

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

-フェリーを利用した海洋健康度モニタリングにおけるサンプル水の深度代表制の評価法-

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

船型開発研究グループ

耐航・復原性能研究グループ

*日夏 宗彦

塚田 吉昭

南 佳成

1. はじめに

フェリー等の VOS (Voluntary Observation Ship) による海洋健康度モニタリング ([1] ~ [4]) 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。本研究では、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上流起源位置の推定を、実験および数値解析によって推定する方法を提案し、その妥当性を検証した。なお、本研究は、国立環境研究所が平成 10 年度から 3 年計画で実施した「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」のサブテーマとして実施したもので、本報告は 3 年間で実施した研究成果をまとめたものである。

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、色素を流出させた上流位置断面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では尺度影響をうけるため、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。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、乱れによる色素の拡散をモデル化した方程式を数値的に解き、模型船および実船スケールにおける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、模型船対応の数値計算結果と実験結果を比較することで今回

のシミュレーションモデルの妥当性を調べ、これをふまえて、実船における上流起源について考察した。

2. 実験システム^[5]

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 1000cm³ に過マンガン酸カリウム KMnO₄ 1g を溶解したものを重力式に流出させ、模型船に設置した取水口から水槽水を採取する。次に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、上流から流出させた色素含有量に対する比を求める。この手続きを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すと、得られたコンターカーブは、上流のどの位置から色素を流出させたときにもっともよく回収されるかを示すことになる。これにより、取水口から取り込まれる流体は上流のどの位置からもっとも多く流入するかが定量的に推定できる。以上の実験システムの概念図を図 - 1 に示す。

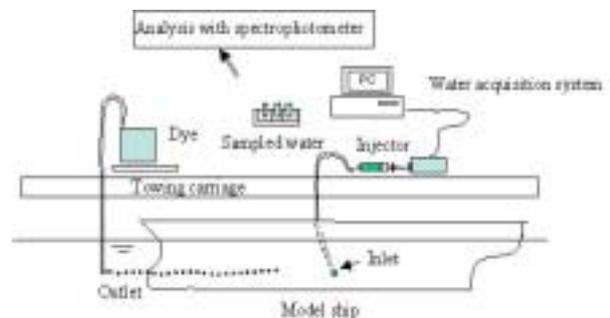


図 - 1 実験構成図

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り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。

3. 模型船および実験状態^[5]

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。今回の実験では、船長が2mの模型船を用いて実験した。取水口位置は船尾から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。取水口部は、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た。模型船の曳航速度(V_m)は、0.5m/s($Fn=0.11$)と1.377m/s($Fn=0.31$)とした。色素の上流流出位置は、F.P.から上流側に100mm(5%Lpp)の位置とした。

4. 平水中の水槽実験結果および考察

4.1 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の1例を図-2に示す。図は船の右舷半分を正面から見たもので、センターライン

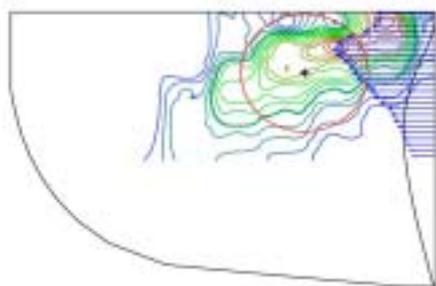


図-2 船側に設置された取水口に取水される水に含まれる色素濃度の上流起源図
(コンター間隔=0.02%, $V_m=0.5$ m/s, $L_{pp}=2$ m)

にあるふくらみのある曲線はバルブのF.P.における断面を示す。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。

5. 規則波中の実験および結果^[6]

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、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3mの模型船を用いた。実験に先立ち、波自身による色素の拡散影響、模型船寸法の違いによる流入色素の上流起源に相違がないか予備試験を行い、それらの影響は無いことを確かめた。実験に用いた規則波の条件は、波長船長比 λ/L_{pp} を1.0及び2.0とし、波高を波長の1/100と設定した。図-3に結果の一例として $\lambda/L_{pp}=1.0$ 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。

規則波中、 $\lambda/L_{pp}=1.0$

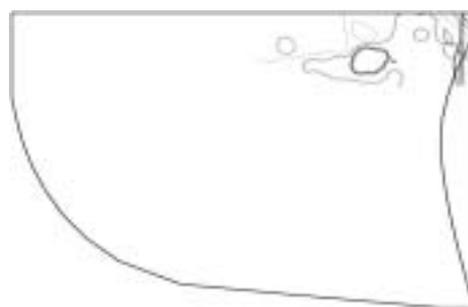


図-3 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度の上流起源図
(コンター間隔=0.02%, $V_m=1.702$ m/s, $L_{pp}=3$ m)

6 . CFD による推定法^[7]

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拡散する。この運動をランダムウォークでモデル化すると、トレーサーの存在確率 $\phi(x, y, z)$ は、次に示す拡散方程式で表現されると考えてよい。

$$\frac{D\phi}{Dt} = v_{dif} \nabla^2 \phi \quad (1)$$

v_{dif} は存在確率の拡散係数で本研究では次のようにモデル化した。

$$v_{dif} \propto v_T \quad (2)$$

比例係数は数値計算結果と実験結果を比較して決定した。

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 コードで計算した [8]、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。計算された結果を図 - 4 に示す。図 - 4 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 - 5 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。これは実験結果の分布の様子をよくとらえており、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。

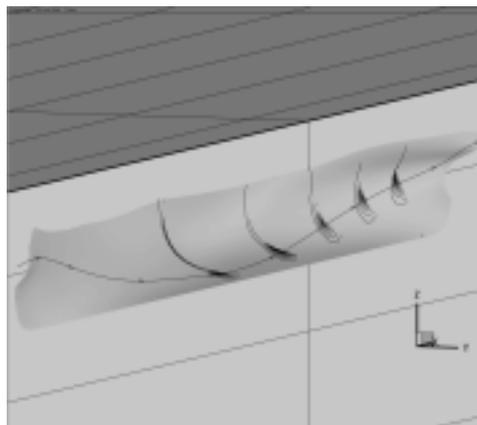


図 - 4 一本の流線に沿って流出した色素の各断における拡散の様子(コンター間隔=0.1)

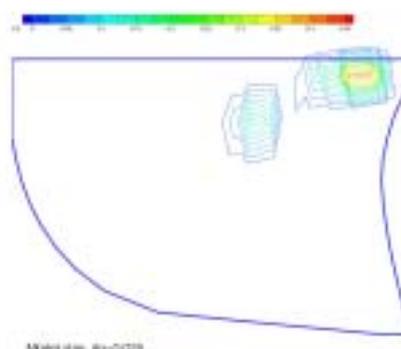


図 - 5 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度の上流起源図、(数値計算、模型船対応)

7 . CFD による実船対応の上流起源の推定

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。そこで実船対応の CFD 計算を行い、前節と同様のシミュレーションを行った。その結果を示したものが図 - 6 であり、模型船の場合の図 - 5 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る。

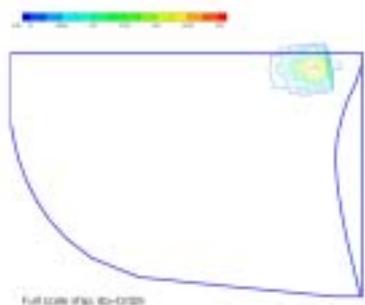


図 - 6 船側に設置された取水口で取水される水に含まれる色素濃度の上流起源図、(数値計算、実船対応)

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。これらの手法を利用することにより、船体取水口に流入する流体の上流起源の推定が模型船のみならず実船スケールでも可能であることを示した。最後に、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。

9 . 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.

- [4] 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
- [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 - 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] Hirata, N. and Hino, T.: "An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship", Journal of the society of Naval Architects of Japan, Vol.185, pp.1-8, 1999