

現地観測に基づく汚濁防止膜の抗力係数に関する一考察

前野 賀彦* ・ 石川 元康** ・ 田中 克往***
東 博之*** ・ 川本 博文***

1. 序 論

沿岸域の開発に伴う埋立・浚渫・土捨て等の海洋工事に際しては、周辺海域の水質・底質環境の保全を目的として、汚濁防止膜が工事海域に設置される。海洋工事の多様化に伴い激しい海象条件下における設置も今後検討されると予想される。そのためには、汚濁防止膜への波・流れの作用を的確に把握する必要がある。しかしながら、設計においては静止物体の抗力係数に基づき波力・流体力が算定されているのが現状である。外力によって変形する膜構造物の抗力係数を求めるためには、波・流れによって膜に作用する流体力と膜の変形形状を得ることが必要である。従来、樫木ら(1987, 1988, 1989)、鶴谷ら(1991)によって自立型または垂下型汚濁防止膜に作用する流体力や膜の変形について検討が行われている。しかしながら、これらの研究はすべて模型実験に基づくものであることから、それらの結果を実海域に設置されている汚濁防止膜に適用するには注意を要することは、既に彼らによって指摘されているところである。そこで、本研究では、波・流れの共存場における垂下型汚濁防止膜の係留索に作用する張力、および流れによる膜の変形特性を現地観測することによって汚濁防止膜の設計に必要な膜構造物の抗力係数の推定を試みた。

2. 現地観測の概要

2.1 係留索張力の現地測定

係留索張力の測定は、1994年11月9日から12月13日までの約1ヶ月間にわたり、東京湾K地区の埋立工事区域において行った。測定地点の概略を図-1に示す。水深42mに設置されている汚濁防止膜の上部および下部係留索の接続部2カ所に張力計を設置している。係留索張力の測定に際しては張力と同時にその作用方向も測定できる張力計を用いた。さらに、張力測定時の波浪および流れの状況を把握するために、観測地点に近接した固定構において海面変動と流速を測定した。調査地点の汚

濁防止膜は膜長7m、膜幅20m、ウェイト重量30kgf/m(294N/m)、膜面の付着生物水中重量6kgf/m²(58.8N/m²)である。全測定期間中の最大有義波高は1.03m、有義波周期は3.8s、汚濁防止膜直角方向の最大平均流速は0.52m/sであった。波・流れの作用下の係留索に作用する張力は、前野ら(1995a, 1995b)が述べているように主に流れによる静的張力成分と主に波による変動張力成分に分解される。ところが、一方で彼らの現地観測結果によれば流れによる静的張力の値が大きくなるに従って波による変動張力の発達が波高の上昇によると考えられる割合を超えて大きくなっている。このことは、波と流れの共存場における流体力の発生には何らかの非線形性があることを示している。そこで、ここでは波と流れによる膜に作用する流体力をそれぞれ検討し、波および流れによる膜の抗力係数の推定を試みた。

2.2 流れによる汚濁防止膜の変形形状の測定

流れによる汚濁防止膜の変形形状の測定は、広島県廿日市埋立工事地区に設置されている垂下型汚濁防止膜を対象として、1995年11月24日に行った。測定地点は、図-2に示されるように、水面積約960,000m²の貯木場の下流側に位置することから、下げ潮時には貯水場内か

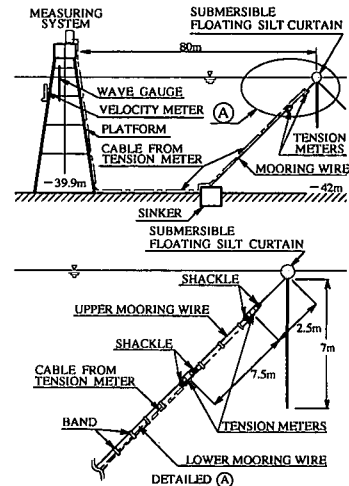
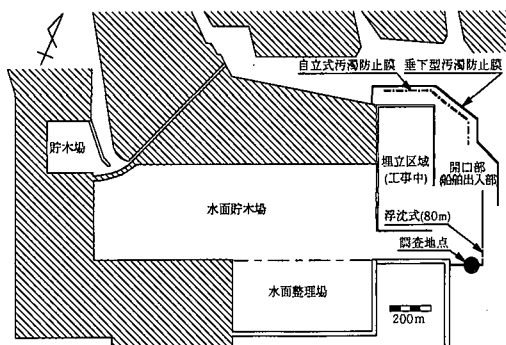
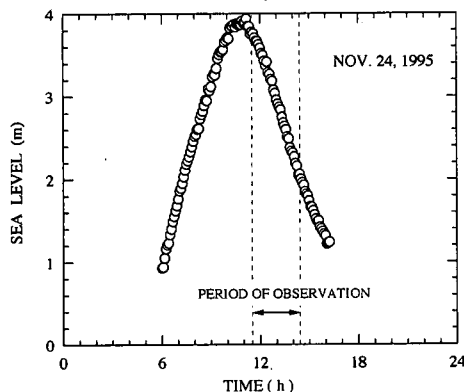


図-1 調査地点の概略

* 正会員 農博 日本大学教授 短期大学部建設学科
** 正会員 工修 日本大学助手 短期大学部建設学科
*** 海洋工事汚濁防止協会



図一2 膜変形状の測定地点平面図



図一3 測定地点の潮位

ら流出する流れの影響が大きい。本研究では、波の影響がない状態における流れによる膜の変形特性を得る必要があることからこの地点を選択した。実際に最大0.15 m/sの流速があるのに対して、測定期間中の平均風速は4 m, 有義波高は0.2 m程度であり、膜の変形に対して風波の影響は無視できるものと考えられる。

膜の変形形状は箱尺を鉛直に水中に沈めて箱尺下端が汚濁防止膜に接したときの水深より膜の鉛直方向変位(ふかれ形状)を求めた。以後、流れによる膜の舞上がり(ふかれと呼ぶことにする。さらに、スチールテープと箱尺により汚濁防止膜の水平方向変位(フロート部のたわみ)を測定した。膜の変形形状の測定と同時に2次元電磁流速計と電磁流向流速計により汚濁防止膜への接近流速の測定を行った。調査時刻は11:30から14:30であり、図一3に示すように満潮時から下げ潮時にかけて行った。調査地点の汚濁防止膜は膜長9 m, 膜幅20 m, ウェイト重量15 kgf/m (147 N/m), 膜面の付着生物水中重量0.5 kgf/m² (4.9 N/m²)である。

3. 汚濁防止膜の抗力係数の推定

波と流れの共存場における汚濁防止膜の係留張力を、

流れによる静的張力成分と波による変動張力成分に分けて考えることにする。波と流れの共存場における膜の変形を考える場合、波が水粒子の楕円運動であることから、波は膜面の往復運動に関与していると考えられ、膜のふかれに対しては流れの影響が大きいものと考えられる。実際の流れは定常ではないことは流速の測定結果より明らかであるが、ここでは、平均流速を用いることにより抗力係数の推定を試みた。汚濁防止膜のように流れに対してフレキシブルな構造物の場合、定常流れ中の抗力係数の算定に際しては膜の変形形状を知る必要がある。このため、定常流れのみが作用した汚濁防止膜の静的解析結果と現地観測結果に基づいて抗力係数の推定を試みた。汚濁防止膜の水平方向の変形(たわみ)解析に関して、Milgram (1971), 榎木・青木 (1987)の研究がある。彼らは膜のたわみに関して膜の接線方向と法線方向の力の釣り合いから解析を行っており、抗力係数を仮定して張力と膜の変形特性を論じている。また、汚濁防止膜の鉛直方向変形(ふかれによる変形)解析に関しては、鶴谷ら (1991)が膜の接線方向と鉛直方向とに力の釣り合いを適用した連立微分方程式を導き、実験結果と対応させた流圧力を与えて膜の変形形状を求めている。ここでは、彼らと同様の考え方に基づき、膜の変形解析を行った。解析に際しては、図一4、図一5に定義される座標系および記号を用いた。また、式の誘導に際して次の仮定を行った。①膜への接近流速は一樣である。②水平・垂直方向に作用する単位幅あたりの流体力は一樣である。③スパンの中央部において流れによる膜の水平方向の最大たわみ δ が生じるとする。

したがって、膜面に垂直に作用する単位幅あたりの抗力 F_c は、流れに対する抗力係数 C_{df} を用いて次式のように示される。

$$F_c = C_{df} \frac{1}{2} \rho_w (u \cos \theta)^2 d \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u は流速、 θ は膜の任意の点における流れに垂直な方向と膜の接線となす角、 ρ_w は海水の密度である。さらに、 d は有効膜高で膜がふかれた場合に流体力を受ける膜高として図一5に定義される。

また、原点における抗力 σ_c は式(1)より次式で示される。

$$\sigma_c = F_c|_{\theta=0} = C_{df} \frac{1}{2} \rho_w u^2 d \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、膜の接線方向と法線方向のそれぞれに力の釣り合い式をたて整理すると、膜の水平方向の変形形状が式(3)により与えられ、式(4)～式(7)が得られる。

$$f(x) = \frac{T_F}{\sigma_c} \left\{ \cosh \left(\frac{\sigma_c}{T_F} x \right) - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta = \frac{T_F}{\sigma_c} \left[\cosh \left\{ \sinh^{-1} \left(\frac{\sigma_c}{T_F} \frac{l_0}{2} \right) \right\} - 1 \right] \quad \cdots \cdots (4)$$

$$l = 2 \frac{T_F}{\sigma_c} \sinh^{-1} \left(\frac{\sigma_c}{T_F} \frac{l_0}{2} \right) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left\{ \tanh \left(\frac{\sigma_c}{T_F} \frac{l}{2} \right) \right\} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$T_F = \frac{T_{FH}}{\sin \theta_0} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 $f(x)$ は膜の変形曲線の関数、 T_F は端部における接線方向の張力、 θ_0 は端部における流れに垂直な方向と膜の接線方向とのなす角である。

上記の各式に、現地測定した汚濁防止膜水平方向の変形形状パラメータ l_0 、 δ と測定係留索張力の水平成分 T_{FH} を代入することにより、最終的に σ_c が求められる。

次に、有効膜高 d については、図-5に示した座標系により膜面に対して垂直方向と法線方向の力の釣り合い式をたて $T_s/(\sigma_s - W_s)$ をパラメータとして整理すると、膜のふかれ形状が式(8)で表され、式(9)～式(11)が得られる。ただし、膜の自重 W_s は鉛直方向(z 方向)に対して常に一定であると仮定する。

$$\left(y - \frac{T_s}{\sigma_s - W_s} \right)^2 + z^2 = \left(\frac{T_s}{\sigma_s - W_s} \right)^2 \quad \cdots \cdots (8)$$

$$d = \frac{T_s}{\sigma_s - W_s} \sin \theta_0 \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\gamma = \frac{T_s}{\sigma_s - W_s} (1 - \cos \theta_0) \quad \cdots \cdots (10)$$

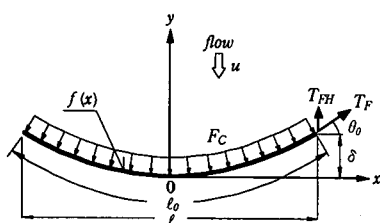


図-4 膜水平方向の座標と記号

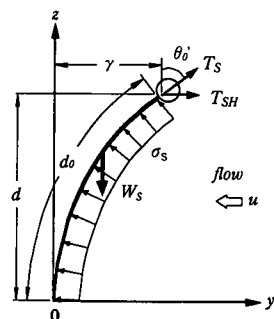


図-5 膜鉛直方向の座標と記号

$$d_0 = 2\pi \frac{T_s}{\sigma_s - W_s} \frac{\theta_0}{360} \quad \cdots \cdots (11)$$

ここに、 T_s はフロート部における膜面の接線方向の張力、 d_0 は膜高、 γ は膜下端の水平変位、 θ_0 はフロート部における鉛直方向と膜面の接線方向とのなす角、 σ_s は膜面に垂直に作用する流体力である。

汚濁防止膜のふかれ形状の測定結果に基づき式(8)を解くことにより得られるパラメータ $T_s/(\sigma_s - W_s)$ と現地観測した汚濁防止膜鉛直方向の変形形状パラメータ d_0 を式(9)～式(11)へ代入し、上記の各式を連立して解くことにより、最終的に d が求められる。

以上得られた抗力 σ_c と有効膜高 d を式(2)に代入することにより、 C_{df} が得られる。

他方、波に対する抗力係数 C_{dw} は、流れに対する抗力係数の算定方法における定常流速を微小振幅波理論に基づく最大水粒子速度に置き換えることにより、次式により与えられる。

$$C_{dw} = \frac{16 T_w \left\{ \frac{T}{\rho_w L} \sinh \left(\frac{2\pi h}{L} \right) \right\}^2}{\sinh \left(\frac{4\pi h}{L} \right) - \sinh \left(\frac{4\pi(h-d)}{L} \right) + \frac{4\pi d}{L}} \quad \cdots (12)$$

ここに、 H は波高、 h は水深、 L は波長、 T は波の周期、 T_w は単位幅あたりの変動張力(振幅)水平成分である。従来の膜に作用する波力算定においては H 、 L 、 T 、 T_w について有義値を用いている。本研究では、最大値、10分の1最大値についても併せて検討している。

4. 結果と考察

4.1 係留索張力に作用する静的張力と流速

先にも述べた通り、波・流れの共存場における汚濁防止膜の変形特性に対しては流れの影響が大きいものと考えられる。したがって、膜の抗力係数の算定に際しては、まず流速と膜に作用する流体力を明らかにする必要がある。そこで、静的張力水平成分 T_{FH} と流速 u との関係を図-6に示した。それによると、静的張力水平成分は流速が0.5 m/s程度までは流速に比例し、近似的に次式で与えられる。

$$T_{FH} = 12.4 u \quad \cdots \cdots (13)$$

波・流れ作用下の張力発達特性についての前野ら(1995a, 1995b)の研究によれば、流れによる静的張力の発達に伴い波による変動張力の発達割合が増すことが示されている。つまり、流れのない状態から緊張状態に至るまでの過程においては、汚濁防止膜が動揺することにより波力が吸収される。特に、小さな流れでは膜の動揺の余地が大きく波力が吸収され、流速の上昇による静的張力の増加に伴い膜がほぼ静止状態となり波力が発達する。しかしながら、静的張力の発達レベルがさらに高く

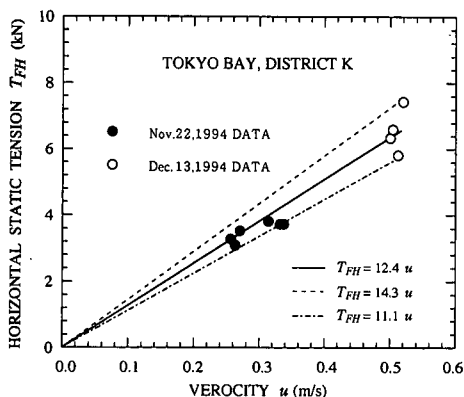


図-6 流速と静的張力水平成分との関係

なると係留索は緊張係留状態となり、波による変動張力の発達割合が低減すると考えられる。さらに、これらの傾向をより複雑にしているのは、膜のふかれの存在である。流速が一定以上に増加すると膜のふかれは海面にまで達し、もはやそれ以上流速が増加しても、静的張力の増加に反映するのはフロート部に作用する流圧力のみとなり、全体として、それ以上張力が増加しない限界流速の存在が示唆される。この点については、鶴谷ら(1993)も実験結果に基づき推論している。

4.2 流れによる汚濁防止膜の変形特性

汚濁防止膜の流れによる水平方向の変形形状は、曲線状でありスパン中央部で最大のたわみを示す。また、流れによる膜の鉛直方向の変形形状は、垂下型の場合、膜の下端の係留がなされていないことから、流れによって膜のふかれが生じる。変形形状の測定は水面より箱尺で行っているため、汚濁防止膜下端を把握することができない。したがって、有効膜高 d が得られないため、解析に際しては膜上部の変形形状の測定値と式(8)を用いて形状を予測し、 d を求めた。膜面に垂直方向の平均流速と膜の変形形状の一例を図-7に示す。これによると、鉛直方向の平均流速が 0.1 m/s 程度で有効膜高 d は膜高 d_0 の90%程度になることが確認される。また、水平方向の流れによるたわみは $\delta = 1.5 \text{ m}$ であった。今回の測定では、流速が一定以上に増加した後も、 δ の値は 1.5 m 以上にはならなかった。このことから、大きな流れが作用したとしても複数の汚濁防止膜と連結され、アンカーによって拘束されるため、 δ は一定値として取り扱えるものと考えられる。

4.3 垂下型汚濁防止膜の流れに対する抗力係数

東京湾 K 地区における暴浪下の係留索張力の測定に際しては、作業の安全上の問題から膜の変形形状の測定を行っていない。そこで、先に示した膜の水平方向の変形における最大たわみを $\delta = 1.5 \text{ m}$ と与えて抗力係数を

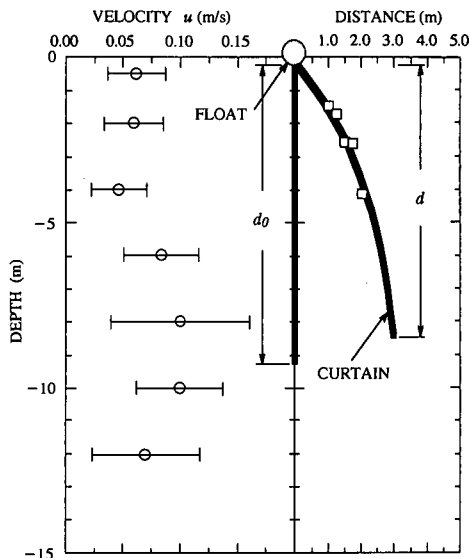


図-7 流れによる膜の変形形状

求めた。また、廿日市工事地区における膜の変形形状の測定に際しては係留索張力の測定を行っていない。そこで、式(13)の関係を用いて抗力係数を求めた。図-8はレイノルズ数 $Re(=u/\nu)$ と流れに対する抗力係数 C_d との関係を有効膜高 d を種々に変化させて示したものである。なお、図中の廿日市地区の計算結果の範囲は図-6に示されるように、流速 u を与えたときの測定静的張力の水平成分 T_{FH} のばらつきの最大値、最小値を用いたときの計算結果の範囲である。図-8に示されるように流れに対する抗力係数は、レイノルズ数の増大に伴って減少し、一定値に漸近する傾向が認められる。この傾向は従来静止物体の抗力係数の特性として得られているものと同様である。これは流速が大きくなると膜が流体力と釣り合うことによりある変形状態を保つことから静止物体として取り扱えることを示している。

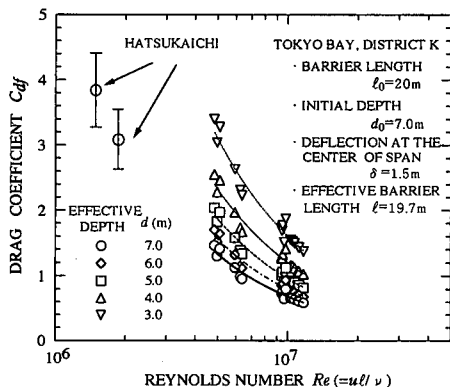


図-8 Re と C_d との関係

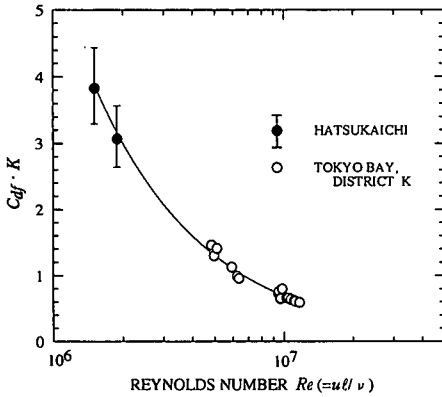


図-9 Re と $C_d \cdot K$ との関係

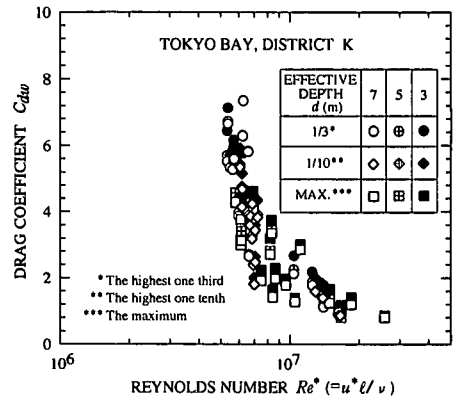


図-10 Re^* と C_{dw} との関係

汚濁防止膜のような外力に対してフレキシブルな構造物について、従来抗力係数の厳密な検討があまりなされていらない。その理由の一つとしては、流れによって膜がふかれることにより、流れの受圧面積の算定が複雑になることが挙げられる。そこで、有効膜高を膜高で除したパラメータ $K=d/d_0$ を導入すると、式(3)は次式のように表すことができる。

$$C_d \cdot K = \frac{2\sigma_c}{\rho_w u^2} \dots\dots\dots (14)$$

図-9にレイノルズ数 Re と $C_d \cdot K$ との関係を示した。この関係を用いることにより汚濁防止膜に作用する流体力を算定する際には、膜のふかれ高さを別途に考慮することなく抗力係数を与えることが可能となる。

4.4 垂下型汚濁防止膜の波に対する抗力係数

暴浪下での変動張力成分から波別解析と同様の方法で有義張力、10分の1最大張力、最大張力をそれぞれ求めた。これらの現地調査結果より、式(12)を用いて波による抗力係数 C_{dw} を求めた。図-10は最大水粒子速度 u^* を用いたレイノルズ数 $Re^*(=u^*l/\nu)$ と波に対する抗力係数 C_{dw} との関係を有効膜高 d を種々に変化させて示したものである。それによると、 Re^* が小さくなるにしたがって C_{dw} は急激に大きくなり、 Re^* が大きい場合には流れに対する抗力係数 C_d と同様の値(約1.0)を示すことが確かめられた。また、変動張力の最大値、10分の1最大値と有義値を用いて得られた各 C_{dw} の違いは認められない。さらに、 C_{dw} に対して膜のふかれによる影響はほとんど認められないことが分かる。

以上の結果から、波に対する抗力係数の値は Re^* によって変化し、有効膜高 d を考慮する必要はないことが確かめられた。

5. 結 論

暴浪時の波・流れ共存場の係留索張力と流速の現地観

測に基づけば、流れによる静的張力は流速の定数倍で示され、波による変動張力は流れの流速の影響を受ける。この結果と現地観測に基づいて得られた流れと膜の変形状の関係によって流れに対する膜構造物の抗力係数を求めた。この抗力係数は、流速の増加に伴い減少し、一定値に漸近する傾向を示し、激しい潮流下(流速0.5 m/s以上)において1.0程度であることが導かれた。さらに、波に対する膜構造物の抗力係数の傾向は、流れに対する抗力係数と同様に水粒子速度の増加に伴い減少し、1.0程度に漸近することが確かめられた。

以上のことから、膜の安定性が問題となる激しい流れと波の共存する場合には、抗力係数と同じ(1.0程度)と仮定することが可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 榎木 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.
- 榎木 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.
- 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.
- 鶴谷広一・惟住智昭・渡邊 弘(1991): 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 786-790.
- 鶴谷広一・渡邊 弘・岡岡大輔・工藤雅春(1994): 海中に設置された汚濁拡散防止膜の水理特性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第33巻, 第2号, pp. 87-113.
- 前野賀彦・高谷富也・村川 博・川本博文(1995a): 汚濁防止膜の重力式係留アンカーの応答特性, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 217-222.
- 前野賀彦・高谷富也・西野好生・安井章雄(1995b): 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, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 971-975.
- Milgram, J. H. (1971): Forces and motions of a flexible floating barrier, J. Hydraulics, Vol. 5, No. 2, pp. 41-51.