

汚濁拡散防止膜に働く流れの流体力に関する実験的研究

鶴谷 広一*・惟住 智昭**・渡邊 弘***

1. ま え が き

近年、わが国では海洋工事やウォーター・フロント開発などに伴うにごりの発生に対して、漁業等への影響を極力少なくするために、海域での環境保護対策に多大の努力がはられてきた。海洋工事にともなう海水のにごりが周辺海域へ拡散するのを防ぐために、通常は汚濁拡散防止膜と呼ばれるフレキシブルな膜体構造物が使われる。

汚濁拡散防止膜は恒久的な構造物ではなく、工事中の限られた期間のみ設置され、埋立地などの構造物の完成後は撤去されるのが普通である。このように、汚濁拡散防止膜は仮設物として扱われるために、水理学的には難しい問題（流れによって変形するため、受圧面積が流れや膜の条件等によって変わる）を含んでいるにもかかわらず、その設計段階においては外力に対する検討が必ずしも十分になされてはなかった。

今後は、関西国際空港の第2期工事や中部新国際空港のように海洋工事が大規模化していくことが予想され、より厳しい条件の中で汚濁拡散防止膜を用いなければならなくなる。そのためにも潮流による汚濁拡散防止膜の変形と膜に働く潮流力の機構を明確にしておくことが必要である。

樫木・青木（1987）は、実際の設置形態に合わせた状態で、流れの中に設置された汚濁拡散防止膜に働く流体力と部材力の算定法を示し、水理実験による検証を行っている。しかし、問題を3次元的に取り扱っていることもあって現象が複雑であり、膜に働く流体力や展張ワイヤーの張力については実験による検証が十分に行われるまでには至っていない。その後、樫木ら（1988, 1989, 1990）は、波浪中に設置された自立式あるいは垂下式の汚濁防止膜に働く衝撃張力の検討を行っている。

汚濁拡散防止膜は、流れ、あるいは波などの外力によってその形を変え、外力と膜構造物の変形を同時に解かなければならず、これらの相互関係に対する基礎

的な検討をさらに進める必要がある。

そこで、本研究では流れの中に設置された汚濁拡散防止膜に働く定常な流体力と膜の変形について検討するため、垂下式の汚濁拡散防止膜の単純な2次元水路実験を行った。また、設置された膜の周辺の流速についても実測を行った。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

実験には港湾技術研究所の水循環装置付大型風洞付水路（長さ 58.5 m, 幅 1.5 m, 高さ 1.3 m）を使用した。水路の測定部は長さ 28.5 m, 幅 1.5 m, 高さ 1.3 m で、下から 73 cm は両側面が厚さ 12 mm のガラス張りである。

本研究では、流れによる断面変形のみを扱う2次元実験とし、水路幅一杯の 1.5 m を使って実験を行った。

実験の概要を図-1に示す。一方向からの定常流に対して、流れのないときに h_0 で垂下していた膜は、流れがかかることによって徐々に変形し、流れによる流体力と釣り合ったところで静止する。このときの流れに対して直角な投影面に對する膜の高さを h_i とする。

2.2 実験ケースと実験方法

実験ケースは表-1に示すとおりで、全実験ケースは180ケースである。模型の素材は表-2に示すように、膜1と膜2がテント用膜材、膜3がネットである。これらの材質を、以下では簡単のために膜1、膜2、膜3で表す。模型の縮尺は1/15である。模型膜を設置したことによる流れの変化を知るために、膜の長さが33 cmのシートについて流速測定を行った。そのときのウェイト重量は133.3 gf/mとした。水深 d は66.7 cmの一定とした。従って、現地水深は10 mとなる。張力の測定

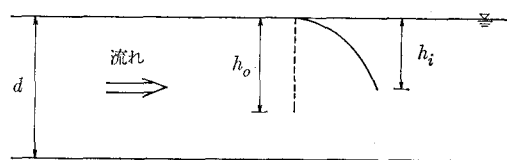


図-1 実験断面図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

** 運輸省第四港湾建設局熊本港工事事務所

*** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

表-1 実験ケース

		縮 尺	模 型	現 地
模 型 (カーテン)	高さ L (深さ)	1/15	0.67m	10.0m
			0.33m	5.0m
			0.20m	3.0m
	幅 B	1/15	1.50m	22.5m
	材 質		72gf/m ²	—
			150gf/m ²	—
			ネット	—
重 錘	ウェイト	1/225	222.2gf/m	50.0kgf/m
			133.3gf/m	30.0kgf/m
			66.7gf/m	15.0kgf/m
			33.3gf/m	7.5kgf/m
	流 速	1/3.87	12.9cm/s	50.0cm/s
			7.7cm/s	30.0cm/s
			5.1cm/s	20.0cm/s
			3.5cm/s	12.5cm/s
			2.6cm/s	10.0cm/s
	水 深	1/15	66.7cm	10.0m

表-2 模型素材の材質および物性値

膜 材 質	物 性 値 (模型)		
	重さ (gf/m ²)	厚み (mm)	目 合
1 PET, タイマー	72	0.12	
2 ビロニン8310	150	0.29	
3 PET BKS0812D	125		2mm 角目

には、最大 1.96 N (200 gf) まで測定可能な張力計を模型両端に用いた。また、流速の測定には、レーザー・ドップラー流速計を用いた。

実海域での汚濁防止膜の変形は 3 次元적であるけれども、既に述べた通り、今回は流れによる断面変形のみを取り扱う 2 次元水理実験のために、幅方向に変形を生じさせないように膜上部に取り付けるフロートは両端を塞いだ中空パイプを用いた。

張力計と膜の接続には、重さが無視できる釣り糸を用い、流れによる水平方向の張力のみを測定するために張力計と膜上部のパイプが水平になるように支柱の高さを調整した。

解析の際には、膜に働く張力のみを求めるために、各流速時のパイプのみに働く張力を別途求めておいて差し引いている。

以後、特に断らない限り、現地での値を用いて表示する。

2.3 解析方法

張力計で測定されたアナログ信号は、直接デジタルデータレコーダー (TEAC DR-F1) で変換してフロッピーディスクに記録し、パソコン (NEC PC-9801 VX) で計算処理を行った。AD 変換時のサンプリング間隔は

$\Delta t = 1/10$ 秒、収録データ個数は $N = 1,500$ 個とした。

流速計で測定されたアナログ信号は、直接デジタルデータレコーダー (TEAC DR-F1) で変換してフロッピーディスクに記録し、大型計算機 (ACOS-1000/10) で計算処理を行った。AD 変換時のサンプリング間隔は $\Delta t = 1/51.2$ 秒、収録データ個数は $N = 4,096$ 個とした。

3. 抗力係数と投影面積の定義

3.1 抗力と抗力係数

粘性流体中に平板などの物体を配置した場合には、平板の前面と後面で流れが変化する。さらに、前面と後面では圧力差が生じ、この圧力差による力と粘性による摩擦力とが物体に働く流体力の主因となる。この圧力による流体力と摩擦力による流体力の双方を合わせた全流体力を抗力と呼ぶ。

流れ方向の抗力を F_x とすると、これは抗力係数 C_D を用いて次のように表せる。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A_x \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 U は流速、 A_x は物体を流れ方向に投影した面積である。

抗力係数 C_D は物体の形状によって異なった値をとるため、球や円柱などある程度解析的に求まる場合を除いて、実験によって定めるのが普通である。

3.2 投影面積

図-1 に示したように、流れによって変形した幅 B の模型の膜に対して、流れ方向の投影面積 A_i を考えると、

$$A_i = h_i \times B \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ここに、本実験では $B = 1.5$ m である。

さらに、 P_i を膜の模型全体に働く抗力とし、2 個の張力計で測定された張力の和とする。これを流れ方向の投影面積で割った単位面積当りの抗力を P_i と定義すると、

$$P_i = \frac{P_t}{A_i} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

4. 実験結果及び考察

4.1 膜に働く流体力

図-2 は、高さが 5 m の膜 1 と膜 2 について、膜に働く全応力 P_t と流速の関係を示したものである。図中の記号の添字の p は現地での値を、 m は実験での値を示す。表-2 に示したように、膜 1 の方が膜 2 よりも単位面積当りの重量は約半分であるが、図-2 によれば同じ条件に対して、膜 1 の方が P_i がやや大きくなっている。これは、膜 2 の浮力が約 0.04 gf/cm² であるのに対して、膜 1 の浮力は 0.01 gf/cm² と小さかったためで、水中重量では膜 2 の方が膜 1 より軽くなったことによ

るものと考えられる。

図-2 によれば、ウェイト重量が大きくなるほど全応力 P_t も大きくなっている。単位長さ当りのウェイト重量が 30 kgf/m と 50 kgf/m の場合には、流速の小さなところで流速の増大と共に全応力も大きくなるが、流速が 20 cm/s を越えると応力の増加はなくなる。これは、流速が大きくなると膜の変形（ふかれ）により、受圧面積 A_i が小さくなるためであり、ふかきを許すような係留方法では、流速が増大しても、係留張力はある一定値に収束することを示している。

ウェイト重量の小さい 15 kgf/m と 7.5 kgf/m の場合には、全応力はかなり小さく、また流速によってもほとんど変化しない。

図-3 は、膜3（ネット）についてプロットしたものである。単位幅当りのウェイト重量が 50 kgf/m のデータについては、ネットに働く流れの流体力が十分ではなく、全体にやや沈み気味で、張力計で正確な水平方向応力を測定できなかったために、ここでは省略してある。図-2 の場合とは違って、全応力は流速と共にやや増加の傾向にある。

4.2 抗力係数

水中に設置された膜体の単位面積当りの流体力 P_t と抗力係数 C_D の関係を、流速をパラメータとして膜2について図-4に示す。一定の流速に対しては、膜の長さが長いほど、あるいはウェイト重量が重くなるほど P_t と C_D は共に大きくなる傾向にある。膜の長さが 10 m で、ウェイト重量が 50 kgf/m のケースでは、流速が小さくなると P_t が小さくなるにつれて C_D が急に大きくなる。これは、2次元実験であるために、微小な流速でも流れは膜の下を抜けるしかなく、このために膜は必ずふかれ上がるために流れ方向の張力が検出されることによって生じたものである。実験では、ウェイトの鉛直下向きの応力を流体力が膜を変形することによって支え、膜の張力を水面上で張力計が水平方向応力として計測している。すなわち、流体力は膜を変形させることによって、ウェイトの重量を膜を通して張力計に伝えるので、ウェイトが重くなるほど張力計で計測される張力はウェイトの重量が支配的となっている。

図-4 ではデータが多すぎて傾向がよくわからないので、図-5 と 6 にそれぞれ膜1と膜3の長さが 10 m のケースについてのみの結果を示す。図-5 を同一ウェイトごとにみると、ウェイト重量が軽くなるにつれて抗力係数 C_D の変化の割合が小さくなっているのがわかる。そして、あるところまで C_D が下がると単位面積当りの流体力 P_t が増加しても、抗力係数 C_D はあまり減少しなくなる。ネットの場合の図-6 でも他の膜1、2と同様の傾向がみられるが、抗力係数 C_D の変動幅は

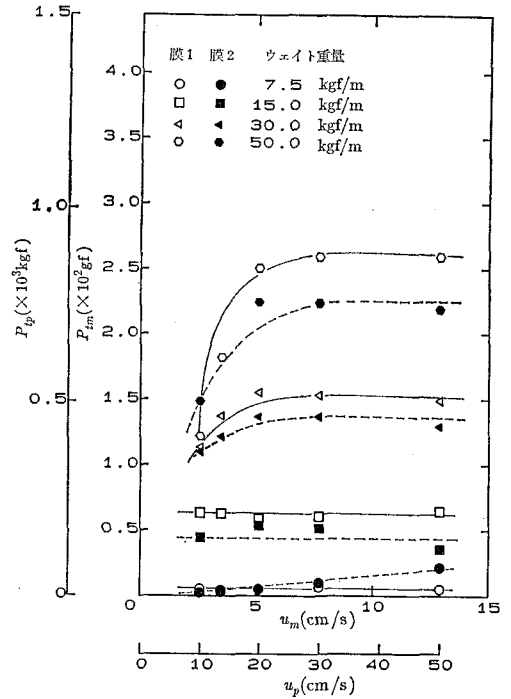


図-2 流速と P_t の関係(膜1, 膜2)

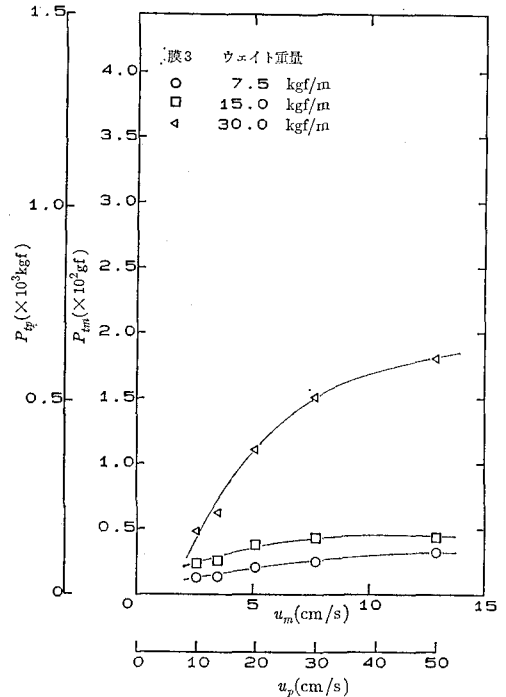


図-3 流速と P_t の関係(膜3)

小さく、ウェイト重量の影響が顕著に現れるということではなく、 P_t も図-4, 5 のケースに比べると、最大で6割ほどしか変わらないことがわかる。汚濁拡散防止膜は、ウェイトや膜の重さ、流速等の条件によって図-1の h_t が

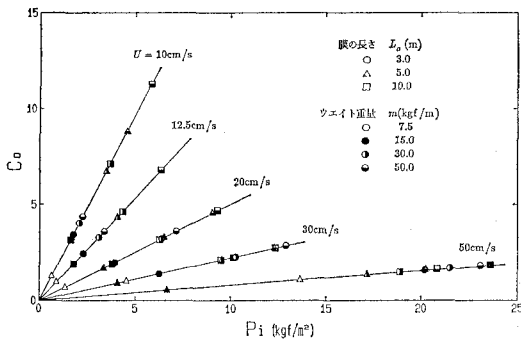
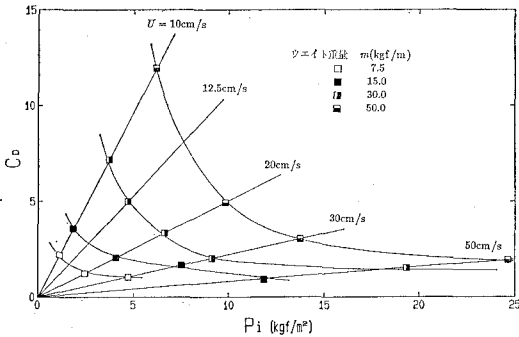
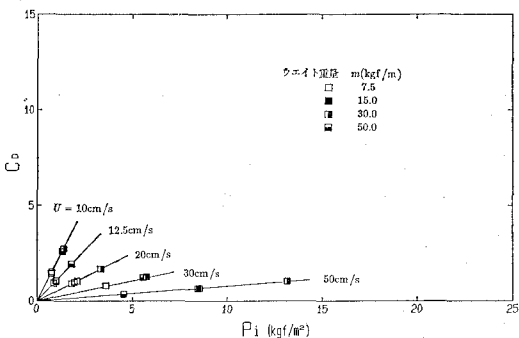
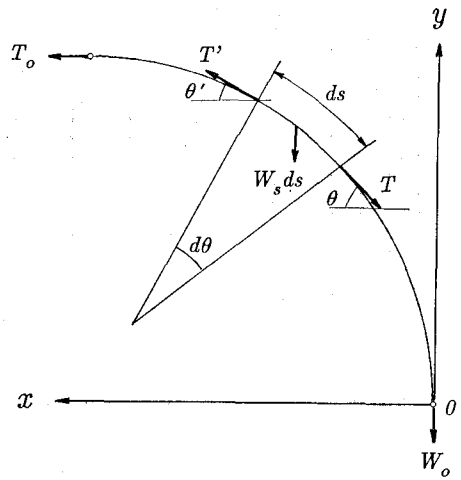
図-4 流速ごとの P_i と C_D の関係 (膜2)図-5 流速ごとの P_i と C_D の関係 (膜1, 膜の高さ10 m)図-6 流速ごとの P_i と C_D の関係 (膜3, 膜の高さ10 m)

図-7 膜の変形計算に用いる座標系

る。流れによる圧力 Δp が膜の微小要素 ds に作用して膜が変形しているとする、 x 方向と y 方向の力のつりあいから以下の連立微分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial s} &= W_s \sin \theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial s} &= \frac{1}{T} (\Delta p - W_s \cos \theta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

実際の計算では、境界値として、ウェイトの重さと膜先端での角度を与える必要がある。図-8 に、流れによって変形した膜の計算結果と実測値の比較を示す。膜の長さは33 cmで、膜の下端での張力は、近似的に張力計で測定された値を用い、角度は $\pi/2$ を与えた。このときの膜の単位面積当りの重さは、浮力を差し引いて 0.0227 gf/cm^2 と小さく、式(4)からわかるように、 W_s を無視すると Δp が一定ならば膜の形状は円弧となる。図-8 の計算では、 Δp を一定として計算すると膜

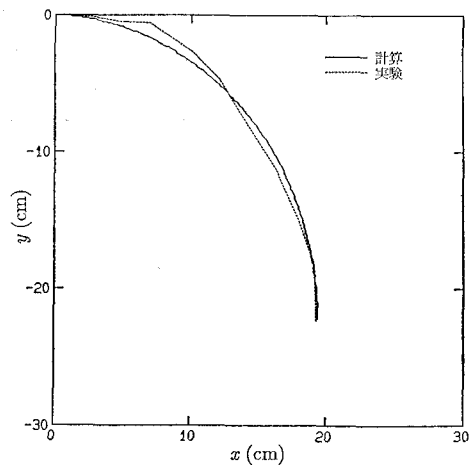


図-8 膜の変形の計算値と実測値の比較

並むるので、 C_D がわかって、 h_i がわからなければ膜に働く流体力を推定することはできない。そこで、以下に膜の変形計算法を示す。

4.3 膜の変形計算

図-7 に示すように、膜の下端に原点をとり、水平方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。膜の上の点 (x, y) で、膜の張力 T が x 軸となす角を θ とし、膜に沿って ds だけ離れた点での張力と x 軸となす角をそれぞれ T' , θ' とすると、図から $T' = T + dT$, $\theta' = \theta - d\theta$ となる。また、単位面積当りの膜の重さを W_s 、膜の下端のウェイトの単位長さ当りの重さを W_0 とす

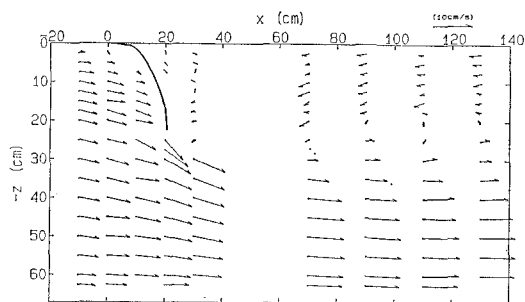


図-9 平均流速のベクトル分布

の下端で変形（ふかれ）が実測値よりも大きくなった。そこで、計算では Δp を以下のように与えた。

まず、膜より十分上流側の流速 u を用いて、

$$p_0 = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

より流れに起因する圧力 p_0 を求める。膜の下端付近は流れがあるので、圧力が膜の上部よりやや小さくなる。そこで、膜に沿った圧力 Δp を次式で与える。

$$\Delta p = \left(\frac{0.35}{L} s + 0.65 \right) p_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 L は膜の長さ、 s は下端を 0 として測った膜の長さである。

計算は、ほぼ実測値の変形を表している。

4.4 流速分布

膜の前後の平均流速分布のベクトル図を図-9に示す。実験での膜のウェイト重量は 133.3 gf/m（現地換算 30 kgf/m）で、膜の長さが 33.3 cm（5 m）、断面平均流速が 5.1 cm/s（20 cm/s）の場合である。なお、流速値も実験での値で示してある。構造物の後流域では主流域、混合域、反流域の3つの領域に区分される。これらの領域を今回の実験ケースに当てはめてみると、流れが膜を避けるような形で下方に縮流されて主流域を形成し、膜からの剝離によって流速が負になるような反流域を形成する。ただし、混合域は主流域と反流域の中間的

な領域であるが判断し難く、明確に区分することはむずかしい。

5. ま と め

今回の実験から得られた結論は、以下の通りである。

汚濁拡散防止膜に働く流れの流体力を、膜に働く水平方向全応力 P_t と、ふかさを考慮した流れ方向の投影面の単位面積当りの流体力 P_i について解析した。

1) 水平方向の全応力 P_t は、ウェイトの重量が小さいときは流速が増加してもそれほど変化しないが、ウェイトの重い場合には、流速が 20 cm/s 程度までは流速の増加と共に P_t も増加する。しかし、それよりも大きい流速では、一定の値を示す。

2) 流れ方向の単位面積当りの流体力 P_i と抗力係数 C_D には一定の流速に対して直線の関係があるが、流速の小さなところでは、 C_D の値はかなり大きくなる。これは、ウェイトが重い場合に相当する。

3) 膜の前後の流速測定を行い、膜の背後に明確な反流域ができることを確認した。この領域では、水が長時間滞留することになる。

本研究は、海洋工事汚濁防止協会の依頼により行った受託試験の一部である。協会の関係各位に厚くお礼申し上げます。また、膜の変形計算を行うに際し、(株)ブリジストンの山瀬晴義氏との討論が有効であった。ここに記して感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 樫木 亨・青木伸一 (1987): 流れの中に張られた汚濁拡散防止膜に及ぼす流体力と有効深さの計算法について, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 203-208.
- 樫木 亨・青木伸一・安井章雄 (1988): 波浪中に張られた自立式汚濁防止膜に発生する張力に関する水理実験, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 313-318.
- 樫木 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.
- 樫木 亨・青木伸一・劉 海波・山下 真 (1990): 波浪中に張られた垂下式汚濁防止膜の展張ケーブルに発生する衝撃張力特性, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 311-316.