

重油・漂流物を用いた室内実験による 漂流特性の研究

STUDY ON DRIFT CHARACTERISTICS IN LABORATORY EXPERIMENT USING HEAVY OIL AND FLOATING OBJECTS

松崎義孝¹・藤田勇²・竹崎健二³

Yoshitaka MATSUZAKI, 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 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)

³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 and floating objects drift with surface current in the ocean. Current velocity due to wind varies vertically. It seems to depend on the depth of water and time from the wind effects on. To calculate accurate oil slick or floating object movement, we have to know the effects of velocity distribution of the current due to wind.

In this study, first, the current and wind were generated and the drift experiment were carried out with emulsion crude oil, a rubber mat, small wood and drifting buoy. And the drift characteristics were tried to find out from the experiments. And also, the time evolution of the current due to wind was calculated by numerical simulation, the time scale was discussed of the current propagation was considered.

Key Words : *Laboratory experiment, Oil spill, Current, Current due to wind, Heavy oil, Floating object,*

1. 序論

海上へ油流出が発生した際、漂流予測に数値シミュレーションが利用されている。瞬間的に油流出が発生すると、初期においては油層厚が大きく、時間が経過すると共に、海水との密度差により油層は薄く広がっていく。また、潮流、風による吹送流等により油は移動していく。吹送流は風が吹き始めて水面近傍の水が動き出し、それが粘性により下方に伝播していく。吹送流速分布のあるときや、流出油、漂流物条件によって、漂流の様子が異なってくる。吹送流に対し、重油、漂流物がどのように移動するか、現象を把握する必要がある。

海上ゴミなどの漂流物も油と同様に、潮流、吹送流に影響をうけるほか、漂流物の海面上部にかかる風圧によっても移動していく。また、シミュレーションの精度検証には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が、実際に漂流ブイの漂流特性が油と同じか、異なるか評価する必要がある。

また、吹送流は流れが発達するまでにある程度の時間を要すると考えられるが、漂流予測を行う際には、どの程度で吹送流が発達するかつかんでおく必要がある。

そこで、本研究では室内水槽で流れ及び風を発生させ、重油、疑似油、木材及び漂流ブイの漂流実験を行った。その結果から、それぞれの漂流特性の解明を試みた。また、数値計算により吹送流の時間発展を計算して求め、速度伝播の時間スケールについて考察した。

2. 実験方法

本実験は図-1 のような油回収実海域再現水槽(120m×B6.0m×H2.5m)で行った。本水槽は潮流、風、波を発生させることができ、水は海水を使っていることから、実海域条件を再現できる。また、小型の水槽に比べ規模が大きく、相似則を用いずに現象を再現できる。本論文では座標を図-1 のように流路方向に x、流路横断方向に y、水面を 0 として鉛直上向きに z とおく。潮流発生装置は水平回流式である。図-2 は流速の鉛直分布の図で横軸が流速、縦軸が z を表す。流路において流速は空間的に一様であり、平均値は 0.39m/s であった。風は送風機(直径 600mm)を水槽上流側の中央に 2 基設置し、風速 10m/s で送風した。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 分間の平均値を風速と

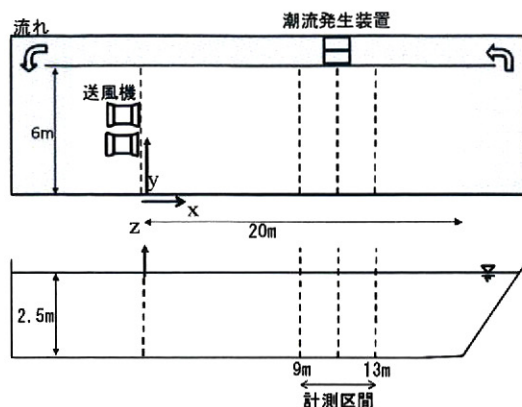


図-1 水槽平面図（上段）と断面図（下段）の概略と計測位置

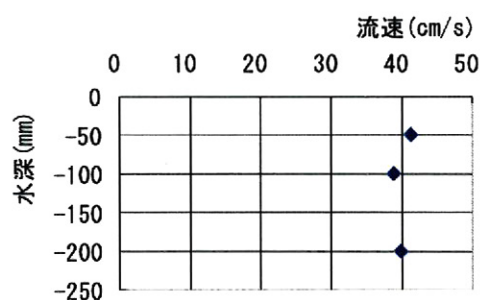


図-2 潮流発生装置による流速の鉛直分布

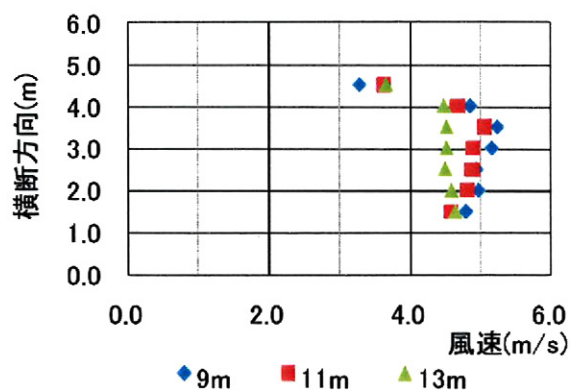


図-3 移動計測区間の風速場

した。図-3 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を表している。本水槽は風洞ではないため、風は風下に行くにしたがい拡散してしまうが、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。風速は水面より 0.20m で 4.84m/s であり、実験条件としてこの風速を用いている。重油・漂流物の移動計測区間は送風機から 9.0～13.0m の 4.0m とし、移動時間をストップウォッチで計時し、移動速度を求めた。

漂流物は写真-1 のようなエマルジョン化油（比重 0.94）、疑似油（ゴムマット製）、木材（510mm×90mm×36mm、密度 466kg/m³）、漂流ブイ（直径 341mm、高さ 305mm、6.0kg）を用いて行った。重油は粘度が

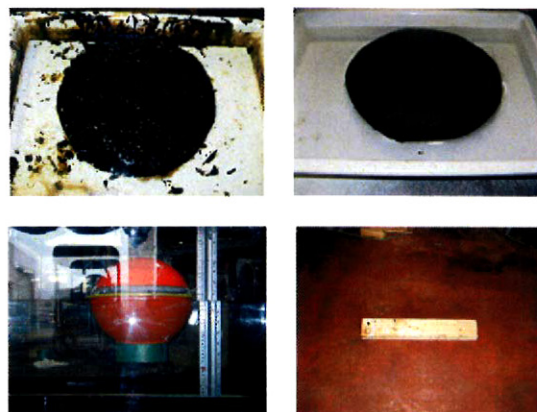


写真-1 エマルジョン化油（左上）、ゴムマット（右上）、漂流ブイ（左下）、木材（右下）の例

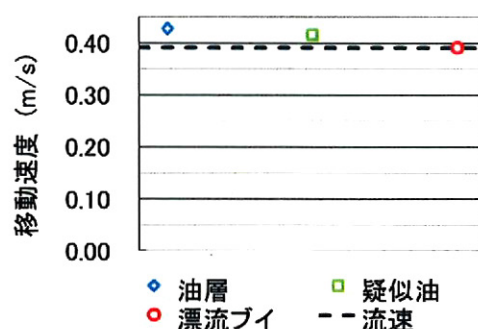


図-4 漂流物と流れによる移動の平均速度の関係

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、油層厚を計算して求めた。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。ゴムマットは比重の高いネオプレンゴム（硬度 45）と比重の低い CR ゴムスポンジを接着し、流出油の物性とほぼ同じ比重 0.83 と加工し、厚さ 2mm および 3mm で直径 24cm の円形とした。

3. 実験結果

(1) 流れによる漂流物の移動

図-4 は各漂流物の流れによる移動速度の比較であり、縦軸が移動速度及び流速である。流速は鉛直方向に一様であることから、その平均値を用いた。木材については実験を行っていない。漂流物にかかわらず、流れと同じ速度で移動していることがわかる。これより、重油・漂流物の漂流予測を行う際の移動

速度は、流速と等しくすればいいことが確認できた。すなわち、漂流予測を行う海域の流体場が精度よく再現されれば、重油・漂流物の移流に関して精度よく予測できるといえる。

(2) 吹送流の鉛直分布と重油・漂流物の移動速度の関係

水面上で風が吹いている際、水面のごく近傍の流速は理論的に風速の約0.035倍と求められる¹⁾。しかしその速度は水表面の近傍のみに限られ、水面から水底にたい吹送流速は遅くなる。大量の重油流出が発生した際は、水面の油層の厚さが厚くなる。また漂流物で水面下部に厚さがあるものもある。よって水面近傍の流速で漂流予測を行うと、誤った結果となる可能性がある。

吹送流による移動を予測するには、重油・漂流物に作用する流体力算定に用いる流速の水面からの平均値を求めればよいと考えられる。そこで、吹送流の水面からの平均流速の式を求める。

水面を原点にとり、鉛直上向きを正とする。鉛直方向の流速分布は対数分布を与えると以下のように求まる²⁾。

$$u = \frac{u_{*w}}{\kappa} \ln \frac{z_{0w} + d}{z_{0w} - z} \quad (1)$$

ここで u は流速、 u_{*w} は水面での水の摩擦速度、 κ はカルマン定数($\kappa=0.4$)、 z_{0w} は水面の水側の粗度長、 d は水槽深さ($d=2.5\text{m}$)である。 u_{*w} は、

$$u_{*w} = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_w}} \quad (2)$$

である。 τ_s は風による水面へのせん断力、 ρ_w は水の密度($\rho_w=1035\text{kg/m}^3$)である。 τ_s は、

$$\tau_s = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (3)$$

で求めた。 ρ_a は空気密度($\rho_a=1.22\text{kg/m}^3$)、 C_d は風の抵抗係数で、 1.2×10^{-3} とした³⁾。 U_{10} は水面から10mでの風速で、べき乗則を用いて以下のように求めた。

$$U_{10} = \left(\frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} U_z \quad (4)$$

風速の計測位置 $z=0.2\text{m}$ なので、 $U_{10}=1.75U_z$ である。 z_{0w} は水面の上下で粗度レイノルズ数が一致すると²⁾、

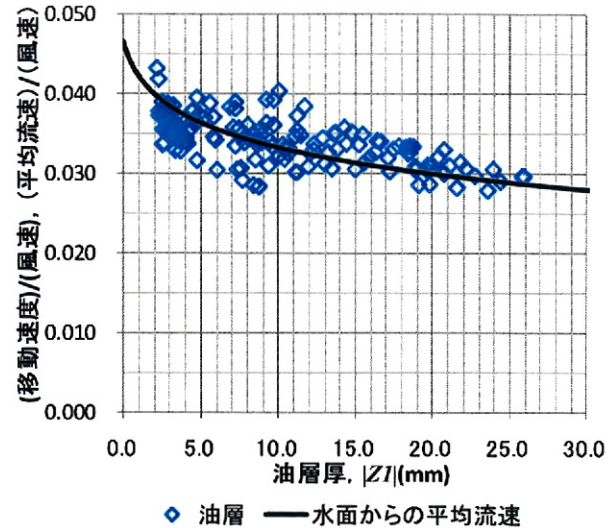


図-5 油層厚と移動速度の関係

$$z_{0w} = \frac{\nu_w}{\nu_a} \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a}} z_{0a} \quad (5)$$

ν_w 、 ν_a は水、空気の動粘性係数($\nu_w=1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、 $\nu_a=14.5 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)、 z_{0a} は風速に対する水面の粗度長で、 $z_{0w}=2.01z_{0a}$ である。 z_{0a} はMoon et al⁴⁾より

$$z_{0a} = \frac{0.0185}{g} u_{*a}^2 \quad (U_{10} \leq 12.5\text{m/s}) \quad (6)$$

より求めた。 u_{*a} は鉛直水面での空気の摩擦速度であり、 $z_{0a}=1.63 \times 10^{-4}\text{m}$ である。

以上の結果から u を計算し、水面からの平均流速 $\bar{U}$ を以下のように求める。

$$\bar{U} = \frac{1}{|Zl|} \int_{z1}^0 u dz \quad (7)$$

Zl は対象とする重油、漂流物の底面の位置である。

(3) 風による油層の移動

図-5は重油の厚さと移動速度を比較したもので、横軸が油層厚及び $|Zl|$ 、縦軸が移動速度を風速で除した値を表している。プロットは油の移動の計測値で、実線は(7)式を風速で除したものである。重油の移動速度は、層厚が厚くなると移動速度が遅くなる傾向があることが見て取れる。また、(7)式による水面か

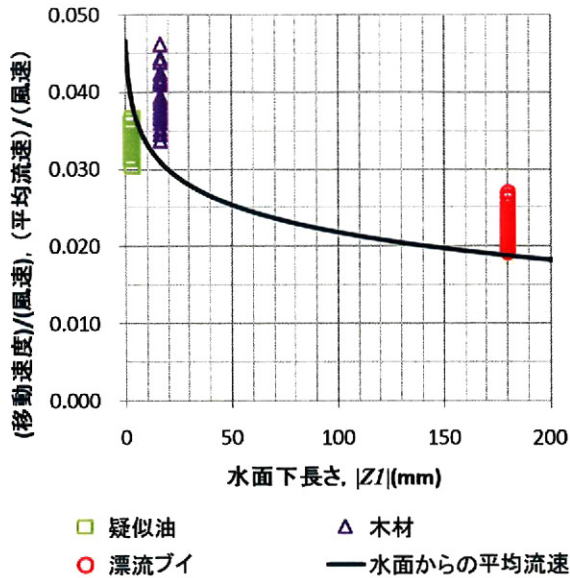


図-6 漂流物と移動速度の関係

らの平均流速も ZI が大きくなると遅くなる。プロットと実線を比較すると、比較的良好一致している。このことから、油層の吹送流による移動速度は、油層厚分の鉛直距離の流速の平均値で、(7)式のように求められることが分かる。

(4) 風による漂流物の移動

図-6は漂流物と移動速度を比較したもので、横軸が漂流物の水面下部分の長さ及び $|ZI|$ 、縦軸が移動速度を風速で除した値を表している。プロットは疑似油、木材及び漂流ブイの移動の計測値で、実線は(7)式を風速で除したものである。図より疑似油の移動は実線と比較的当てはまることがわかる。木材、漂流ブイは(7)式と傾向は似ているが、平均流速より速いことが見て取れる。疑似油は密度が油に近く、水面上にはほぼ出ていない。一方、木材及び漂流ブイは浮力により水面上に出ており、風圧が作用している。風による漂流物の移動を予測する場合、吹送流のほかに漂流物の水面上部分にかかる風圧を考察する必要がある、これを風圧流とよんでいる^{5), 6), 7)}。風圧流は図-7のような関係である。風圧流による漂流物の移動速度は以下のように求められる。

物体に働く風圧力 F_a は、

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a C_{da} A U_a^2 \quad (8)$$

ここで、 C_{da} は漂流物の空中抵抗係数、 A は風圧にかかる断面積、 U_a は風速である。次に、物体に働く水圧力 F_w は、

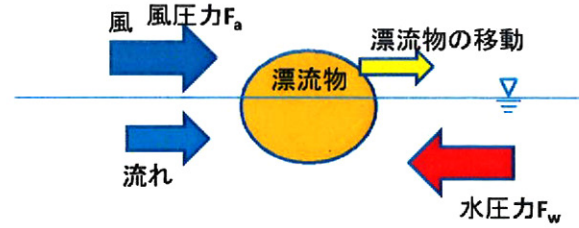


図-7 風圧流の模式図

表-1 風圧流の抵抗係数

	$\sqrt{\frac{A}{B}}$	$\frac{U - U_w}{U_a}$	$\sqrt{\frac{C_{da}}{C_{dw}}}$
木材	1.1	0.0083	0.22
漂流ブイ	0.85	0.0041	0.14

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w C_{dw} B (U - U_w)^2 \quad (9)$$

ここで、 C_{dw} は漂流物の水中抵抗係数、 B は水圧にかかる断面積、 U は漂流物の移動速度、 U_w は流速である。漂流物は風を受けて移動し、風圧力と水圧力の釣り合ったところで一定速度となり、そのとき $F_a = F_w$ と表せられる。よって、

$$\frac{1}{2} \rho_a C_{da} A U_a^2 = \frac{1}{2} \rho_w C_{dw} B (U - U_w)^2 \quad (10)$$

これより、漂流物の移動速度 U は、

$$U = U_w + 0.035 \sqrt{\frac{C_{da}}{C_{dw}}} \sqrt{\frac{A}{B}} U_a \quad (11)$$

実際に(11)式を使って風圧流による漂流物の移動速度を予測する場合、あらかじめ水中、空中の抵抗係数、断面積を計測しておく必要がある。

今回の実験結果より、木材、漂流ブイの水圧流の抵抗係数を求める。(11)式は以下のように書き換えられる。

$$\sqrt{\frac{C_{da}}{C_{dw}}} = \frac{U - U_w}{0.035 \sqrt{\frac{A}{B}} U_a} \quad (12)$$

(12)式より抵抗係数を求める。 $(U - U_w)/U_a$ は図-6より求めた。 A と B の比は、木材は比重から計算し、漂流ブイは水面上に浮かべ写真を撮影し、画像解析により求めた。それらの結果は表-1である。

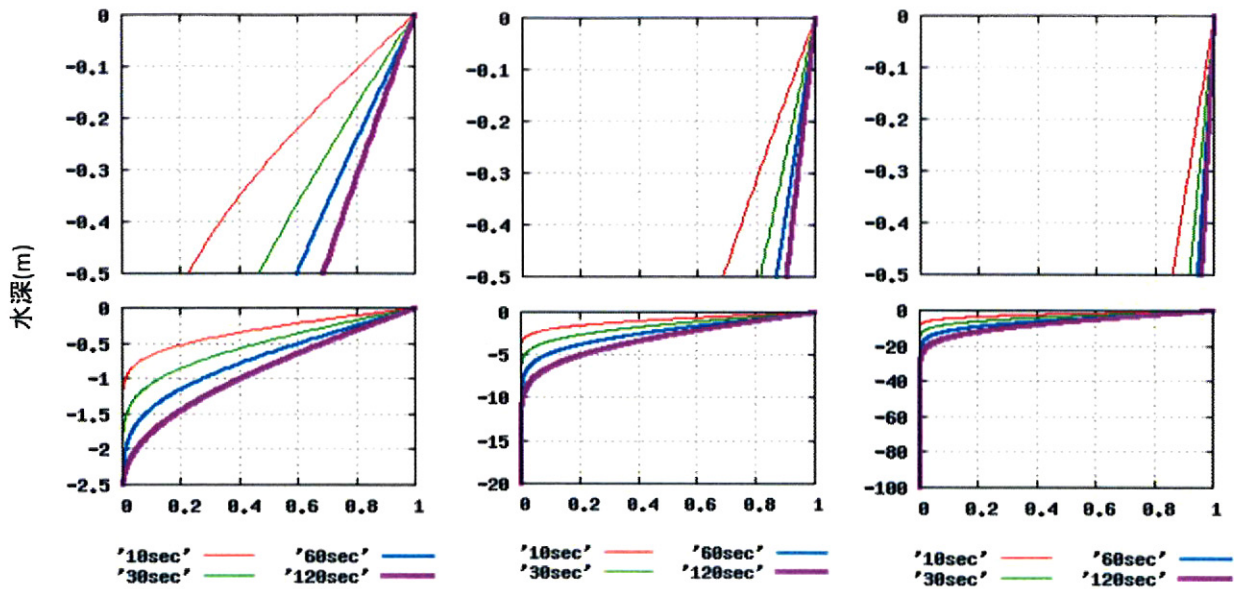


図-8 吹送流の時間発展 (左から水深2.5m, 20m, 100m)

漂流ブイを漂流させ、その海域での海流、潮流を調べる実験がよく行われる。その際には風圧流の影響を取り除かなければ実際の流れを再現しているとはいえない。以上の考察より、漂流ブイを用いて流れを調べる際には以下の式を用いることを提案する。

$$U_w = U - 0.0041U_a \quad (13)$$

(13)式を用いることで、風圧流を除いた流れをとりだすことができる。ただし、本実験では風速を1ケースのみでしか行っていないため、風速の違いによる検討ができていない。よってこれを用いる際は風速に注意する必要がある。また、実海域ではコリオリ力による偏向が作用する¹⁾ので、それも考慮する必要がある。

4. 吹送流の時間発展

3. の考察より、吹送流による重油・漂流物の移動速度を求めるには、水面から重油、漂流物の底面までの流速の平均値を求めればよいことが分かった。ここで、吹送流は風が作用してから鉛直方向に発達するのに時間がかかる。吹送流伝播に時間がかかる場合、漂流を予測する際には吹送流の発達時間を考慮する必要がある。また時間差が小さい場合は、吹送流は風に鋭敏に反応するので、風向風速に注意する必要がある。よって吹送流伝播時間はどの程度であるか検証することは重要である。そこで、吹送流の時間経過による発達に関してオーダーを調べるため以下のような検討を行った。

十分に長い海域に一樣に風が吹き始めるとする。この際、本計算は時間のオーダーを見るために行うので、水面変動はしないものすると、運動方程式は、

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} \quad (14)$$

ここで K_z は鉛直渦動粘性係数である。 K_z は混合距離理論を用いて⁸⁾、

$$K_z = \kappa u_* (d+z) \quad (15)$$

で表わした。本実験条件のような風速 5.0m/s のとき $K_z = 4.0(d+z) \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ である。吹送流の伝播計算は(14)式を差分して数値計算し、流速の時間発展を求めた。時間差分は陽解法、拡散項は中央差分を用いた。時間格子は $1.0 \times 10^{-4} \text{sec}$ 、空間格子は $1.0 \times 10^{-2} \text{m}$ である。境界条件として水面で $u_w = 1.0 \text{m/s}$ を与え、水底で Slip 条件を与えた。

計算結果について説明する。図-8 は吹送流の時間発展について計算した結果で、横軸が吹送流の伝達度合い、縦軸が鉛直方向で 0 が水面を表している。図は左から水深 2.5m, 20m, 100m, 上段が水面から 0.5m まで、下段が水面から水底までを表している。実線はそれぞれ風が吹き始めてから 10, 30, 60, 120 秒後を表している。下段をみると、風応力の伝播は水深が浅いほど水底までの伝播時間が短いことがわかる。重油・漂流物に直接影響を与えるのは水面近傍であり、上段をみると、応力の伝達は水深が深いほうが応力伝播は早い。よって水深が深い場合は風が吹き始めてから吹送流が発達するまでの時間差をあまり気にする必要がないといえる。また、20m といった水深が浅い海域でも 30 秒後に 0.3m で 9 割ほ

ど伝播している。これらの結果より、吹送流による重油・漂流物の漂流予測に関して、吹送流の影響は鋭敏であるから、ランダムウォーク的成分が出やすい。特に風の乱れが大きく、風向が頻繁に変わる地域では注意が必要である。

5. 結論

本研究では、室内水槽で流れ、風による重油・漂流物の漂流実験を行い、考察を行った。主要な結論をまとめると以下のようになる。

- ・重油、漂流物は流れと同じ速度で移動する。流れによる物体の移動を数値計算で精度よく予測するには流れの再現が重要となる。

- ・吹送流の鉛直方向の流速分布は重油、漂流物の移動速度に影響を与える。風場における油層の移動速度は水面から油層底面までの流速の平均値で求まる。漂流物の移動速度は底面までの流速分布のほか、風圧流を考慮する必要がある。

- ・木材、漂流ブイの風圧係数を提案した。

- ・水深が深いとき風応力の鉛直方向への伝達速度は早い。また、漂流にかかわる程度の深さまでは吹送流の鉛直方向伝播時間は水深にかかわらず短い。漂流予測を行う際は吹送流の時間変動を考慮する必要がある。

謝辞：本研究で実施した実験に熱心に協力していただいた当時岩手大学学部生であった砂川透吾君に深く感謝する。

参考文献

- 1) 松崎義孝, 吉江宗生, 藤田勇, 竹崎健二：薄い漂流物を用いた漂流実験を漂流推定方法の検討, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp. 33-39, 2009
- 2) 鶴谷広一, 中野晋, 加藤始, 一戸秀久：吹送流に関する風洞実験, 港湾技術研究所報告, 第 22 巻, 第 2 号, pp. 127-174, 1983
- 3) 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
- 4) Moon, IL-JU, I. Ginis, T. Hara, and B. Thomas : A physical-based parameterization of air-sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions, Monthly Weather Review, 135, pp.2869-2878, 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) U.S. COAST GUARD ADDENDUM TO THE UNITED STATES NATIONAL SEARCH AND RESCUE SUPPLEMENT (NSS) To The International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual (IAMSAR) , Appendix H Search Planning Handbook, 2004
- 7) 国際航空海上捜索救助マニュアル IAMSAR Manual 第 3 巻, 2004
- 8) 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学, 1993