

汚濁防止膜による流況制御に関する研究

STUDY OF FLOW CONTROL BY SILT CURTAIN

小野正順¹・安井章雄²・有光 剛³・出口一郎⁴

Masanobu ONO, Akio YASUI, Tsuyoshi ARIMITSU and Ichiro DEGUCHI

¹正会員 工博 大阪大学大学院講師 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 太陽工業株式会社

³正会員 工修 関西電力株式会社

⁴正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

Silt curtains are generally stretched around construction site in the coastal region to protect turbidity generated by the construction works from flowing out of the region. The hydraulic functions of silt curtain have been investigated in the two-dimensional wave tank. However, the silt curtains are stretched in a three-dimensional sea and three-dimensional effect becomes very important.

In this study, the effects of a stand-up type and a hang-down type silt curtain on the unidirectional flow are investigated through experiments in a basin. The authors also proposed numerical model for predicting flow pattern around silt curtain and examined the validity of the procedures by using experimental results.

Key Words : stand-up type silt curtain, hang-down type silt curtain, flow control, SOLA method

1. はじめに

近年、沖合人工島や海上空港建設などの海洋工事に伴う汚濁発生に対して、周辺海域への汚濁の流出を防止するために汚濁防止膜が設置される。汚濁防止膜の汚濁防止効果は、①防止膜背後の死水領域の形成とそれによる汚濁のトラップ効果、②膜端部から発生する乱れによる汚濁拡散効果などが考えられる。いずれの効果も汚濁防止膜周辺の流況と密接に関係している。汚濁防止膜周辺の流れ場に関する研究は、垂下式あるいは自立式の汚濁防止膜をそれぞれ単体で設置した場合の実験的研究¹⁾がいくつか行われている。しかしながら、最近では垂下式と自立式の汚濁防止膜を2重に設置される事例が増加している。一方、実海域で展張される汚濁防止膜は工事区域を囲むように設置されるため、従来行われてきた断面2次元の検討結果をそのまま適用することは難しい。また、汚濁は汚濁防止膜設置区画内で発生するために、汚濁防止膜設置に伴う平面的な流速場の変化が汚濁の移流拡散過程に影響しているものと考えられる。

そこで本研究では、汚濁防止膜周辺の流れ場の特

性に関する断面2次元的な検討として自立式単体あるいは自立式・垂下式を併設した場合の汚濁防止膜周辺の流況特性について検討を行った。また、平面的な検討として汚濁防止膜を平面的に設置した場合の汚濁防止膜設置区画内と区画外の流況特性について検討を行い、汚濁拡散防止膜設置に伴う流況制御効果について明らかにした。

2. 汚濁防止膜による流況制御に関する実験

実験は、図-1に示す幅5m、長さ15m、水深60cmの振動流平面水槽を用いて行った。断面2次元実験の場合は、自立式汚濁防止膜（以下、自立式と称す）と垂下式汚濁防止膜（以下、垂下式と称す）を水槽の全幅に展張し、3次元実験の場合は図-1に示すように水槽の中央部で側壁に沿って、囲い込み長さ $D=4\text{m}, 6\text{m}$ 、囲い込み幅 $W=1\text{m}, 1.5\text{m}, 2\text{m}$ にわたって自立式で囲い込み、その前後に垂下式を展張し実験を行った。水深は20cmで一定とし、作用させた定常流の最大流速 U_0 は4cm/sである。流速の測定は、断面2次元実験の場合は水槽中央部の測線で、3次元実験では図-1に示すように囲い込み領域

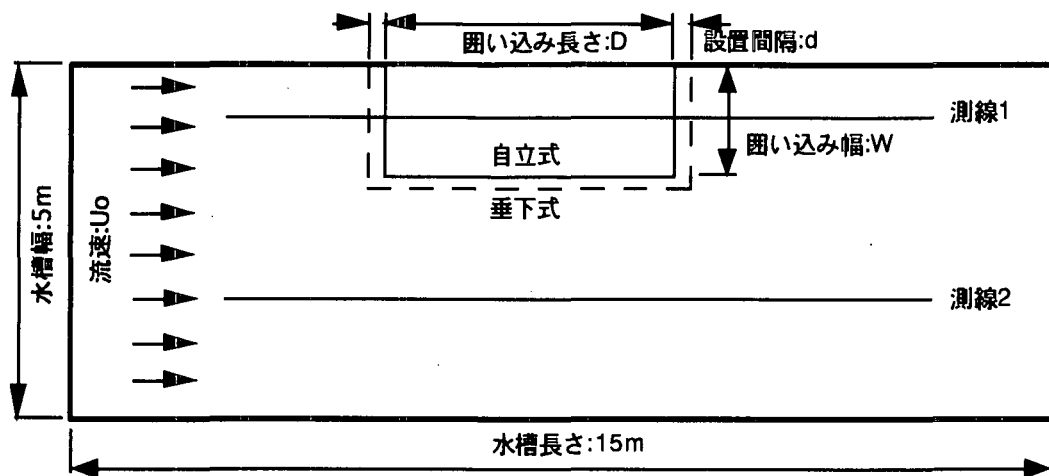


図-1 実験水槽及び汚濁防止膜の設置方法

を含む測線1と囲い込み領域を含まない測線2で測定した。鉛直方向には汚濁防止膜近傍では底面近傍を含めて底面から3.75cm間隔で5地点で、膜から離れたところでは底面近傍を含めて底面から7.5cm間隔で3地点を測定した。

3. 汚濁防止膜周辺の流況に関する数値計算

(1) 断面2次元流れ場に設置された膜周辺の流れに対する数値計算

a) 座標系及び計算領域

解析モデルの座標系と計算領域を図-2に示す。計算は、鉛直2次元場で行い、水深 h が一定の流れ場に、膜長 d_L, d_U の垂下式と自立式の汚濁防止膜が、間隔 d で設置されている。それぞれの汚濁防止膜は不透過である。

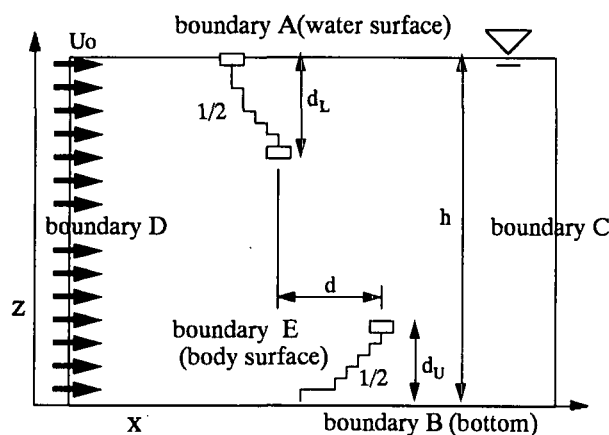


図-2 座標系及び計算領域

b) 基礎方程式

計算方法は、Navier-Stokesの式を直接計算するSOLA法²⁾を用いた。計算に用いた基礎方程式は次に示す連続式とNavier-Stokesの運動方程式であ

る。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = Di = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

ここに、 u, w はそれぞれ x, z 方向の流速、 ρ は水の密度、 g_x, g_z は x, z 方向の加速度、 ν は動粘性係数、 Di は発散を示し非圧縮性流体では0となる。

c) 数値計算法及び境界条件

数値計算は、差分法を用いた。運動方程式の移流項についてはdoner差分を用い、重み定数 a は0.5(0のとき2次の中央差分、1のとき1次の風上差分)に設定し、粘性項については2次の中央差分を用いた。

計算手順は、始めに(2),(3)式を用いて流速 u, w を時間発展で求め、それぞれの時間で(1)式により発散 Di を計算し、発散 Di が0に収束するように圧力 p と流速 u, w は補正される。

境界条件は、水面 (boundary A) と海底 (boundary B) ではすべりの条件(u については計算領域の一つ内側の値と等しく、 $w=0$)とし、両側方 (boundary D, C) の条件は、流入側 (boundary D) で $u=U_0, w=0$ を与え、流出側 (boundary C) では拘束のない条件(u, w ともに計算領域の一つ内側の流速に等しい)で与えた。構造物は物体表面の不透過条件より、物体表面の法線方向流速を0としている。計算領域は、水平床で左右の境界から同じ静水圧がかかるため、 g_x, g_z は0とした。

(2) 囲い込みによる流速低減に関する数値計算

a) 座標系

解析モデルは平面2次元で、流れ方向に x 軸をとり、流れと直角方向に y 軸をとる。

b) 基礎方程式

基礎方程式は、連続式とNavier-Stokesの運動方程式を水深方向と時間平均することで得られる質量及び運動量保存式である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \rho(h+\eta) \} + \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho u(h+\eta) \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \rho v(h+\eta) \} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho u(h+\eta) \} + \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho u^2(h+\eta) \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \rho uv(h+\eta) \} = \\ -\rho g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \tau_x \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho v(h+\eta) \} + \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho uv(h+\eta) \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ \rho v^2(h+\eta) \} = \\ -\rho g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \tau_y \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、(u,v) は流下方向及び横断方向流速、h は水深、η は平均水位変動量、 k_x, k_y は渦動粘性係数、 τ_x, τ_y は流下方向及び横断方向の底部せん断力である。

c) 数値計算法及び境界条件

計算は(4)～(6)式をADI法によって差分化し数値的に解いた。なお、汚濁防止膜の影響は断面縮小法で評価した。境界条件は、側面では不透過の条件を、上流側において水位と流量を与えている。

4. 断面2次元的な流況制御の特性

(1) 時間平均流速場の特性

図-3,4は膜長 $d_U=7\text{cm}$ の自立式単体を設置した場合の汚濁防止膜周辺の時間平均流速の分布を示し、図-3は実験結果を図-4は計算結果をそれぞれ示す。両図から自立式膜の上流側で上昇流が形成され、死水領域が下流側100m程度まで存在していることがわかる。また、計算では水位変動を解かず一定水深を仮定してるため、計算結果では水面付近での上昇流は過小評価され、膜上方での縮流による流速増大は過大評価されている。

図-5,6は、膜長 $d_U=7\text{cm}$ の自立式・膜長 $d_L=5\text{cm}$ の垂下式を併設した場合の汚濁防止膜周辺の時間平均流速の分布を示し、図-5は実験結果を図-6は計算結果をそれぞれ示す。両図から自立式単体の場合と比較して、垂下式が設置していることにより自立式背後の死水領域が小さくなり、下降流速も大きくなっていること、垂下式の下流側で死水領域

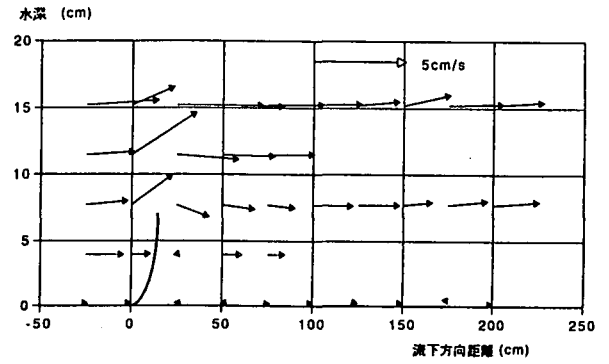


図-3 自立式単体の膜周辺の流速分布の実験結果
($d_U=7\text{cm}, U_0=4\text{cm/s}$)

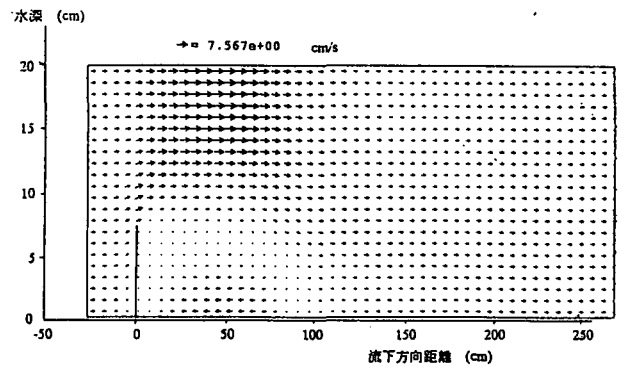


図-4 自立式単体の膜周辺の流速分布の計算結果
($d_U=7\text{cm}, U_0=4\text{cm/s}$)

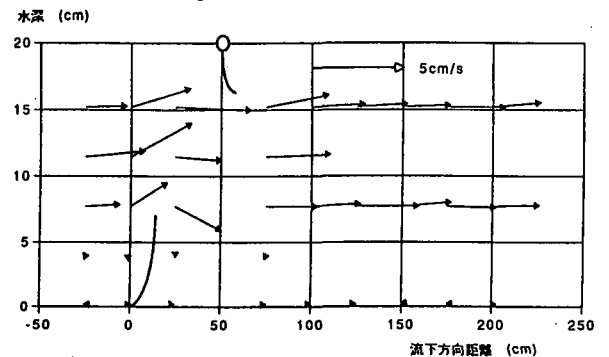


図-5 複列配置の膜周辺の流速分布の実験結果
($d_U=7\text{cm}, d_L=5\text{cm}, U_0=4\text{cm/s}$)

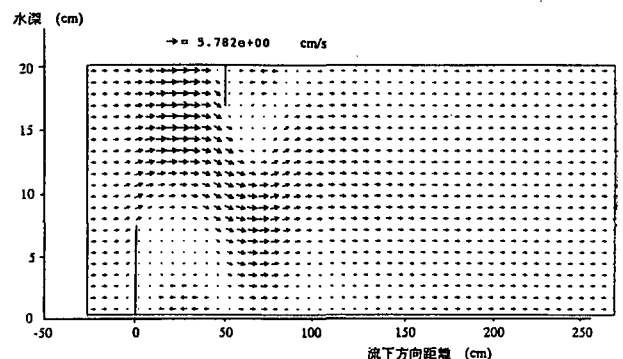


図-6 複列配置の膜周辺の流速分布の計算結果
($d_U=7\text{cm}, d_L=5\text{cm}, U_0=4\text{cm/s}$)

が形成され再び上昇流が発生することなど定性的な流況は計算結果でも再現できている。

(2) 乱れ強度の分布特性

汚濁防止膜の汚濁防止効果の一つとして膜端部から発生する乱れによる汚濁拡散効果が考えられる。図-8,9にそれぞれの設置方法で汚濁防止膜を設置した場合の乱れ強度の分布の実験結果を示す。乱れ強度は時間平均された水平及び鉛直流速からのそれぞれの流速時系列の残差の2乗平均値で定義する。また、比較のため防止膜を配置していない場合の乱れ強度の分布の実験結果を図-7に示す。防止膜を設置しないケースにおいても多少の乱れ強度が存在している。この乱れ強度と比較すると防止膜を設置した両ケースとも、自立式上端部から上方あるいは垂下式下端部下方での乱れ強度は大きいことがわかる。特に複列の場合は、垂下式下端部から下流側の下層での乱れ強度が大きく、乱れ強度の空間分布だけを比較してみると自立式単体の場合よりも複列式の方が広い範囲で大きな乱れが発生していることがわかる。また、汚濁防止膜周辺の大きな乱れ強度は膜設置位置から上下流側に離れるに従って小さくなっており、上流側へも乱れが伝達されている。

汚濁防止効果は、防止膜背後の死水領域の形成とそれによる汚濁のトラップ効果に関しては、自立式

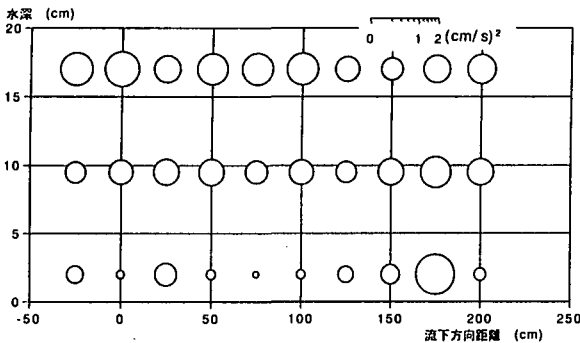


図-7 膜を設置しない場合の乱れ強度の分布 (Uo=4cm/s)

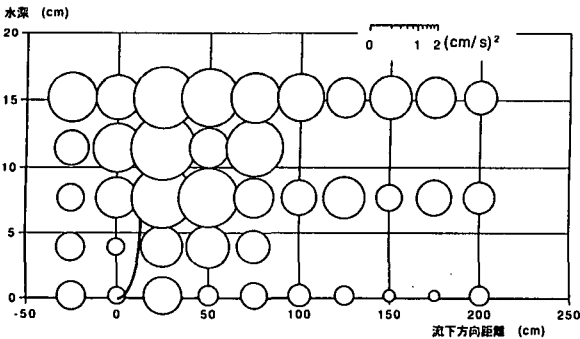


図-8 自立式単体の膜周辺の乱れ強度の分布 (d_U=7cm, Uo=4cm/s)

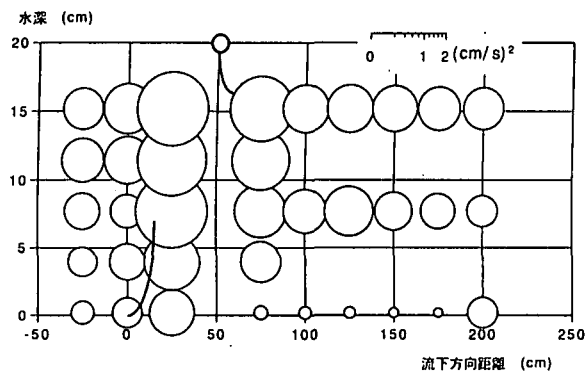


図-9 複列配置の膜周辺の乱れ強度の分布 (d_U=7cm, d_L=5cm, Uo=4cm/s)

単体の方が効果があると考えられる。しかし、膜端部から発生する乱れによる汚濁拡散効果については乱れ強度の分布が広い範囲に及ぶ複列の場合の方が有効であると考えられる。どちらの配置法が汚濁防止効果に有効かは種々の現象の影響を総合的に比較検討する必要がある。

5. 囲い込みによる平面的な流況制御の特性

(1) 平面的な流速場の特性

図-10は一例として膜長d_U=7cm, d_L=5cmの複列式で囲い込み長さ4m、囲い込み幅1.5mに平面配置したときの囲い込み領域周辺の平面的な流速場の

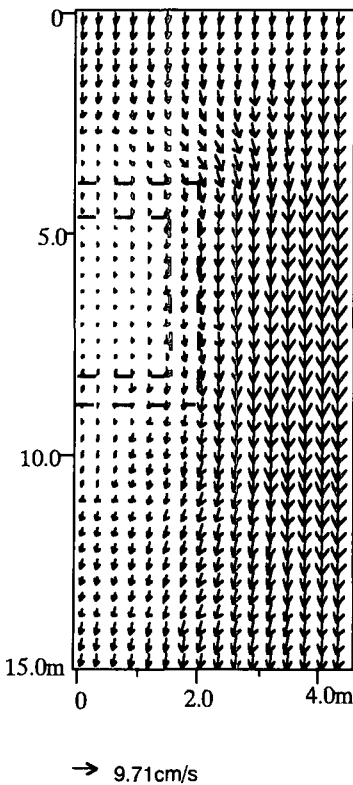


図-10 囲い込み周辺の平面的な流況(Case:E-8) (d_U=7cm, d_L=5cm, Uo=4cm/s)

表-1 囲い込みによる流速低減効果の実験ケース

実験ケース	内側膜長	外側膜長	設置間隔	囲い込み長さ	囲い込み幅
	(cm)	(cm)	d(cm)	D(cm)	W(cm)
E-0	無し	無し			
E-1	自立式7	無し		400	100
E-2	自立式7	無し		400	150
E-3	自立式7	無し		400	200
E-4	自立式7	無し		600	150
E-5	自立式10	無し		600	150
E-6	垂下式10	無し		400	150
E-7	自立式7	垂下式5	0	400	150
E-8	自立式7	垂下式5	50	400	150
E-9	自立式7	垂下式5	100	400	150
E-10	自立式7	垂下式5	50	600	150
E-11	垂下式5	自立式7	50	400	150
E-12	自立式10	垂下式5	50	600	150

計算結果を示す。汚濁防止膜を平面的に設置することにより、流れは汚濁防止膜で囲い込まれた領域外を流れ、囲い込まれた領域内の流速が低減している。この流速低減効果により、囲い込み領域内で発生する汚濁の移流速度が低減するために汚濁の流出を低減できると考えられ、汚濁防止膜を平面的に配置した場合の有効な汚濁流出低減効果と考えられる。

(2) 囲い込みによる流速低減効果

図-11は、表-1に示す各実験ケースの流速低減効果を示す。流速低減効果は、囲い込み領域内の断面平均流速/断面平均流速で計算した。図より、自立式のみを設置した場合(E-1～5)でも60%程度の流速低減効果があることがわかる。また、当然の事ながら、膜長が長いほど流速低減効果が大きい。

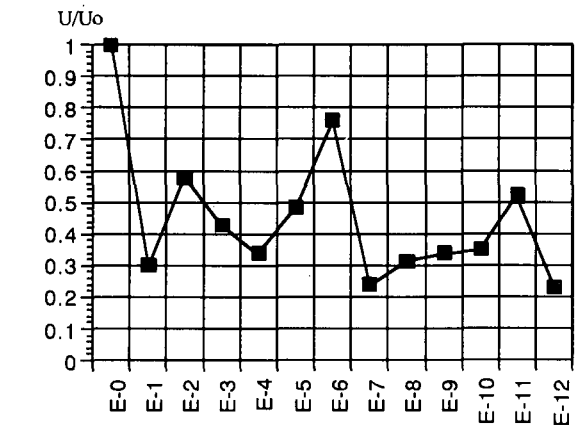


図-11 囲い込みによる流速低減効果

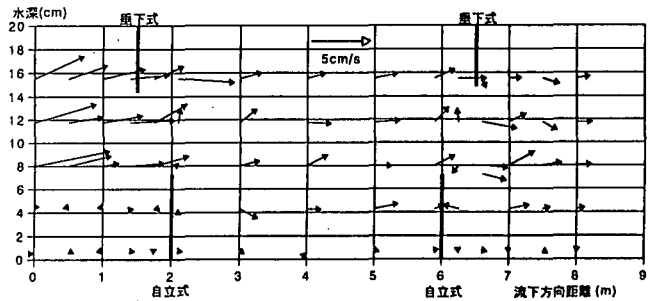


図-12 囲い込み領域内の流速分布(Case:E-8)
($d_U=7\text{cm}$, $d_L=5\text{cm}$, $U_0=4\text{cm/s}$)

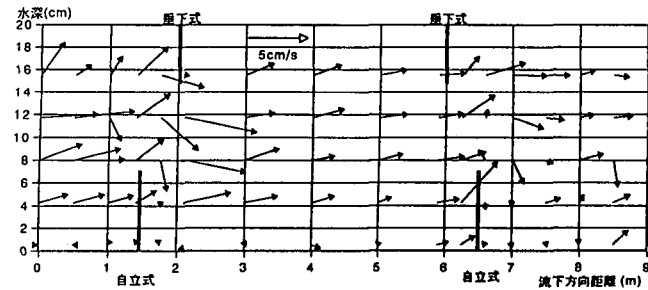


図-13 囲い込み領域内の流速分布(Case:E-11)
($d_U=7\text{cm}$, $d_L=5\text{cm}$, $U_0=4\text{cm/s}$)

図-12は膜長 $d_U=7\text{cm}$, $d_L=5\text{cm}$ の複列で、囲い込み長さ4m、囲い込み幅1.5mに配置したときの囲い込み領域内の測点1に沿った断面の流速分布を示す。また、図-13は図-12とは逆に垂下式を内側に自立式を外側に配置した場合の実験結果を示す。図よ

り防止膜を設置した近傍では流速分布の空間的な変動は大きい、囲い込み領域内の流速分布は空間的に変化が少なく安定しており、流速低減効果が汚濁の移流速度の低減（囲い込み領域内の汚濁の沈降量の増大）に効果があることがわかる。また、図-12,13の両図を比較すると、垂下式が領域の内側にある方が、垂下式下流部で縮流効果により流速が増加していることがわかる。自立式が領域の内側にある図-12の場合は、それほど顕著に流速の増大は見られない。これは、自立式の場合、断面縮小により水面付近の流速は増加するが膜を設置した付近の水面も上昇し、これが囲い込みを回り込む流速を引き起こすのに対して、垂下式の場合は断面縮小により海底付近の流速が大きくなって、海底面は固定境界なので縮流による流速の増加が大きいものと考えられる。図-11において流速低減効果が最も少ない実験ケースが垂下式のみを設置したケースで、75%の流速低減効果しか得られないのも同様の理由と考えられる。

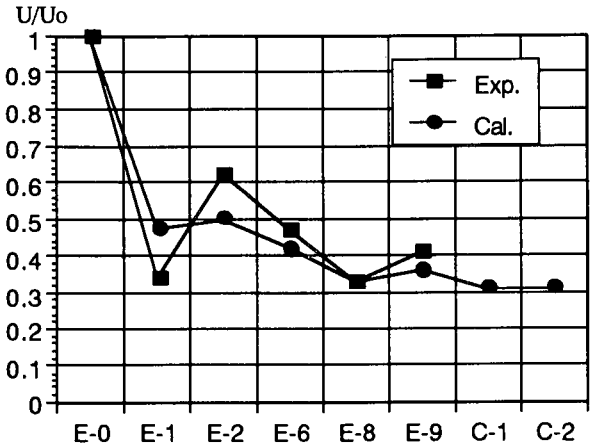


図-14 流速低減効果の実験結果と計算結果の比較

図-12,13の囲い込み領域内の流速分布を見てみると底面摩擦の影響が大きいと考えられるので、底面から4cm以下の流速を無視して囲い込み領域内の平均流速を定義し直して計算結果と比較した。図-14は囲い込みによる流速低減効果の実験結果と計算結果との比較を示す。また、計算によりE-2の膜の配置法で水槽幅が9mの場合(C-1)、半無限大の場合(C-2)も計算を行った。図より計算結果と実験結果は良い一致を示す。また、囲い込み幅の3倍以上の幅の水槽を用いることで、水槽幅の影響は流速低減効果にはそれほど影響が大きいことがわかる。

6. 結論

本研究では、海洋工事に伴う汚濁発生に対して、周辺海域への汚濁の流出を防止するために設置される汚濁防止膜による流況制御特性について検討を行った。得られた結果は、以下の通りである。

①汚濁防止膜背後の死水領域の範囲など、防止膜周辺の渦流れをSOLA法を用いた本計算方法で精度良く予測することができる。

②汚濁防止膜の汚濁防止効果に関係すると考えられる防止膜背後の死水領域は、自立式を設置しその下流側に垂下式を設置する複列式の場合、自立式単体を設置した場合と比較すると垂下式の影響により死水領域は小さくなる。しかしながら、複列式の方が自立式を流下してからの上昇流が大きく、移流拡散効果が長くなるため汚濁の沈降効果、あるいは移流拡散効果に自立式単体よりも有効であると考えられる。従って、どちらの設置法が汚濁防止効果に有効かは種々の効果を総合して検討する必要がある。

③汚濁防止膜の汚濁防止効果の一つとして膜端部から発生する乱れによる汚濁拡散効果が考えられる。自立式単体、複列式の両ケースとも、自立式上端部から上方あるいは垂下式下端部下方での乱れ強度は膜を設置しない場合に比較して大きい。乱れ強度の大きさを比較してみると両ケースはほとんど変わらないが、空間分布を比較すると自立式単体の場合よりも複列式の方が広い範囲で乱れ強度が大きい。

④汚濁防止膜を平面的に配置することにより、防止膜設置区域内で流速の低減が生じる。この流速低減は、防止膜設置区域内で発生する汚濁に対して移流速度を低減させ、汚濁沈降量の増大に効果があるものと考えられる。

⑤囲い込みによる流速低減効果は自立式単体の場合でも、膜を設置していない場合の流速の半分程度は低減できる。また、単層モデルを用いて囲い込みによる流速低減効果はほぼ予測できることがわかる。

参考文献

- 1) 小田一紀・重松孝昌 他：汚濁拡散防止膜周囲の鉛直2次元流れに関する実験的研究, 海岸工学論文 第38巻, pp.876-880, 1991.
- 2) 高橋亮一 編著：コンピューターによる流体力学<演習>, (株) 構造設計研究所, 275p, 1982.

(1999.4.19受付)