

薄い漂流物を用いた漂流実験と 漂流推定方法の検討

DRIFT EXPERIMENT USING THIN FLOATING MAT AND STUDY TO PREDICT DRIFT

松崎義孝¹・吉江宗生²・藤田勇³・竹崎健二⁴

Yoshitaka MATSUZAKI, Munuo YOSHIE, Isamu FUJITA and Kenji TAKEZAKI

¹正会員 修(工) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 博(工) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴国土交通省 関東地方整備局 京浜港湾事務所 (〒220-0012 神奈川県横浜市西区みなとみらい6-3-7)

Spilled oil drifts with surface current in the ocean. Buoys have been used for drift experiments to predict oil slick drift and to check drift simulation results. Buoy drifts with resistance from sea water and wind directly, but oil drifts with little resistance. So, the drifting characteristic of real oil is different from buoy.

In this study, first, thin floating mat was compared to spilled oil about drift to wind current in the tank. As a result, drift characteristic of thin floating mat was the same as rubber. Second, drift experiments were carried out using thin floating mat in the real sea, and position of floating mat, current condition and wind condition were measured. Drift velocity of floating mat is nearly equal to 3% of the wind velocity at 10m above the sea surface, and drift direction is shifted to the right of the wind direction.

Key Words : Oil spill, Surface current, Buoy, Floating mat, Wind, Current, Observation

1. 序論

油流出が発生した際、沿岸への油の漂着位置の予測、海上での油回収作業位置の選定などに数値シミュレーションが利用されているが、実際には油の漂流を精度よく予測できてはいない。2007年12月に韓国で発生したHebei Spirit号油流出事故の際は、冬期であったことから、低い気温の影響で油はさほど拡がらず、接岸までの猶予時間が24～36時間という予測もあった。しかしその日は暖かく、波浪、不規則風の影響により予測に反して短時間で沿岸に漂着し、目撃証言には事故後約13時間で接岸していたとするものもある^{1),2)}。油漂流シミュレーションが有効に機能していれば、油回収体制の適切な初期対応が可能となり、被害の軽減を図ることができた可能性がある。よって精度の高い漂流シミュレーションが求められている。

海上に流出した油は時間経過によって油層厚が変化し、油層厚により移流の様子が異なるが、薄く拡がった流出油はごく表面の流れにのって移動する。漂流シミュレーションの精度検証にはGPSロガーを装備した漂流ブイを用いた漂流実験データがよく用

いられている³⁾が、漂流ブイは水面上部分に風圧がかかること、水中部の抵抗が大きいことより、表面流を直接計測しているとは言えず⁴⁾、実際シミュレーションの精度検証には利用しにくい。これは、従来のGPSロガーは大型のものが多く、漂流実験にはブイを用いるしかなかったからだ。近年は小型で軽量のGPSロガーがあり、比重が油と等しい薄い漂流物に装備することで、表面流を計測できると考えられる。

そこで本研究では、流出油の漂流状況によく似ていると考えられる、薄い漂流物を選定し、室内実験で油と漂流物の移動特性を比較し、漂流物が油と同じ移動をするのか検証を行った。また、それを用いた実海域での漂流実験を行い、その移動、流向流速及び風向風速の計測を行い、漂流油の移動特性の把握を目的とする。

2. 漂流物と油の漂流特性の比較検討

海面に拡がった流出油は表層の海水に追従すると考えられる。従来行われている漂流実験では漂流物

としてブイを用いているケースがほとんどである。ブイを用いると水面上、水面下の部分の抵抗を考慮する必要があり、漂流予測をする際は風圧係数を考慮しているが、これは実際の流出油を表現しているとは言い難い。よってわれわれは実海域漂流実験において、漂流物として流出油により近いと考えられるゴムマットを用いることとした。

ゴムと油の漂流特性を比較するため、室内水槽において吹送実験を行った。実験は図-1に示す油回収実海域再現水槽(L20m×B6.0m×H2.5)を用いた。本水槽は平面回流式であるから、1次元風洞水槽で発生する反流はないと考えられる。送風機(直径 600mm)を中央に2基設置し、風速 10m/s で送風し、ゴムマットと重油の移動させた。計測区間は送風機から 9～13m の 4m とし、移動時間をストップウォッチで計測し、移動速度を求めた。風速の計測にはデジタル風速風量計を用い、1秒ごとにデータを記録し、1分程度の平均値を風速とした。図-2は風速場の計測結果であり、横軸が風速、縦軸が水槽の横断方向の位置である。本水槽は風洞ではないため、風下に行くにしたがい風が拡散してしまったが、水路中央であれば計測区間で風速をほぼ一定に保つことができた。

ゴムマットはネオプレンゴム(硬度 45)とCR ゴムスポンジを接着し、流出油の物性とほぼ同じ比重 0.85 と加工し、厚さ 2mm および 3mm で直径 24cm の円形とした。油に関して、油の粘度が高く容器に付着してしまうことから、油の面積、体積(質量)、油層厚を定量的に多数のケースを計測するのが困難であった。本実験の主目的は水面に浮かぶ油層の吹送流場における移動特性を把握することであり、吹送流の移動に関係のある油層厚を正確に知る必要があった。そこで今回はゴムマットと同じ直径 24cm の円形のポリエチレンシートにエマルジョン化した重油を付着させ質量を計測することで、油層厚を逆算して求めた。この方法では油層の変形、拡散を考慮できないが、エマルジョン化した油は吹送流場でもさほど変形しなかったため、層厚と移動速度の関係を調べることを優先させた。

ここで風速と吹送流の関係を整理しておく。風速と水面の吹送流速の関係は以下のように述べられる。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つり合いより、

$$\tau = \rho_a C_d W^2 = \rho_w C'_d U^2 \quad (1)$$

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_d 、 C'_d は海面、大気の抵抗係数、 W 、 U はそれぞれ大気、水の速度である。 C_d と C'_d が等しいと仮定すると、

$$U = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} W \approx 0.035W \quad (2)$$

となり、風速の 3.5% の流速をもつ吹送流が発生することがわかる。

図-3 は油とゴムマットの移動速度の比較で、横軸がゴムマット及び油の層厚、縦軸が風速に対する油

及びゴムマットの移動速度である。ここで風速は流路中央における流れ方向の平均値 4.8m/s を用いた。油層は吹送流に追従すると考えられるが、ゴムマットの移動も油層と同様であることがわかった。よって、流出油の漂流特性に近いゴムマットを用いて漂流実験を行うことで、流出油の漂流予測に利用できることが示された。

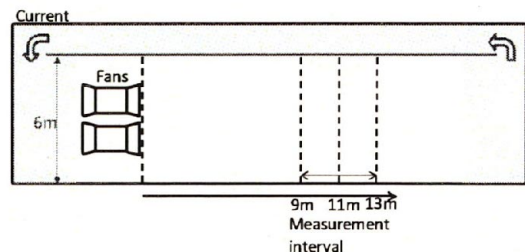


図-1 水槽平面図の概略と測定位置

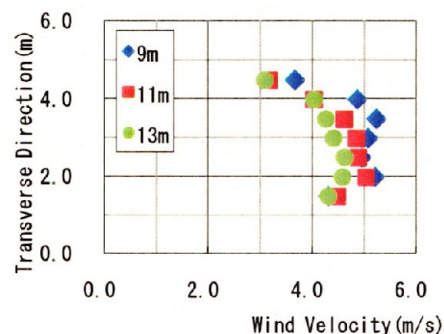


図-2 風速場

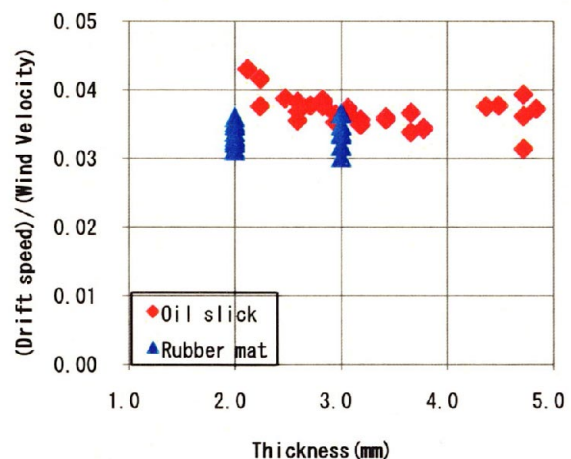


図-3 油とゴムマットの移動速度の比較

3. 漂流実験

(1) 実験方法

実験は2008年10月30日に図-4の京都府舞鶴市若狭

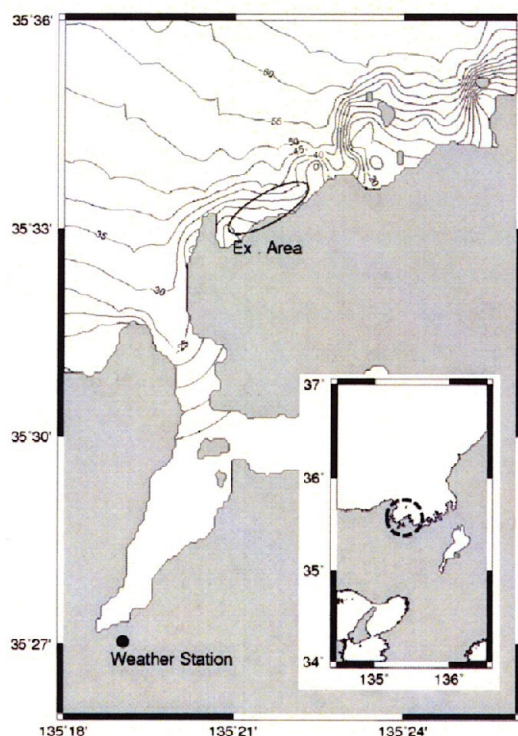


図-4 実験海域と舞鶴海洋気象台の位置

湾付近の海域で行った。漂流物には写真-1のように1m×1m×3mmのゴムマットに、小型GPS（Wintec WBT-201, 60×38×16mm, 41g）と視認性確保のための布を張り付けたものを使用した。計測方法について図-5に示す。漂流物を観測船で追跡し、漂流物に装着した小型GPSで漂流物の位置を記録した。また観測船の船側にADCP（ADCP Workhorse 1200kHz）、水面より4mの位置に超音波式風向風速計（WindSonic, PGWS-100）を配置し、流れと風を計測した。流向、風向は船に設置したGPSコンパス（Hemisphere V100）で船首の方位を計測して補正した。ADCPは水面より1.5mの位置から0.25mきざみで80層計測するよう設定した。今回使用したADCPは水深40m程度を超えると対地速度の計測（ボトムトラッキング）ができず、船の相対速度を計測できないため、その場合は漂流物を回収し、水深の浅い海域で漂流物を再投入した。計測時刻は9:50 - 11:20 (case1), 12:00 - 14:00 (case2), 14:40 - 16:00 (case3)の計3ケースである。

(2) 実験結果

実験結果について説明する。図-6は船上で計測した風向風速と舞鶴海洋気象台で観測した風向風速で、横軸が時刻を表し、ベクトルの大きさと向きがそれぞれ風速と風向を表している。船上で風向風速を計測できている時間は、漂流物を追跡している時間と一致している。この図より、地上と海上との違いは考慮しなければならないが、実験領域から12km程度離れるだけで、風況は大きく異なるということがよ

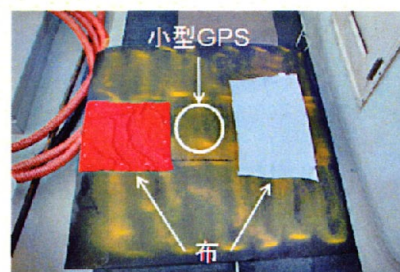


写真-1 漂流物

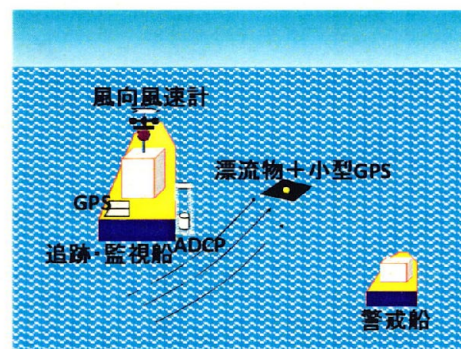


図-5 計測方法の模式図

くわかる。

図-7は漂流物、流れ、風についての計測結果と、図-4にある舞鶴海洋気象台（標高2m）での風の計測値（地上高さ41.4m）である。横軸が時刻を表し、ベクトルの大きさと向きがそれぞれ速度と方向を表している。漂流物の移動速度、方向は10分ごとの位置の平均値を求め、それを時間で差分して求めた。風に関して、船上は計測値の10分平均値、気象台はホームページより用いた。ここで、風による漂流物の移動速度は海面から10mにおける風速の約3%であるといわれている。風速計は海面より4mに設置したので、風の鉛直分布の1/7乗則を用いて10mの風速に変換した⁵⁾ものに3%をかけた値をベクトル表示した。よって風に関してはベクトルの大きさが漂流物の移動量予測値となっている。流れはADCPで計測したもののうち、一番表層に近い水深1.5mのものを表示した。

図-8は漂流物の移動経路と風況、流況による予測を実験領域に描いた図であり、図-7の流速の積分値といえる。

図-7, 8より、以下のことがいえる。まず漂流物の移動と船上で計測した風を比較すると、風がある程度の大きさをもつ場合 (Case1, Case2), 漂流物の移動速度の絶対値は海上10mでの風の3%とおおよそ一致し、風向に対して右側に偏向することがわかる。一方 Case3のように風速が小さい場合には、漂流に対する風の影響は小さいといえる。また、どのCaseにおいても、舞鶴海洋気象台における風向風速の観測値で

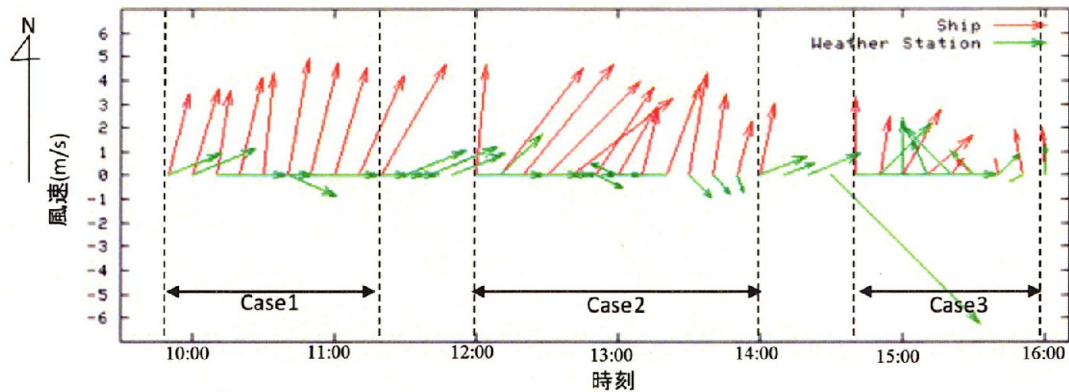


図-6 船上と舞鶴海洋気象台の風向風速

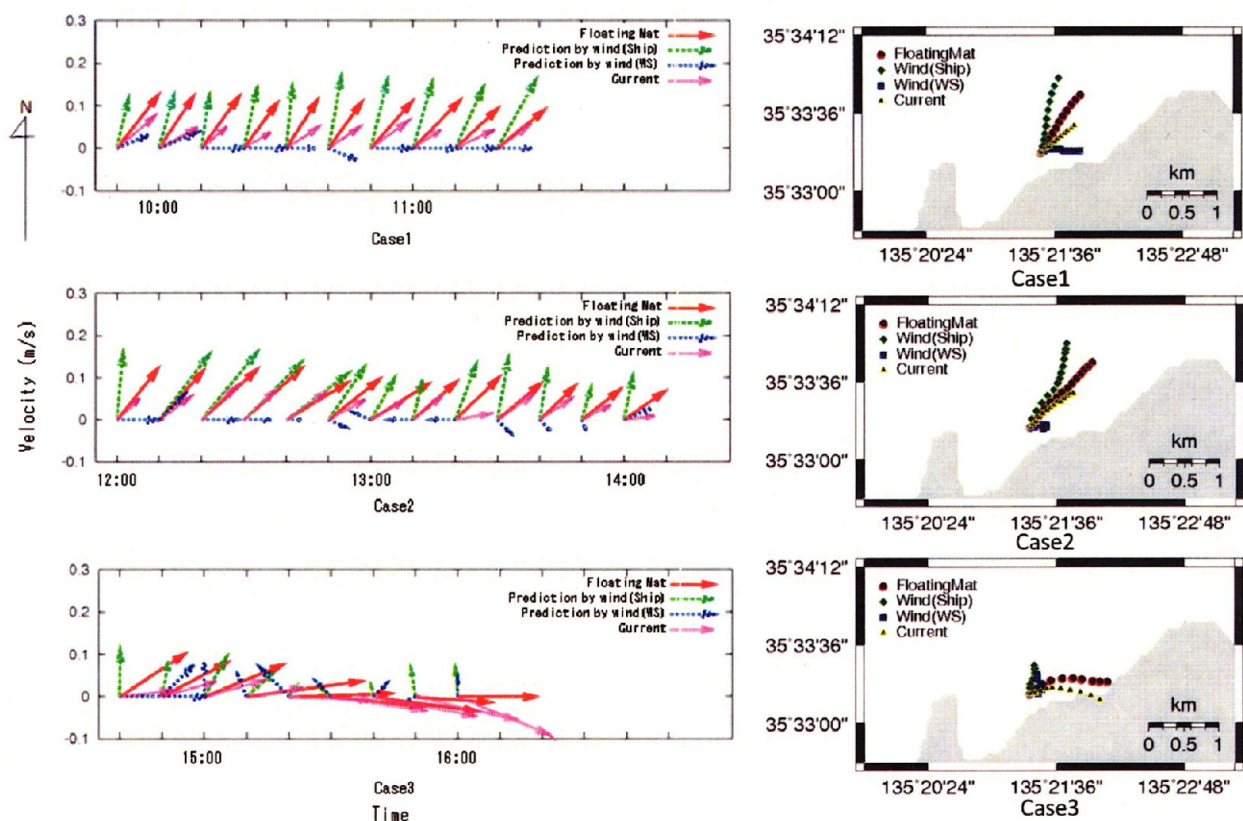


図-7 漂流物の移動速度と風況、流況の比較

図-8 漂流物の漂流経路と風況、流況による予測

は漂流物の移動を予測することはできなかった。このことから、油の漂流予測に現場の風況観測値を用いる場合は、より現場に近いデータが必要であることがわかった。

漂流物と流れを比較すると、流速の計測位置が水深 1.5m であるので、表層流に追従すると考えられる漂流物の漂流を完全にはとらえることができないことがわかった。Case3 のように風の影響が少ない場合、水深 1.5m の流速でもある程度漂流物の移動と一致することもある。一方 Case1 のように安定した風況のとき、漂流物は 1.5m の流れに対して左側に流れ

る。

これらの結果から、風応力が作用する場合の漂流予測にはコリオリ力による偏向を十分に考慮する必要があると考えられる。以下で風と偏向の関係を考察する。

(3) コリオリ力による偏向の検証

図-9は10:20(Case1)の流れ、風、漂流物の移動の図で、東西、南北方向は速度、鉛直方向は水深を表している。これを見ると水深6m付近で流向が北東から南西へ逆転している。流れが逆転している要因と

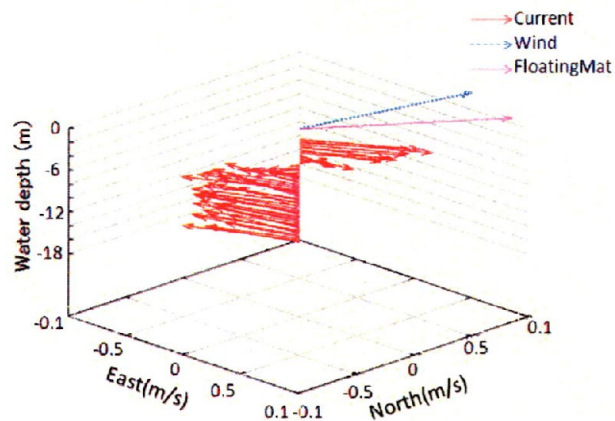


図-9 流れ，風，漂流物の移動(10:20)

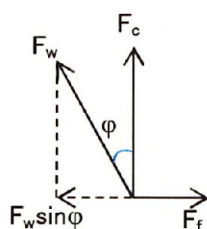


図-10 水面近傍の流体塊にかかる力の分布

F_c : 流体塊(運動量)
 F_f : コリオリ力
 F_w : 風応力

して風が考えられるため，以下の検討を行った．

風によって単位面積の流体塊にかかる力を F_w とすると，

$$F_w = \rho_a C_d W^2 \quad (3)$$

また，単位面積の流体塊の運動量を F_c とすると，

$$F_c = \rho_w \int_{z=D}^{z=0} U dz \quad (4)$$

と表すことができる．ここで， D は流速の逆転層までの深さである．この流体塊へ作用するコリオリ力を F_f とすると，

$$F_f = f F_c \quad (5)$$

である．ここで， f はコリオリパラメータである．以上の関係より，図-10のように力のつり合いが表われ，以下の式が成り立つ．

$$F_f = F_w \sin(\phi) \quad (6)$$

そこで(6)式を用いて風向に対する流体塊の偏向角を求め，それと風向に対する流体塊の偏向角を比較することで，コリオリ力の影響を検討する．

海面の抵抗係数は本多・光易の実験式⁶⁾である，

$$C_d = (1.29 - 0.024W) \times 10^{-3} \quad W < 8 \text{ m/s} \quad (7)$$

を用いた． D は流向がおおよそ逆転している深さまでとし，他の係数は定数として扱い， $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$ ， $f = 8.44 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ である．

表-1 コリオリ力の検討

	コリオリ力からの推定偏向	風向に対する流体塊の偏向	風速(m/s)
9:50	-	45.9	3.55
10:00	88.5	47.9	3.83
10:10	57.3	51.3	3.66
10:20	38.1	49.5	4.20
10:30	36.1	59.7	4.34
10:40	36.2	65.2	5.05
10:50	55.6	59.4	4.85
11:00	46.8	53.9	4.74
11:10	54.8	48.4	4.63
11:20	46.6	51.1	5.41
12:00	36.9	47.5	4.68
12:10	28.2	18.8	5.74
12:20	20.5	12.4	6.03
12:30	24.7	23.2	5.62
12:40	43.4	8.5	5.38
12:50	56.7	34.9	4.47
13:00	-	38.3	3.35
13:10	-	52.2	2.88
13:20	81.2	61.8	4.13
13:30	-	72.9	4.39
13:40	-	80.8	3.50
13:50	-	78.8	2.35
14:00	-	86.6	3.12
14:40	-	78.3	3.30
14:50	-	70.6	2.51
15:00	-	55.5	3.16
15:10	-	34.3	2.53
15:20	-	53.8	0.87
15:30	-	135.7	0.99
15:40	-	97.9	0.70
15:50	-	91.1	2.00
16:00	-	92.0	2.01

表-1は(6)式から推定した偏向量と，風向に対する流速の逆転層までの流体塊の偏向量の比較，およびその時の風速である．表のコリオリ力の推定偏向において-の表示箇所は， $F_w \sin(\phi)$ より F_f が大きいとき，つまり風速の小さいときである．表より，数度の精度でとらえているわけではないが，風速の大きいときはコリオリ力からの推定偏向と風向に対する流体塊の偏向が近い値となり，流体塊および漂流物の偏向がコリオリ力によってなされているといえる．

4. 結論

本実験での主要な結論をまとめると以下のようになる．

- ・ゴムマットのような薄い漂流物を用いることで，漂流油の挙動により近い漂流実験が可能となった．
- ・風が強い場合，海上10mでの風速の3%で漂流油の移動をある程度予測できる．その際はコリオリ力による偏向を考慮する必要がある．
- ・現地データを漂流予測に用いる場合，観測場所は

漂流現場近傍である必要がある。

本研究で得られた知見を現在開発中の漂流油予測シミュレーションに生かす予定である。特に風向に対する偏向について、どのような条件でどの程度偏向するか定量的につかめていないことから、今後実験等で明らかにしていきたい。また、現地でのリアルタイムの現地データの収集の必要性が再認識された。よって海象観測データの利用(NOWPHAS, 海洋短波レーダー等), 当研究チームで開発中の流出油追跡ブイ⁷⁾の利用や、今回の薄い漂流物に位置情報発信機を装備することでのリアルタイムでの移動情報の把握することなどから、現地データを利用した漂流油予測システムの構築を行う予定である。

参考文献

- 1) Clearing Oil Contamination to Take at Least Two Months ,
THE KOREA TIMES, 2007
- 2) 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, 2008

- 3) 石油連盟: 流出油の拡散・漂流予測モデルに関する調査研究報告書, 1997
- 4) 藤田勇, 吉江宗生, 竹崎健二, 加藤直三, 千賀秀敬, 奥山悦郎: 浮流重油自動追跡ブイの自然流下特性実験, 第62回土木学会年次学術講演会講演原稿, 2007
- 5) 福島繁樹: 漂流予測の高度化のための基礎調査～風圧流と偏角について～海上保安庁海洋情報部技報, Vol. 24, pp. 107-111, 2006
- 6) 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, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93, 1980
- 7) Muneo Yoshie, Yoshitaka Matsuzaki, Isamu Fujita, Kenji Takezaki, Toshinari Tanaka, Naomi Kato, Hidetaka Senga: At-sea Trial Test of an Autonomous Buoy which Tracks Drifting Oil and Observation of In-Situ Data Tracking Drifting Markers on the Sea for Predicting Location of the Spilled Heavy Oil, The Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2009(Under posting)