# 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

日夏宗彦*, 塚田吉昭*, 南 佳成*, 原島 省**

* 船舶技術研究所
**国立環境研究所

**要約**：フェリー等の VOS（Voluntary Observation Ship）を用いた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、海水面からどの程度の深さに存在していたものかを特定することは、サンプルされた資料の評価の上で重要である。本研究では、船体取水口に取り込まれたサンプル水の上流起源位置を推定することを目的とし、本年度は実験的研究によりこれを明らかにすることを試みた。実験では、まず VOS に見立てた模型船を作製した。これを試験水槽中で曳航し、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。この結果を色素を流出させた位置ベースに回収された色素含有量を表示することで、取水口に流入する流体が船体上流のどの付近からくるかを明らかにした。また、CFD (Computational Fluid Dynamics) による船体まわりの流れを計算し、船体上流から流れる流体粒子がどのような経路を経て流れ去るのかを流線追跡を行って確かめた。その結果は、実験で得られた結果と整合することが確認された。

## 1．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、現在、国立環境研究所において、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 [1), 2), 3)]。 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評価を行っている。評価過程の内、採取された海水が、本来海洋のどの深さに存在していたかを知ることは、計測データの信頼性を高めるうえで非常に重要となる。

本研究は上記の背景のもとに、船体取水口より取り込まれた海水の上流起源を推定することを目的としている。推定手法としては、模型船を用いた実験的手法と CFD シミュレーションによる方法が考えられる (例えば Kodama *et al.*,1992[4)]) 。実験的手法では模型船を用いて色素などのトレーサーを船体上流から流出させ、これを取水口から回収し、どの程度回収できたかの量から上流起源を推定するするものである。わかりやすい方法であるが、模型船と実船のレイノルズ数の違いによる尺度影響、実験に際して色素を流出させるときに、色素自身が拡散する影響等を考慮しなければ、実船での推定精度が保証できなくなる。一方、CFD による方法では、モデル方程式の良否とその最適化等に実験結果との検証が必要であるが、一旦モデル方程式が確立されれば実船レベルでの推定は困難ではない。本報告ではまず実験的手法を主として

あげた。

## 2．実験方法

実験では、模型船上流から色素を流出させ、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、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す。実験方法の概念図を Fig.1 に示す。

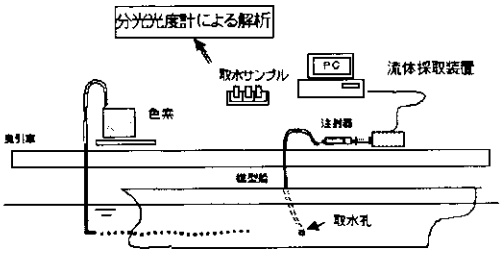



Fig. 1 Schematic setup of experiment.

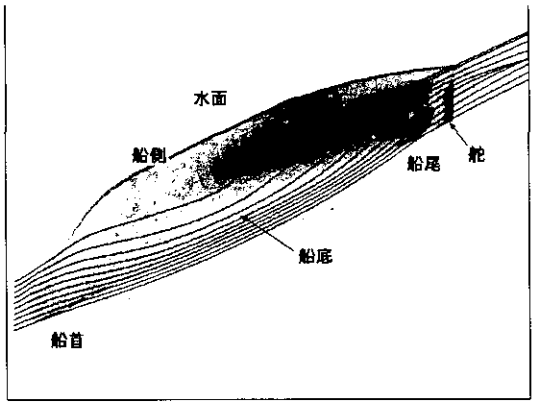



Fig. 2 Trajectries of streamlines atarting from around ship bow.

色素含有量の測定に用いた分光光度計は島津紫外可視分光光度計 UV-2500PC で、吸光度を精確に測定できる。流出させる色素は過マンガン酸カリウム（$KMnO_4$）を使用した。これは無害かつ可視化波長域に高い吸収ピークがあるのが特徴で、微少な吸光度の測定も比較的容易となると考えた。色素の濃度は、ベンチテストの検討結果より水槽水 1000cm$^3$ に 1g を溶かしたものを使用した。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で、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．模型船および実験状態

現在、瀬戸内航路で運航されているフェリーをボランタリー観測船（Voluntary Observation Ship, VOS）として海洋健康度モニタリングを実施している。しかし、同船の船型データが入手できなかったので、ここではその代替船として運輸省航海訓練所所属の「青雲丸」の模型を用いた。実際の船とは異なるが、今回はまず、試験方法自体の検証と将来実施予定の CFD による上流起源の推定法の検証データを収集するという意味を兼ねて三鷹第３試験水槽において実験を行った。模型船長さは、２m（垂線間長 Lpp）とした。比較的小型の模型を使用したが、色素が拡散し濃度減少による測定精度の低下を考慮したためである。取水口位置は現在モニタリングに供されている VOS 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%船長の位置(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 にとりつけられた取水口の面積（シーチェスト開口部）は 0.3481m$^2$ 、船長の自乗で無次元化した面積は 1.776x10$^{-5}$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 1.96x10$^{-5}$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。色素の流出口は直径が 3.0mm、流出速度は 100cm$^3$で 30 秒程度であったので、平均流出流速は 0.47m/sec 程度となる。色素が流出すると流出させる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、容器の底に適宜板を敷いた。

実験でのサンプル水の吸引速度は、0.536ml/sec とした。これを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 6.83mm/sec となる。これを模型船速の割合で表すと、船速が 0.5m/sec のとき 1.34%、1.377m/sec のとき 0.496%となる。一方、対応する VOS では取水量が 20000ml/min なので、取水口全体の面積の平均吸い込み速度は 0.956mm/sec となる。同船の運航速度は 11.52m/sec であるから、平均吸い込み速度は船速の 8.3×10$^{-3}$%以下となる。従って実験で行った取水速度は実船に比べてかなり速い。実験のサンプル水の取水速度を実船のそれと一致させるためには、たとえば 1.377m/s で実験したときでも、今回の取水に要した取水時間の 60 倍程度の時間をかけて取水をせねば成らず、現実的に無理であった。

模型船の曳航速度(Vm)は、予備試験的にいくつかの速度を設定したが、0.5m/sec（Fn=0.11）と 1.377m/sec（Fn=0.31）で行った。0.5m/sec のときは色素流出速度とほぼ同じで、実験時に色素が噴流状に供給されない利点がある。また 1.377m/sec は実船の運航速度に対応する。

色素を流出させる位置は、流出点に船体の影響が大きく及ぼさず、かつ模型船に極力近い位置からを検討し、F.P.から上流側に 100mm（5%Lpp）の位置とした。

## 4．模型船流場の推定

CFD[4]により、実験に用いた模型船周りの時間平均的な流れがどのようになっているか求めた。Fig.2 に、模型船船首部分から粒子を流出させたときの軌跡を示した。図は水中から船尾を斜めに見上げたところを示している。一般に船首水面近傍から流出した粒子は、船首から船体中央部に流れるにつれ、船底に回り込みそれが船尾付近で再び水面近傍にわき上がると行った行程をたどる。これは一般によく知られた傾向である。このことから、船尾部の喫水中央付近に取り付けられた取水口には船首近傍の流れが流入するであろうことが予測される。ただし、この図では流れの乱れによる"散乱"の影響は考慮されていないので、本手法そのままでは取水口に流入する上流起源の特定は定量的には行えない。このためには別にモデル方程式が必要であり、それについては後述する。

## 5．実験結果および考察

5.1　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 60mm とした。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した。Fig.3 に Vm=0.5m/sec の結果を示す。Fig.3a は垂直方向の分布を、Fig.3b は水平方向の流出させた色素の濃度比（%）を示した。水平方向、垂直方向とも分布は正規分布状であり、今回の Vm と距離における拡散は、大略半径 50mm の円内に収まっている。なお、垂直方向の分布でピークが z=60mm 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思われる。

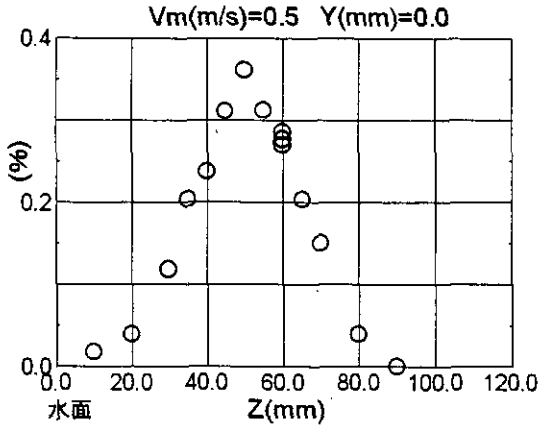



Fig. 3a Vertical distribution of diffused dye under uniform flow.

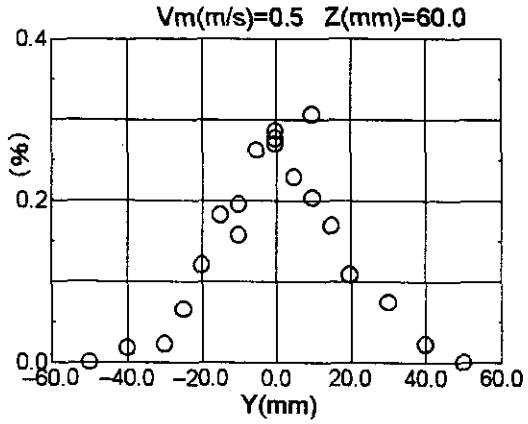



Fig. 3b Horizontal distribution of diffused dye under uniform flow.

5.2　船体側部取水口に流入する流体

実験結果を Fig.4～7 に示す。Fig.4,5 は Vm=0.5m/sec、Fig.6,7 は Vm=1.377m/sec の結果である。Fig.4 には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。図中の円は計測領域内の濃度全量がその円面積と最大濃度の積に等価な円を示す。中心は全濃度の重心である。Fig.5 は Fig.4 の等深度線に沿って積分した量を矢羽で示した。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、流線追跡の結果から想定される結果とほぼ一致する。なお、色素の拡散影響のため、正面から見て流線にそった位置に対応する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。速度を速くしても同様の傾向である（Fig.6,7）。

5.3　船体底部取水口に流入する流体

Vm=0.5m/sec の時の結果を Fig.8, 9 に示す。表示は Fig.4, 5 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、もっとも多く色素が含まれている。また、場所も船側取水口に比べて限定的である。従って、モニタリングのために設置するサンプル水の取水口の取り付け位置は、制約がない限り、船底の船体対称

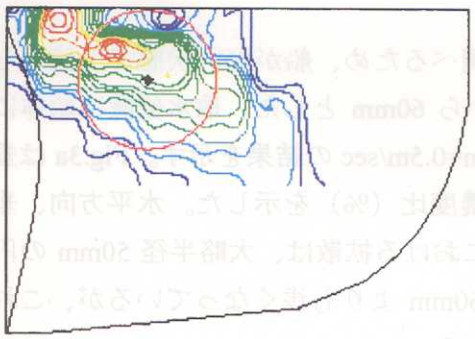


Fig.4 Contour of percentage of dye in sample water picked up from side inlet (Vm=0.5m/s, Thick Line 0.1%, contour interval 0.02%).

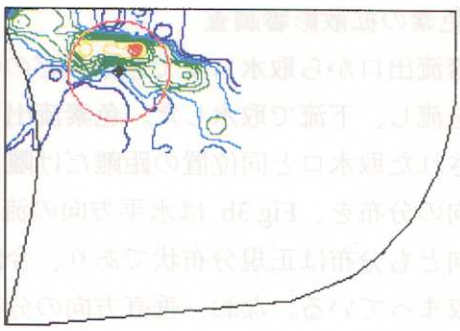


Fig.5 Contour of percentage of dye in sample water picked up from side inlet (Vm=1.377m/s, Thick Line 0.1%, contour interval 0.02%).

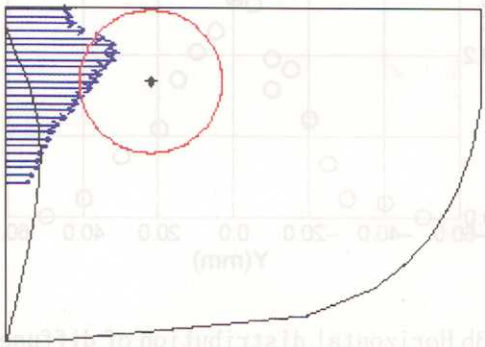


Fig.6 Integrated percentage of dye in sample water along horizontal direction (side inlet, Vm=0.5m/s).

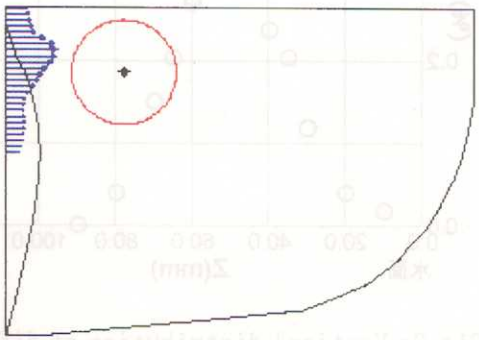


Fig.7 Integrated percentage of dye in sample water along horizontal direction (side inlet, Vm=1.377m/s).

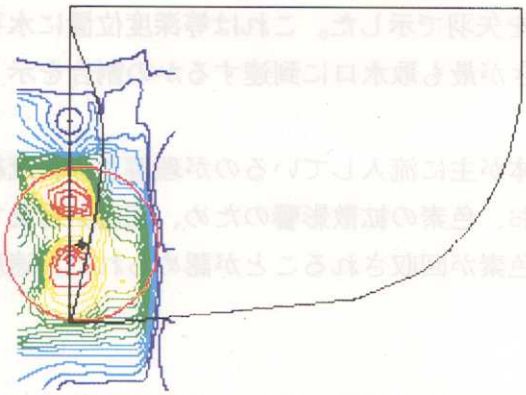


Fig.8 Contour of percentage of dye in sample water picked up from bottom inlet (Vm=0.5m/s, Thick Line 0.1%, contour interval 0.02%).

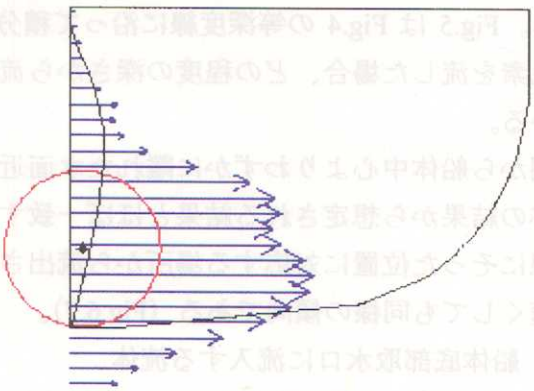


Fig.9 Integrated percentage of dye in sample water along horizontal direction (bottom inlet, Vm=0.5m/s).

面におくことが望ましいと思われる。

**6. モデル方程式について**

ある生物粒子群が船体に対し$(x_0, y_0, z_0)$を常に一定の時間間隔で通過して船体に接近するとする。この点を通過後、層流域を流れていく限りでは、流線にそって流されて行くであろうから、このときは流線の方程式を解けば$(x_0, y_0, z_0)$ を通過した微小生物のその後の位置は同定される。この生物粒子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、次々にやってくる生物粒子は、乱れによってあちらこちらに散乱して行くであろう。この運動はいわゆるランダムウォークでモデル化できるであろう。このように仮定したとき、生物粒子の存在確率を$\phi(x,y,z)$とすると上流の$(x_0, y_0, z_0)$では$\phi(x_0, y_0, z_0) \propto \delta(x_0, y_0, z_0)$ で表される。

これが乱れによって散乱されるときは、次のような存在確率関数は拡散方程式で表現されると考えてよい。

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

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。$\nu_{dif}$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。生物粒子は乱れが大きいところでは、平均流線よりより遠い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。

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

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

ここで、$d$ は壁からの距離で、$d_0$および$\kappa$は係数。これは、動粘性係数の一方程式モデルで使われる形と同じである。従って、

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

と考えてよいであろう。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が十分に乱れが小さければ、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、水槽水自体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、計算値実験値を比較するときには注意が必要である。

## 7. あとがき

模型船の取水口に来る流体位置測定を、分光光度計による色素濃度測定方法で試み、以下の結果を得た。

1.上記の実験方法で、定量的な流体起源の特定が可能である。

2.模型船の側方に設置された取水口位置では、水面から喫水の 13.1%の深さから流出させた場合、もっとも高濃度で回収された。船型は違うがこれを今回の VOS にあてはめると、海面下 0.71m 付近となる。

また、CFD による上流起源の推定方法についても考え方を述べた。

問題点として、今回の実験は海洋健康度を測る指標となるものが、鉛直方向に一様に分布しているものと仮定しているため、もし、その物質がもともと深さ方向にある分布を持っているとすれば、今回の結果と本来の分布の積のような量を用いて上流起源を推定する必要がある。また、色素の拡散影響に対するレイノルズ数影響をどう扱うかも今後解決すべき問題である。さらにモデル方程式を CFD により解き、これと今回の実験データと比較し、数値解析と実験データの相関を調べ、それを考慮して、実船スケールの拡散計算を実施する方法を試みることが残されている。

波がある場合や船が運動している場合で同実験を実施し、波や船体運動の影響を考慮したときの上流起源の特定を行うことも課題である。

## 参考文献


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) Kodama, Y. (1992):Computation of Ship's Resistance Using an NS Solver with Global Conservation - Flat Plate and Series 60(Cb=0.6)Hull - , 日本造船学会論文集, 第 172 号, 147-155.

# A model ship experiment on the original depth of the sea water taken for the monitoring system deployed on the ferry

**Munehiko HINATSU*, Yoshiaki TSUKADA*, Yoshimasa MINAMI* and Akira HARASHIMA****

*Ship Research Institute

**National Institute for Environmental Studies

Abstracts: In the monitoring of a sea helthiness using a voluntary observation ship, the information of original depth of sampled water is very important to assess it through sampled water analyses. The objective of the research is to develop the method to estimate the original depth of sampled water. In order to do that, first of all, we use a model ship experiment. In the experiment, we inject dye from the upstream of the ship and pick the water up from the inlet, then occupation rate of dye in the picked up water is analysed using a spectrophotometer. The occuaption rate is mapped onto the position of dye injection and we thus show the original location of sampled water as a contour map. Further, numerical simulation of flow around ship is done and streamline tracing is carried out. Thus the water trajectories which pass near the inlet are roughly estimated. These results agree with the experiment.