

## 定期航路船舶による海洋モニタリングを実施する上での 船体利用の定式化と効率化に関する研究

富田 宏<sup>\*</sup>、日夏 宗彦<sup>\*\*</sup>、塚田 吉昭<sup>\*\*\*</sup>、南 佳成<sup>+</sup>  
深澤 良平<sup>\*\*\*</sup>、石田 茂資<sup>+</sup>、二村 正<sup>+</sup>、沢田 博史<sup>+</sup>  
山口 良隆<sup>++</sup>、田口 昇<sup>++</sup>、山之内 博<sup>++</sup>、柴田 俊明<sup>++</sup>、  
樋富 和夫<sup>++</sup>、山岸 進<sup>\*\*\*</sup>

### Study of Efficient Utilization of Volunteer Observing Ship for the Ocean Direct Monitoring

by

Hiroshi TOMITA, Munehiko HINATSU, Yoshiaki TSUKADA,  
Yoshimasa MINAMI, Ryohei FUKASAWA, Shigesuke ISHIDA,  
Tadashi NIMURA, Hiroshi SAWADA, Yoshitaka YAMAGUCHI,  
Noboru TAGUCHI, Hiroshi YAMANOUCHI, Toshiaki SHIBATA,  
Kazuo HITOMI and Susumu YAMAGISHI

### Abstract

In the first part of the report, we deal with the hydrodynamic property of VOS (volunteer observing ship) to lend itself to direct monitoring of seawater. The original depth of seawater sampled at the stern at mid draft of the ship of opportunity for monitoring was estimated by model ship in an experimental basin. We injected dye from the upstream of the model ship and picked the water up from the inlet, and then the density occupation rate of dye in the water taken from the fixed inlet (sea chest) was analyzed by use of a spectrophotometer. By iterating the same sort of measurements changing the location of the dye injection point, we obtained a contour map of the occupation rate of dye. Furthermore, CFD (computational fluid dynamics) was employed to confirm the model experiment. The experiment in regular waves was conducted to make above method extend to be applicable in real ocean condition. In addition, full size numerical computation was performed to validate the new method in its practical use. Results showed that the sampled water comes from near the water surface. In the scale of ferry being used for monitoring, it was predicted that water at -0.7m was drawn into the inlet at -4 to -5m in depth.

In the latter part of the paper we examine a simplified method of real time monitoring with

diluted ingredient oil as a test material. Observations in actual sea were conducted and the samples were chemically analyzed in more precise in laboratory as well. The fluorescent spectroscopic analysis was found to be applicable to design the on board equipment and measurement system in the near future. A part of the paper was presented at two international workshops held in Japan and US as a contribution to the global monitoring system of ocean pollution.

---

\* 海洋開発研究領域    \* \*    CFD 研究開発センター    \* \* \*    輸送高度化研究領域  
 + 海上安全研究領域    + +    環境エネルギー研究領域    + + +    (元) 装備部  
 原稿受付 平成 14 年 11 月 13 日  
 審査済 平成 15 年 3 月 21 日

## 目 次

## 1. まえがき

1. まえがき .....	51
第1部 船舶に取り付けられた取水口から採取されるサンプル水の上流起源推定	
2. はじめに .....	52
3. サンプル水の深度代表性に関する研究 .....	52
3.1. 実験的方法 .....	52
3.2. 模型船及び平水中の実験状態 .....	52
3.3. 実験結果および考察 .....	53
3.3.1. 色素の拡散影響調査 .....	53
3.3.2. 船体側部取水口に 流入する流体 .....	53
3.3.3. 船体底部取水口に 流入する流体 .....	54
3.3.4. 規則波中の実験および結果 .....	55
3.3.5. CFDによる推定法 .....	56
3.3.6. CFDによる模型船 対応の上流起源推定 .....	57
3.3.7. CFDによる実船対応の 上流起源推定 .....	58
3.3.8. まとめ .....	59
謝辞	
第2部 船載型モニタリングシステムの研究	
4. はじめに .....	59
5. 海水資料分析 .....	60
5.1. 海水採取 .....	60
5.2. 実験方法 .....	60
5.2.1. 添加回収率試験海水 .....	60
5.2.2. IGOSS 油分測定法 .....	60
5.2.3. 四塩化炭素(CCL <sub>4</sub> )抽出法 .....	61
5.2.4. フーリエ変換赤外吸光分光 (FT-IR)法 .....	61
5.2.5. 実験条件 .....	61
5.3. 添加回収率試験結果 .....	61
5.4. 船上でのサンプリングと 自動化分析の可能性 .....	61
5.4.1. 分析法の選択 .....	61
5.4.2. 予備資料調整 .....	61
5.4.3. 予備試験 .....	61
5.4.4. 船上での実験 .....	62
5.5. 結果と考察 .....	62
5.5.1. 蛍光法でのオイル分析 .....	62
5.5.2. 海水中のオイル含有量計測 .....	63
謝辞	
参考文献 .....	64

本研究は平成11年度より平成13年度に涉って環境省所管にかかる地球環境研究総合推進費のうち海洋汚染分野のプロジェクト研究「アジア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の樹立に関する研究」の一部として、国立環境研究所、産業総合研究所（当時の電子技術総合研究所）、東海大学との共同研究によって実施されたものである。このプロジェクトの目的は経済成長の著しいアジア各国に隣接した海域における河川流出水を起源とする大規模な海洋環境の変質、すなわち「水域への人為的な窒素 (N) およびリン (P) の負荷が増大する一方、ダム建設等により、自然の風化作用で供給される珪素 (Si) の流量が減少し、その結果海洋生態系の基盤が珪藻類 (Si を必要とする概ね無害の藻類) から非珪藻類植物プランクトン (Si を必要としない有害性の藻類) にシフトする可能性がある。」という所謂シリカ欠乏仮説を検証するものである。そのためには植物プランクトンの多くが棲息する海洋表面近傍の海水を直接に採取し、取水中に見られるプランクトンの種類を確かめる必要がある。当所の担当した研究内容は定期航路客船を利用した常時海洋モニタリングを実施するに当たって航走中の船体周りの流れを詳しく調べて採取した海水の深度を確認すること、および採取したサンプルのリアルタイム処理装置の開発に関する調査、試験を実施することであった。前者は主として旧推進性能部、運動性能部のグループがこれに当たり、後者については同じく旧装備部のグループが担当した。それぞれの研究は流体力学ならびに分析化学の知見を要するもので、これらの結果を1つの論文にまとめることはむしろ得策でないと考えられたので、本報告では各々第1部、第2部として編集することとした。但し、目次、図面等については通し番号を付け、参考文献は一括して巻末に示した。また全体プロジェクトに標榜されている国際協力体制の樹立の一環として、平成12年11月にはアジア縁辺海域沿海諸国の研究者、行政担当者の出席を得て、CoMEMANS ワークショップが当所において開催され、本報第1部の前半部<sup>14)</sup>も当該国際集会において発表されている。さらに上記論文は平成14年2月にシアトルで開催された PICES (北太平洋海洋科

学機構)ワークショップにおいて環境研究所の代表研究者によって紹介され、海洋モニタリングの専門家の間でも注目されている。

## 第1部 船舶に取り付けられた取水口から採取されるサンプル水の upstream 起源の推定

### 2. はじめに

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。今回の実船試験で利用したフェリー「さんふらわあいぼり」では海洋生物付着防止装置(MGPS)のついたエンジン冷却水ラインを避け当該装置のついていない活魚運搬用海水ラインを使用した。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 upstream 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 upstream 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 upstream 起源を推定しうることを示した。

### 3. サンプル水の深度代表性に関する研究

#### 3.1. 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 upstream 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 upstream 起源を定量的に特定する。

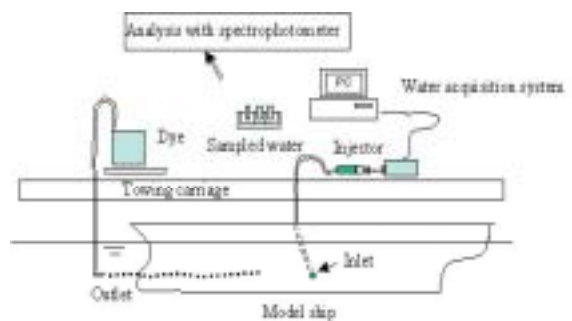


図1 実験構成図

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、 upstream 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、微小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ピングモータにより、注射器のピストンを駆動する流体採取装置を製作した。

#### 3.2. 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 Lpp=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 : Volunteer Observing Ship と略称）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%Lpp 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 10mm、深さ 3mm の半球状に窪ませ、中心部に内径 1mm 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  $1.960 \times 10^{-5}$  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 3.0mm 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%Lpp) の位置とした。

### 3.3. 実験結果および考察<sup>4)</sup>

#### 3.3.1. 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

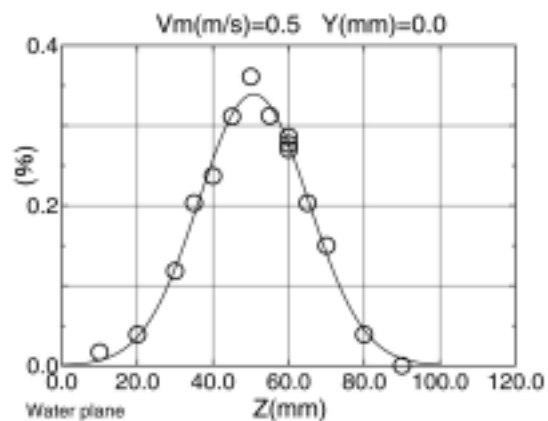


図2 色素拡散の分布  
 $V_m=0.5\text{m/s}$  の場合

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。

#### 3.3.2 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、ここに曲線が表れることは、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

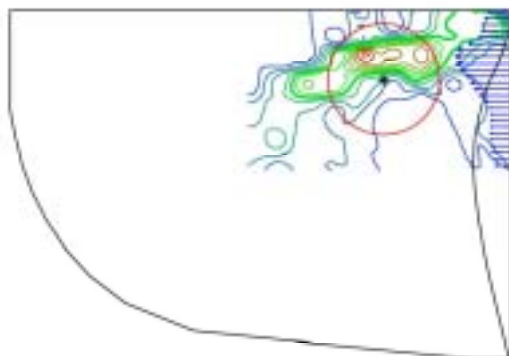
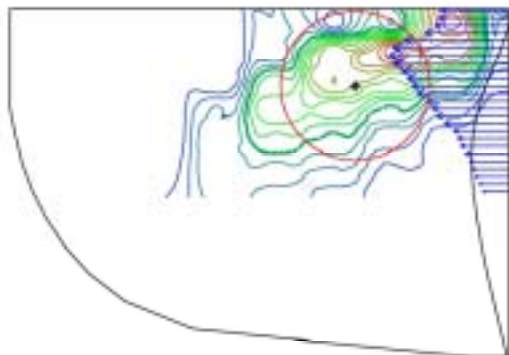


図3 船側に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの

(a) 上図：コンター間隔 = 0.02%

$V_m = 0.500 \text{ m/s}$

$L_{pp} = 2 \text{ m}$

(b) 下図：コンター間隔 = 0.02%

$V_m = 1.377 \text{ m/s}$

$L_{pp} = 2 \text{ m}$

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)を比較てわかるように、船速を変化させてもその分布はほとんど変わらないことが確かめられた。

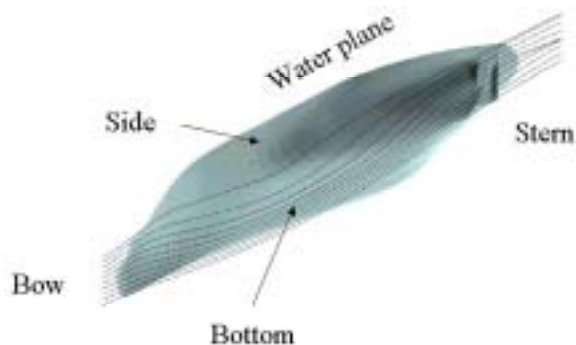


図4 船体周りの流線（数値計算結果）

### 3.3.3. 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も限定的であるといえる。

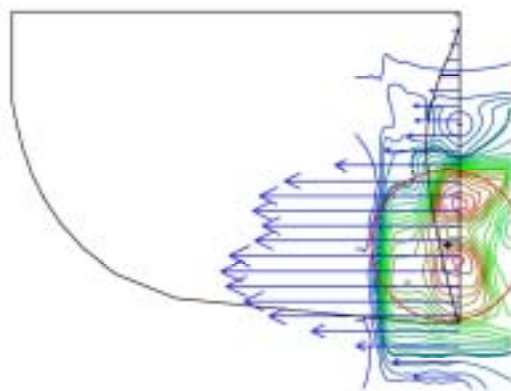


図5 船底に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの

コンター間隔 = 0.02%

$V_m = 0.500 \text{ m/s}$

$L_{pp} = 2 \text{ m}$

3.3.4. 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

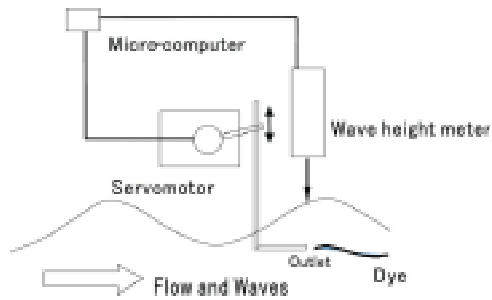


図6 規則波中実験における色素流出装置

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

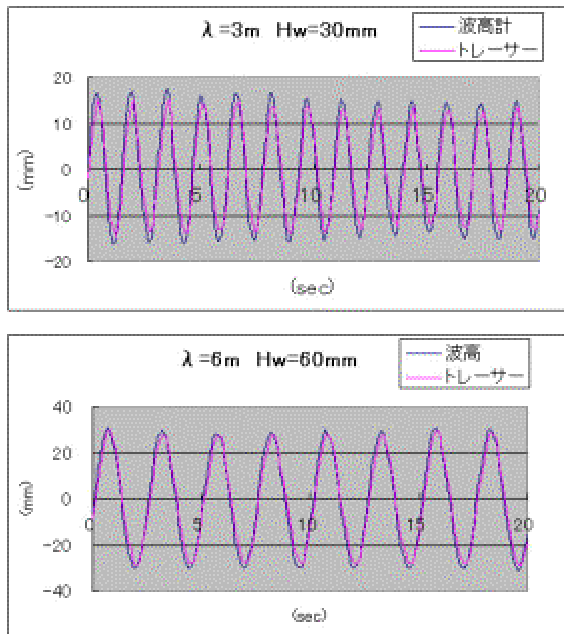
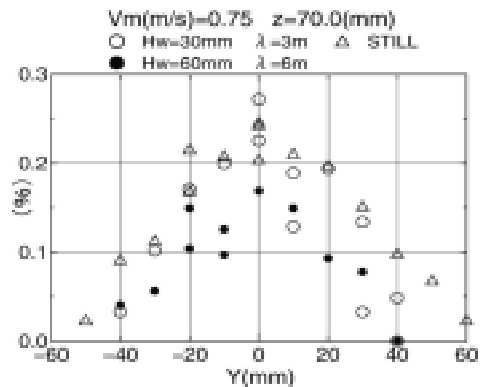


図7 入射波面と色素流出口の運動の同期

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下するので、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。



平水中、波液中拡散調査

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

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。

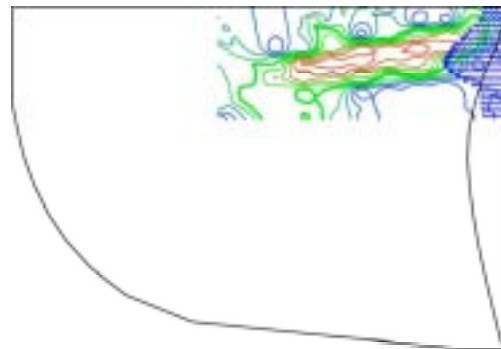


図9 船側に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの（平水中）

コンター間隔 = 0.02%

$V_m = 1.702\text{m/s}$

$L_{p,p} = 3\text{m}$



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

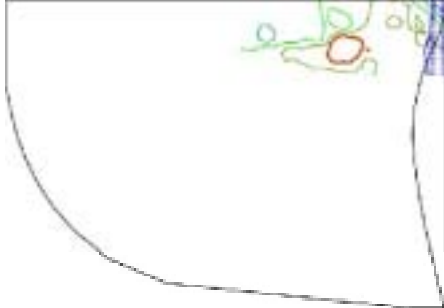


図 10(a) 船側に設置取された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの

コンター間隔 = 0.02%

$V_m = 1.702 \text{ m/s}$

$L_{pp} = 3 \text{ m}$

規則波中、 $\lambda/L_{pp} = 1$

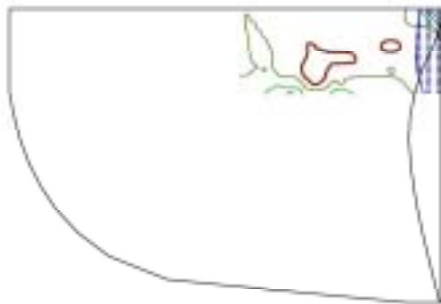


図 10(b) 船側に設置取された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの

コンター間隔 = 0.02%

$V_m = 1.702 \text{ m/s}$

$L_{pp} = 3 \text{ m}$

規則波中、 $\lambda/L_{pp} = 2$

をあげると船体運動が大きくなるため、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  $A$  として、 $\lambda/L_{pp}=1$  のとき  $h_{amp}/A \sim 0.4$ 、 $\lambda/L_{pp}=2$  のとき  $h_{amp}/A \sim 1$  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当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。

### 3.3.5. 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则认为てよい。

$$\frac{D\phi}{Dt} = \nabla \cdot (\nu_{dif} \nabla \phi)$$

この Fick のモデルでは存在確率は流力の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。 $\nu_{dif}$  は存在確率の拡散係数で RANS(Reynolds Averaged NS) 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、

$\nu_{dif} \propto \sqrt{k}$  ( $k$ 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、 $\nu_{dif}$  は次のようにモデル化される。

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

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

ここで、 $d$  は壁からの距離で、 $d_0$  および  $\kappa$  は係

数。 $\nu_{dif}$  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。そこで、本研究では、

$$\nu_{dif} \propto \nu_T$$

と考えてよいと仮定した。具体的な  $\nu_{dif}$  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、流れ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。

### 3.3.6. CFD による模型船対応の上流起源推定

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、 $\nu_{dif}$  は  $\tau$  の 2

倍とし、層流境界層と乱流境界層の閾値は  $\nu_{dif}$  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  $\nu_{dif}$  の値は1とし、乱流境界層に貫入しは、貫入後の流線の距離  $d'$  を用いて  $1 - \tanh(10 \cdot d')$  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

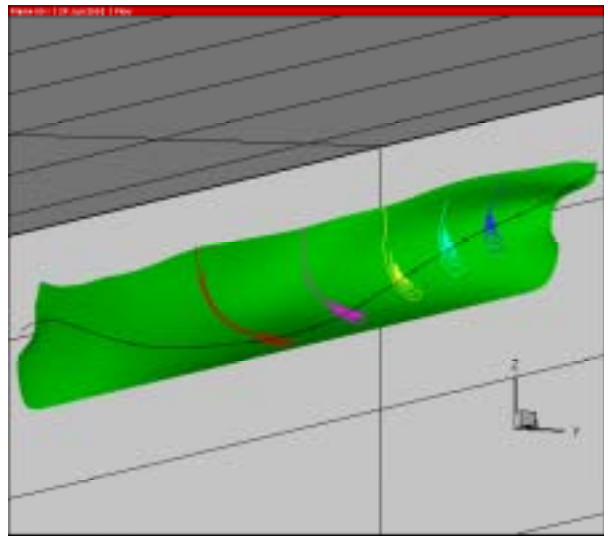


図11 一本の流線に沿って流出した色素の各断面における拡散の様子 (コンター間隔 = 0.1%)

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。

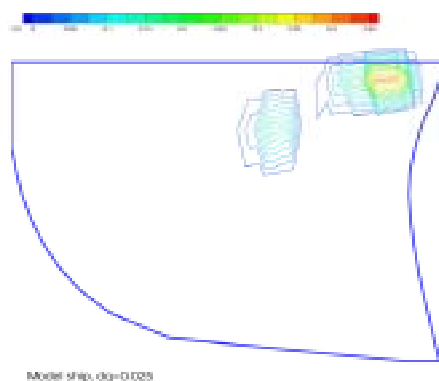


図 12 船側に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの（数値計算、模型船対応）

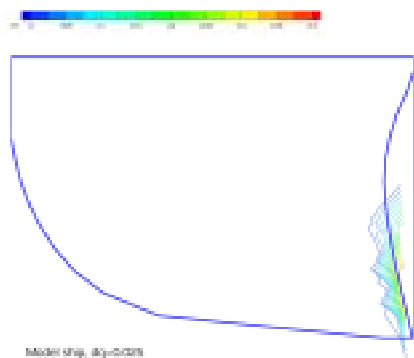


図 13 船側に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの（数値計算、模型船対応）

### 3.3.7. CFD による実船対応の上流起源推定

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

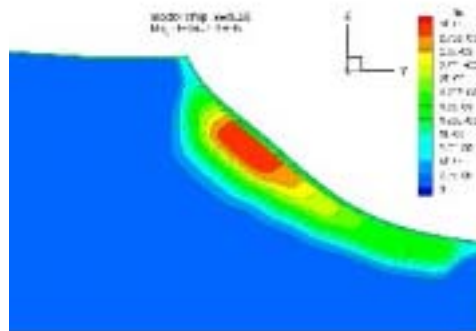


図 14  $x = 0.25$  断面における渦動粘性係数の分布

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

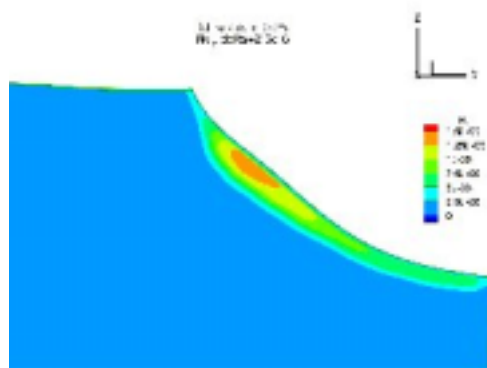


図 15  $x = 0.25$  断面における渦動粘性係数の分布

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、

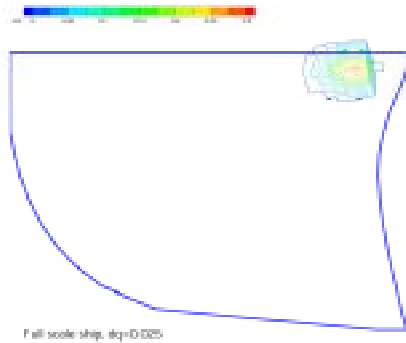


図 16 船側に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの（数値計算、実船対応）

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。

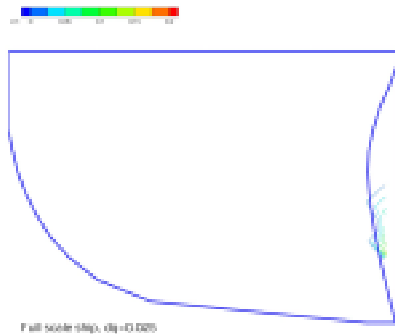


図 17 船側に設置された取水口で採取される水に含まれる色素濃度を色素流出面での等高線で描いたもの（数値計算、実船対応）

### 3.3.8. まとめ

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、実験的手法および数値解析的手法を

開発した。以下に結果を示す。

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。

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。

規則波中の実験も実施し、波高が大きくなれば平水中の結果と定性的に一致することがわかった。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。

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。

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。

### 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。

## 第2部 船載型モニタリングシステムの研究

### 4. はじめに

近年環境問題がクローズアップされている中、化学物質による汚染の種類も増加し、さらに環境中での状態も多様化している。海洋環境への化学物質汚染は、河川、大気経由で流入したり、海洋中及び湾岸などから直接海洋へと様々な経路をたどり流入していると考えられている。これらの動態を解明する事は重要であるが、非常に複雑である。広域で定時的に観察ができれば非常に有益な動態解明の手掛りとなる。そのためには船舶を利用してそれらの航路上を計測できれば有用な環境情報が入手できる。このアイデアを実行したのが、原島・功刀らの「フェリー利用による海洋環境モニタリング」<sup>8)</sup>である。その計測項目として海洋物理的及び海洋化学的の様々な要素が計測されており、船上で計測したデータのいくつかは通信回線を用いて陸上の研究機関に転送されている。

計測項目として

- ( 1 ) 栄養塩としての窒素、リン
- ( 2 ) 藻類の生息指標としてのケイ素
- ( 3 ) クロロフィル
- ( 4 ) 海生微生物
- ( 5 ) ヘキサクロロシクロヘキサンやトリブチルスズなどの化学物質

などを行っている。また日夏らにより船舶内で得られる海水の起源についても明らかにされた。<sup>9)</sup>

以上のような環境データについて広大な海洋での状態を把握するために船舶でも特に定期商船を海洋観測プラットフォームとして利用させてもらい、さらに自動計測した結果について通信を利用し陸上のセンターでモニターを行う、観測ネットワークの構築を目指している。

今後、海洋汚染調査が進行すると汚染物質も多岐にわたると考えられ、必要な計測項目は増加すると思われる。そのため従来の分析技術だけでは環境中の化学物質計測に対応しきれなくなりつつある。まさに新たな採取法や分析法についてのアイデアが必要な時である。また最近の環境計測トレンドとして、現場での瞬時状況把握の必要性があげられる。これは速報的な役割もさる事ながら、前処理及び分析操作での試料への汚染を減らすためにも重要である。つまり現場でサンプリングを行い実験室に持ち帰るやり方から、現場でアウトプットを出すいわゆるその場分析への必要性が出てきている。また環境試料のサンプリング手法についても大量に採取して溶媒抽出を行う方法より、現場で簡易的に処理・濃縮を行う固相抽出法に代表される手法が開発されてきている。また固相抽出法は、液液抽出法に比較して溶媒を大量に使用しない利点があり、また保存や移動のための省スペース化ができる。この様にサンプリング手法のダウンサイズ化が行われてきている。

古くからの海洋汚染問題の一つに海水へのオイル汚染がある。オイル流出事故のような大量のものから、工業排水など様々な場所を起源とし海洋中に分散し混濁した微量オイルまで様々な状態のものがある。<sup>10)</sup>大量のものは機械的にある程度は回収ができるが、海水中に混濁したオイルについては回収が難しく、分布などを評価をした例が少ない。また微量なオイル汚染についての情報は通常の汚染モニタリングのみならずオイル流出事故後の浄化の指標作りにも役立つ。また生態系へのオイル汚染及び濃縮の例についても報告されており<sup>11)</sup>、オイル汚染と生物汚染を相補的に検討することによりリスク評価が可能でとなる。そのために海洋での海水中に含有される微量オイルの含有量や動態解明が重要である。

現在の含有量分析法としては、各海域で海水を大量に持ち帰り、地上の研究施設で分析を行うものである。そのために専用船でないと詳細なデータの取得は難しい。先ほどのフェリー計測で少ないスペースで現場でのオイル採取及び分析手法について簡便化を行うために省スペースサンプリング及び自動化を目指した分析手法について研究を行った。省スペース試料採取は固相抽出法を利用し、自動化については分光法を利用した。

## 5. 海水試料分析

### 5.1. 海水採取

海洋でのオイル汚染状況の概要を予め知るために、観測に使用しているフェリー航路上及びオイル汚染状況に興味のあるそれぞれの場所について海水採取をしてオイル濃度について予備試験を行った。また比較のために人工海水(アクアザルツ)を使用した。

フェリー航路上の海水試料採取は、大阪～松山～別府の瀬戸内海を運航している関西汽船・「さんふらわあいばり」内で行った。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に装備されている環境分析専用の海水採取ラインから行った。採取した海水は良く洗浄した3L 褐色ビンに入れて持ち帰り、各種分析を行った。試料は次ぎの通りである。

実海水検体：福井県三国町、松山港、別府港、大阪湾、大阪湾船外、大阪湾船内

人工海水：アクアザルツ

### 5.2. 実験方法

添加回収試験及び実海水の分析を以下の通りの手法で行った。

#### 5.2.1. 添加回収率試験海水

回収率を求めるために、試料を人工海水に添加して抽出などを行った。実験操作としては、人工海水 200 mL にフェナントレン、n-エイコサンを最終濃度 1 mg/L になるように添加した後、四塩化炭素(CCl<sub>4</sub>) 20 mL を加え 10 分間振とうした。この操作を 2 回繰り返す、CCl<sub>4</sub> を無水硫酸ナトリウムで脱水し、ロータリーエバポレーターで濃縮を行った。この溶液をガスクロマトグラフ質量分析装置(GC/MS)で測定を行った。

#### 5.2.2. IGOSS 油分測定法

ここで用いた方法は Integrated Global Ocean Station System (総合世界観測組織) に準拠した

四塩化炭素抽出 - 蛍光分析である。(以下、IGOSS 油分測定法)すなわち、人工海水 2 L にクリセンを 0.42  $\mu\text{g/mL}$  添加し攪拌後、n-ヘキサンを 100 mL 加え 15 分間攪拌を行った。静置後 n-ヘキサン層  $\text{CCl}_4$  を分離する。残った試料に n-ヘキサンをさらに 80 mL 加えて 15 分攪拌を行った。また静置後に n-ヘキサンを分離して、前に分離したものと合わせて濃縮及び定容を行い、蛍光分光光度計で計測を行った。

#### 5.2.3. 四塩化炭素( $\text{CCl}_4$ )抽出法

人工海水 2 L にクリセンを最終濃度が 22  $\mu\text{g/L}$  になるように添加し攪拌後  $\text{CCl}_4$  を 100 mL 加え、さらに 15 分攪拌を行った。静置後  $\text{CCl}_4$  層を分離して、残った試料に  $\text{CCl}_4$  を 50 mL 加えて 15 分攪拌を行った。また  $\text{CCl}_4$  層を分離し前回の  $\text{CCl}_4$  層と合わせ蒸発乾固させた。その固形物を n-ヘキサンに溶解させ蛍光分光光度計で計測を行った。

#### 5.2.4. フーリエ変換赤外吸光分光(FT-IR)法

人工海水 1 L に n-エイコサンを最終濃度が 1  $\text{mg/L}$  になるように添加し、 $\text{CCl}_4$  50 mL を加えて振とう抽出を行った。 $\text{CCl}_4$  層を FT-IR で計測をしてメチル基の伸縮振動の 2854  $\text{cm}^{-1}$  で定量を行った。

#### 5.2.5. 実験条件

ガスクロマト質量分析装置(GC/MS)

装置：HP6890GC/5973MSD (Hewlett Packard 社製)

カラム：HP-5MS (30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu\text{m}$ )

カラム温度：60 -10 /分-320 (5分) キャリアーガス：He 1 mL/分、注入口温度：250、注入法：スプリットレス、計測法：スキャン法

蛍光分光光度計

装置：島津 RF-5000

測定条件：励起波長 310.0 nm, 蛍光波長 250.0 ~ 450.0 nm

FT-IR

装置：Nicolet 製 Magna 860

測定条件 積算回数：64、測定範囲：3200 ~ 2500  $\text{cm}^{-1}$ 、分解能：4  $\text{cm}^{-1}$

#### 5.3. 添加回収試験結果

それぞれのオイル添加実験の人工海水からの回収結果について記載する。それぞれの試薬及び手法で3回以上実験を行い、その平均値を示したも

のである。GC/MS 法による添加回収試験の結果は n-エイコサンとフェナントレンの平均回収率は両者とも 105% となった。蛍光分光光度法による添加剤クリセンの平均回収率はヘキサンの IGOS 油分測定法の場合は 78.2% で、 $\text{CCl}_4$  の平均回収率は 88% となった。また FT-IR 法においては平均回収率は 96.3% となった。

実海水の結果について述べる。通常は n-ヘキサンを使用して回収するが、今回の実験ではヘキサンの回収量が少ないために、 $\text{CCl}_4$  で行ったところ標準的な回収量であった。そのため今回の実験では  $\text{CCl}_4$  抽出を採用し、添加回収率を求めた。標準としてクリセンを添加して、平均回収率は 81% となった。予備試験と良い一致をしている。手法として蛍光分光光度法が高感度かつ簡便な手法であるので今回の抽出後の計測は蛍光分光光度法でおこなった。航路上のそれぞれの海域でのオイル含有量の平均値を表 1 に示す。

表 1 各海域のオイル含有量

計測場所	含有量
大阪湾	Trace
松山湾	ND
別府湾	3.3 ppb

#### 5.4. 船上でのサンプリングと自動化分析の可能性

##### 5.4.1. 分析法の選択

分光法を用いたオイル検知には、IGOSS 油分測定法やリモートセンシング法<sup>12)</sup>では蛍光法が利用されている。オイル成分中には、紫外光で励起すると蛍光が放出される成分が多数含まれている。また吸光分析法より発光分析法の方が高感度分析を比較的行いやすい。そのために本研究もこの性質を利用して測定を行う。

##### 5.4.2. 予備試料調整

水及び海水に既知量のオイルを添加した試料を調整した。海水にオイルを入ただけだと確実に分散をしないので、高速回転カッターを利用し強制的に分散させた。オイルは軽油、A 重油などを 50 ppm になるように添加したものを原液とした。この原液を必要に応じて各含有量に希釈を行った。

##### 5.4.3. 予備試験

蛍光分光装置(日立 F-2500)を用いてスペクト



ル計測を行った。セルは  $1 \times 1 \times 10 \text{ cm}^2$  の石英製蛍光分析用を使用した。蛍光スペクトルは励起波長、蛍光波長、強度の3次元のものを取得した。

#### 5.4.4. 船上での実験

船上での海水サンプリング及び分析は、大阪南港フェリーターミナル内に停泊中の関西汽船・さんふらわあいばり内の環境実験区画で行った。試料海水は、さんふらわあいばりの船底より汲み上げを行い、船内の環境試料専用配管を通して船内の実験室へ供給されている。実験室では海水専用水道より分岐し、ビニールホースにて微量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は、最初にオイルを確認するためのフロー型蛍光分析装置 (Turner Design 10-AU) があり、その後、固層抽出オイル採取フィルター (3M Oil & Grease Desk 90 mm) へとつながっている。現場写真を図18に示す。このフィルターはオイルを選択的に吸着・捕集する固層フィルターである。また大量の海水処理のために、フィルターは直径90 mmの非常に大きなものを採用した。採取フィルターを10 L吸引ろ過瓶にセットし、ろ過効率を向上させるために真空ポンプを使って強制的に吸引を行った。ろ過量は吸引ろ過ビンで計測を行い、吸引後不用になった海水は吸引ろ過瓶より排水口へ流した。

サンプリングシステム海水を通水しオイル採取したフィルターをビニール袋へ入れて保湿したまま研究室に持ち帰った。フィルターより採取したオイルを取り出すために n-ヘキサン (蛍光分析用) を用いて逆抽出を行った。さらに n-ヘキサンで定容後、蛍光分光装置 (日立 F-2500) でオイル量の定量を行った。オイルの標準として A 重油を用いた。

装置条件 (蛍光分光装置)

装置：日立 F-2500

励起波長：220 ~ 750 nm

検出波長：220 ~ 750 nm

励起光及び検出光スリット幅：5 nm

検出：石英セル中

フロー型蛍光光度計

装置：Turner Design 10-AU

光学系：Short Wavelength Oil Optical Kit 使用

励起波長：254 nm、検出波長：300 ~ 400 nm

検出：石英セル中



図18 船内実験室でのオイル

#### 5.5. 結果と考察

##### 5.5.1. 蛍光法でのオイル分析

オイルを添加して調整した試料は、1ヶ月以上放置しても水層とオイル層に分離せずに、希薄なエマルジョン状態で安定であった。

蛍光分光法を利用する予備計測では、軽油及びA重油が水中での含有量500 ppbのものを計測した。そのスペクトルをそれぞれ図19、図20に示す。このスペクトルは、それぞれの励起波長に対する検出強度を等高線で示したものである。これらのスペクトルに共通している事は図中の矢印示す通りに277 nmの光で励起して318 nmにピークトップが出現することである。蛍光の相対強度は軽油では1624、A重油では1025であった。検出の限界値は励起波長277 nmと検出波長318 nmのピークトップを用いて、バックグラウンドと50 ppbを比較したところ20の相対強度差があった。この結果より蛍光分光法でのオイルの検出下限値は数十 ppbまで可能であると見積もった。また2つのオイル種のピーク位置より蛍光分光法ではオイル種を特定できない。しかしながら標準試料への換算量になるが、種類の区別なく自然界などで各種混合されたオイルを全体量として捉えるのには最適かつ計測しやすい手法である。IGOSS油分測定法と等価な n-ヘキサン蛍光分析による陶らの報告<sup>13)</sup>に記載されている1975年～



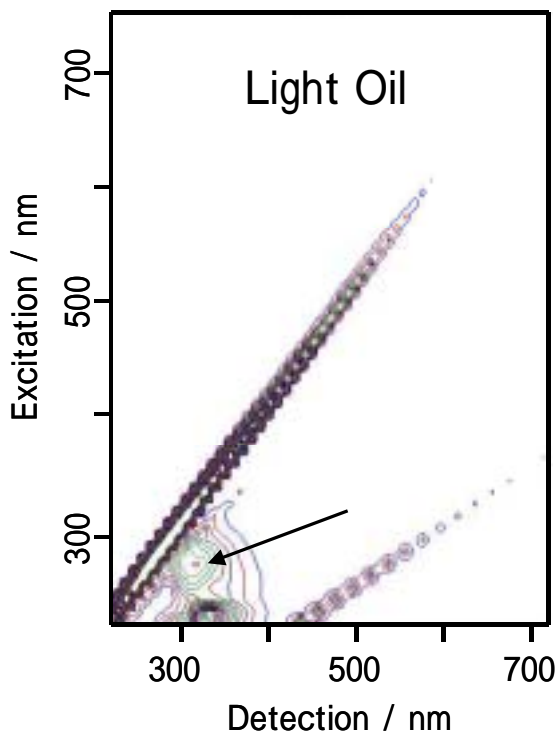


図19 軽油 500ppb 添加の蛍光スペクトル

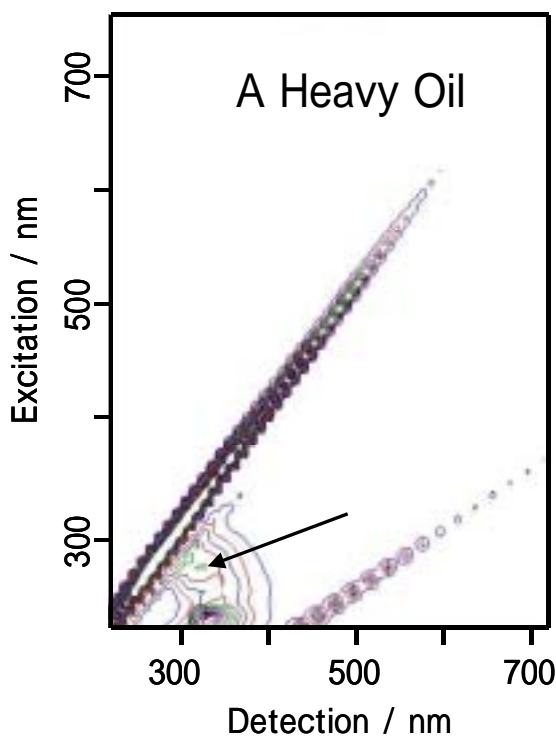


図20 A重油 500ppb 添加の蛍光スペクトル

1996年の間の調査によると日本近海の海水のオイル含有量は 0.0 ~ 118  $\mu\text{g/l}$  である。この値が

ら蛍光分光法では、原理上は分析ができる異常値を検出できるが、限界値近い場合は定性的なもの、検量線の範囲では定量用として海洋環境モニタリングに使用できる手法である。

#### 5.5.2. 海水中のオイル含有量計測

試料採取用海水供給ラインの配管のオイル汚染について検討を行った。実験としてフェリー内で採取した海水と着岸時にフェリー取水口近くの海面で採取した海水のオイル量を比較した。結果として分析法の感度を考慮に入れてフェリー内外の含有量は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。

フロー型蛍光分析について船内で行った。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。そのために海水中にオイル成分の有無を判断する定性分析のみであった。しかしバックグラウンドが一定にならず定量性を確保することに関しては今の段階では難しい。

固相抽出法で海水中のオイルを濃縮し、実験室に持ち帰り逆抽出・定容を行い蛍光法で観察を行った。そのオイルについての蛍光スペクトルを図21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

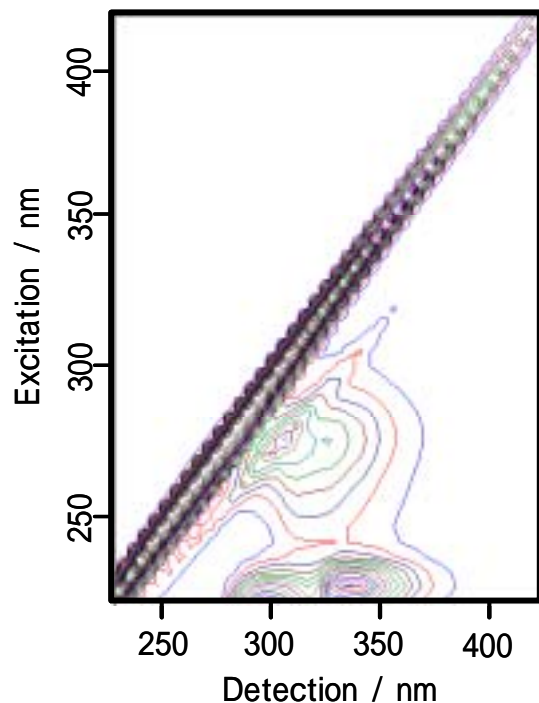


図21 実海水からのオイル成分の蛍光スペクトル

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利用可能である事がわかった。しかしながら予め行った海水中濃度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。また今までの蓄積されたデータと比較するために現在まで行われている IGOS 油分測定法などどのような相関があるか比較する必要がある。

結論として、まだ少し詳細な分析は必要なものの固層抽出法を用いた定期フェリーでのサンプリング手法は今までの手法に比較してダウンサイズ化された、簡便で省スペース化されたものであることがわかった。他の物質についても今後このような手法の応用が期待される。

#### 謝辞

研究にご協力頂いた国立環境研究所原島省博士、功刀正行博士、日本気象協会関西支部太田英介氏、住化分析センター田中裕子氏、小俣美郁子氏、岡田安弘氏に感謝致します。

#### 参考文献

- (1) 原島省、功刀正行:「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 (1997)
- (2) Harashima, A., Tsuda, R., Tanaka, Y., Kimoto, T., Tatsuta, H. and Furusawa, K.: "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 (1997)
- (3) 原島省:「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 (1998)
- (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) N. Hirata and T. Hino : "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) 原島省、功刀正行編: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書、(2000)
- (9) 日夏宗彦、塚田吉昭、南佳成:平成14年度(第2回)海上技術安全研究所研究発表会講演集、p.189 (2002)
- (10) E. Gold: "Gard Handbook on Marine Pollution", p.228 (1997), (Assuranceforeningen Gard, Norway)
- (11) 堀之内愛、堤史薫、河野恵里子、高田秀重、モハメド・ザカリヤ・パウジ、乗木新一郎:湾岸研究、37、23 (1999)
- (12) S. Yamagishi et. al.: "Exchange of experience in at-sea response to offshore oil spills by passing ships", Proceedings of From the Nahodka to the Erika, p77 (2000)
- (13) 陶正史:海洋、30、599 (1998)
- (14) M. Hinatsu, Y. Tsukada, Y. Minami, H. Tomita and A. Harashima : "Evaluation of upstream location of sampled water using model ship experiments", PICES SCIENTIFIC REPORT, No.21 (2002)