析データとしてFRA-JCOPE再解析データを用いることを想定しており，今後それらのデータを用いた計算の報告を行う予定である．

2.5.2　潮汐流

東京湾のような内湾や，韓国西海岸の黄海のような沿岸域において，潮汐流は流出油の移流に強い影響がある．計算には他研究機関等において計算されたデータのほか,独自に計算したデータを用いることができる．本研究では，潮汐流は静水圧近似を用いた準3次元モデルであるSTOC_ML(富田ら,2005)を用いた数値計算結果を用いる．基礎方程式は連続方程式，Reynolds方程式，自由表面の式である．

STOC_ML における表面流速とは，STOC_ML の表面が存在する格子の流速とする．これは鉛直方向の格子位置により流速の値が異なるためである．なお，流速の定義点がスタッガードであるために，表面が存在する格子界面が複数層に渡って存在することがあるが，その場合は，もっとも上層の格子界面における流速をもって表面流速とする．

2.5.3　吹送流

吹送流を計算する方法は二つあり，一つは風係数法による推定法，もう一つは準 3 次元計算である STOC_ML(富田ら,2005)等を用いて計算する方法である．本計算モデルでは吹送流計算方法を選択でき，その計算結果について 3 章において考察を行っている．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-2.5.1** 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る．

表-2.5.1　風係数法を用いたモデルと風係数

開発者	年	風係数(%)
Wangら	1974	3.0
Johansen	1987	3.0
Shenら	1988	3.0 (1.0～6.0で変化する)
Reedら	1989	3.0
AL-Rabeh	1994	3.1
Sotilloら	2008	2.6
Wangら	2008	3.0
Guoら	2009	3.0
Zhao-chun	2010	3.0

風係数法の計算方法を説明する．風速と水面の吹送流速の関係は，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より，

$$\tau = \rho_a C_{da} W^2 = \rho_w C_{dw} U_w^2 \qquad (2.5.1)$$

と表わされる．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} は大気から海面，海面から大気の抵抗係数，W，U_w はそれぞれ水面近傍の大気，水の速度である．C_{da} と C_{dw} が等しいと仮定すると，

$$U_w = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} W \fallingdotseq 0.035W \qquad (2.5.2)$$

となり，海面近傍風速の 0.035 倍の吹送流が発生することがわかる．以上のように入力する風速に係数をかけて，それを吹送流と見なす方法を風係数法とよび，本計算モデルでは式(2.5.3)のように計算を行う．

$$\mathbf{U}_{wi} = C_W \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \mathbf{W}_{10i} \qquad (2.5.3)$$

ここで，海上風データは海面から 10m で整理されていることがほとんどである．よって海面近傍より風速が大きくなることを考慮し，本計算モデルでは C_w=0.03 としている．θ はコリオリ力による偏向を表わす．吹送流に関するコリオリ力は著者らにおいて十分な整理ができておらず，本モデルにおいては θ=0 として計算している．今後効果を十分検討したうえでコリオリ力の導入を検討する予定である．

次に STOC による直接推定について説明する．計算における水面上で式(2.5.4)のように風応力 $\boldsymbol{\tau}$ を与える．

$$\boldsymbol{\tau} = \rho_a C_{da} \mathbf{W}_{10i}^2 \qquad (2.5.4)$$

海面抵抗係数 C_{da} は，本多・光易(1980)の実験式を用いて与える．

STOC による直接推定のテスト計算を行った．長さ 900m，水深 1.0m の断面 2 次元水路で，計算条件は**表-2.5.2** のとおりである．このような一様水深水路の吹送流鉛直分布 $\mathbf{u}_{wz}$ には理論解があり式(2.5.5)で与えられる．

$$\mathbf{u}_{wz} = \frac{h\boldsymbol{\tau}}{4\rho_w \upsilon_V}\left(1+\frac{z}{d}\right)\left(1+\frac{3z}{d}\right) \qquad (2.5.5)$$

ここで h は水深，ν_V は鉛直渦動粘性係数，d は水深である．計算条件は**表-2.5.2** の通りである．計算結果と理論の比較をしたものが**図-2.5.1** であり，横軸が流速(m/s)，縦軸が水位 z(m)である．計算結果は理論とほぼ一致している．よって STOC_ML 等を用いた直接計算によって吹送流を計算することは原理的には可能であることが分かる．ただし，厳密に解を得るには Δz を小さくとる必要があり，それに伴い Δt も小さくとる必要がある．よって計算時間がかかる点に注意が必要であり，3 章において考察を行っている．

表-2.5.2　計算条件

x 方向格子数		30
z 方向格子数		101
格子間隔	Δx	30m
	Δz	0.01m
時間間隔	Δt	0.001sec
初期水深		1.0m
風速	W	10m/s
水の密度	ρ_w	1026kg/m^3
鉛直渦動粘性係数	ν_v	0.01m^2/s

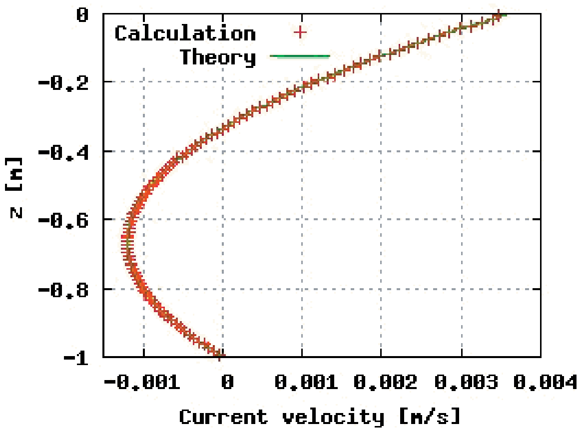


図-2.5.1　吹送流の鉛直分布

風況データは主に気象庁 GPV データを用いることを想定している． GPV データは気象庁全球数値予報モデル GPV (GSM)と日本近海版であるメソ数値予報モデル(MSM)があり，その特徴は**表-2.5.3** のようにまとめられる．

表-2.5.3　気象庁 GPV データ

	GSM	MSM
初期値	00,06,12,18UTC（1日4回）	00,03,06,09,12,15,18,21UTC（1日8回）
予報時間	84時間予報（00,06,12,18UTC），6時間間隔 96-192時間予報(12UTC)，12時間間隔	15時間予報（00,06,12,18,UTC） 33時間予報（03,09,15,21UTC） 地上は1時間間隔、気圧面は3時間間隔
配信領域	全球	北緯22.4度～47.6度，東経120度～150度
格子系	等緯度等経度 地上～100hPa:0.5度×0.5度(格子数720×361) 70～10hPa:1.0度×1.0度(格子数360×181)	等緯度等経度 地上：0.05度×0.0625度（格子数505×481） 気圧面：0.1度×0.125度（格子数253×241）

2.6　油粒子のパラメータの計算方法

油流出の油粒子の流出指定は,総粒子数と流出位置(緯度･経度)および流出半径を与えるとともに,流出期間(開始，終了)を与えることにより指定する．モデルでは，流出位置を中心とした流出半径内のランダムな位置に，流出期間で流出量が一定となるよう粒子を流出させる．また，個別に粒子ごとにユーザーが流出位置と流出時刻をファイルで指定して与えることも可能であり，必要に応じこのファイルを作成すれば，流出量が時間によって変化するなど，様々な状況に対応ができる．

3.　韓国泰安沖油流出事故の再現計算

本章では2章で説明した油拡散粒子モデルの再現性を検証するため，韓国泰安沖油流出事故を対象とした再現計算を行い，本モデルの有効性を検証するとともに，感度分析を行い，各種計算パラメータの検討を行った．

3.1　事故概要

2007年12月7日6:50頃，韓国忠清南道泰安沖約8km（図-3.1.1参照）において錨泊中であったタンカーHebei Spirit号（香港船籍，146,848GT）にクレーン台船が衝突した．この衝突によりタンカーの油槽が破口し，原油約12,000klが黄海に流出した．流出した油は海岸線方向に漂流し，短時間の内に泰安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た．この事故は韓国史上最大の油流出事故となった．クレーン台船との衝突によりタンカー左舷側のタンク（1番，3番，5番）に破口し，積み荷の原油が流出した．船尾に近い5番タンクに空いた穴が一番大きく，次いで3番タンク，1番タンクの順になっている．油の流出時間は5番タンクが一番短く12月7日の12:00で止まっている．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頃にようやく流出が止まる．流失油量は当初10,500klと見積もられたが，後の公式発表では12,547klと報告されている．流失した油は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．なお，事故の詳細は藤田ら(2008)に記載されているため，そちらを参考にしていただきたい．

また，韓国泰安沖の風向風速観測地点（Ando，Gadaeam及びOngdo）において計測された風向風速と気象庁全球数値予報モデルGPV (GSM)に関して，付録A. にまとめてあるので参考にしていただきたい．

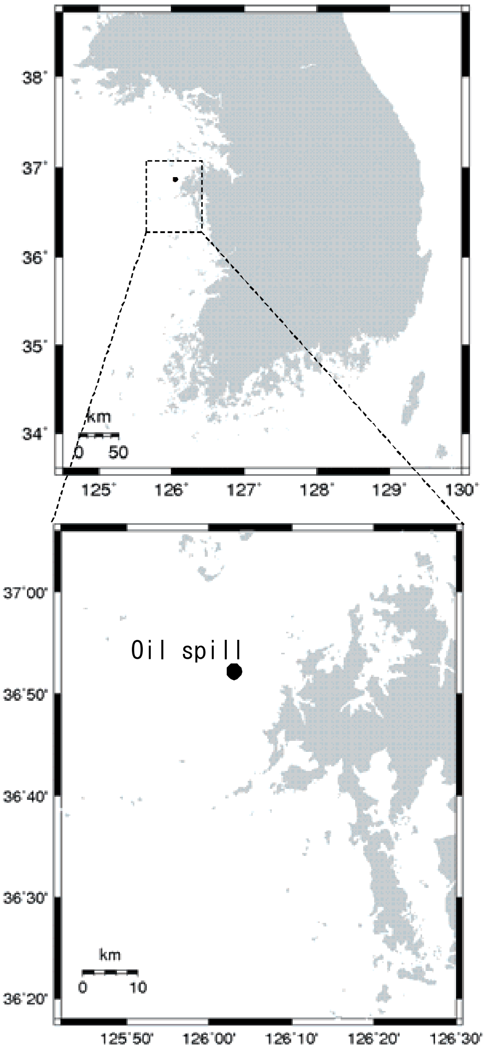


図-3.1.1　油流出地点

3.2　計算条件

油拡散粒子モデルの計算について，計算条件は表-3.2.1の通りである．油の流出流量は이봉길(2008),藤田ら(2008)を参考に設定した．数値計算に用いる粒子は多いほど現象を詳細に表わすと考えられるが，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．計算時間間隔は小さい

ほど現象を詳細に表わすと考えられるが，計算機の制約，計算時間の兼ね合いを考えて決定した．油の渦拡散係数は以下の通り決定した．まず，流出油の衛星画像（**図-3.2.1**参照）より求まる拡散面積と，拡散方程式の解析解を比較し，油の渦拡散係数を推定する．油の渦拡散係数は時間，空間スケールに影響を受けるが，簡単のため拡散係数を一定とすると，流れのない場合の2次元の拡散方程式において，t=0に原点に質量Mの物質を付加したときの濃度分布は，式(3.2.1)と導かれる．

$$C_o = \frac{M}{\sqrt{(4\pi D_H t)^2}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{4D_H t}\right) \qquad (3.2.1)$$

式(3.2.1)は標準偏差 $\sigma_x=\sigma_y=\sigma$ の 2 次元正規分布と同じ形をとっており，σ には式(3.2.2)が対応する．

$$\sigma = \sqrt{2D_H t} \qquad (3.2.2)$$

図-3.2.1 の衛星画像から油拡散面積を計算すると約 961km^2 であった．油が円形に拡がっていると考えると，拡散半径は 17.5km である．衛星画像はほぼすべての流出油をとらえていると仮定し，正規分布における 3σ が含まれる(99.74%)とする．拡散開始から画像撮影までの時間 t は約 99 時間であるので，これらの条件において式(3.3.2)の関係を用いると油の渦拡散係数 D_H=47m^2/s である．この油拡散は渦拡散(Diffusion)のほか，油膜自身の特性による拡散(Spreading)，流れによる拡がりを含んでいることから，実際はこれよりは小さくなると考えられる．

次に，染料流しの実験結果の整理（大久保, 1970；宇野木,1993）によると，拡散スケール L(cm)と油の渦拡散係数 D_H(cm^2/s)の関係は式(3.2.3)のように求められる．

$$D_H = 0.0103L^{1.15} \qquad (3.2.3)$$

拡散スケール L を油拡散直径 35.0km とすると油の渦拡散係数 D_H =34.6m^2/s である．式(3.3.3)で求まる油の渦拡散係数は時間・空間の関数であるため一様に比較できないものの，これらの結果から，韓国泰安沖における事故時の油の渦拡散係数は 30m^2/s 程度であると考えられる．

移流外力は，韓国泰安沖である黄海は海流の影響は大きくなく，泰安付近では大河川の流入がないため，潮汐流と吹送流のみとした．潮汐流の計算条件は**表-3.2.2**の通りである．格子間隔，時間間隔，粗度係数，水平渦動粘性係数，鉛直渦動粘性係数は試行錯誤的に決定した．なお，水平渦動粘性係数と鉛直渦動粘性係数は，**3.4**において感度分析を行っている．境界条件としてMatsumotoら(2000)のモデルを用い，開境界の仮想セルにおいて水位を与えた．水深データはGEBCO（http://www.gebco.net/）の30秒格子データを用いた．

吹送流は風係数法を用いた．風況データは気象庁全球数値予報モデルGPV (GSM)を用いた．

表-3.2.1 油拡散粒子モデルの計算条件

計算範囲	125°40′ 15″ ～126°26′ 15″ 36°9′ 15″ ～37°6′ 15″
粒子数	1200個
粒子体積	10m^3/個
計算時間間隔	10sec
油流出時間及び流出流量	12/7 8:00～12/9 0:00 211m^3/hour
	12/9 0:00～12/11 11:00 61m^3/hour
油の渦拡散係数	30m^2/s

表-3.2.2 潮汐の計算条件

計算時間		2007年12月4日0：00～11日11：00
格子数	nx	70
	ny	112
	nz	10
格子間隔	dx	743m (30秒)
	dy	925m (30秒)
	dz	5m(1～8層) 10m(9，10層)
時間間隔	dt	10sec
粗度係数	n	0.0026
水平渦動粘性係数	ν_H	30m^2/s
鉛直渦動粘性係数	ν_V	0.10m^2/s

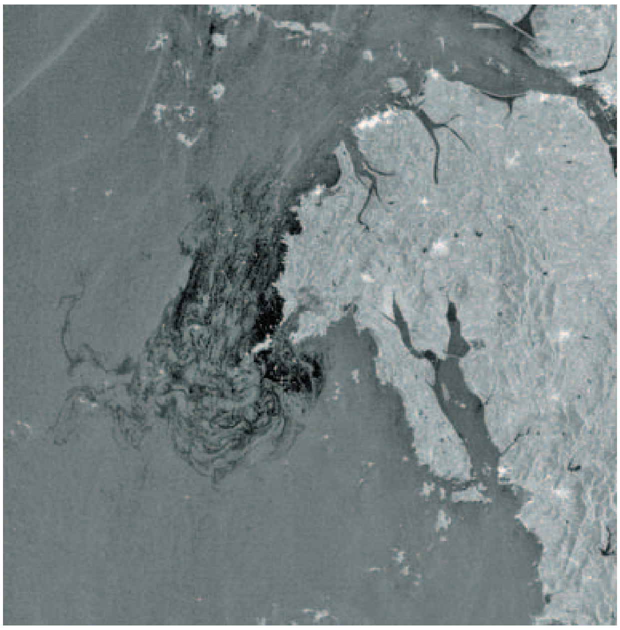


図-3.2.1 Envisat ASARによる流出油の衛星観測結果 (12/11 10:40)

3.3　計算結果

図-3.3.1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-3.3.1**の観測結果において，12/7，8 は目視観測(Lee ら, 2009)，12/11 はEnvisat ASAR (http://www.esa.int/)の観測による．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，吹送流により南東方向に移動している様子が再現されている．また，12/11 の油拡散範囲は一致していると考えられる．

次に，数値計算の検証を行う必要があるが，目視観測，衛星観測は油の拡がり（海面の油の面積）を示しており，油量の分布までは判定できない．よって油流出の予測計算モデルの検証を定量的に行うことは難しい．今回は数値計算と観測を**表**-3.3.1のように整理し比較した．移流に関して，観測は画像解析より油の重心位置を求め，数値計算は総油粒子の座標平均値を求め，それらの差をとった．本計算は対象とする計算時間が長いため，計算時間当たりにおける観測と数値計算の差も求めた．拡散に関して，観測は画像解析から油の重心から各油pixelの距離を求め，標準偏差の3倍を拡散半径と定義した．数値計算は油粒子の重心からの各油粒子の距離の標準偏差の3倍を拡散半径と定義した．これによると，重心は数km～十数kmずれているが，時間あたりのずれは2cm/s程度と，潮流が1m/sのような漂流予測の難しい海域においてその誤差は大きくないと考える．拡散に関して，両者はよく一致していると考えられ，数値計算の確からしさを表わしている．

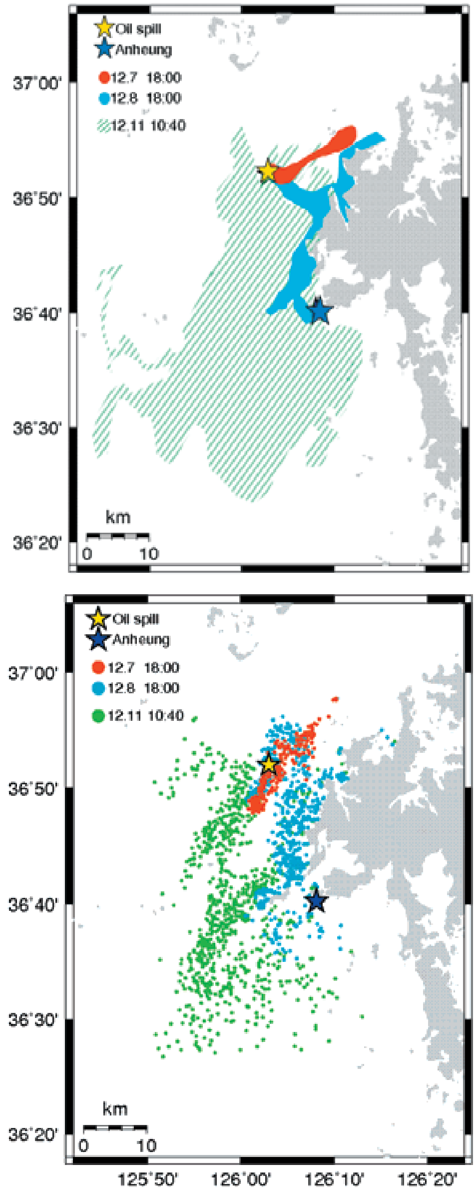


図-3.3.1　観測結果(上)と計算結果(下)の比較

表-3.3.1　数値計算結果と観測結果の比較

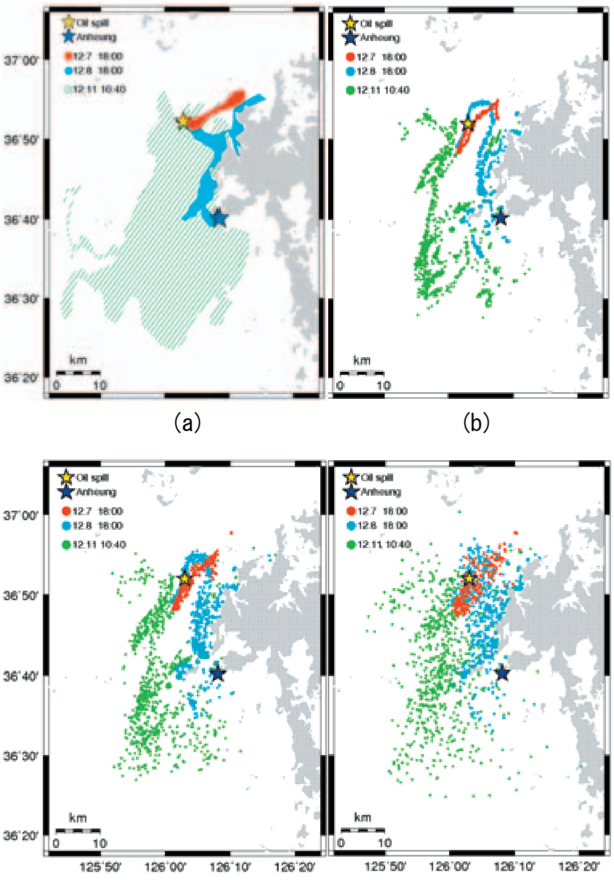
	移流	
	A（観測：画像重心位置)-(数値計算：油粒子平均位置）［km］	B　計算時間当たりにおけるAのずれ［cm/sec］
12月 7日　18:00	7.6	2.0
12月 8日　18:00	13.4	2.8
12月11日　10:40	17.5	2.5
	拡散	
	C　観測：画像の拡散半径［km］	D　数値計算：油粒子の拡散半径［km］
12月 7日　18:00	6.1	6.8
12月 8日　18:00	12.5	10.2
12月11日　10:40	20.8	20.4

3.4　感度分析

数値計算を行う際，計算に必要な各種係数は，計算対象のスケールや流況，計算の格子サイズなどにより異なるため，試行錯誤により決定することが多い．また，渦動粘性係数の決定の際に乱流モデルを用いて，自動的に決定する方法もある．しかし，万能なモデルはなく，計算結果を現地観測データ等と比較し，計算結果の精査を行う必要がある．本資料では複数のパラメータ値で，計算結果と観測結果との比較及び観測結果の解析により感度分析を行った．

まず，水平渦動粘性係数に関して検討を行う．水平渦動粘性係数は潮汐流計算に影響を与え，油の渦拡散係数は油拡散粒子モデルの計算に影響を与える．水平渦動粘性係数，油の渦拡散係数はそれぞれ潮汐流計算格子間隔，外力として用いる流況のほか，風況データの空間，時間スケールにより決まる．**図-3.4.1**は韓国泰安沖油流出事故観測結果と水平渦動粘性係数，油の渦拡散係数を変えたときの計算結果の比較であり，水平渦動粘性係数v_Hと水平渦動粘性係数D_Hを変えて計算を行った．油の渦拡散係数D_HはASCE(1996)では一般的に1～100m^2/sであるとしていることから，v_H=D_H=1m^2/s，10m^2/s，100m^2/sの3ケー

スで行った．それ以外の計算条件は**表**-3.2.1及び3.2.2と同じである．**図**-3.4.1 (b) よりD_H=1では油拡散が小さく，**図**-3.4.1 (d) よりD_H=100では油拡散が大きい．**図**-3.4.1 (c) は (b)，(d) 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考えられる．画像解析による推定，**図**-3.4.1 (c) を踏まえると，韓国泰安沖における油流出時の油の渦拡散係数は，本計算モデルを用いると30m^2/s程度で計算するとよいと考えられる．



(a)　(b)

(c)　(d)

図-3.4.1　観測結果と計算結果の比較

(a)：観測結果

(b)：計算結果　ν_H=1m^2/s, D_H=1m^2/s

(c)：計算結果　ν_H=10m^2/s, D_H=10m^2/s

(d)：計算結果　ν_H=100m^2/s, D_H=100m^2/s

また水平渦動粘性係数を定数で与えるほか，潮汐流を数値計算する際に用いた乱流モデルにより求まる水平渦動粘性係数を用いることもできる．そこで沿岸域の流況計算でもよく用いられるSmagorinskyのモデルを用いて，再現性の検証を行った．

Smagorinskyモデルは式(3.4.1)で表される．

$$\nu_H = (C_s\Delta)^2\left\{\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial uu_j}{\partial x_i}\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{3.4.1}$$

ここで，C_sはSmagorinsky定数，Δはフィルター幅であり，潮汐流計算格子に依存するとした．本計算においては水平方向等方乱流と3次元一様等方乱流の2パターンで拡散係数の算出を試みた．水平方向等方乱流は式(3.4.2)，3次元一様等方乱流は式(3.4.3)である．

$$\nu_H = C_s^{\,2}\Delta x\Delta y \left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{3.4.2}$$

$$\nu_H = \left\{C_s(\Delta x\Delta y\Delta z)^{\frac{1}{3}}\right\}^2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2+\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right\}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.4.3}$$

Smagorinskyモデルを用いて水平渦動粘性係数を求めた結果が**図**-3.4.2である．この時C_sは0.20とし，その他の計算条件は**表**-3.2.2と同様に計算している．なおC_sの理論値は0.173である．時間は12/7 8:00の結果で，潮位変化が大きく，潮流が早い時間帯であるが，水平方向等方乱流，3次元一様等方乱流共に10^{0}オーダーである．前述の通り韓国泰安沖の水平渦動粘性係数は10^{1}オーダーであると考えられるため，今回の計算条件ではSmagorinskyモデルは適さないといえる．

次に鉛直渦動粘性係数の感度分析を行う．鉛直渦動粘性係数は潮汐流の計算の際に重要となってくる．まず潮汐流の計算結果について示す．**図**-3.4.3はAnheungにおいて，鉛直渦動粘性係数0.01，0.10，0.30m^2/sで潮汐を計算した際の水位と験潮記録の比較である．**図**-3.4.3における観測と計算の誤差の標準偏差は3ケースとも0.27mであり，計算結果は験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**-3.4.4はHebei Spilit号の事故地点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が大きいと水深方向の流速を一様化する働きによると考えられる．なお，流速に関しては比較する観測データが見つからなかったた

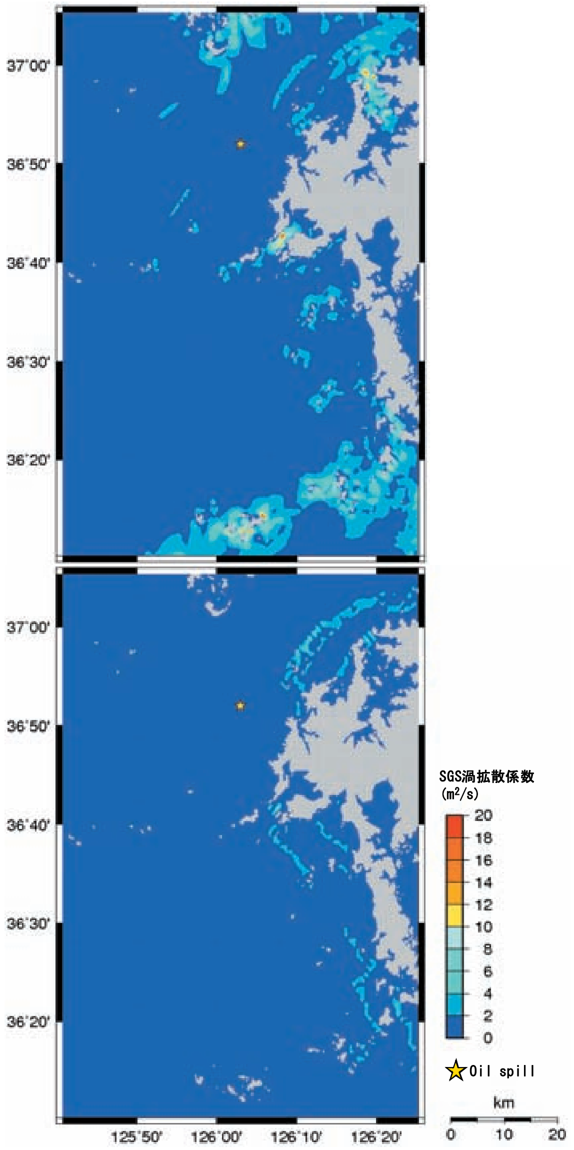


図-3.4.2　乱流モデルを用いた
水平渦動粘性係数 ν_H(m²/s)の推定(12/7 8:00)
上：水平方向等方乱流　下：3次元一様等方乱流

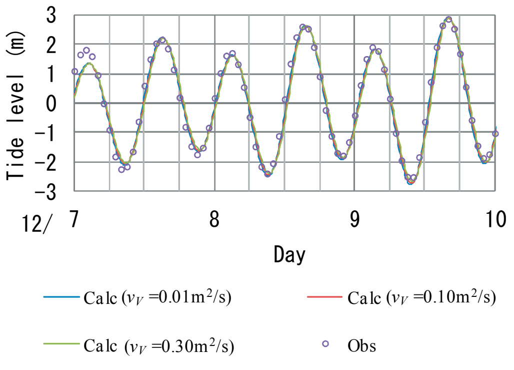


図-3.4.3　Anheung での潮汐計算と観測値の比較

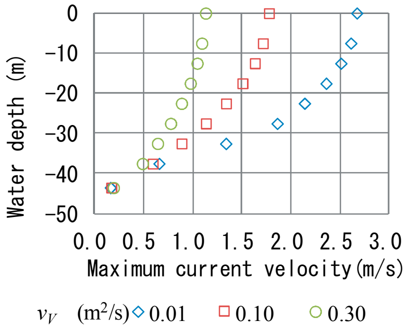


図-3.4.4　タンカー事故地点の鉛直渦動粘性係数の変化による計算期間における最大流速の鉛直分布の比較

め，計算結果のみで比較している．

図-3.4.5は韓国泰安沖油流出事故観測結果と鉛直渦動粘性係数を変えたときの計算結果の比較であり，鉛直渦動粘性係数v_Vを変えて計算を行い，その影響を比較している．v_V=0.01m²/s，0.10m²/s，0.30m²/sの3ケースで行った．それ以外の計算条件は表-3.2.1及び3.2.2と同じである．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-3.4.5 (b)は潮汐流により油の移動量が南方に大きく，観測値と一致しない．また，図-3.4.5 (d)は潮汐流が小さいため，油の移動量が小さく，油の拡がりが表現されていない．図-3.4.5 (c)は計算をよく再現していると考えられる．よって，今回の計算条件，気象，海象条件下では油の渦拡散係数，水平渦動粘性係数は30m²/s程度，鉛直渦動粘性係数は0.10 m²/s程度で計算すると油拡散をよく予測できた．

3.5　吹送流の再現方法

2.5.3で述べたように，風によって発生する流れである吹送流は風係数法とSTOCのような流体計算で直接再現する方法がある．ここでは２つの方法で計算を行い比較することで，適切な計算方法に関して検討する．

図-3.5.1は吹送流の計算方法の計算結果に与える影響を示している．計算条件は表-3.2.1及び表-3.2.2と同じであるが，吹送流の直接計算は水面近傍のz方向の格子間隔を(c) においてΔz=1m，(d)においてΔz=2mとして計算している．また，Δzを小さくしたことから，時間間隔を(c)においてΔt=2.5秒としている．それ以外の計算条件は表-3.2.1及び3.2.2と同じである．図-3.5.1(c),(d)いずれにおいても岸側に移動する様子が再現されていない．これは流出初期に強く吹いていた北西風による油の移動

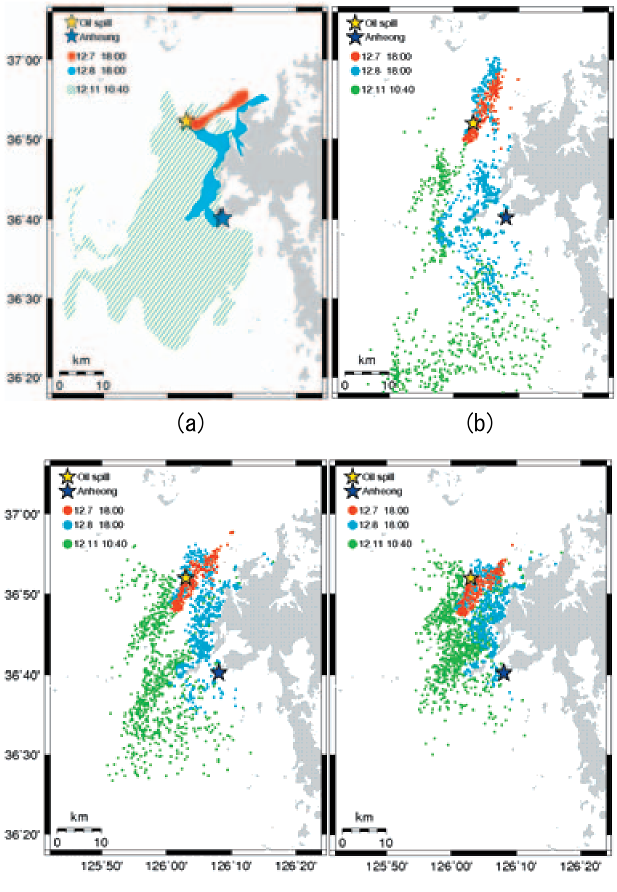


図-3. 4. 5　観測結果と計算結果の比較

(a)：観測結果

(b)：計算結果　ν_l=0.01m^2/s

(c)：計算結果　ν_l=0.10m^2/s

(d)：計算結果　ν_l=0.30m^2/s

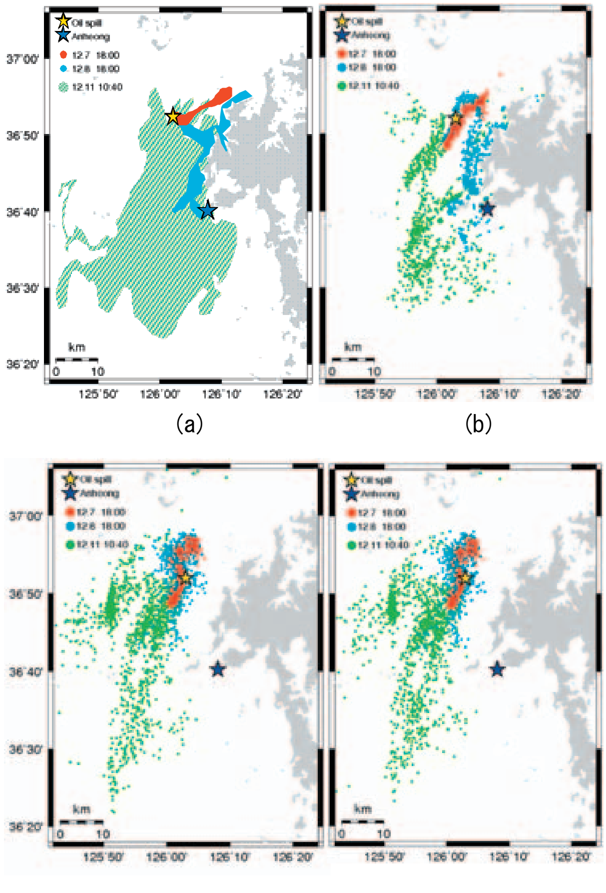


図-3. 5. 1　吹送流の計算方法の計算結果に与える影響

(a)：観測結果

(b)：計算結果　風係数法

(c)：計算結果　直接計算，表面近傍の Δz=2m

(d)：計算結果　直接計算，表面近傍の Δz=1m

を再現できていないことによる．これは吹送流を表わすには水面近傍の格子間隔を細かくとる必要があることによると考えられる．しかしながら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ため，計算機の能力等を考慮すると実用的でない．よって，これらの結果より，現状では吹送流の評価は風係数法が適切であると考えられ，吹送流の直接計算による漂流予測は計算機の性能向上，画期的なコーディングへの改良といった対策が必要となり，今後の課題であると言える．

4.　結論

本研究では海上に流出した油の漂流予測を行う，油拡散粒子モデルを開発した．油拡散粒子モデルは海表面の油に関して，油膜自身の特性による油拡散(Spreading)，流れの乱れによる渦拡散(Diffusion)，海表面流れによる移流を計算できる．油膜自身の特性による油拡散は，粒子を用いて計算するモデルを導出し，連続的な油流出の計算も行えるようにした．開発した油拡散粒子モデルを用いて，2007 年に発生した韓国泰安沖油流出事故の再現計算を行い，観測と同様の結果が得られた．また，油拡散粒子モデル計算に必要な油の渦拡散係数，潮汐流計算に必要な水平渦動粘性係数，鉛直渦動粘性係数に関して感度分析を行った．今回の計算条件，気象，海象条件下では油の渦拡散係数，水平渦動粘性係数は 30m^2/s 程度，鉛直渦動粘性係数は 0.10 m^2/s 程度で計算すると油拡散をよく予測できた．吹送流を数値計算で求めるには水面近傍の空間刻みを小さくとる必要があり，計算時間が長くなることから実務上適さないことがわかった．吹送流による油の移流を計算するには風係数法を用いることを提案する．

今回の研究では油流出数値計算のベース部分が完成し

た．今後実務に適用可能な精度を確保した数値計算を完成させていくには以下の作業が必要となると考えている．流れの乱れによる渦拡散の計算の際には，対象となる海域での拡散係数が重要となるが，現状ではその評価が十分でない．日本近海における気象条件，海象条件を整理し，油の渦拡散係数を定量的に評価することが課題である．油の移流の計算では海流，潮汐流，風のデータが必要となるが，即時の予報に向けたそれらのデータベースの構築が必要となる．

今後の数値計算の応用としては，津波や地震といった自然災害による港湾区域での油流出の予測技術の確立を行う予定であり，今後危惧される東海，東南海，南海地震の際の油流出計算の指標を提言していきたい．

謝辞

韓国泰安沖における潮汐，風向風速のデータ収集及び韓国語の翻訳に当たり，廉慶善研究官に協力をしていただいた．また，本資料をまとめるにあたり，中村由行研究主監，栗山善昭特別研究官，菅野高弘特別研究官から貴重なご意見を頂いた．ここに深く感謝の意を表する．

参考文献

宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理学，672p.

大久保明(1970)：海洋乱流・拡散，海洋物理Ｉ，東海大学出版会，pp.265-381

石油連盟 (1992)：流出油の拡散予測モデル調査報告書，107p.

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

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.

松﨑義孝・吉江宗生・藤田勇・竹﨑健二（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

余錫平・及川一彦・磯辺雅彦・渡辺晃(1998)：静水場および波浪場における事故流出油の挙動に関する基礎的研究，海岸工学論文集，pp.916-920

AL-Rabeh A. H. (1994) : Estimating surface oil spill transport due to wind in the Arabian gulf, Ocean Engineering, Vol21, No.5, pp.461-465

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

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

Fay, J. A. (1969) : The spread of oil on a calm sea, Plenum Press, pp.53-64

Guo.W.J, Wang.Y.X(2009) : A numerical oil spill model based on a hybrid method, Marine Pollution Bulletin, 58, pp726-734

Johansen O. (1987): DOOSIM - A new simulation model for oil spill management, OIL SPILL CONFERENCE, pp.529-532

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

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

NOAA(2012) : International Oil Spill Conference Short Courses documents

Reed M. and Gundlach E. (1989) : A Coastal Zone Oil Spill Model: Development and Sensitivity Studies, Oil & Chemical Pollution, 5, pp.411-449

Shen H. T., and Yapa P. D. (1988): Oil slick transport in rivers, J. HYDRAUL. ENG., pp.529-543

Sotillo M. G., Fanjul E. A., Castanedo S., Abascal A.J., Menendez J., Emelianov M., Olivella R., Garcı´a-Ladona E., Ruiz-Villarreal M., Conde J., Go´mez M., Conde P., Gutierrez A.D. and R. Medina (2008) : Towards an operational system for oil-spill forecast over Spanish waters: Initial developments and implementation test, Marine Pollution Bulletin, vol. 56, pp.686-703

Wang S. and Hwang L-S. (1974): Numerical simulation of oil slick transport in bays, Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, No.14, pp.2227-2244

Wang S. D., Shen Y. M. and Zheng Y. H. (2005) : Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas, Ocean Engineering, vol.32, pp.1556-1571

Wang S. D., Shen Y. M. Guo Y. K. and Tang J. (2008) : Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas, Ocean Engineering, vol35, pp.503-510

Zhao-chun WU (2010) : Simulation of the oil slick movement in tidal water-ways, Journal of Hydrodynamics, vol.22, No.1, pp.96-102

이봉길(2008)：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，pp.10-20. （韓国語）

記号表

A	：油層の水平方向断面積
C	：係数

C_o ：拡散濃度
C_w ：風係数
D_H ：油の渦拡散係数
K ：積分定数
L ：油の拡散スケール
M ：質量
N ：粒子i周辺の粒子の数
R ：近傍粒子検索半径
R_n ：0から1の一様乱数
$\mathbf{U}_b$ ：海岸線，構造物等境界の斥力による速度
$\mathbf{U}_{di}$ ：着目粒子の渦拡散速度
$\mathbf{U}_i$ ：着目粒子の移動速度
$\mathbf{U}_{oi}$ ：着目粒子位置の海流による移流速度
$\mathbf{U}_{si}$ ：着目粒子の油膜自身の特性による油拡散速度
$\mathbf{U}_{ti}$ ：着目粒子位置の潮汐流による移流速度
$\mathbf{U}_{wi}$ ：着目粒子位置の吹送流による移流速度
V ：油層の体積
V_i ：粒子体積
W_{10i} ：着目粒子位置の海上10mでの風速
W ：風速
X_i ：着目粒子の位置
Δt ：計算時間ステップ
g ：重力加速度
h ：油層厚
h_1 ：Fayの式から求まる油層厚判定値
i ：着目粒子
j ：着目粒子の周辺のある粒子
k_a ：重力と慣性力に関する実験との比較から求まる係数(k_a=1.14)
k_b ：重力と粘性力に関する実験との比較から求まる係数(k_b =1.45)
k_{br} ：境界における計算パラメータ
k_c ：粘性力と表面張力に関する実験との比較から求まる係数(k_b =2.30)
k_1 ：U_{si}を求める係数
k_2 ：U_{si}を求める係数
l ：油層の半径
n ：単位面積当たりの油粒子密度
r_{bi} ：油粒子と境界線分との距離
r_{b1} ：境界における計算パラメータ
r_{b2} ：境界における計算パラメータ
r_{ij} ：粒子i，j間の距離
r_o ：各領域の重心からの平均半径
r_{oi} ：各領域の重心から着目粒子までの距離
s ：境界における計算パラメータ
t ：時間
u_{sij} ：着目粒子iに対する粒子jの相対拡がり速度
x,y,z ：座標
δ ：水の境界層厚さ
θ ：コリオリ力による偏向角
μ_w ：水の粘性係数
ν_w ：水の動粘性係数
ρ_o ：油の密度
ρ_w ：水の密度
$\Delta\rho$ ：水と油の密度差
σ ：標準偏差
σ_x ：x方向標準偏差
σ_y ：y方向標準偏差
σ_o ：界面張力係数
τ_w ：水から油層面へのせん断力

付録 A.　韓国泰安沖付近の風況

本論文における泰安韓国沖油流出の再現計算では，風向風速のデータとして気象庁全球数値予報モデル GPV (GSM)を用いて，渦動粘性係数等モデルの評価を行っている．ここでは海上で観測された風向風速と，GPV と風向風速の比較を示す．なお，ここでの目的は GPV の計算が実際の風況の誤差を把握することであり，GPV の計算方法や計算精度に関する考察ではない．よってここでは観測との単純比較にとどめる．

風向風速と気温のデータは韓国気象庁のホームページよりダウンロードした（http://203.247.66.10/weather/observation/aws_table_popup.jsp）．場所は油流出地点から近い Ando, Gadaeam, Ongdo である(**写真-A.1**，**図-A.1** 参照)．これらの地点以外にも内陸に観測地点はあるものの，陸上と海上では風況が全く異なるといった状況が考えられるため，ここでは扱わない．なお，Ando，Ongdo は島であり，島の影響による風況の変化も考えられるが，ここではその点に関して特に解析は行っていない．

表-A.1 は観測地点における油流出時の風向風速をまとめたものである．Ando, Ongdo は 1 時間平均と 10 分平均，Gadaeam は 1 時間平均である．

表-A.2 は GPV を観測地点に合わせて線形補間し求めた風向風速である．**表-A.3** は観測値と GPV の平均風向風速の比較である．**図-A.2** は 1 時間ごとの GPV と観測値の風速の差をプロットしたもので，横軸が東西方向の風速差(GPV)-(観測値)，縦軸が南北方向の風速差(GPV)-(観測値)である．**表-A.2**, **表-A.3**, **図-A.2** より Ando 周辺において東成分，Ongdo 周辺において南東方向の吹送流成分が過大であった可能性がある．Gadaeam 周辺においては風向の差は大きくないものの，風速が過大であった可能性がある．

図-A.3 は GPV と観測値のベクトル図である．7 日，8 日の風速の高いとき，定性的に一致しているが，完全な一致とはいえず，風況予測の困難さがうかがえる結果である．

(a)Ando　観測機高さ：海抜 27m

(b)Gadaeam　観測機高さ：海抜 17m

(c)Ongdo　観測機高さ：海抜 59m

写真-A.1　風向風速観測施設の様子

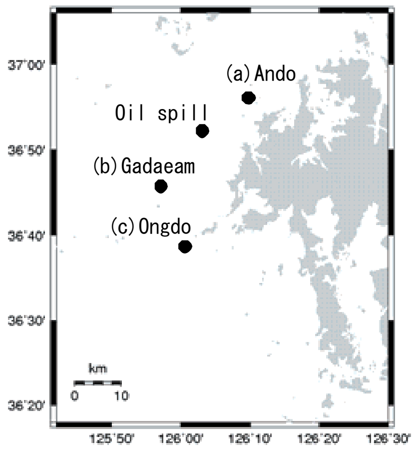


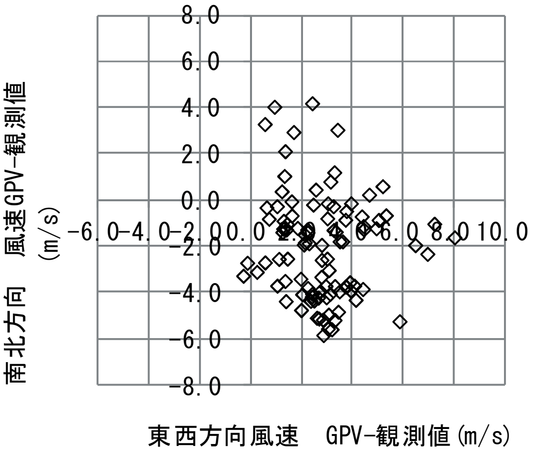
図-A.1 油流出地点と風向風速観測場所

表-A.2 風況観測地点での GPV の結果

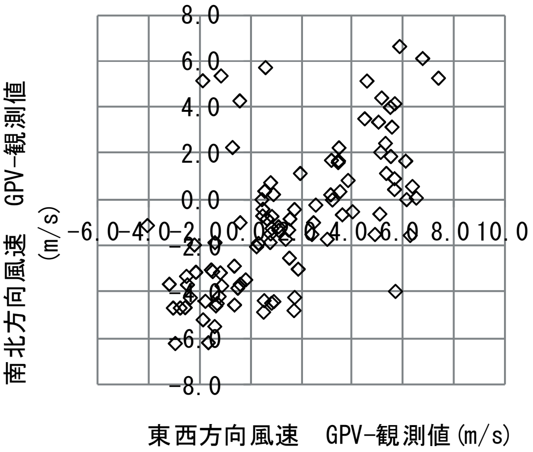
		Ando		Gadaeam		Ong-do	
日	時	風速	風向	風速	風向	風速	風向
7	3	11.8	292	12.9	296	12.7	297
7	9	9.5	305	11.2	305	11.1	305
7	15	8.4	325	9.7	326	9.5	326
7	21	8.2	314	9.1	319	8.9	320
8	3	7.4	316	8.3	315	8.1	315
8	9	7.1	322	8.2	318	8.0	316
8	15	6.9	328	7.9	327	7.9	327
8	21	6.3	324	7.3	325	7.1	326
9	3	3.7	323	4.3	317	4.2	319
9	9	0.8	167	2.6	269	2.8	265
9	15	4.0	296	6.1	290	6.0	287
9	21	4.7	299	5.1	300	4.7	300
10	3	2.7	325	3.5	314	3.3	313
10	9	3.2	39	2.6	359	2.1	335
10	15	3.6	42	2.8	29	2.0	7
11	9	0.4	256	0.5	225	0.9	184
11	21	0.8	98	1.2	102	1.4	97

表-A.3 観測値と GPV の平均風向風速の比較

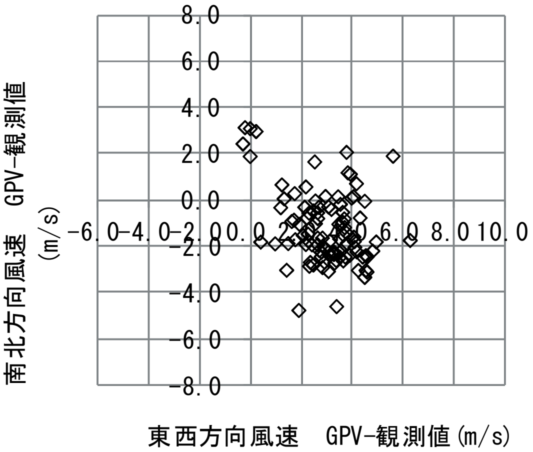
	Ando		Gadaeam		Ongdo	
	平均風向	平均風速	平均風向	平均風速	平均風向	平均風速
観測値	204	1.1	145	3.1	167	2.1
GPV	141	3.7	135	4.3	141	3.7



(a)Ando



(b)Gadaeam



(c)Ongdo

図-A.2 GPV と観測された風況のずれ(GPV)-(観測値)

表-A.1(1/3)　風向風速観測結果

2007 年 12 月 7，8 日

日	時	Ando					Gadaeam			Ongdo				
		気温	1時間平均風向	1時間平均風速	10分平均風向	10分平均風速	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	10分平均風向	10分平均風速
7	0:00	7.2	239.9	2.4	221.7	2.7	7.6	215	13.3	7.4	285.9	13.7	265.8	10.2
7	1:00	5.9	295.2	9.3	297.4	8.4	6.9	267	16.5	6.5	325.2	15.7	327.6	15.5
7	2:00	5.1	305.3	13.7	301.3	9.5	5.8	265	16.6	5.9	323.0	13.6	325.5	14.1
7	3:00	4.9	291.8	15.2	298.9	9.5	5.4	263	16.8	5.4	324.8	14.7	326.6	14.8
7	4:00	4.3	302.4	10.6	298.4	9.8	4.7	266	15.0	4.6	331.5	14.2	326.5	13.7
7	5:00	4.8	296.6	11.4	301.5	7.3	欠測			4.7	326.2	10.6	326.9	12.9
7	6:00	4.5	305.0	8.3	292.1	7.4	5.0	266	15.8	4.7	323.0	14.9	322.8	14.6
7	7:00	4.8	287.3	6.2	297.5	6.1	5.0	263	12.8	4.9	329.4	11.5	328.5	12.3
7	8:00	5.6	282.3	8.0	288.8	9.1	5.5	257	13.1	5.5	323.0	12.7	324.3	12.2
7	9:00	5.4	88.1	10.2	333.3	8.4	5.5	292	15.1	5.7	337.6	11.6	333.6	12.6
7	10:00	5.0	268.6	5.1	331.4	5.3	4.9	310	11.1	6.0	324.5	7.7	333.5	8.9
7	11:00	5.7	15.6	5.2	15.7	6.5	5.0	317	9.5	6.0	327.8	7.2	353.7	7.9
7	12:00	5.6	9.4	4.5	13.9	5.4	5.1	308	7.2	6.4	350.8	7.1	343.2	7.0
7	13:00	6.1	321.0	3.1	317.4	3.4	5.5	298	5.9	6.5	338.8	6.9	338.6	5.8
7	14:00	6.0	327.9	4.9	324.0	4.5	5.8	301	6.8	6.2	341.9	5.9	342.9	6.0
7	15:00	5.8	307.2	2.4	312.2	3.8	6.4	292	9.2	6.5	336.4	8.0	334.9	8.1
7	16:00	6.1	311.1	3.0	306.5	3.2	6.2	290	9.4	6.4	337.3	9.4	333.4	8.5
7	17:00	6.1	293.1	2.7	300.0	2.8	6.1	288	9.7	6.3	330.7	8.9	331.8	8.6
7	18:00	5.4	307.3	2.8	295.5	2.9	5.9	277	9.3	6.1	334.0	7.1	330.0	7.8
7	19:00	5.5	292.6	2.8	295.9	2.8	5.7	284	8.4	5.7	341.5	5.6	333.6	7.0
7	20:00	5.3	318.2	3.4	311.1	3.2	5.6	291	8.1	5.8	324.7	6.4	330.8	6.8
7	21:00	5.2	322.0	2.8	315.2	2.8	5.4	298	7.4	5.5	338.0	7.3	334.7	6.8
7	22:00	4.4	308.4	4.4	325.3	3.2	5.2	287	7.3	5.2	331.8	5.8	334.5	5.4
7	23:00	4.2	314.6	3.1	309.7	2.6	5.1	292	5.7	5.1	341.0	5.4	337.2	5.8
8	0:00	3.9	322.3	2.7	320.9	3.3	5.1	311	6.1	5.0	342.2	5.2	335.6	6.5
8	1:00	3.9	322.5	2.8	316.2	2.6	4.8	288	5.6	4.9	338.2	4.1	342.0	4.7
8	2:00	3.8	319.0	2.3	308.7	2.5	4.8	293	4.7	4.8	336.7	5.4	328.9	6.2
8	3:00	3.7	312.0	2.8	311.9	2.4	4.8	280	5.7	5.0	333.9	6.7	331.9	6.2
8	4:00	4.2	313.9	2.4	295.6	2.9	5.0	267	7.9	5.0	327.2	5.3	327.9	6.2
8	5:00	4.9	305.0	3.0	300.9	3.8	5.1	281	8.1	4.9	323.2	6.6	330.3	5.5
8	6:00	4.6	306.8	4.0	325.9	5.0	5.2	273	7.5	4.8	337.9	5.5	329.0	5.6
8	7:00	4.6	305.0	5.7	302.5	3.4	4.9	297	9.3	5.0	331.3	8.0	333.3	8.0
8	8:00	3.9	308.2	3.3	356.5	5.4	4.6	288	9.0	4.8	339.3	7.7	334.7	8.1
8	9:00	3.8	316.5	4.9	306.5	3.8	4.3	301	8.5	4.6	335.8	8.4	336.2	7.6
8	10:00	4.3	314.7	5.1	313.9	4.1	4.1	312	8.1	4.6	343.2	3.9	336.8	6.2
8	11:00	5.6	291.2	1.9	309.4	3.2	3.9	295	7.7	4.8	336.4	8.5	339.1	7.5
8	12:00	5.7	295.5	2.6	325.5	3.8	4.0	294	8.2	5.8	328.6	8.1	342.8	7.7
8	13:00	5.6	312.1	2.4	304.8	3.3	4.3	289	8.9	7.1	333.0	7.1	333.2	7.3
8	14:00	5.3	331.2	6.0	315.2	3.2	4.7	288	7.7	6.9	338.7	8.6	337.6	7.8
8	15:00	5.2	305.4	1.4	318.3	2.4	4.7	302	6.9	5.7	334.7	8.2	336.9	7.1
8	16:00	4.6	320.2	2.3	324.0	3.3	4.5	299	5.8	5.4	346.8	5.2	347.5	4.5
8	17:00	4.5	320.4	2.3	316.8	2.8	4.7	300	5.7	5.0	343.5	6.4	339.4	5.9
8	18:00	4.7	309.9	2.5	306.4	2.8	5.1	299	7.0	4.9	347.5	5.3	349.2	5.1
8	19:00	4.8	292.7	2.9	335.9	3.8	5.1	285	6.1	4.9	347.3	5.0	338.6	4.9
8	20:00	4.3	9.9	4.8	1.4	3.0	5.3	285	6.0	4.9	333.3	4.6	334.9	4.9
8	21:00	4.3	343.6	3.8	355.0	3.1	5.5	292	6.0	5.4	334.9	5.6	335.3	5.6
8	22:00	4.0	2.6	3.4	348.0	3.0	5.5	299	5.5	5.6	354.0	3.8	342.7	4.6
8	23:00	4.0	5.9	3.0	358.1	2.5	5.6	281	6.7	5.5	336.6	5.5	341.4	4.8

表-A.1(2/3)　風向風速観測結果

2007 年 12 月 9，10 日

		Ando					Gadaeam			Ongdo				
日	時	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	10分平均風向	10分平均風速	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	10分平均風向	10分平均風速
9	0:00	4.1	0.9	1.7	353.5	1.8	5.4	309	4.3	5.4	344.2	5.3	340.4	5.6
9	1:00	4.1	341.7	2.2	359.9	1.9	5.3	321	3.6	5.4	327.6	2.1	329.5	3.1
9	2:00	4.0	342.6	2.5	351.2	2.5	5.3	320	3.2	5.1	4.4	0.7	351.1	2.1
9	3:00	4.1	327.2	2.1	346.5	2.1	5.2	299	2.5	5.1	353.2	1.3	343.4	2.2
9	4:00	3.9	352.3	1.9	327.9	1.3	5.3	308	3.1	4.9	341.8	2.5	341.5	2.2
9	5:00	4.0	354.0	2.4	348.7	2.2	5.2	305	2.9	5.0	347.6	2.1	346.5	1.4
9	6:00	4.2	331.5	1.0	320.6	1.6	5.2	314	2.6	4.7	137.2	1.7	126.8	1.1
9	7:00	3.9	124.6	2.1	58.1	1.4	5.3	303	2.6	4.8	118.4	1.8	134.5	1.8
9	8:00	3.6	127.5	2.9	122.0	3.1	5.4	340	1.8	4.6	147.4	2.3	135.4	2.1
9	9:00	3.8	130.3	3.6	127.6	3.6	5.5	182	1.7	5.1	154.5	0.7	151.5	0.3
9	10:00	4.6	144.2	3.2	136.0	2.7	5.5	122	0.8	6.1	152.1	1.0	145.6	1.3
9	11:00	6.9	166.9	1.3	164.3	1.1	5.9	123	1.8	8.8	200.3	0.7	191.9	0.4
9	12:00	10.0	208.0	0.7	227.7	0.8	6.0	320	1.3	10.4	欠測		40.5	0.3
9	13:00	9.4	271.6	1.2	269.8	1.2	6.2	262	3.4	10.3	320.4	4.6	326.6	2.9
9	14:00	8.4	272.6	1.8	296.6	1.5	6.3	282	4.6	9.7	332.1	3.1	336.5	4.3
9	15:00	7.4	300.4	3.4	298.3	3.7	6.6	269	5.7	9.7	327.0	4.4	331.1	4.6
9	16:00	6.5	289.4	3.6	299.9	3.1	6.7	280	4.9	8.2	336.2	5.5	329.7	4.1
9	17:00	6.1	323.6	2.5	315.2	1.7	6.6	286	5.0	7.1	336.0	4.4	340.6	4.3
9	18:00	5.7	326.4	1.7	319.3	1.4	6.4	280	4.5	6.1	335.7	3.0	339.0	3.9
9	19:00	5.7	321.4	1.2	351.3	2.0	6.2	287	3.6	5.8	355.6	2.7	345.1	2.8
9	20:00	5.6	23.0	3.5	18.2	3.5	6.1	318	3.1	5.6	352.5	3.1	348.3	2.8
9	21:00	5.2	345.9	1.7	4.8	2.2	6.0	309	2.5	5.5	345.8	2.4	343.8	2.5
9	22:00	5.3	21.9	3.1	22.8	2.7	6.1	343	3.0	5.4	7.2	1.0	10.8	0.9
9	23:00	5.2	51.2	1.8	33.1	1.9	6.0	11	2.1	5.5	15.2	1.2	19.6	1.1
10	0:00	5.0	28.7	2.3	35.1	2.9	5.9	4	3.0	5.3	0.0	0.0	84.8	0.5
10	1:00	4.9	17.7	2.5	25.3	1.8	5.7	43	4.2	4.8	95.2	1.2	100.3	1.2
10	2:00	4.7	44.2	3.3	41.5	2.9	5.5	42	4.8	4.8	52.6	1.3	58.2	1.4
10	3:00	4.8	28.5	3.9	35.3	3.5	5.5	57	3.5	4.6	344.0	0.7	34.4	0.9
10	4:00	4.6	34.5	4.8	41.5	5.1	5.0	60	5.2	4.3	121.6	1.1	84.2	0.8
10	5:00	4.2	122.5	3.8	113.9	3.9	4.7	48	6.6	4.0	91.5	2.9	91.6	2.4
10	6:00	3.7	120.1	4.3	114.0	4.2	4.4	60	6.5	3.9	95.3	1.8	87.0	1.8
10	7:00	3.6	113.6	0.9	108.9	3.4	4.3	52	6.3	4.1	89.2	1.9	89.3	1.5
10	8:00	3.6	116.7	3.2	106.7	4.2	4.1	50	7.3	4.1	86.3	1.6	81.6	2.0
10	9:00	3.3	103.6	5.9	107.1	6.3	4.1	45	8.6	4.6	88.8	2.2	92.6	2.9
10	10:00	3.8	109.6	5.8	110.0	6.2	4.3	50	7.6	5.2	103.3	2.7	105.6	2.4
10	11:00	4.2	111.2	2.3	106.5	2.7	4.5	44	6.1	5.6	77.8	1.6	95.5	1.5
10	12:00	4.3	102.3	2.9	95.9	2.0	4.7	41	8.5	5.8	82.1	0.8	88.6	0.9
10	13:00	4.8	104.1	4.3	105.8	4.6	5.1	43	6.9	7.5	85.3	1.7	98.1	0.9
10	14:00	4.8	109.8	5.9	107.8	5.9	5.8	48	6.6	7.6	125.8	2.3	133.6	1.6
10	15:00	5.3	115.9	6.7	121.3	5.9	6.7	81	4.7	7.0	142.6	4.5	135.8	3.9
10	16:00	6.3	112.2	9.5	115.5	9.0	7.1	75	8.2	7.2	131.8	5.8	126.0	6.0
10	17:00	6.3	103.7	4.7	104.9	5.1	7.8	113	7.1	7.6	168.5	0.8	168.6	0.8
10	18:00	5.7	104.7	3.4	107.0	3.5	8.1	96	6.7	7.5	138.9	3.5	131.3	3.1
10	19:00	5.8	25.6	3.5	63.1	3.4	8.2	50	6.3	7.4	132.3	4.4	126.6	4.1
10	20:00	5.5	104.5	5.1	110.7	5.7	7.3	49	6.4	7.4	115.4	2.3	99.9	1.8
10	21:00	6.0	87.2	1.5	99.6	2.1	7.5	44	5.7	6.5	122.7	3.7	127.1	2.6
10	22:00	5.1	103.9	4.9	109.1	6.6	6.4	35	6.0	6.6	81.0	1.3	80.2	1.8
10	23:00	5.5	102.6	7.2	72.5	4.3	5.6	37	8.2	5.4	148.8	0.6	63.0	1.5

表-A.1(3/3)　風向風速観測結果

2007 年 12 月 11 日

		Ando					Gadaeam			Ongdo				
日	時	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	10分平均風向	10分平均風速	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	気温	1時間平均風向	1時間平均風速	10分平均風向	10分平均風速
11	0:00	6.0	107.1	4.0	106.1	4.9	4.9	45	8.5	4.7	98.2	3.2	101.4	3.1
11	1:00	6.0	103.8	2.7	91.7	2.3	4.6	53	8.5	4.5	112.3	3.2	106.8	2.7
11	2:00	5.2	111.7	6.9	113.2	6.9	4.7	52	6.4	4.5	121.5	2.8	108.5	2.6
11	3:00	4.9	104.7	5.0	110.3	5.4	4.6	66	5.2	5.4	134.6	4.4	137.4	4.3
11	4:00	5.2	121.6	3.5	115.4	3.1	5.5	83	3.3	5.7	148.9	1.5	151.7	2.1
11	5:00	5.4	105.3	1.1	109.2	2.0	6.1	63	3.0	6.2	109.1	1.7	127.2	2.2
11	6:00	5.6	39.2	1.3	43.8	1.3	6.5	30	0.4	6.2	96.4	1.1	92.0	0.9
11	7:00	5.9	44.7	4.7	38.5	4.1	6.7	327	2.4	6.4	358.2	2.8	352.8	2.4
11	8:00	5.8	25.5	5.2	32.4	5.1	7.2	348	4.3	6.9	350.1	3.0	345.1	3.0
11	9:00	6.1	24.3	3.6	22.7	4.5	7.0	3	5.8	7.2	354.1	1.3	353.2	2.2
11	10:00	6.2	9.1	4.6	16.7	4.2	7.0	345	5.6	7.5	350.6	2.1	3.7	1.9
11	11:00	7.0	6.3	3.7	7.7	4.5	7.0	338	5.6	8.2	3.5	3.0	1.2	2.5
11	12:00	7.2	11.1	4.5	8.0	4.6	7.0	328	6.2	8.9	333.0	5.0	358.1	3.6
11	13:00	7.5	19.0	3.6	7.4	3.6	7.1	324	6.9	8.8	3.8	2.1	9.5	3.8
11	14:00	7.2	356.8	3.0	8.8	4.4	6.8	320	6.3	8.2	359.0	3.7	357.0	4.1
11	15:00	7.4	343.3	2.4	347.2	2.3	6.7	316	6.3	8.3	346.6	5.4	3.2	4.0
11	16:00	6.7	2.5	4.9	352.5	3.9	6.6	327	5.9	7.9	12.7	4.1	14.3	3.3
11	17:00	6.7	343.2	2.6	358.5	3.3	6.6	322	5.6	6.8	20.1	3.1	8.2	4.2
11	18:00	6.8	10.9	5.6	11.9	5.6	6.8	347	6.3	6.6	4.5	1.9	5.7	2.4
11	19:00	7.0	10.2	4.5	7.7	4.7	7.1	357	5.3	6.8	338.7	1.4	7.9	2.0
11	20:00	7.5	15.8	6.6	14.8	6.2	7.4	1	6.1	7.0	14.7	1.8	14.2	1.9
11	21:00	7.1	20.7	4.6	15.8	5.1	7.7	4	5.0	7.1	0.9	1.2	15.1	2.0
11	22:00	7.1	20.3	5.3	19.1	5.1	7.7	6	5.2	7.3	11.4	1.5	20.4	1.8
11	23:00	7.2	18.6	4.4	13.6	4.2	7.8	5	4.3	7.1	43.5	1.2	29.2	1.3

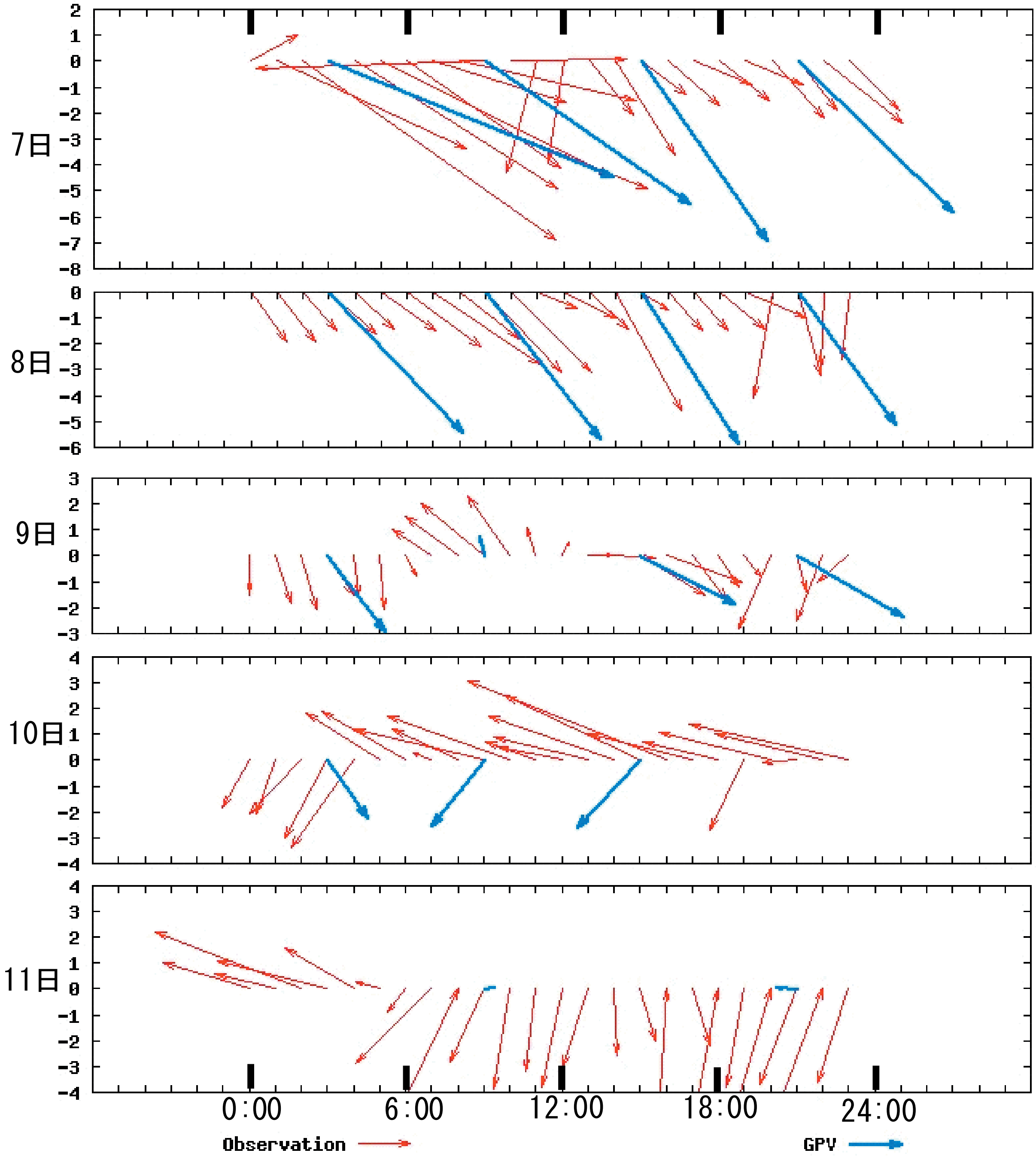


図-A.3　風況に関する観測値と計算値のベクトル図　(a)Ando

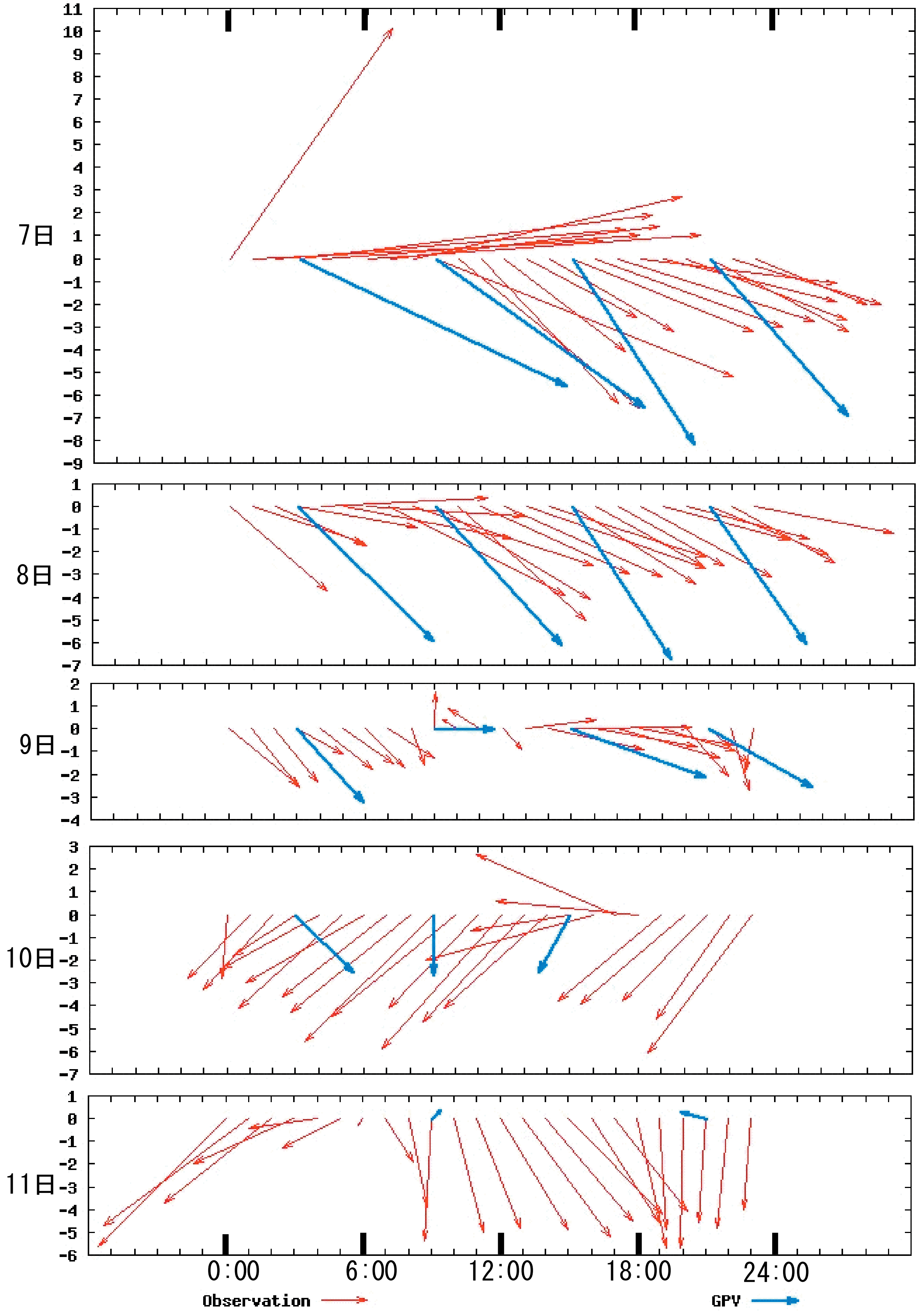


図-A.3　風況に関する観測値と計算値のベクトル図　(b)Gadaeam

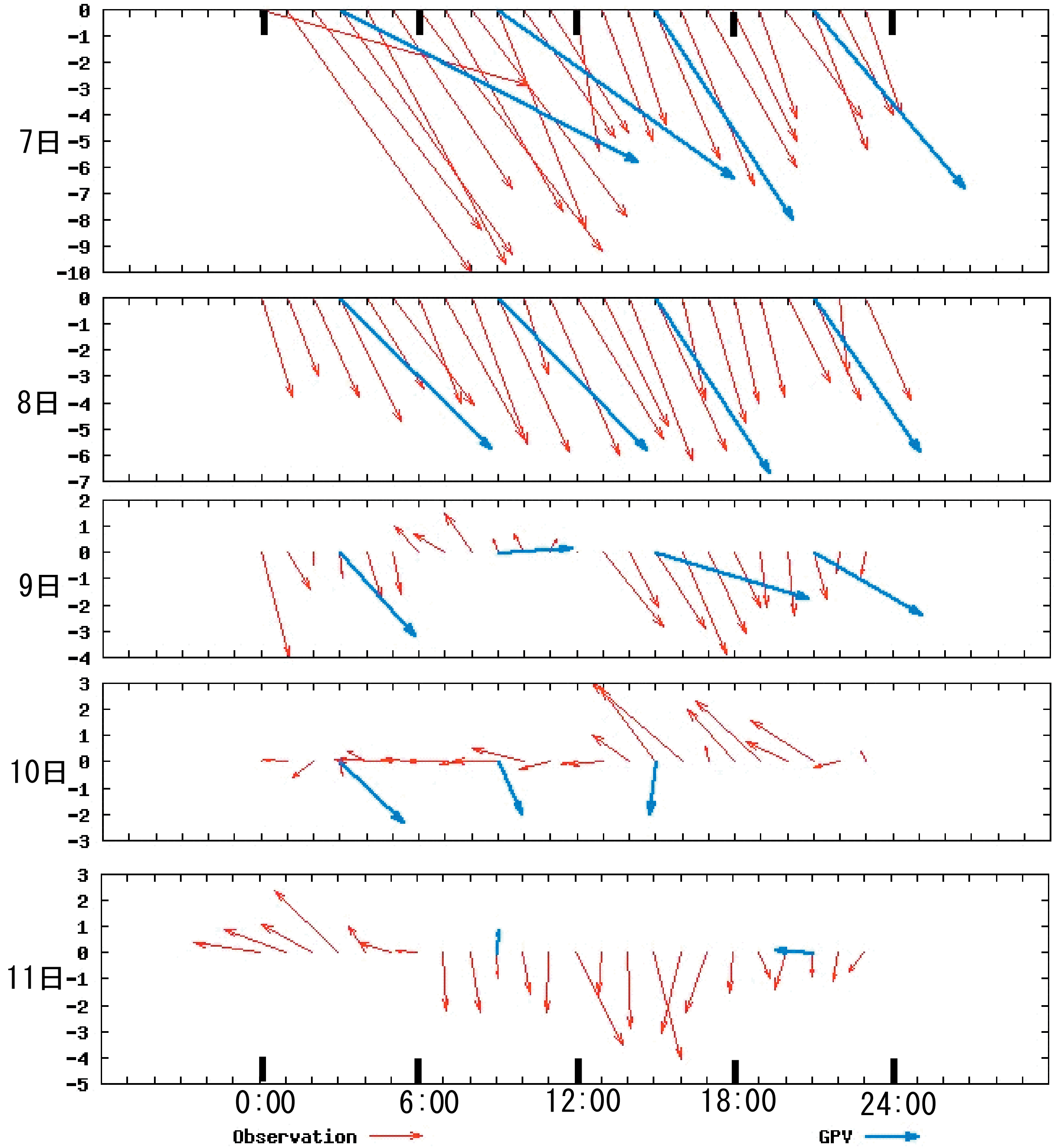


図-A.3　風況に関する観測値と計算値のベクトル図　(c)Ongdo

港湾空港技術研究所資料　No.1255

２０１２．９

編集兼発行人　独立行政法人港湾空港技術研究所

発　行　所　独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬３丁目１番１号
TEL. 046(844)5040　URL. http://www.pari.go.jp/

印　刷　所　株式会社シーケン

Copyright ©（2012）by PARI
All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI
　この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

古紙配合率70%再生紙を使用しています