

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

小田 一紀* 重松 孝昌** 小林 徹雄***
岡 本 寛**** 山瀬 晴義*****

1. はじめに

環境に対する意識が高まる昨今、物質の拡散に関する研究は重要な研究課題の 1 つである。海岸工学の分野においても、汚染物質や湧昇流とともに水面に浮上した富栄養物質、あるいは河川から流出した細粒土砂などの拡散現象に関する研究は数多い。汚濁防止膜周辺の濁水の拡散現象もその 1 つとして挙げられよう。しかし、この現象は、柔らかい汚濁防止膜が流体中で容易に変形し、周囲の流体運動を複雑にするため、未解明な点が多く残されている。それゆえ、膜の諸元が濁水の拡散に及ぼす影響についても十分に明らかにされていないのが実情である(たとえば、加納ら, 1987; 加納ら, 1989; 小田ら, 1990)。

著者らは、既に水中に垂下膜や自立膜が設置されたときのそれらの周辺の鉛直 2 次元流況を実験的に明らかにしている(小田ら, 1991)。本研究では、膜周辺における沈降性物質の拡散現象に着目し、カオリンを用いて膜の高さが物質の沈降・拡散現象に及ぼす影響を鉛直 2 次元実験を行って検討した。

2. 実験概要

実験は、長さ 50 m、幅 2.5 m、高さ 1.5 m のコンクリート製の流れ水槽を隔壁で幅 1.0 m に縮小した部分で行い、水深は $h=1.0$ m とした。膜の模型には不透水性の合成繊維を用い、垂下膜の場合はその下端に直径 3 mm、重さ 100 gf/m の重錘を取り付け、自立式膜の場合は上端に直径 25 mm、浮力 340 gf/m の発泡スチロール製のフロートを取り付けた。流れの断面平均流速 U_0 は 3.2 cm/s と一定にし、膜高 l は自立膜、垂下膜に関わらず 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m の 3 種類とした。

座標系は、水面を原点として流下方向に x 軸を、水底方向に z 軸をとり、垂下膜および自立膜は $x/h=1.0$ の位置に設置した。カオリン溶液は、垂下式膜の場合には原

点から放出し、自立膜の場合にはその x 座標を $x/h=0$ に固定し、 z 座標 z_L は、相対膜高 $l/h=0.25$ の場合は $z_L/h=0.75$, $l/h=0.50$ の場合は $z_L/h=0.50$, $l/h=0.75$ の場合は $z_L/h=0.25$ とした。本来ならば、濁源の位置や、膜と濁源の距離などをいろいろ変えて実験を行い、膜の近傍における拡散現象について検討すべきであるが、それには多大な時間と労力を要するので、ここでは上記の条件下でのみ実験を行った。

汚濁は図-1 に示すように、水路横断方向に固定した直径 3 mm、長さ 1 m の真鍮製の円管を用いて発生させた。この真鍮管を水面上約 80 cm に固定された漏斗状の容器 4 本の直径 3 mm のビニール管を用いて連結し、さらに、真鍮管の水底側に 0.8 mm の孔を 1 cm 間隔であけた。ビニール管を摘んで容器から真鍮管へ流体が流れないようにした後、容器内に 10000 mg/l のカオリン溶液を 1 l 入れ、ビニール管を解放して汚濁を放出した。濃度は、光感度式濁度計 ((株) KENEK 製 PM403, および PM406) を 9 本用いて、カオリンの放出位置から $x/h=6.0$ までの領域を $\Delta x=25$ cm, $\Delta z=10$ cm 間隔で測定した。濁度計の精度がフルスケール (500 mg/l) の 2 %であることを考慮して、各測定点で 10 mg/l 以上の濃度が測定された時を測定の開始時刻とし、サンプリング周波数 10 Hz で 120 秒間測定した。

拡散現象は時間的、空間的にランダムな現象であるので、本来は実験を繰り返し行い、得られたデータを統計的に取り扱わなければならない。ここでは同一条件の放出実験を 3 回繰り返し、各測定点で測定された 3 個の時

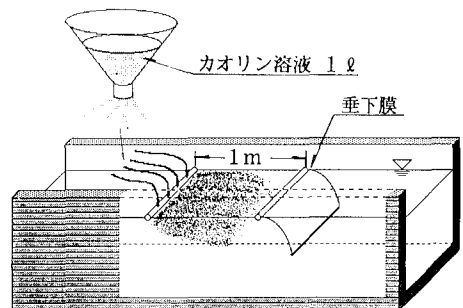


図-1 実験概要

* 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 工学部土木工学科
**** 日立造船(株)
***** (株)ブリヂストン

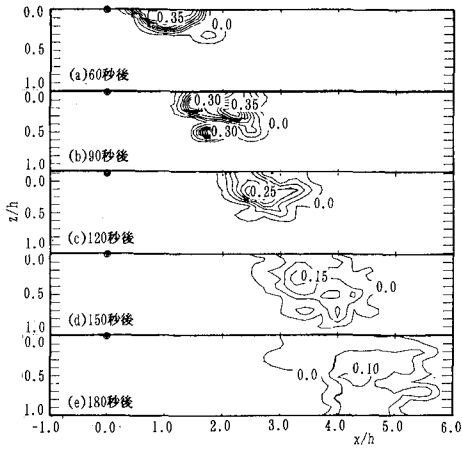
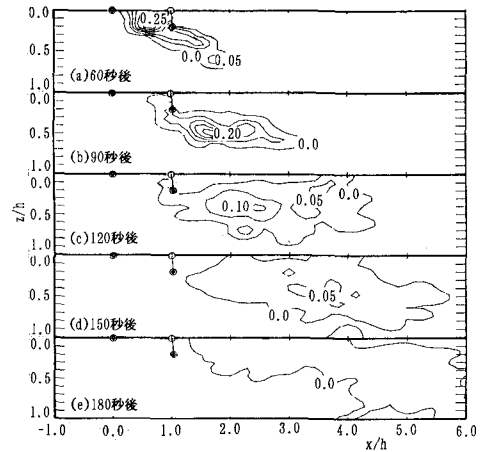
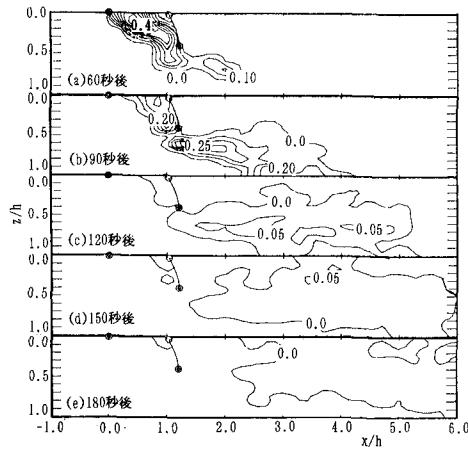
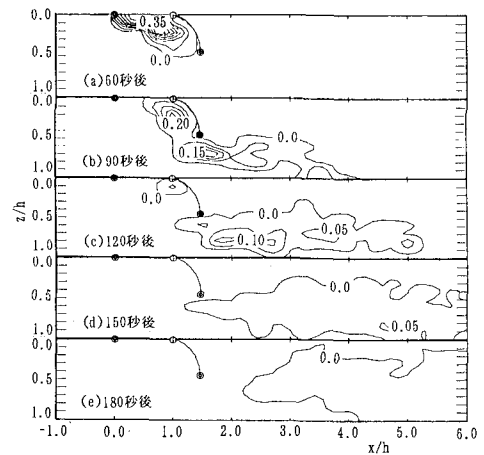


図-2 等濃度比線図 (膜を設置しない場合)

図-4 等濃度比線図 (垂下膜, $l/h=0.50$)図-3 等濃度比線図 (垂下膜, $l/h=0.25$)図-5 等濃度比線図 (垂下膜, $l/h=0.75$)

系列データの平均 (アンサンブル平均) をとることによってその測定点におけるカオリン溶液放出後の濃度時系列を求めた。このようにして得られたデータから、カオリン放出後の垂下膜および自立膜近傍の濃度分布の経時変化を求めた。その際、カオリン放出点の直後の濃度がほぼ均一とみなせる地点で計測した濃度 C_0 で正規化して表した。さらに、膜の設置位置およびその下流域の各点において総濃度フラックス F を求めた。

3. 実験結果

3.1 垂下膜

(a) 濃度分布の経時変化

図-2は、膜を設置しない場合に原点からカオリン溶液を放出したときの濃度分布の経時変化を示したものである。カオリンは流れの影響を受けて時間の経過とともに断面平均流速 U_0 とほぼ同じ速度で下流へと移流していることがわかる。また、カオリン自身の沈降特性のた

め流下とともに水底方向にも拡散しながらその分布領域を上げ、150秒後には $x/h=4.0$ 付近でほぼ全水深にわたってカオリンが分布することがわかる。

図-3は、相対膜高 $l/h=0.25$ の垂下膜を設置したときの実験結果を示したものである。同図(b)より、ほとんどのカオリンは膜の下流域に流出していることがわかる。下流域に流出したカオリンは、 $x/h<3.2$, $0.2<z/h<0.7$ の領域に分布し、膜を設置しない図-2(b)と比較すると水平方向に細長く分布し、その濃度も $C/C_0=0.20$ と低くなることがわかる。さらに、120秒後の下流域の濃度分布図(図-3(c))を見ると、水平方向にも鉛直方向にも分布領域は拡がり、濃度は $C/C_0 \leq 0.10$ と低くなっていることがわかる。これは、垂下膜の下流域における流況の影響を大きく受けているものと考えられる。すなわち、膜の背後では後流域が形成されているため、流体は上向き速度成分をもつようになり(小田ら, 1991)、この上向きの速度成分によってカオリンが水面方向へと

輸送されると考えられる。また、図-3(d), (e) より、時間の経過とともに下流域に流出したカオリンは膜を設置しない場合と比べて広範囲に分布するようになり、その濃度も低くなることがわかる。

図-4は相対膜高 $l/h=0.50$ の垂下膜を設置したときの濃度の分布の経時変化を示したものである。同図(b)より、 $l/h=0.50$ の垂下膜の下流域に流出したカオリンは $l/h=0.25$ の垂下膜を設置した場合よりもさらに下層に、そして水平方向に広く分布し、濃度は水底付近で高くなっていることがわかる。これは、水面から放出されたカオリンが垂下膜によって水底に輸送されていることを示している。しかし、その後、下流域に流出したカオリンの分布領域は流下しながら次第に水面方向に拡がり (図-4(c)), やがて全水深にわたって分布するようになることがわかる (図-4(d), (e))。前述のように、膜の下流域における流体運動がカオリンの沈降・拡散現象に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

$l/h=0.75$ の垂下膜を設置したときの濃度分布の経時変化を図-5に示す。図-4と図-5を比較すると、垂下膜によるカオリンの下層への移流や膜の下流域における濃度分布、また、時間の経過による濃度の低下などの傾向は非常によく似ていることがわかる。小田ら (1991) による膜周辺の流況実験によれば、膜背後の乱れ特性は有効膜高 (膜が変形したときの鉛直高さ) に大きく依存している。 $l/h=0.50$ および 0.75 の垂下膜が $U_0=3.2$ cm/s の流れの中に設置されたときの相対有効膜高 l_e/h (l_e : 有効膜高) は 0.43 および 0.48 とほぼ等しいこと、および上述の拡散実験の結果を考慮すると、垂下膜周辺の物質の拡散現象も有効膜高に依存していると考えられる。

(b) 濃度フラックス

図-6(a)は原点からカオリン溶液を放出したときの水平方向の総フラックスを示したものである (ただし、 $F_0 = \int_0^\infty C_0 U_0 dt$ で無次元表示している)。同図より、水面から放出されたカオリンは沈降しながら流下し、 $x/h=6.0$ 付近では総濃度フラックスは鉛直方向にほぼ一樣になることがわかる。また、同図(b)~(d)より、垂下膜の設置位置においては膜高が大きい程、 F/F_0 のピークは水底に近いところに現れ、ピークの値も大きくなっている。このピークの現れる位置は $x/h=2.0$ 付近で最も水底に近くなるが、さらに流下すると中層付近に現れるようになり、ピーク値は流下するとともに小さくなっていくことがわかる。

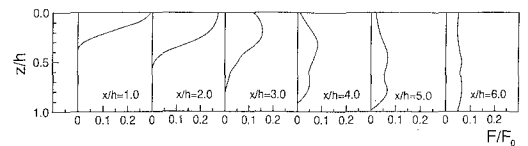
3.2 自立膜

(a) 濃度分布の経時変化

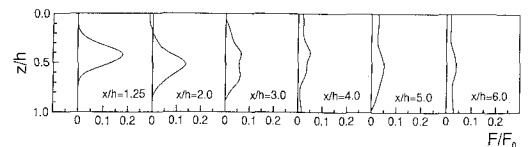
カオリン溶液の放出水深を $z_L/h=0.75$ として自立膜を設置しなかったときの濃度分布の経時変化を図-7に

示す。同図より、沈降特性を持ったカオリンは水底に堆積してその濃度を低下させながら、水底近傍を下流域へと流下していることがわかる。図-8は $z_L/h=0.75$ として $x/h=1.0$ に $l/h=0.25$ の自立膜を設置したときの濃度分布の経時変化を示したものである。同図(a)および(b)より、カオリンは自立膜の前面で滞留した後、膜の上端から下流域へ流出していくことがわかる。図-8(c)~(e)をみると、膜前面の濃度が低下し、下流域にカオリンの分布する領域が広がっていることがわかる。しかし、その濃度は高いところでも $C/C_0=0.05$ 程度と非常に低くなっている。また、 $C/C_0=0.05$ の領域は膜の直後にみられ、膜の後流域でカオリンが滞留していることがわかる。

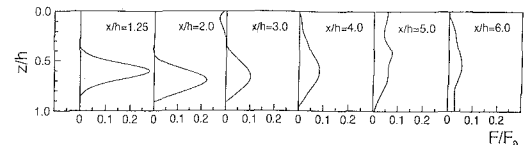
図-9は、自立膜を設置しないときに $z_L/h=0.50$ の位置からカオリンを放出したときの実験結果を示したものである。また、図-10は、放出位置を同じにして $l/h=0.50$ の自立膜を設置したときの濃度分布の経時変化を示したものである。図-10より、 $l/h=0.25$ の自立膜の場合と同様に、膜の下流域におけるカオリンの濃度は非常に低く、放出後120秒経過時には C/C_0 は 0.05 以下となっていることがわかる。同図(c)~(e)の濃度分布図によると、それぞれの時間におけるカオリンの分布領域はほとんど変化していないことがわかる。底層部に存在する分



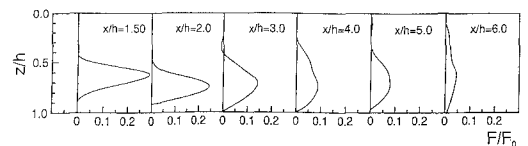
(a) 垂下膜を設置しない場合 ($z_L/h=0.0$)



(b) $l/h=0.25$ の場合 ($z_L/h=0.0$)



(c) $l/h=0.50$ の場合 ($z_L/h=0.0$)



(d) $l/h=0.75$ の場合 ($z_L/h=0.0$)

図-6 総濃度フラックス

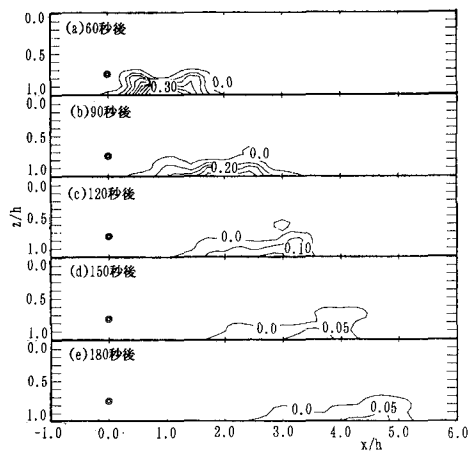


図-7 等濃度比線図 (膜を設置しない場合, $z_L/h=0.75$)

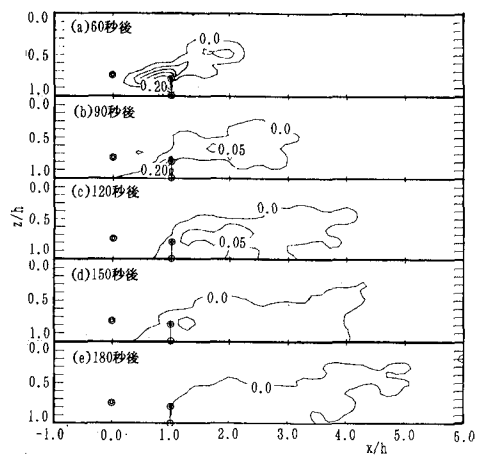


図-8 等濃度比線図 (自立膜, $l/h=0.25$)

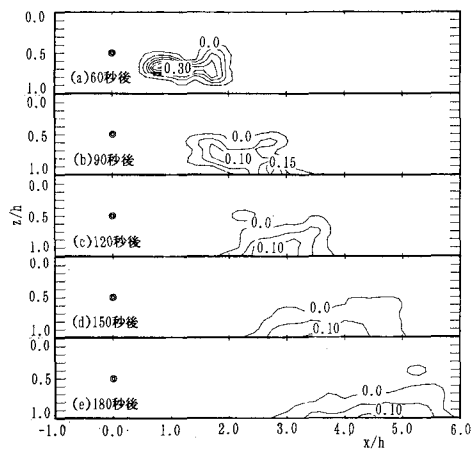


図-9 等濃度比線図 (膜を設置しない場合, $z_L/h=0.50$)

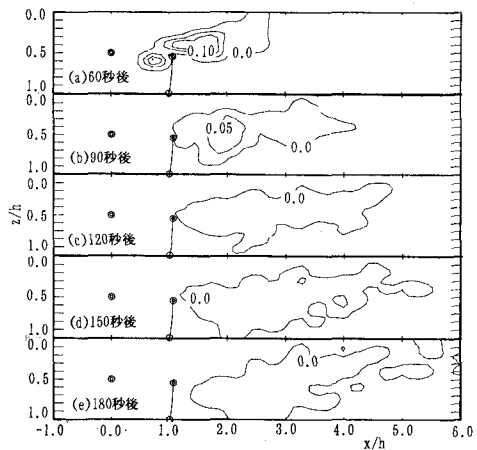


図-10 等濃度比線図 (自立膜, $l/h=0.50$)

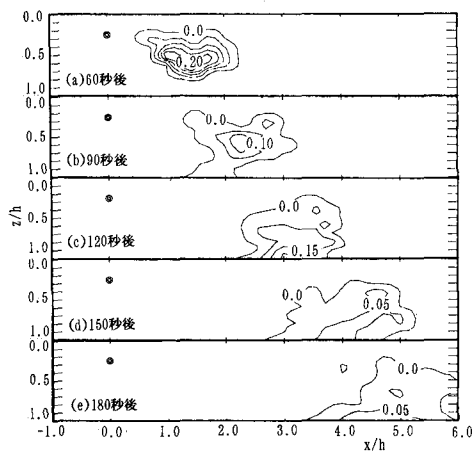


図-11 等濃度比線図 (膜を設置しない場合, $z_L/h=0.25$)

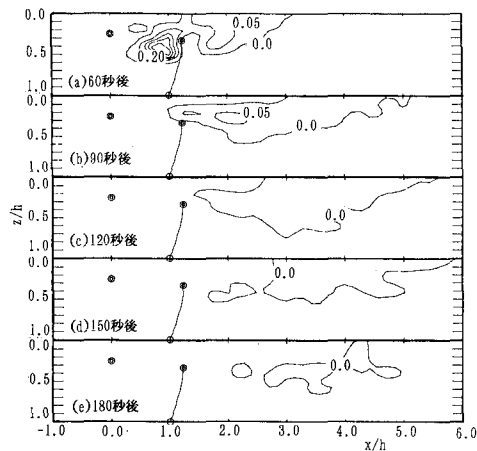


図-12 等濃度比線図 (自立膜, $l/h=0.75$)

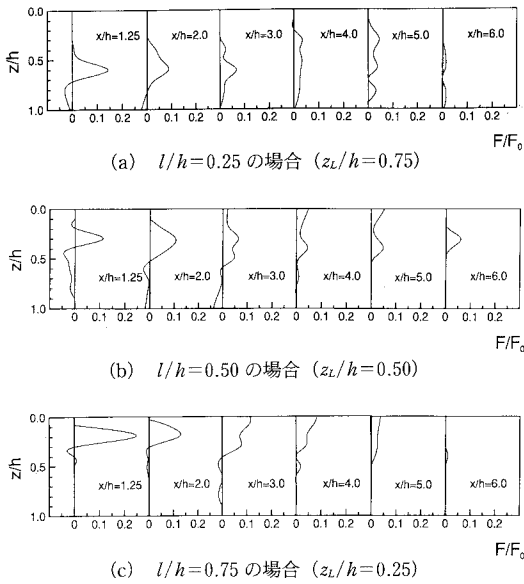


図-13 総濃度フラックス (自立式膜の場合)

布領域は膜の後流域内にカオリンが浮遊していることを示しており、上層部の分布領域は複雑な流体運動によって後流域内から主流域へと輸送されてきたカオリンが上層に浮上していることを示している。

放出水深を $z_L/h=0.25$ としたとき、膜を設置しない場合の実験結果を図-11に、 $l/h=0.75$ の自立膜を設置した場合の実験結果を図-12に示す。 $l/h=0.50$ の自立膜を設置したときと同様に、膜の背後では濃度が非常に低くなっていることがわかる。図-8および図-10と比較すると、膜の下流域におけるカオリンの分布領域は水面付近に現れていること、また、有効膜高が高くなるほど膜の下流域における濃度の低下が著しいことがわかる。これは、有効膜高の増加とともに、主流域の速度が速くなり短時間に遠方にカオリンが流されること、また、膜背後の流体の乱れが大きくなるため(小田ら, 1991)、拡散速度が大きくなることなどによると考えられる。

(b) 濃度フラックス

図-13は自立膜を設置したときのその下流域における総濃度フラックス比を示したものである。図-14に示した膜を設置しないときのフラックス比の分布と比較すると、膜を設置しないときには総濃度フラックスは水底近傍で大きな値を有するのに対して、自立膜を設置すると水底近傍ではフラックス量は小さく、膜高が大きくなるほど上層部で大きな値を示すようになることがわかる。また、自立膜を設置すると $x/h=6.0$ では総濃度フラ

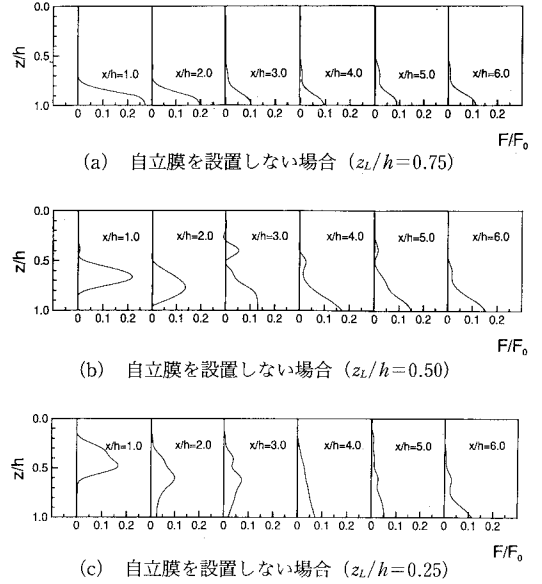


図-14 総濃度フラックス (膜を設置しない場合)

ックスが非常に小さくなるが、これは、計測時間が十分でないことや各測定点における測定開始時刻の決定の仕方などに原因があると考えられる。

4. ま と め

本実験によって得られた結果を要約すると以下のようである。膜の上流から放出されたカオリンは、垂下膜の下端あるいは自立膜の上端から下流域に流出し、下流域におけるその分布は有効膜高の影響を大きく受けることがわかった。このことは、流れの中におかれた膜の形状に関する研究の重要性を示すものである。

今後は、これらの膜周辺の拡散現象を3次元的に検討したいと考えている。

参 考 文 献

- 小田一紀・重松孝昌・濱崎佳尚・山瀬晴義 (1990): 汚濁拡散防止膜の効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 843-847.
- 小田一紀・重松孝昌・濱崎佳尚・中尾敦典・山瀬晴義 (1991): 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 876-880.
- 加納 敬・本城 豊・川本博文 (1987): 半水深二重敷設汚濁防止膜の効果に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 209-214.
- 加納 敬・本城 豊・川本博文 (1987): 大水深用汚濁防止膜の最適敷設法に関する空気流模型実験, 海洋開発論文集, Vol. 5, pp. 239-244.