

大阪市立大学工学部 正会員 小田一紀 ○ 重松孝昌
東亜建設工業(株) 武田将英

1. はじめに

工事海域周辺の環境に及ぼす濁水の影響を抑制する目的として設置される汚濁拡散防止膜の効果については、未だ、十分に明らかにされていない。著者らは、既に、鉛直二次元実験によって汚濁防止膜より流出する濁りの挙動を明らかにするとともに、差分法に基づいた数値シミュレーションによって拡散計算を行い、その再現性について検討を行っている^{1),2)}。それによれば、防止膜周辺に見られるような計算メッシュを斜めに横切るような流れが存在するような領域では、既往の計算手法による濃度の計算値は著しく小さな値となり、実現象を十分な精度で再現できないという結果を得ている。これは、そのような流れ場で移流項を計算する際に生じる偽拡散³⁾に起因すると考えられる。

そこで、本研究では移流項の計算方法を改良することによって、メッシュを斜めに横切る流れ場の下でも十分な精度で実現象を再現することができる手法を提案する。

2. 計算手法

防止膜周辺の流況は、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルをSIMPLE法に基づいた計算コードTEACH-TBによって計算した。このとき、膜の変形形状は実験で観測された釣り合い形状のデータを用いた。

拡散計算に用いた基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial\{(w+w_0)C\}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_t \frac{\partial C}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

ここに、 C ：濁りの濃度、 u 、 w ： x 、 z 方向の流速成分、 w_0 ：濁り粒子の沈降速度、 D_t ：渦動拡散係数、 q ：単位時間、単位面積当たりの濁りの負荷量を表す。

式(1)を陰解法によって計算する。ここで、移流項の計算に一次精度の上流差分を適用すれば、上流側の物質が必ず下流へと輸送される。すなわち、図-1に示すような $u_W \geq 0$ 、 $w_S \geq 0$ の場合には $C_{i-1,k}$ 、 $C_{i,k-1}$ を用いて $C_{i,k}$ の値を求めることになる。今、仮に等長メッシュを用いて $u_W = w_S$ の流れ場の下で一次の上流差分によって移流項を計算すれば、上記に従って $C_{i-1,k}$ 、 $C_{i,k-1}$ を用いて $C_{i,k}$ の値を求めることになるが、上流差分の物理的意味を考慮すれば $C_{i-1,k-1}$ を用いて計算すべきである。しかし、従来の上流差分ではメッシュ(i-1,k-1)からメッシュ(i,k)への物質輸送が直接計算できず、軸に沿った移流拡散しか計算できない。これが、メッシュを斜めに横切る流れがある場合に生じる偽拡散の原因となる。

ここでは、着目メッシュ(i,k)の中心における流速成分 u_C 、 w_C より流向を求めた後、この流向と x 軸との成す角 θ_C が $\theta_C \leq \theta = \tan^{-1}(\Delta z/\Delta x)$ の場合には、メッシュ(i-1,k)と(i-1,k-1)の中心を結ぶ線分と(i,k)の中心より x 軸と θ_C の角をなす直線との交点における濃度 C_{ref} を $C_{i-1,k}$ と $C_{i-1,k-1}$ より線形補間により求め、これと u_W を用いて移流項の計算を行うこととした(図-2(a)参照)。また、 $\theta_C > \theta$ の場合には、 $C_{i-1,k-1}$ と $C_{i,k-1}$ より同様に C_{ref} を求め、これを w_S を用いて計算を行う(図-2(b)参照)。移流項をこのように計算することによって、偽拡散を抑制することができる。

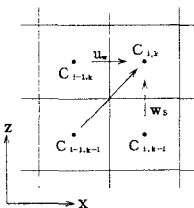
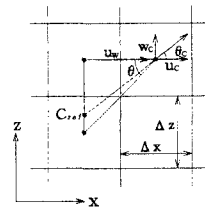
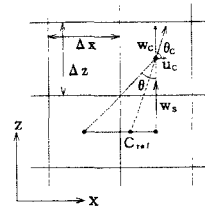


図-1 従来の上流差分法



(a)



(b)

図-2 改良型上流差分法

3. 計算条件および計算結果

計算領域は、水深 $h=100\text{cm}$ 、水平方向 800cm とし、メッシュサイズは $\Delta x = \Delta z = 5\text{cm}$ の等長メッシュとした。タイムステップは $\Delta t=0.25\text{s}$ とし、濁りは計算開始後 40 秒間だけ $q=100\text{mg/cm}^2/\text{s}$ の割合で負荷した。また、沈降速度は $w_0=0.05\text{ cm/s}$ と、膜の境界条件は膜を表す界面上において濃度フラックスを 0 として計算した。

図-3 および図-4 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-3 は $\ell/h = 0.5$ (ℓ : 膜高) の垂下式膜近傍の場合の両者の比較を示したもので、濁りの負荷位置は膜より 1m 上流の水面である。垂下式膜の上流では濃度の計算値は実験値よりもかなり高くなっており、改良の余地があることがわかる。

図-4 は $\ell/h = 0.5$ の自立式膜の場合(濁りの負荷位置は膜より 1m 上流の $z/h=0.5$ の位置)の両者の比較を示したものである。この図からも、膜の下流側における濃度の計算値は実験値よりもやや大きな値となっていることがわかる。しかし、従来の手法では計算することができなかった下流域への濁りの流出や膜背後への回り込みなどの現象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なものであると考える。

4. 結論

一次精度の上流差分を改良することによって偽拡散を防止することができ、その結果、防止膜より下流域に流出する濁りの拡散現象を十分な精度で計算できることが確認された。今後、この手法を用いて防止膜の設置効果について検討を行いたい。

参考文献

- [1] 小田・他(1993): 垂下膜、自立膜の近傍における沈降物質の拡散に関する鉛直 2 次元実験, 海講第 40 巻, pp.876-880.
- [2] 小田・他(1994): 薄い境界を有する二次元移流拡散方程式の数値計算, 第 49 回年講, CS-49.
- [3] Suhas V. Patankar (1980): Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, pp.106-109.

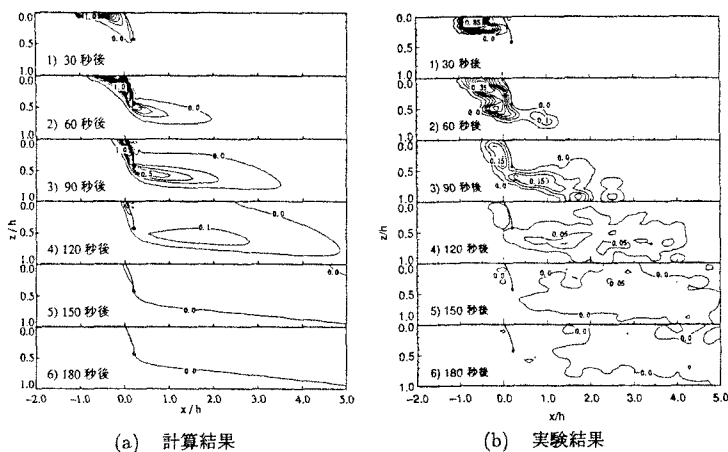


図-3 計算結果と実験結果の比較(垂下式膜 $\ell/h = 0.5$ の場合)

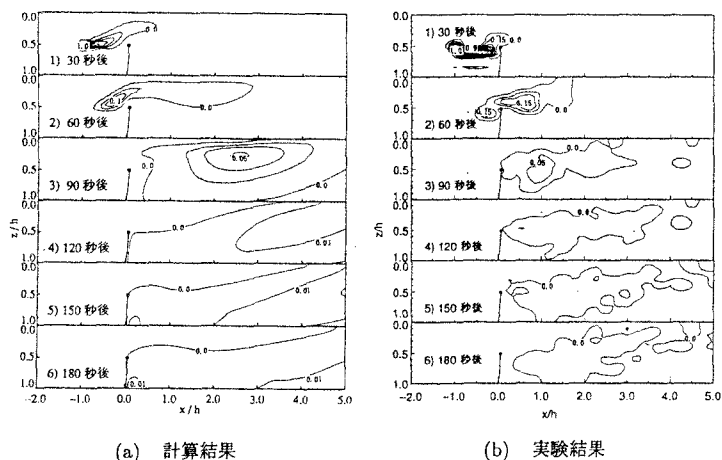


図-4 計算結果と実験結果の比較(自立式膜 $\ell/h = 0.5$ の場合)