

D-3 アジア大陸縁辺海域帯における海洋健康度の持続的監視・評価手法と国際協力体制樹立に関する研究  
(3) 定期航路船舶における船体利用の定式化と効率化に関する研究

独立行政法人 海上技術安全研究所

推進性能部	海洋環境研究室	富田 宏
推進性能部	推進研究室	日夏 宗彦、塚田 吉昭、南 佳成
運動性能部	耐航性研究室	石田 茂資、二村 正、沢田 博史
装備部	部長	山岸 進
装備部	船舶設備研究室	樋富 和夫、山口 良隆、山之内 博

平成11～13年度 合計予算額 15,848 千円  
(うち、平成13年度予算額 4,852 千円)

[ 要旨 ]

フェリー等の VOS (Voluntary Observation Ship) による海洋健康度モニタリングにおいて、サンプルされた海水が本来存在していた位置特に水深を特定することは、結果の評価において重要な情報を与える。本研究は、海洋を航走する船舶の船体取水口に取り込まれたサンプル水の深度代表性 (上流起源位置) の推定を船体模型実験および数値解析によって推定する方法を提案し、結果を示すことによりその妥当性を検証したものである。

実験では、平水中および規則波中の試験水槽中で模型船を曳航し、模型船上流の様々な位置から流出した色素を、模型船に設置した取水口から吸引し、吸引された水の中に含まれている色素の量を分光光度計を用いて定量的に計測した。回収した色素濃度を流出させた位置において等高線図を描くことにより、取水口から回収された流体の上流位置が推定できる。

一方、実験では模型船と実船を大きさが異なることによる影響をうけるため、模型実験で得られる結果と実船で得られる結果は一般には異なると予想される。そこでこの量を評価するため、CFD (Computational Fluid Dynamics) により、平水中を航走する模型船および実船まわりの流れを計算した。その結果を用いて、乱れによる拡散効果を考慮した計算を実施し、船体取水口に流入する流体の上流起源の推定を行った。その上で、模型船対応の結果と実験結果を比較した上で、今回の方法の妥当性を調べ、さらに実船における上流起源について考察した。さらに多様な海洋汚染項目の計測への適合性の検討のため、実船において光学的計測による油汚染のモニタリング手法を試行し、蛍光スペクトル分析法が有効であることが確認された。

[ キーワード ] 海洋環境モニタリング、VOS、計測深度代表性、船体模型実験、CFD

1. 序および研究の目的

近年、海洋環境保全の重要性が改めて認識される中で、我が国では国立環境研究所を中心にして瀬戸内海航路のフェリー船舶や、東南アジア航路のコンテナ船舶を利用した海洋健康度のモニタリングが実施されている<sup>1), 2), 3)</sup>。そこでは船の取水口から海水を採取し、その中に含まれている栄養塩や汚染度、微小生物等を計測し、海洋環境保全の科学的な調査を行っている。このとき、微小生物等が本来、海洋中のどの位置—特に水深—に存在したかを知ることは、結果を評価する上で重要な要素の一つである。しかし、今

までのところ、船舶を用いた海洋環境モニタリングの研究の中では、この点を明らかにするための研究はなされていなかった。この問題の定性的な解答は、たとえば船体周りのポテンシャル流場を計算し、それを用いて流線追跡すれば容易に得られる。しかし定量的にどの位置の流体がどの程度取水口に到達するかを推定することは、それほど容易ではないと思われる。本研究ではその方法のひとつを示した。

今回の問題は、基本的には船体周りの流れに支配されているため尺度影響を受ける。従って単に模型実験を行ってもその結果をそのまま実船に対する評価に用いることはできない。そこで、本研究では実験的手法と数値解析的手法を組み合わせる手法を用いる。すなわち、まず模型実験による上流起源の推定を行う。そしてそれに対応する数値解析を行い、模型試験の結果と比較し数値実験的に数値モデルを構築する。数値モデルができれば実船対応の数値解析を行い、実船の取水口に流入するサンプル水の上流起源を推定するという流れである。

本報告では、上記の手順に従って研究を進めて得られた結果を示し、模型試験法と CFD による推定法をあわせることで、実際のモニタリングにおいて採取されるサンプル水の上流起源を推定しうることを示した。

以下、まずサンプル水の深度代表性に関連する研究についてまとめ、その後で微小油分モニタリングシステムについての報告を記す。

## 2. 研究方法と結果

### (1) サンプル水の深度代表性に関する実験的方法

模型船に取り付けられた取水口に流入する流体の上流位置を特定するための実験方法について示す。まず、模型船上流から色素(ここでは水槽水 1000cm<sup>3</sup>に過マンガン酸カリウム KMnO<sub>4</sub> 1g を溶解したもの)を流出させ、模型船に設置した取水口から水槽水を採取する。

採取した水の中にどの程度色素が含まれているかを分光光度計で測定し色素含有量を調べて、流入する流体の上流起源を定量的に特定する。

この時、流れに対して鉛直面内で色素を流出させる位置を変化させ、流出位置と採取された色素含有量との関係をコンターカーブ等で表し、上流起源を定量的に評価する。以上の実験方法の概念図を図-1に示す。流出色素に過マンガン酸カリウムを用いた理由としては、無害であることと、可視波長域に高い吸収ピークがあり、微少な吸光度の測定も比較的容易であると考えたためである。サンプル水の採取は、注射器を用いて吸引した。この時、正確な吸引速度を保つため、パソコンで制御されたリニアステップモータにより、注射器のピストンを駆動する流体採取装置を製作した。

### (2) 模型船および平水中の実験状態<sup>4)</sup>

実験に用いた船型は独立行政法人航海訓練所の「青雲丸」とした。本来ならば実際に環境モニタリングで使用されているフェリー船型を用いるべきであるが、船型データが利用できなかったため青雲丸を代船とした。

今回の実験では、上流から流出した色素を下流側で採取しその濃度を計測することから、色素の拡散による測定精度の低下が予想された。このため、第一段階として拡散影響を小さくするため船長が  $L_{pp}=2m$  の模型船を用いて実験した。実験は三鷹第3試験水槽で実施した。

取水口位置は現在モニタリングに供されているフェリー(以下 VOS : Voluntary Observation Ship と略)に取り付けられた位置と相対的に同じ位置に設置した。すなわち、船尾から 22.5% $L_{pp}$  の位置(S. S. 2-1/4)、船底から喫水の 52%上方の位置とした。さらに、参考のため、同じ断面内の船底での船体中心面にも取水

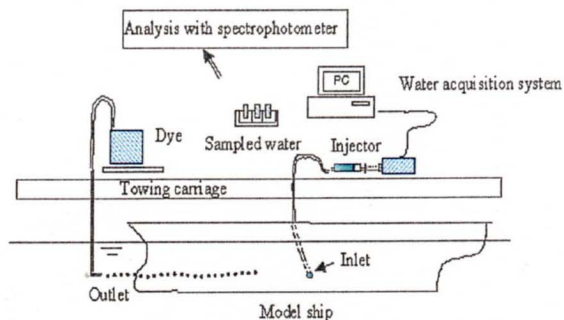


図-1. 実験構成図

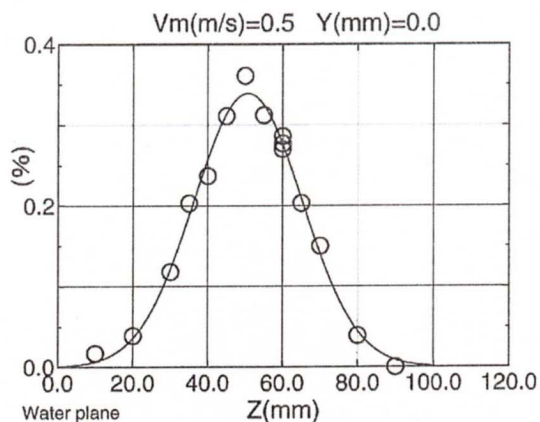


図-2. 色素拡散の分布

$V_m=0.5\text{m/s}$  の場合

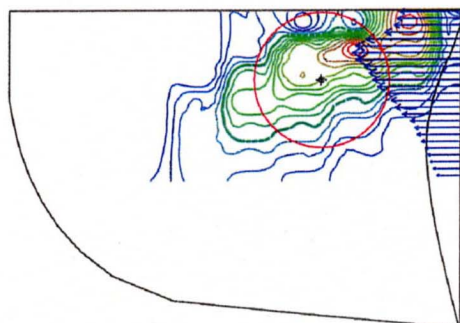


図-3 (a). 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの  
コンター間隔=0.02%、 $V_m=0.5\text{m/s}$ ,  $L_{pp}=2\text{m}$

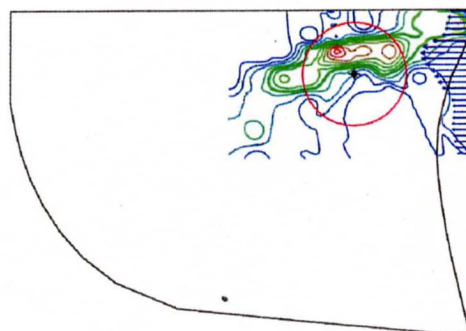


図-3 (b). 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの  
コンター間隔=0.02%、 $V_m=1.377\text{m/s}$ ,  $L_{pp}=2\text{m}$

位置を設置した。

VOSにとりつけられたシーチェスト開口部面積は $0.3481\text{m}^2$ で、船長の自乗で無次元化した面積は $1.776 \times 10^5$ となる。VOSではシーチェストに引き込まれた水をさらに細いパイプで吸引しているため、今回そのモデルとして、模型の船体表面を直径 $10\text{mm}$ 、深さ $3\text{mm}$ の半球状に窪ませ、中心部に内径 $1\text{mm}$ の真鍮パイプをとりつけ、サンプル水の取水を行った。

このときの取水口（窪ませた円形部分）の面積は船長の自乗で無次元化して $1.96 \times 10^5$ となる。

色素は曳引車上に設置した容器から重力式に流出させた。色素流出用パイプの内径は $3.0\text{mm}$ で、このとき $100\text{cm}^3$ の色素が流出するのに $30$ 秒程度要したので、平均流出流速は $0.47\text{m/s}$ 程度となることがわかった。色素が流出すると水頭が小さくなるので、色素と水面の水頭が一定に保つように、容器の高さを調整した。

実験でのサンプル水の吸引量は $0.536\text{ml/s}$ とした。これはシーチェストを模した円形窪みに流入する平均流速に直すと $6.83\text{mm/s}$ となる。また模型船速の割合で表すと、船速が $0.5\text{m/s}$ のとき $1.34\%$ 、 $1.377\text{m/s}$ のとき $0.496\%$ となる。

一方、対応するVOSでは取水量が $20\text{l/min}$ なので、取水口全体の面積の平均吸い込み速度は $0.956\text{mm/s}$ となる。同船の運航速度は $11.52\text{m/s}$ であるから、平均吸い込み速度は船速の $8.3 \times 10^{-3}\%$ 以下である。原理的には両者は一致させることが望ましいが、そのためには水槽実験において吸引時間を数十倍のオーダーで長くする必要があり、現実的には対応できなかった。実験では実船に比べ拡散の影響が大きいため広範囲に色素が拡散するが、吸引速度も大きく、この意味では両者の効果は相殺する方向に働くと考えられる。この部分の尺度影響の考察は今少し詳細に検討する必要がある。

模型船の曳航速度( $V_m$ )は、予備試験的にいくつかの速度を設定したが、 $0.5\text{m/s}$ ( $Fn=0.11$ )と $1.377\text{m/s}$ ( $Fn=0.31$ )で行った。 $0.5\text{m/s}$ とした理由は、このとき色素流出速度と模型船船速がほぼ一致し、実験時に色素が噴流状に供給されないことによる。また $1.377\text{m/s}$ は実船のフルード数に対応している。

色素の上流流出位置は、流出点が船体の影響を大きく受けず、かつ模型船に極力近い位置が望ましいことを考慮し、F.P.から上流側に $100\text{mm}$ ( $5\%L_{pp}$ )の位置とした。

### (3) 実験結果<sup>4)</sup>

#### ① 色素の拡散影響調査

色素流出口から取水口まで色素がどの程度拡散するか調べるため、船がない状態で上流から色素を流し下流で取水した。色素流出口の深さは水面から $60\text{mm}$ とし、取水位置は船体に設置された取水口と同位置の距離だけ離れた。図-2に曳航速度が $0.5\text{m/s}$ の結果を示す。図は回収したサンプル水に含まれている色素濃度の、流出させた色素濃度に対する比(%)で、垂直方向分布を示した。図中の実線は正規分布曲線でデータをあてはめたものである。これから分布は正規分布状であり、今回の船速と流出口と取水口との距離における拡散は $50\text{mm}$ 内に収まっていることがわかる。なお、ピークが $z=60\text{mm}$ よりも浅くなっているが、これは色素を流出させた管が流れに与える乱れの影響と考えられる。

#### ② 船体側部取水口に流入する流体

取水された水の濃度分布を、色素流出位置に対してプロットした結果を図-3(a), (b)に示す。図-3(a)は $V_m=0.5\text{m/s}$ 、図-3(b)は $V_m=1.377\text{m/s}$ の結果である。図は、船の右側半分を正面から見たもので、図右側の垂直な線が船体中央面、上側の水平線が喫水、左側の曲線が船体中央部の船側および船底を表す。また、

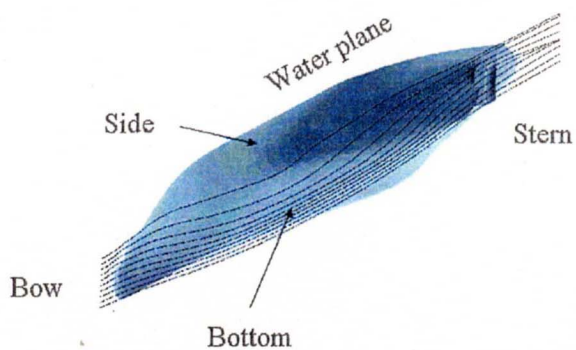


図-4. 船体周りの流線 (数値計算結果)

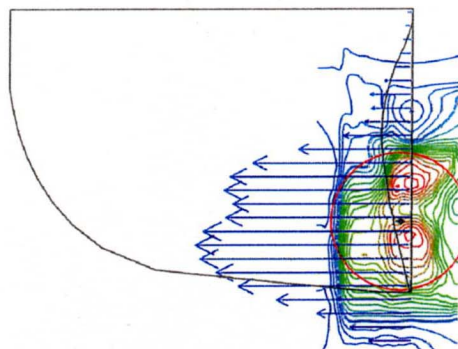


図-5. 船底に設置された取水口に取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、コンター間隔=0.02%、 $V_m=0.5\text{m/s}$   
 $L_{pp}=2\text{m}$

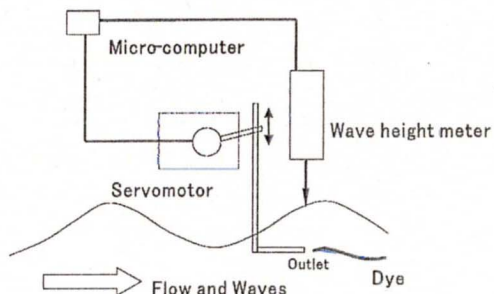


図-6. 規則波中実験における色素流出装置構成図

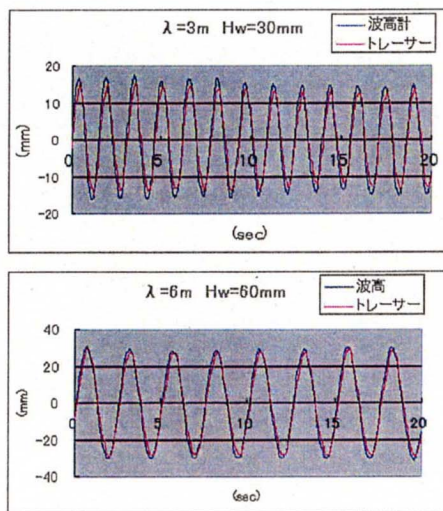
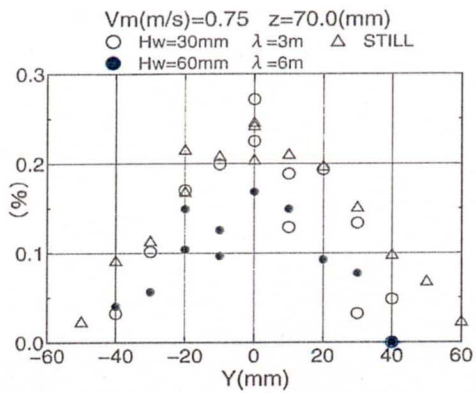


図-7. 入射波面と色素流出口の運動の同期



平水中、波浪中拡散調査

図-8. 色素拡散の分布 (規則波中、水平方向)  
 $V_m=0.75m/s$  の場合

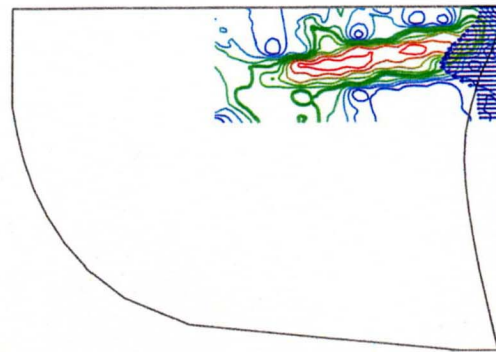


図-9. 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、平水中、  
 コンター間隔=0.02%,  $V_m=1.702m/s$ ,  $L_{pp}=3m$

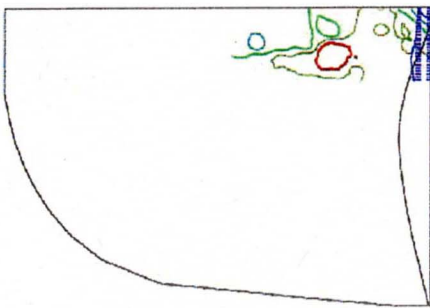


図-10(a). 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、規則波中、 $\lambda/L_{pp}=1$ ,  
 コンター間隔=0.02%,  $V_m=1.702m/s$ ,  $L_{pp}=3m$

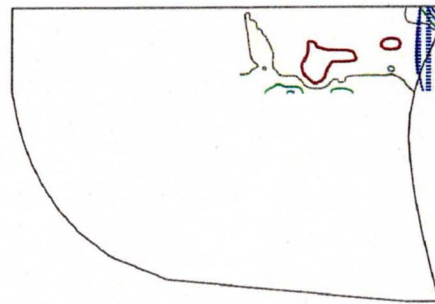


図-10(b). 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、規則波中、 $\lambda/L_{pp}=2$ ,  
 コンター間隔=0.02%,  $V_m=1.702m/s$ ,  $L_{pp}=3m$



図右側の小さな縦長の曲線は、船首が水面を貫く点で船体横断面に平行な面で切った断面を表し、ここに曲線が表せることは、船首バルブが存在することに対応する。図中の円は計測領域内の濃度全量とその円面積と最大濃度の積に等価な円を示す。中心は計測された全濃度の重心である。図には等深度線に沿って積分した量も矢羽で示した。これは等深度位置に水平に色素を流した場合、どの程度の深さから流したときが最も取水口に到達するかの割合を示している。

図から船体中心よりわずかに離れた水面近傍の流体が主に流入しているのが理解される。この図から深さ方向分布のピーク位置を読みとると、水面から喫水の13%程度の深さであった。参考のためCFDで計算した流場を用いて得られた流線を図-4に示す。

これらの結果から、流線追跡で得られた結果から推定されるように、船尾中央部に設けられた取水口に流入する流体は、船首水面近傍に端を発しているのが定量的に示されている。なお、色素の拡散影響のため、正面から見て取水口を通る流線に沿った場所から流出させても色素が回収されることが認められた。また図3(a), (b)を比較してわかるように、船速を変化させてもその分布形状はほとんど変わらないことが確かめられた。

### ③ 船体底部取水口に流入する流体

$V_m=0.5\text{m/s}$ の時の結果を図-5に示す。表示は図-3と同じである。船体中心線の船首バルブ下方から流出させた場合、ほとんど船体中央部の船底に沿って流れるため、含まれている色素も多い。また、場所も船側取水口に比べて幅方向の広がりが限定的であるといえる。

### ④ 規則波中の実験および結果<sup>5)</sup>

実際のVOSは実海域を航走するので、波の中で運動しながら計測することが一般的である。そこで規則波中で上記と同様の実験を行った。ただし、規則波中では色素流出口を固定すると相対水位が変化するので、図-6に示したようなサーボ機構を製作し、自由表面波形に追従するように流出パイプを上下させた。なお、規則波中実験では新たに3mの模型船を製作して、これを用いた。流出パイプが波面の運動と追従している様子を図-7に示した。波面の運動と流出パイプはよく同期して運動しており、これから色素流出が波面より常に一定の水深から行われていることが確認できた。

また規則波の場合、波の運動による色素の拡散影響を考察しておく必要がある。基本的には波の運動はポテンシャル流であるので、拡散作用は無いと期待されるが、改めて波のみの色素拡散の様子を実験によって確認した。図-8がその結果である。色素流出口は波にあわせて上限するので、ここでは水平方向の広がりのみ調べた。図から、波があっても色素の拡散の程度は平水中とほぼ同等であることがわかる。

さらに、新たに製作した3m模型船を用いた結果が2m模型船で得られた結果と変わらないことを確認する必要があるので、改めて3m模型船を用いて平水中での実験を行った。その結果を図-9に示す。この結果と2m模型船の場合(図-3参照)と比べるとわかるように、3m模型船を用いても結果にほとんど影響を与えないことが確認された。

実験に用いた規則波の条件は波長船長比 $\lambda/L_{pp}$ は1及び2とし波高を波長の1/100とした。波高をあげると船体運動が大きくなり、色素の拡散が大きくなり、色素濃度が計測できなくなった。今回の波高は、150m程度の船では実船対応で1.5m程度であり、外洋を想定すると必ずしも十分ではない。波高が大きくなった場合の実験法の開発は今後の課題である。図-10(a)に $\lambda/L_{pp}=1$ の場合の船側取水口に流入するサンプル水に対する実験結果を示す。平水中に比べかなり色素濃度が低下しているが、傾向としては平水中の

それと同じく、水面近傍から流出させた色素がより多く採取されている。図-10(b)には $\lambda/L_{pp}=2$ とした場合の結果を示した。両者ともほぼ同様の結果が得られた。このときの船体上下運動の振幅  $h_{amp}$  は、入射波振幅を  $\zeta_A$  として、 $\lambda/L_{pp}=1$  のとき  $h_{amp}/\zeta_A \sim 0.4$ 、 $\lambda/L_{pp}=2$  のとき  $h_{amp}/\zeta_A \sim 1$  であった。これから船体運動が小さければ、規則波中であっても基本的には平水中の結果が十分参考になる。

なお、可視化の結果、色素流出位置によってはビルジキール近傍に流れる場合があり、その場合は船体運動によって、色素の流脈がビルジキールにあたるため上下に周期的に変化し、このため、色素がビルジキールより下流で流れる位置が変化することが認められた。これより船体運動が大きくなるとビルジキールの影響も無視できないことがわかった。

#### ⑤ CFDによる推定法<sup>6)</sup>

船体の上流のある点から連続的にトレーサーを流出しているときの計算モデルを以下のように考える。

トレーサーが船体に対し定点  $(x_0, y_0, z_0)$  を通過して船体に接近するとする。この点を通過後、トレーサーは層流域を流れていく限りでは流線に沿って流されて行くので、流線の方程式を解けば、トレーサーの定点通過後の位置は同定される。このトレーサーが船尾後部で乱流境界層に取り込まれたとする。このとき、次々にやってくる

トレーサーは乱れによってあちらこちらに拡散する。この運動をランダムウォークでモデル化する。今、トレーサーの存在確率を  $\phi(x, y, z)$  とすると、上流の  $(x_0, y_0, z_0)$  では  $\phi(x_0, y_0, z_0) \propto \delta(x_0, y_0, z_0)$  と集中的に存在しているものと表現できる。これが乱れによって散乱されるときは、存在確率関数は次に示す拡散方程式で表現されると考えてよい。

$$\frac{D\phi}{Dt} = v_{dif} \nabla^2 \phi$$

このモデルでは存在確率は流力的物性と独立であるので、予め求められた乱流場を背景にして存在確率の空間分布を解けばよい。 $v_{dif}$  は存在確率の拡散係数で RANS 方程式の動粘性係数と同じ次元を有する。ト

レーサーは乱れが大きいところでは、平均流線よりもより離れたところに運ばれるであろうから、 $v_{dif} \propto \sqrt{k}$  ( $k$  は乱流エネルギー) に比例すると考えられる。一方壁に近いところでは、乱れはダンピ

ングの影響を受けるので小さくなる。従って、 $v_{dif}$  は次のようにモデル化される。

$$v_{dif} \propto \sqrt{k} \cdot L$$

$$L \propto \begin{cases} \kappa, & d \leq d_0 \\ const., & d > d_0 \end{cases}$$

ここで、 $d$  は壁からの距離で、 $d_0$  および  $\kappa$  は係数。 $v_{dif}$  の形は、たとえば1方程式モデルで用いられる動粘性係数モデルと同型であり、また長さスケールは混合距離モデルで用いられるものと同型である。そ



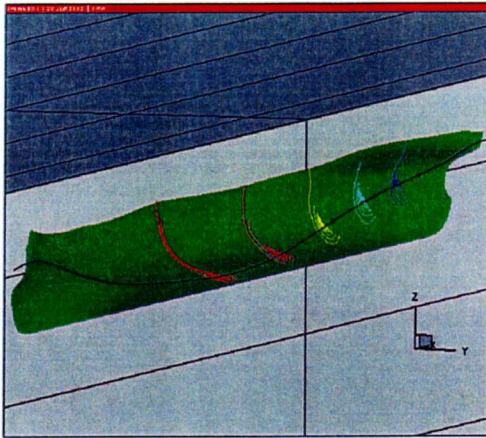


図-11. 一本の流線に沿って流出した色素の各断面における拡散の様子、コンター間隔=0.1%

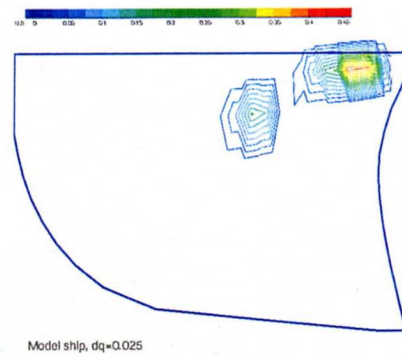


図-12. 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、(数値計算、模型船対応)

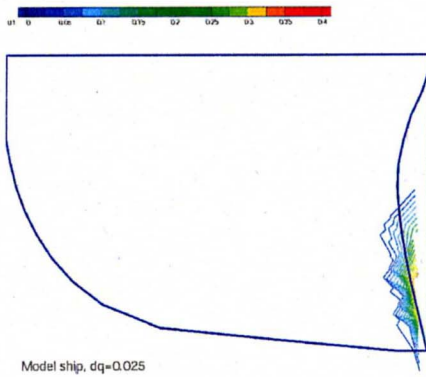


図-13. 船底に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、(数値計算、模型船対応)

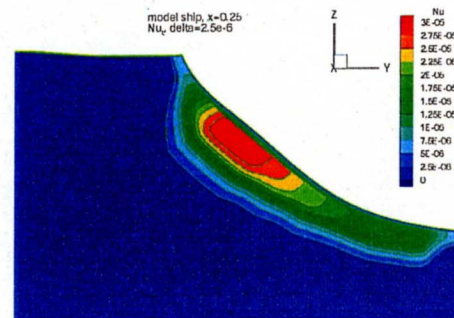


図-14.  $x = 0.25$  断面における渦動粘性係数の分布 (模型船対応)

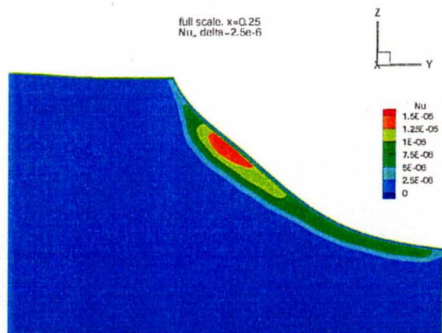


図-15.  $x = 0.25$  断面における渦動粘性係数の分布 (実船対応)

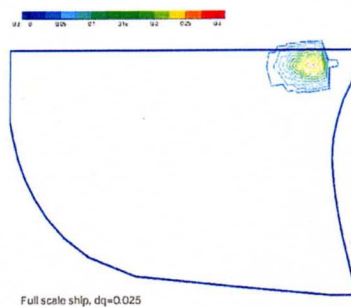


図-16. 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、(数値計算、実船対応)

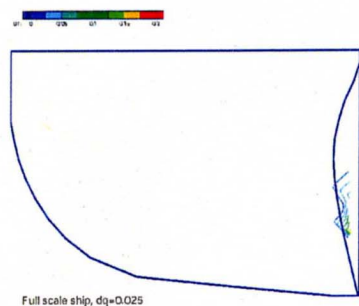


図-17. 船底に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの、(数値計算、実船対応)

ここで、本研究では、

$$v_{dif} \propto v_T$$

と考えてよいと仮定した。具体的な $v_{dif}$ の値は決められないので、水槽試験結果を参照しながら最適値を探索する。すなわち、上流のある点に点強さの存在確率関数を置き、層流域は流線追跡で、乱流域は拡散方程式を解き、取水口位置の存在確率関数の値を求める。これを上流においた点強さの位置を変えて計算し、それぞれにおける取水口での存在確率を計算する。このようにして得られた取水口での存在確率の値を上流においた点強さ位置にマッピングし、実験結果と比較する。

なお、実験では色素を用いているが、分子粘性に起因する拡散は乱れによる拡散に比べ十分小さいので、模型船に流入する流れの乱れが十分に小さければ、実験結果と計算結果は1対1に対応する。ただし、実際には、水槽水自身が持っているゆらぎや色素を流すパイプ自身が作る乱れ等によって乱流境界層に巻き込まれる以前から若干の拡散をうけるので、計算値と実験値を比較するときには注意が必要である。

#### ⑥ CFDによる模型船対応の上流起源の推定

以上の考えをもとにまず模型船対応の数値計算を行った。基礎となる流場は平水中で $Re=1.25 \times 10^7$ とし、NEPTUNEコード<sup>7)</sup>で計算した。いくつかの数値実験の結果、今回の場合、 $v_{dif}$ は $v_T$ の2倍とし、層流境界層と乱流境界層の閾値は $v_{dif}$ の最大値の1%とした。また、拡散方程式の対流項はMUSCLで評価し、minmod関数を用いたTVDスキームを用いた。

流線に沿う $\phi$ の値は、1とし乱流境界層に貫入した後は、貫入後の流線の距離 $d_l$ を用いて $1 - \tanh(10 \cdot d_l)$ で減少させた。また計算は無次元時間で1だけ行った。

計算された結果を図-11に示す。図-11は船体後方の水中から船体を見上げた図で、図中に示した一本の流線に注目し、その流線に沿った色素が下流に行くに従ってどのように拡散していくかを示した。流線を中心に境界層内に色素が拡散していく様子が理解できる。図-12は、船側に取り付けられた取水口位置における色素の濃度を、それを流出させた上流位置にコンターで表示したもので、実験結果の図-3に対応する。図-13には、船底取水口位置における色素濃度の流出位置における濃度分布で、これも実験で得られた結果をよく表現している。いずれの結果も実験で得られた特徴をよく表現しており、CFDがサンプル水の上流位置推定に有効であることがわかる。

#### ⑦ CFDによる実船対応の上流起源の推定

前節の数値解析結果は模型船レベルを対象としている。しかし実際の船ではレイノルズ数が大きく(今回の場合で $Re=8.9 \times 10^8$ )、このため境界層が模型船に比して小さくなっている。このことは、渦動粘性係数の分布が、実船の方が模型船に比べてより船体近傍に限定された領域に存在するものと期待される。実際、図-14と図-15に模型船対応および実船対応の、 $x=0.25$ における渦動粘性係数の分布を示した。模型船の方が実船に比べてより広い範囲にわたって渦動粘性係数が分布しているのがわかる。またその大きさも模型船の方が大きい。これから、実船の場合の方が、より色素の拡散が少ない、言い換えれば上流から流出した色素はよりポテンシャル流線に沿って流出していくことになる。従って色素の上流起源も実船の

方が模型船の場合に比べて、より限定された領域にあるものと考えられる。その結果を示したものが図-16 および図-17 で、これらは模型船の場合の図-12 と図-13 に対応する。この図から、船側口、船尾口とも、そこに流入するサンプル水の上流起源は、実船の方が模型船の場合に比べ、船体に近寄ったところに集中しているのがわかる。

この図から判断すると、模型実験で得られた上流起源分布図から、実船相当のそれを類推するには、大略的に言って、模型実験結果の分布のうち、船体側半分程度に集中しているものと見なすことができよう。

#### (4) 海水の油汚染計測への応用の検討

フェリー計測試料の汚染度を検討するために、海水中に混濁した微量オイルの検出法について検討を行った。また流出事故後の浄化の指標や生態系へのオイル濃縮汚染などが報告されており、環境の評価のためにも海水中オイル成分の含有量や動態解明が重要である。また現在の各海域での含有量を計測法は、各海域で海水を持ちかえり、地上の研究施設で分析を行うものである。試料採取のための省スペース化を目指し、広域で定期的に採取及び分析可能な手法が必要である。

始めに海洋でのオイル汚染状態の調査として、観測プラットフォームに使用されているさんふらわあいぼり号の航路上(大阪～別府)の海水サンプリングを行い、含有オイル成分を調べた。海水採取は大阪湾、松山湾、別府湾に航行及び停泊中に船舶内の海水採取ラインから行った。海水サンプルを持ち帰った後の、オイル含有量分析の手順は下記の通りである。海水を四塩化炭素(CCl<sub>4</sub>)でオイル分の抽出を行った。CCl<sub>4</sub>層を蒸発乾固させ、そこで得られた固形物をもう一度n-ヘキサンに定容で溶解させた。このヘキサン溶液を蛍光分光法で計測した。

航路中のオイル濃度が把握できたので省スペースサンプリングのためのテストを大阪南港フェリーターミナル内に停泊中の関西汽船フェリー・さんふらわあいぼり号内で行った。試料海水は、海水専用水道よりビニールホースでオイルサンプリングシステムへ供給を行った。サンプリングシステムの構成は、採取された海水がフロー型蛍光分析装置(Turner Design 10-AU)を通った後、オイル

だけ選択的に吸着捕集する固層抽出オイル採取フィルター(3M Oil & Grease Desk 90 mm)を通る構成になっている。採取フィルターの吸引は、真空ポンプ付きの吸引ろ過瓶を使用した。海水を通水したフィルターはビニール袋へ入れて保湿したまま研究室に持ち帰り、採取されたオイルについてn-ヘキサンで逆抽出を行い、さらに定容後、蛍光分光装置でオイル量の定量を行った。

配管のオイル汚染は、船舶内外で採水・分析より含有量がほぼ同じであったために配管の汚れについて影響はないと考えている。

蛍光分析も船内で行った。オイルが含有している海水を入れたときには蛍光光度が計測できた。しかしバックグラウンドが一定ならず、定量性を確保するのは今の段階では難しい。

オイル採取したオイルの蛍光スペクトルを図に示す。A 重油を標準に用いてオイル量の換算を行った結果、大阪湾フェリーターミナルのオイル含有量は20.1～29.5 ppbとなった。航行している場合でも計測条件はほとんど変わらないためにフェリーを利用したサンプリングに本システムは計測可能である事がわかった。

表1 各海域のオイル含有量  
計測場所 含有量

計測場所	含有量
大阪湾	Trace
松山湾	ND
別府湾	3.3 ppb

予備試験とフィルター抽出との検出結果が異なる。そこで検討課題として時間によるオイル汚染変化や他のオイル計測法との相関が必要である。

### 3. 考察

以上の実験およびCFDの結果、すなわち喫水から13%の深度に取得海水の銃身があるという結果を、サブテーマ(1)において計測あるいはサンプリングを行っているフェリー「さんふらわあ」やコンテナ船「ACCX-LILY」にあてはめると、取得海水の起源深度は、概ね0.7m~1m程度であると推測される。海洋物理学的には、風応力により海洋表層に形成される混合層が数メートル以上の厚みをもっていると考えられているから、取得海水はこの表層混合層の海水を代表していることになる。また、波高1.5m以上に対応する実験は行わなかったが、波高が高い場合では混合層内での鉛直混合も盛んなので、確実に混合層内の特性を反映していると考えられる。逆に、夏季の内湾などの静穏な状態で海面加熱または河川水流入が存在する場合には、1mよりも浅いところに水温躍層または塩分躍層が形成されることもあるので、この場合には海水が躍層の上下のどちらから取り込まれたかには注意を要する。

また、従来海水の油汚染のモニタリングでは、海面に浮遊する油分やタールボールを対象としたものが中心であったが、漏出された油分が微細粒状になったり分解の途中別の形態になったりした場合も中長期的な海洋汚染として重要である。本研究で得られた、定期航路により油分の計測を行う手法は後者の場合に有効であると考えられる。

### 4. 本研究で得られた成果

- 1) 模型船の取水口に流入する流体の上流起源を推定するため、実験的手法では、上流から色素を流出し、それを船体に設けた取水口から吸い取り、その中に含まれている色素量を分光光度計で計測して求める方法を開発した。この実験方法で、定量的な流体起源の特定が可能となった。
- 2) 模型船の側方に設置された取水口位置では、今回の場合では水面から喫水の13%の深さから流出させた場合、もっとも高濃度で採取された。船型およびレイノルズ数は違うがこれを実船にあてはめると、海面下0.71m付近からの海水がもっとも取り込まれることになる。
- 3) 規則波中の実験も実施し、波高が大きくなければ平水中の結果と定性的に一致することがわかった。
- 4) CFDによる上流起源の推定方法についても考え方を述べ、数値計算を行った。その結果、色素の拡散係数を数値実験的に定めることで、実験値の傾向をよく表す計算結果を得ることができた。
- 5) CFDにより模型船レベルおよび実船レベルの計算を行い、実船レベルの方が、上流起源の広がりが限定されることが示された。
- 6) 以上の方法は汎用性があるので、船型が変わっても適用可能である。またCFDのみでも、十分上流起源が推定されることが示され、取水口位置の設定に有効な手段となるものと思われる。
- 7) 多様な海洋汚染項目の計測への適合性の検討のため、実船において光学的計測による油汚染のモニタリング手法を試行し、蛍光スペクトル分析法が有効であることが確認された。

### 5. 謝辞

実船対応の船体周り流場の計算に尽力いただいた海上技術安全研究所平田信行博士に感謝する。

### 6. 引用文献

- 1) 原島省、功刀正行(1997):海の働きと海洋汚染、第5章「海洋環境の変動をモニターする」, 101-131. 裳華房ポピュラーサイエンス.
- 2) Harashima, A., Tsuda, R., Tanaka, Y., Kimoto, T., Tatsuta, H. and Furusawa, K. (1997), Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes with a flow through system deployed on ferries in the adjacent seas of Japan, in Kahru, M. et al. (eds.) Monitoring Algal Blooms - New Techniques for Detecting Large-Scale Environmental Change, 85-112, Springer.
- 3) 原島省(1998) 航走連続モニタリングシステム, 平野敏行(編) 沿岸の環境圏, 1446-1452, フジテクノシステム
- 4) 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平:船舶を利用した海洋環境モニタリング計測データの評価について - サンプル水の上流起源特定実験 -, 第74回船舶技術研究所研究発表会講演集、(2000)
- 5) 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平:船舶を利用した海洋環境モニタリング計測データの評価について - 第2報 規則波中航走時のサンプル水の上流起源特定実験 - 第1回海上技術安全研究所講演会講演集(2001)
- 6) 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平:船舶に取り付けられた取水口から取水されるサンプル水の上流起源の推定, 日本造船学会論文集第190号、(2002)
- 7) Hirata N., Hino T., :An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship, 日本造船学会論文集第185号、(1999)
- 8) Miller, C. (Ed.): Report of the PICES Volunteer Observing Ship (VOS) Workshop, 4-5 April 2002, Seattle, Washington, (2002).

#### [ 国際共同研究等の状況 ]

PICES (北太平洋海洋科学機構) が定期航路船舶を利用した広域の海洋モニタリングを計画しつつあり、その技術的な議論のための「Volunteer Observing Ship ワークショップ」という会合を主催した。課題代表者によって本研究結果が紹介されたところ、定期航路船舶利用のために貴重な知見であると判断され、同ワークショップの報告書<sup>9)</sup>を通じて、米国・カナダの海洋モニタリング計画に反映されつつある。

#### [ 研究成果の発表状況 ]

##### (1) 誌上発表 (学術誌、書籍)

- ① 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、原島省:フェリー利用による海洋環境モニタリングおよび関連研究に関する総合報告、38-44、(2000)  
「フェリーによる海水モニタリング用連続取水の深度代表性に関する船体模型実験」
- ② M. Hinatsu, Y. Tsukada, Y. Minami, H. Tomita and A. Harashima: Proc. 2<sup>nd</sup> Meeting Towards a Cooperative Marine Environmental Monitoring in the Asian Marginal Seas, (10-1)-(10-5), (2000)  
“ Evaluation of Upstream Location of Sampled Water Using Model Ship Experiments”
- ③ 山口良隆、田口昇、山之内博、柴田俊明、樋富和夫、山岸進、ぶんせきかがく、50, 893-899, (2001)  
「マクロ計測およびマイクロ分析による海上流出化学物質の広域モニタリング」
- ④ 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平:日本造船学会論文集、190, 279-285, (2002)  
「船舶に取り付けられた取水口から取水されるサンプル水の上流起源の推定」

(2) 口頭発表

- ⑤ 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平：第74回船舶技術研究所研究発表会、(2000)  
「船舶を利用した海洋環境モニタリング計測データの評価について—サンプル水の上流起源特定実験—」
- ⑥ 山口 良隆、田口 昇、山之内 博、柴田 俊明、樋富 和夫、山岸 進：第10回環境化学討論会、(2001)  
「実海域でのリアルタイムオイル成分分析手法の研究」
- ③ 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平：(第1回) 海上技術安全研究所研究発表会、(2001)  
「船舶を利用した海洋環境モニタリング計測データの評価について 第2報—規則波中航走時のサンプル水の上流起源特定実験—」
- ④ 山口 良隆、田口 昇、山之内 博、柴田 俊明、樋富 和夫、山岸 進：(第1回) 海上技術安全研究所研究発表会、(2001)  
「海水中微量オイル成分の検法の開発について」
- ⑤ 山口 良隆、田口 昇、山之内 博、柴田 俊明、樋富 和夫、山岸 進：第54回コロイドおよび界面化学討論会、(2001)  
「海洋海面の汚染物質検出法についての基礎的研究」
- ⑥ Y. Yamaguchi, M. Majima, N. Taguchi, H. Yamanouchi, T. Shibata, K. Hitomi and S. Yamagishi:  
A Joint Seminar Between CEDRE et NMRI, (2001)  
"A Monitoring for Imaging of Oil and Chemicals Spill—present technique and future plan—"
- ⑦ 山口 良隆、小俣 美郁子、岡田 安弘、田口 昇、山之内 博、太田 英介、樋富 和夫、山岸 進、原島 省：日本分析化学会第50年会、(2001)  
「広域及び定期計測に向けての海水中含有オイル分析手法の検討」
- ⑧ 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成：(第2回) 海上技術安全研究所研究発表会、(2002)  
「船体取水口から取水される流体の上流起源の推定について」(提出済み)
- ⑨ 山口 良隆、田口 昇、山之内 博、柴田 俊明、樋富 和夫、山岸 進：(第2回) 海上技術安全研究所研究発表会、(2002)  
「微量オイルの海洋汚染検出について」(提出済み)
- ⑩ 山口 良隆、山之内 博、柴田 俊明、太田 英介、樋富 和夫、原島 省：第11回環境化学討論会、(2002)  
「フェリー利用のための海水中オイル汚染分析法の検討」(提出済み)

(3) 出願特許

日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成、深澤良平：海上技術安全研究所：「色素流出法と分光光度計を用いた流れに伴った汚染物質等の上流起源特定法」、特願 2001-246882、平成13年8月16日

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

旧運輸省によって、「モーダルシフト」すなわち、自動車による陸上輸送を船舶輸送に切り替えた場合



のエネルギーおよび環境負荷の軽減が検討された。本報告のように定期航路船舶が環境モニタリングに有効であることが定式化されれば「モーダルシフト」に新たな価値が加えられることになる。この件は、未だ正式な審議会あるいは委員会レベルまで上げるに至っていないが、課題代表者とも政策への反映方向を検討中である。