

汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究

小田 一 紀*・重松 孝 昌**・野口 達 矢***・武田 将 英****

1. はじめに

海洋工事を行う際には、一般に、海域環境に配慮するため汚濁防止膜と呼ばれる仮設構造物を設置して発生する濁りの拡散を防止する対策が施されている。汚濁防止膜に関する研究は、設計・施工の観点から膜に作用する張力や係留力に主眼をおいた研究と、その所期の目的である濁りの拡散防止効果に主眼をおいた研究とに大別できよう。前者の研究としては、定常流中に設置された防止膜に作用する流体力と変形状について検討した研究 (Milgram, 1971; 榎木ら, 1987)、波動場に設置された防止膜による波変形及び波力について検討した研究 (榎木ら, 1988, 1989)、衝撃展張力に関する研究 (榎木ら, 1991; 安ら, 1993; Sawaragi, 1992)、係留アンカーの応答特性に関する研究 (前野ら, 1994a, 1995) 等が挙げられる。

一方、後者の研究としては若干の研究例があるに過ぎず (加納ら, 1987, 1989)、まだ十分な検討が行われていないのが実情である。最近では、これらの研究のほかに、防止膜の効果に及ぼす生物付着の影響について検討するための付着生物種に関する研究も行われている (前野ら, 1994b)。

著者らは、濁りの拡散防止効果について検討するため、膜の周辺の流況および沈降性物質の拡散現象について実験的な研究を行い、流れの中に設置された変形後の膜の高さ (以下、有効膜高と称す) が膜周辺の流況および拡散現象に大きな影響を及ぼすことを明らかにした (小田ら, 1991, 1993)。このことは、汚濁防止膜に作用する張力・係留力の検討だけでなく、その設置効果の検討に際しても膜の変形状を正確に予測することが重要であることを示唆している。また、汚濁防止膜の設置効果を検討するためには、防止膜周辺の流況および拡散現象を数値的に十分な精度で予測する必要がある。しかし、差分法に基づいた手法では膜近傍において疑似拡散の影響が大きくなるため、その計算精度に問題があることが指摘

されている (小田ら, 1994)。

このような状況を鑑み、本研究では、問題を定常流中の鉛直 2 次元問題に限定し、流れの中に設置された膜の変形状を簡便に予測する手法を提案するとともに、膜周辺の拡散現象を精度よく予測する手法を提案するものである。

2. 防止膜の変形状の予測手法

2.1 定 式 化

ここでは、榎木ら (1989) に倣って以下のように定式化する。まず、図-1 に示すように静水面上に原点をとり、水平方向に x 軸、鉛直下向きに z 軸をとる。膜の微小要素 ds を取り出し、接線方向を s 、法線方向を n とし (図-2 参照)、膜の伸び、剛性を無視してそれぞれの方向に要素の中心において運動方程式を立てると次のようになる。

$$T_+ \cos(\theta - \theta_+) - T_- \cos(\theta - \theta) + \tau_s(s) ds + \sigma \cos \theta ds = \frac{\sigma ds}{g} \frac{d^2 s}{dt^2} \quad \dots\dots (1)$$

$$T_+ \sin(\theta - \theta_+) + T_- \sin(\theta - \theta) - \Delta p(s) ds + \sigma \sin \theta ds = -\frac{\sigma ds}{g} \frac{d^2 n}{dt^2} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 T_+ 、 T_- は要素の両端における単位幅当たりの張力、 θ は要素の中心を通る鉛直線と接線とのなす角で、 θ_- 、 θ_+ は要素の両端における鉛直線と接線とのなす角、 σ は膜の単位面積当たりの水中重量、 Δp 、 τ_s はそれぞれ膜面に働く法線および接線方向の流体力である。

いま、膜が流れの中で定常状態にあるものとし、 $\tau_s(s)$ が無視でき、さらに $\Delta p(s)$ を一定とすれば式 (1)、(2)

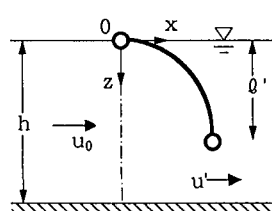


図-1 座標系

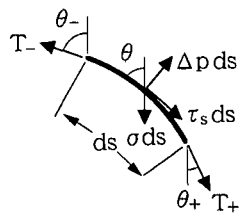


図-2 膜の微小要素に作用する力

* 正 会 員 工 博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工 修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 大阪市立大学 大学院

**** 東亜建設株式会社

は次のように書き換えられる。

$$T_+ \cos(\theta - \theta_+) - T_- \cos(\theta - \theta) - \sigma \cos \theta ds = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$T_+ \sin(\theta - \theta_+) + T_- \sin(\theta - \theta) - \Delta p ds + \sigma \sin \theta ds = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、微小要素の変形が非常に小さいと仮定すれば、 $(\theta_- - \theta) \approx (\theta - \theta_+) \approx d\theta$, $(\theta_- + \theta_+)/2 = \theta$, $(T_+ - T_-)/ds = dT/ds$, $(T_+ + T_-)/2 = T$ が成り立ち、これらを式 (3), (4) に代入すれば次式を得る。

$$dT = -\sigma \cos \theta ds \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Td\theta = \frac{1}{2}(\Delta p - \sigma \sin \theta) ds \quad \dots\dots\dots (6)$$

これら2式の比をとれば、

$$\frac{dT}{T} = \frac{2\sigma \cos \theta}{\sigma \sin \theta - \Delta p} d\theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、これを任意の点 $P(\theta_-)$ から点 $P(\theta_+)$ まで積分すれば、

$$\int_{\theta_-}^{\theta_+} \frac{dT}{T} = 2 \int_{\theta_-}^{\theta_+} \frac{\sigma \cos \theta}{\sigma \sin \theta - \Delta p} d\theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore T_- = \left(\frac{\sigma \sin \theta_- - \Delta p}{\sigma \sin \theta_+ - \Delta p} \right) T_+ \quad \dots\dots\dots (9)$$

また、式 (6) を書き換えれば、

$$ds = \frac{T_- + T_+}{-\sigma \sin((\theta_- + \theta_+)/2) + \Delta p} d\theta \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。したがって、微小要素の一端で T_+ , θ_+ および $\Delta\theta(\theta_- - \theta_+)$ を与えることができれば、ある未知数 Δp に対して他端における張力 T_- が式 (9) から、また、要素長 ds が式 (10) から求めることができる。

2.2 計算方法および計算結果

ここでは、自由端境界の張力として重錘の水中重量あるいはフロート浮力を用い、その方向は z 軸に平行であるとし、微小角度増分 $\Delta\theta = 0.1 \times \pi/180$ として、微小要素長の総和が $\sum ds$ が膜高 L になるまで、あるいは $\theta = \pi/2$ まで計算を行うことによって、膜の変形形状を求めた。図-3 に、実験結果と計算結果との比較の一例を示す。同図より、両者は非常によく一致しており、適切な Δp を用いて本手法によって計算すれば、簡便にかつ精度よく膜

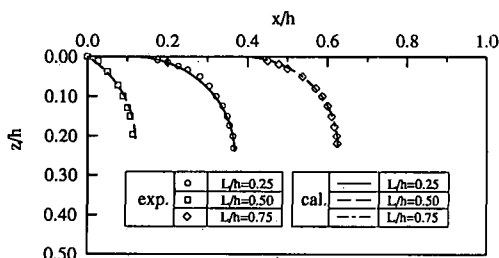


図-3 膜の変形形状 (計算結果と実験結果の比較)

の変形形状を計算できることがわかる。

変形後の膜の鉛直高さ、すなわち、有効膜高を l' とすれば、膜の上あるいは下を通過する流速 u' は、

$$u' = \frac{hu_0}{h-l'} \quad \dots\dots\dots (11)$$

で求められる。ここに、 h は水深、 u_0 は無限遠方における平均流速を表す。

図-4 は垂下式膜の場合、図-5 は自立式膜の場合の、 Δp と u'^2 との関係を示したものである。図中の W , B は、それぞれ重錘の水中重量およびフロート浮力を表している。これらの図によれば、 u'^2 と Δp とは線形関係にあり、その勾配は膜の設置方法によって異なることがわかる。最小自乗法によってこれらの実験結果を直線で近似すれば、垂下式膜の場合は

$$\Delta p = 1.100 \times (0.5 \rho u'^2) \quad \dots\dots\dots (12)$$

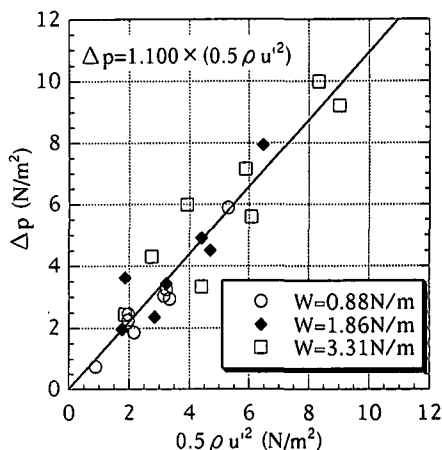


図-4 Δp と u'^2 との関係 (垂下式膜)

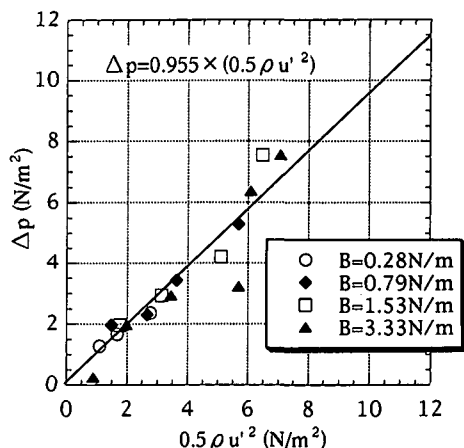


図-5 Δp と u'^2 との関係 (自立式膜)

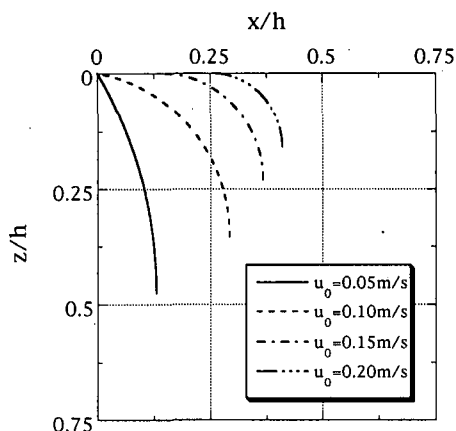


図-6 膜の変形形状の予測

自立式膜の場合は、

$$\Delta p = 0.955 \times (0.5 \rho u^2) \quad \dots\dots\dots (13)$$

が得られる。

2.3 膜の変形形状の簡易予測手法

前述のように、適切な Δp を用いて式 (9)、(10) を計算すれば、膜の変形形状を予測できる。いま、平均流速 u_0 の中に、膜高 L の膜を設置するときの膜の形状は、次の手順で計算することができる。すなわち、最初に有効膜高 l_0 を仮定し、この仮定した l_0 に対して、式 (11) を用いて膜通過流速 u' を求める。得られた u' と式 (12) あるいは式 (13) を用いて Δp を仮定する。この Δp を用いて膜の変形形状を予測する。得られた変形形状より、新たな有効膜高 l' を求める。 l_0 と l' が一致しない場合は、 l' を l_0 として上記の計算を繰り返す。

図-6 は、水中重錘重量 $W=4.9 \text{ N/m}$ 、膜高 $L=0.5 \text{ m}$ の垂下式膜を設置した場合について、上述のような収束計算を行って得られた膜の変形形状である。同図に示すように、本手法によれば、断面平均流速 u_0 の増加に伴って、膜は吹かれてその有効膜高が減少していく様子が再現できていることがわかる。

3. 防止膜周辺の物質拡散の計算手法

著者らは既に、SIMPLE 法や 5 次精度の上流差分および 6-point 法を用いて防止膜周辺の拡散計算を試みているが、いずれの計算手法においても実験結果を良好に再現することができないことを明らかにしている (小田ら, 1994)。これは、差分法に基づいて計算を行う際に、メッシュを斜めに横切るような流れが存在する場では疑似拡散が発生し (Patankar, 1980)、これによってその周辺の物質濃度が過度に低下するためである。

3.1 従来の上流差分法

計算の安定性やその物理的解釈の容易さから、拡散計

算においては上流差分が用いられることが多いように思われる。いま、簡便のため、 $u=w>0$ の様な流れ場のもとで、上流差分による拡散計算を行う場合について考えてみる。図-7 においてセル (i, k) の濃度を計算する際には、左側の界面では u_w が正であるから $C_{i-1,k}$ を用いて、また、下側界面で w_s が正であるから、 $C_{i,k-1}$ を用いて流入濃度フラックスを計算することになる。したがって、 $C_{i,k}$ を計算する際には、本来上流であるはずの地点の濃度 $C_{i-1,k-1}$ が全く考慮されないことになる。したがって、セル $(i-1, k-1)$ に存在する物質がセル (i, k) に移流されるためには、セル $(i, k-1)$ 、あるいはセル $(i-1, k)$ に移流した後に初めて (i, k) に移流されるのである。このような移流項の計算手法が疑似拡散を発生させることになる。すなわち、従来の上流差分法では、流向を考慮せずに流れを局所的に 1 次元にとらえて計算を行っているところに、問題があるように思われる。

3.2 上流差分法の改良

図-8 に示すように、セル (i, k) の中心における流速成分をそれぞれ u_c 、 w_c とし、 $\tan^{-1}(w_c/u_c) = \theta$ 、 $\tan^{-1}(\Delta z/\Delta x) = \theta_{\text{cell}}$ (Δx , Δz はそれぞれセルの x , z 方向の長さ) とする。ここでは、次のような計算手法を提案する。すなわち、 $0 \leq \theta < \theta_{\text{cell}}$ の場合には、 $C_{i-1,k}$ と $C_{i-1,k-1}$ を用いて線形補間によって得られる C_{ref} (図-8(a) 参照) と u_w を用いて流入濃度フラックスを計算する。また、 $\theta_{\text{cell}} \leq \theta < \pi/2$ の場合には $C_{i-1,k-1}$ と $C_{i,k-1}$ の線形補間によって得られる C_{ref} と w_s を用いて流入濃度フラックスを計算する (図-8(b))。このような改良を施すことによって、平面的な上流位置を定義することができるようになり、この地点における濃度を用いてセルを斜めに横切る方向の移流拡散を直接計算できるようになり、その結果、疑似拡散を抑制することができる。

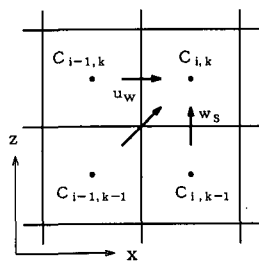


図-7 上流差分法概念図

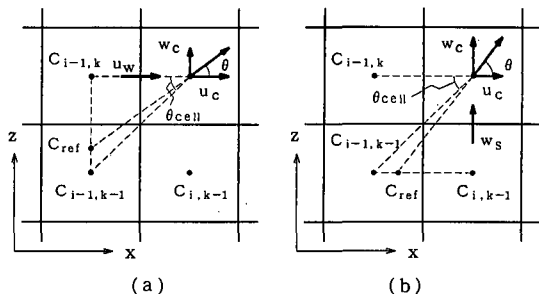


図-8 改良型上流差分法概念図

3.3 計算条件

計算領域の水深は $h=1\text{m}$ とし、水平方向の計算の対象領域は $-2.0 \leq x/h \leq 6.0$ とした。防止膜周辺の流況は $k-\epsilon$ 乱流モデルを SIMPLE 法 (TEACH-TB コード) によって計算した。このとき、膜の変形形状は既往の実験 (小田, 1991) によって測定されたものを用いた。その後、前述の手法を用いて移流拡散方程式の計算を行った。拡散計算に際して、プラントル数を 1、すなわち、乱流拡散係数と流れの計算で得られた渦動粘性係数を等値として計算を行っている。また、メッシュサイズは $\Delta x/h = \Delta z/h = 1/20$ 、タイムステップは $\Delta t = 0.25$ 秒である。濁りは計算の開始後 40 秒間 $q = 1\text{ kg/m}^2/\text{s}$ の割合で膜の設置位置より 1m だけ上流で負荷した。拡散物質の沈降速度は $w_0 = 5 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ とし、膜の境界条件は膜を表す界面上を通過する濃度フラックスが 0 となるように計算した。

3.4 計算結果

図-9 および図-10 に計算結果と実験結果の比較の一例を示す (ただし、既往の実験結果と比較するため、計算結果は計算開始後 40 秒間の濁りの負荷地点における定常濃度で無次元化している)。図-9 は $L/h = 0.5$ の垂下式膜の近傍における物質濃度の分布の経時変化を示したもので、濁りの負荷位置は膜より 1m 上流の水面である。同図によれば、膜の上流極近傍では計算値は実験値よりもかなり高くなっているおり、その分布領域は小さくなっていることがわかる。また、膜の下流域に流出した物質の濃度もやや高くなっている。図-10 は、 $L/h =$

0.5 の自立式膜の場合の両者の比較を示したものであり、濁りの負荷位置は、膜より 1m 上流の $z/h = 0.5$ の位置である。膜の下流側における濃度の計算値は実験値よりも多少大きな値となっている。

このように、計算結果は実験結果よりも多少大きな値を有するが、従来の手法では得ることができなかった下流域への濁りの流出や、膜の背後への回り込み現象などはよく再現できている。さらに、実験の測定精度や拡散現象の 3 次元性を考慮すれば、ここで示した計算手法は妥当であると考えられる。

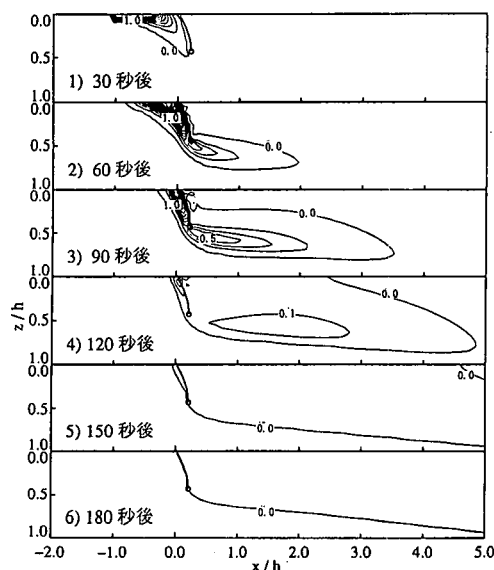
4. 結 論

本研究によって得られた結論を要約すると、以下のようである。

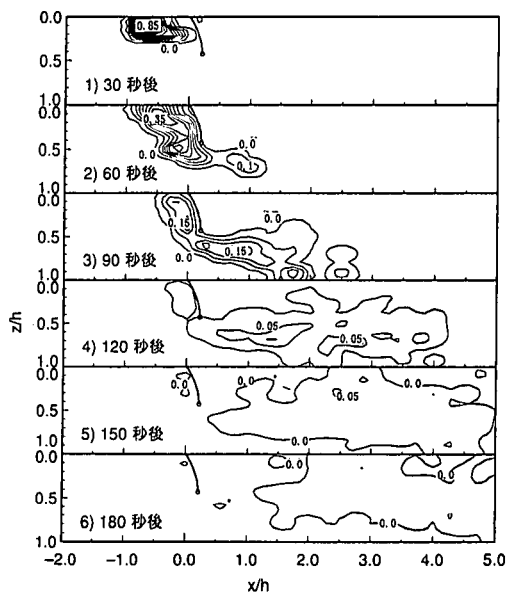
(1) 膜の前後に作用する圧力差 Δp を一定として導いた本手法による膜の変形形状の予測値は、適切な Δp を用いて計算を行えば実験結果を精度よく再現することができる。このとき、 Δp は膜の上あるいは下を通過する流速 u' の自乗に比例し、その勾配は垂下式膜と自立式膜によって異なる値を有することが明らかになった。

(2) 移流拡散方程式の移流項の計算手法を工夫することによって、疑似拡散を抑制することができる。ここで示した手法による汚濁防止膜周辺の拡散の計算結果は、実験結果を十分な精度で再現できることがわかった。

本研究の一部は、(財)能村膜構造物技術振興財団の援助を受けて行ったものであること、および土木学会海岸工学委員会研究小委員会公募研究「沿岸環境要素の評価

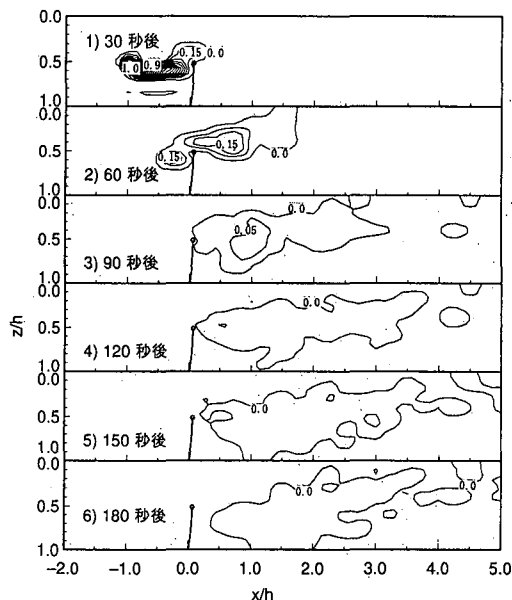


(a) 計算結果



(b) 実験結果

図-9 計算結果と実験結果の比較 (垂下式膜 $L/h=0.5$ の場合)



(b) 実験結果

- 榎木 亨・青木伸一・劉 海波 (1989): 自立式汚濁防止膜による波の変形と波力の解析, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 559-563.
- 榎木 亨・青木伸一・劉 海波 (1991): 垂下式汚濁防止膜に発生する衝撃展張力のモデル化, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 95-100.
- 前野賀彦・高谷富也・西野好生・安井章雄 (1994a): 海洋工事汚濁防止膜の係留アンカーに関する一考察, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 325-330.
- 前野賀彦・大久保茂樹・安井章雄 (1994b): 海洋工事汚濁防止膜への付着生物調査, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 331-336.
- 前野賀彦・高谷富也・西野好生・安井章雄 (1995): 汚濁防止膜の各種係留アンカーの実測張力による変位応答特性, 海洋工学論文集, 第 42 巻 (2), pp. 971-975.
- 前野賀彦・石川元康・田中克往復・長屋和則・川本博文 (1995b): 汚濁防止膜の設置環境と生物付着について, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp.
- Milgram, J. H. (1971): Forces and motions of a flexible floating barrier, J. Hydraulics, Vol. 5, No. 2, pp.41-51.
- Patankar Suhas V. (1980): Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 106-109.
- Sawaragi, T., Aoki S., and Liu, H. (1992): Wave-induced impulsive forces in tension cables of a floating silt curtain, Proc. Offshore and Polar Eng. Conf. pp. 339-346.