

外洋型オイルフェンスにおける衝撃展張力の発生限界

Critical Condition of the Occurrence of Impulsive Tension in Offshore Oil Booms

安成模*・ 樫木 亨**・ 青木伸一***

Sung Mo. AHN, Toru. SAWARAGI, Shin-ichi. AOKI

A series of model test is carried out to investigate the critical condition of the occurrence of impulsive tension in offshore oil booms moored slack in waves and current. The critical condition, at which the maximum tension suddenly increases with control parameters changing, is discussed in terms of representative dimensionless parameters such as gap ratio or Froude number. A numerical model is proposed for predicting the critical condition and compared with the experiments.

Keywords: impulsive forces, offshore type booms

1. はじめに

近年、世界的に地球環境保全が叫ばれる中、最近大規模なタンカーの衝突あるいは座標事故が世界各地で生じ、流出油による環境汚染が深刻な問題となっている。流出油の回収を効率よく行えるか否かは流出の初期段階に如何に迅速に対応し、油の拡散を防止できるかにかかっている。しかしながら、流出事故が発生するような荒天時にオイルフェンスを展開して拡散を防止し、速やかに回収を行うことは容易ではなく、高度な技術が要求される。特に、高波浪時の展張及び曳航に対して十分な強度と滞油性能を有するオイルフェンスの開発とその展張技術の向上は最重要課題である。荒天時に外洋に流出した油の回収技術の向上のためには、高波浪時に外洋において展張あるいは曳航されるオイルフェンスに作用する流体力とそれによってフェンスに発生する部材力を予測する手法を確立することが望まれる。オイルフェンスのような膜面を有するフレキシブルな浮遊式構造物が剛な構造物と異なる点は、外力の作用によって構造物が変異するだけでなく、構造物の形状そのものが変わることである。この変形特性を無視して設計を行うことは、多くの場合過大設計となるが、フェンスが弛緩状態から緊張状態に移移する際に衝撃に大きな張力が発生する現象などはフレキシブルな構造物に特有のものである。

本研究は高波浪時に外洋において展張あるいは曳航されるオイルフェンスに発生する部材力を予測する手法の確立を達成するための基礎的な研究として、外洋型オイルフェンスに発生する衝撃展張力とその発生限界についての検討を行ったものである。

2. 水理模型実験

実験に使用した水槽は図-1に示したような長さ30m、幅0.7m、深さ1mの油圧駆動式造波機を有する2次元造波水槽で、揚水ポンプとサイフォンの組み合わせによる循環装置により定常流を起こすことができる。また、模型膜体の設置は図-2に示すように上部・下部ともに展張ケーブルを配したものを対象とし、両端が係留されているタイプ（現地において係留設置、あるいは曳航される場合に対応）のものであり模型膜体の上下展張ケーブルにはそれぞれリングゲージを介して水路両側に取り付けてある。この模型膜体は大きく分けて剛性が大きいものと剛性が小さいもの（剛性が大きい方はフェンス型に、剛性が小さい方はカーテン型に対応）の二つの形態であり、剛性が大きい方は膜長を3種類変え、に剛性が小さい方は膜長、フロートの径、及び膜の深さをそれぞれ変えた7種類に対して行ったが、その詳細は表-1に示す。また、展張ケーブルとしては鋼ワイヤーとナイロン糸を用いた。表-2には実験で作用させた定常流及び波浪の諸元を示す。

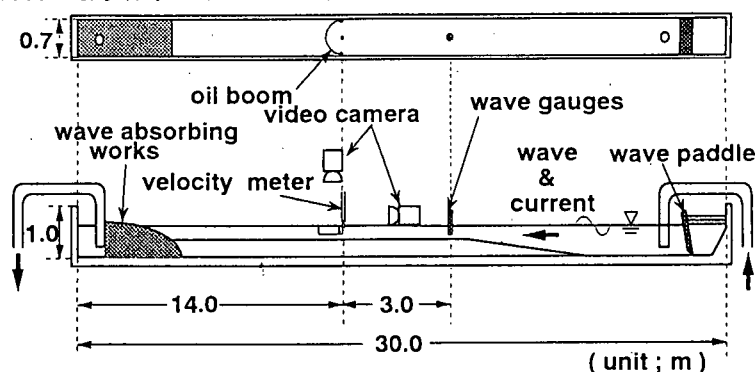
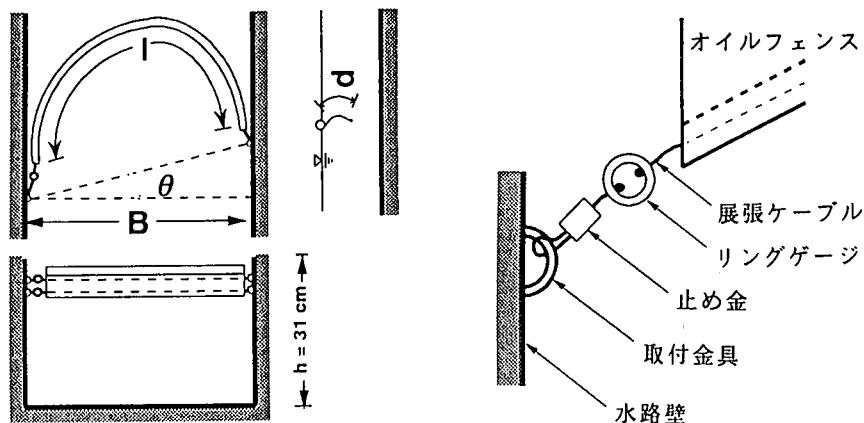


図-1 実験水槽

* 正会員 鳴尾研究所 東洋建設(株) 総合研究所(〒663 西宮市鳴尾浜三丁目十七番六号)

** 正会員 大阪産業大学 工学部 土木工学科

*** 正会員 豊橋技術科学大学建設工学科



図－２ 模型膜体

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
膜の深さ (d)	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	3cm	1.5cm	3cm
膜張 (l)	81cm	108cm	180 cm	90cm	108cm	138cm	90cm	108cm	138cm	138cm
フロートの径 (ϕ_f)	2cm	2cm	2cm	2cm	2cm	2cm	1cm	1cm	1.5cm	3cm
展張幅 (B)	68cm			68cm						
カーテンの厚さ (t_c)	0.29mm			0.09mm						
カーテンのヤング率 (E_c)	45.9kgf / mm ²			25.3kgf / mm ²						

３．衝撃展張力の定義及び発生限界

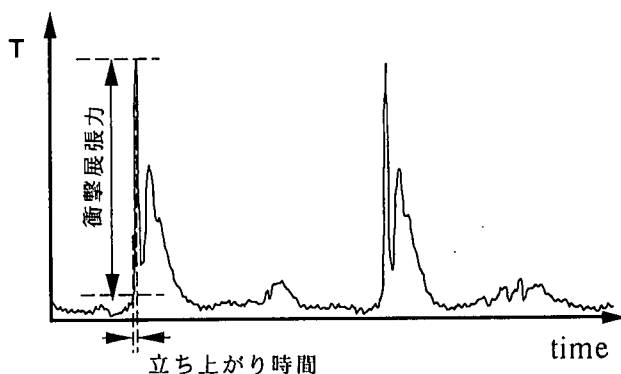
表－１ 膜の諸元

３－１．衝撃展張力の定義

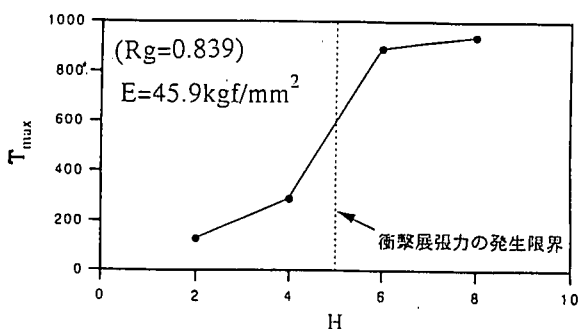
樫木ら（１９９２）は図－３に示すように、短い立ち上がり時間に展張力の時系列の傾きが急に鋭くなる展張力を衝撃展張力として定義し、衝撃展張力の値は傾きが急に鋭くなる地点からピークまでの値としている。しかしながら、本研究で対象としている荒天時、及び曳航に対応する外洋型オイルフェンスは流れ、または曳航の影響によって最初からある程度緊張している状態である。そこで、波によって弛緩、または緊張を繰り返すので、フェンスが緊張するときの展張力の時系列はほとんどのケースで既往の研究で定義した衝撃展張力の形態である傾きが急に鋭くなる時系列を示す。しかしながら、このような形態をもっていても展張力の値が極めて小さいケースを衝撃展張力として取り扱うのは適切ではない。そこで、本研究ではオイルフェンスに発生する展張力の大きさに着目して、衝撃展張力を定義する。図－４は実験からえられた波高の変化による展張力の大きさを示したものである。この図からオイルフェンスに発生する展張力は波高の増加によって増加傾向を示すが、ある波高になると展張力の値が急激に大きくなることからわかる。したがって、本研究では荒天時、または曳航に対応する外洋型オイルフェンスに発生する衝撃展張力を次のように定義する。すなわち外洋型オイルフェンスに生じる展張力の中で張力が０に近くなる状態が一周期間で発生する場合の展張力を緊張時に生じる展張力と定義し、その緊張時に生じる展張力の中で張力の最大値が図－４に示すような極端に大きい展張力を衝撃展張力と定義する。そこで、衝撃展張力の発生限界を明らかにすることは重要な課題である。

水深 (h)	30cm			
波高 (H)	2cm	4cm	6cm	8cm
周期 (T)	1.2sec		1.8sec	
入射角 (θ)	0°		15°	
			30°	

表－２ 波浪諸元



図－３ 衝撃展張力の定義



図－４ T_{max} と H の関係

3-2. 衝撃展張力の発生限界

図-5、図-6は各々フルード数を横軸に、H/hを縦軸にとって、剛性が大きい場合と小さい場合の実験から得られた展張力の最大値を数字で示したものの一例である。この図から展張力の値を見ると、一定のフルード数でH/hの増加によって、急激に大きい値を示す領域が確認できる。この展張力が極端に大きくなる境界を各フルード数ごとに結ぶと、図-5の中の点線のような推定線を描くことができる。この線の意味は、3-1で定義した外洋型衝撃展張力の定義によって点線の上の部分は衝撃展張力が発生する領域で、また下の部分は衝撃展張力の生じない領域を示すことになる。

スカート部の剛性が大きい場合は（図-6）H/hの増加によって、展張力の値が極端に大きくなる限界をさがすのは容易ではない。剛性が大きい場合の展張力の最大値はH/hの増加に伴い比例して増加する。また、その展張力の最大値も剛性が小さい場合と比べると大きい値を示す。したがって、剛性が大きいケースは剛性が小さいケースに比して衝撃展張力が生じやすく、H/hの小さい領域でも常に発生していると思われる。図-7はスカート部の剛性が小さいケースで、フルード数を横軸に、H/hを縦軸にとってフルード数、また各々H/h及びRgの影響を示したものの一例である。この図からフルード数の増加によって衝撃展張力が発生するH/hの値が減少する傾向がわかる。特に、h/Lの値が0.169と0.104の場合は全く同じ傾向を示すこと、またRgの値が大きくなるに従い衝撃展張力の発生するH/hの値が小さくなること

4. 発生限界モデル

4-1. モデルの概要

(1) 膜体の初期形状

前述したように膜体構造物は、外力の作用によって構造物が変異するだけでなく構造物の形状そのものも変わる。そこで、膜体の初期形状を求めることが必要となるが、この初期形状は力に釣り合いによって求めることができる。このとき次のような仮定を設定する。

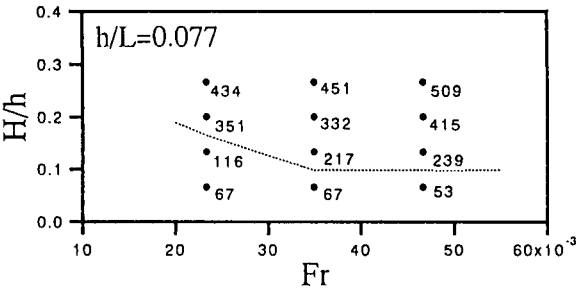
- 図-8のような、X-Y平面を決定する。
- 流れはY軸に平行に存在する。
- 展張ケーブルには、直応力 F_c （単位幅当たりの力）が作用し展張ケーブルにかかる張力はいたるところで一定。
- F_c はフェンスのスカート部に垂直方向の流速成分 $U \cdot \cos \theta$ によって決定され次式で与えられる。

$$F_c = \sigma_c \cdot \cos^2 \theta \dots \dots \dots (1)$$

ケーブルの描く曲線の関数を $y = f(x)$ ($-B/2 \leq x \leq B/2$) とすると、ケーブルの微小部分についての法線方向の釣り合いから次式が得られる。

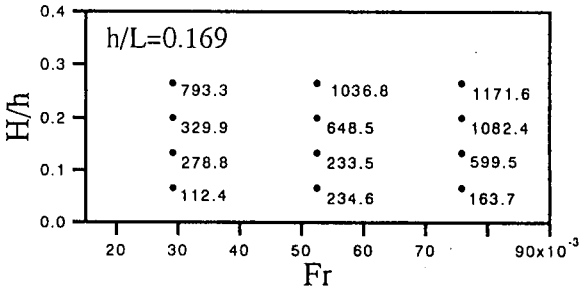
$$F_c = T_c \frac{f''(x)}{\{1 + f'(x)^2\}^{3/2}} \dots \dots \dots (2)$$

式(1)を $y = f(x)$ と膜中央部の F_c は σ_c を用いて、



$$R_g=0.63 \quad E=25.3\text{kgf/mm}^2$$

図-5 衝撃展張力の発生限界



$$R_g=0.839 \quad E=45.9\text{kgf/mm}^2$$

図-6 衝撃展張力の発生限界

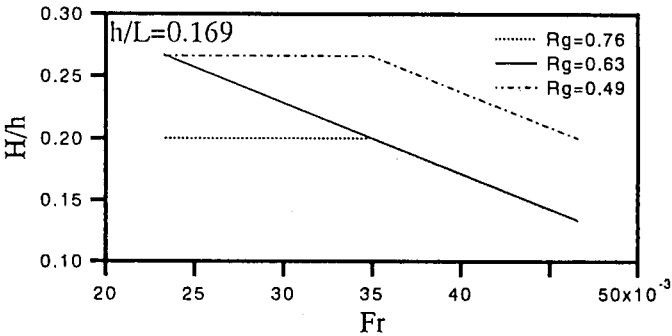


図-7 衝撃展張力の発生限界

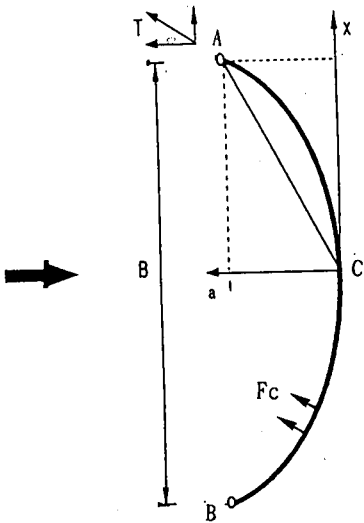


図-8 膜体の初期形状

$$F_c = \frac{\sigma_c}{1 + \{f'(x)^2\}^{1/2}} = \sigma_c \cdot \cos^2 \theta \quad \dots \dots \dots (3)$$

である。式(3)を(2)に代入すると、次のような微分方程式が得られる。

$$T_c f''(x) - \sigma_c \{1 + f'(x)^2\}^{1/2} = 0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

これを $f(0) = f'(0) = 0$ という条件下で解くと、次のようになる。

$$f(x) = \frac{T_c}{\sigma_c} \left(\cosh \frac{\sigma_c}{T_c} x - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、膜体の形状を決めるために張力を決定することが必要となるので、ケーブル長が l という条件を式(6)に用いる。

$$l = \int_{-B/2}^{B/2} \sqrt{1 + \{f'(x)\}^2} dx = \frac{2T_c}{\sigma_c} \sinh \frac{\sigma_c B}{2T_c} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$\tau_c = T_c / (\sigma_c \cdot l)$, $R_{gc} = B/l$ とおくと式(7)は次のように表せる。

$$\tau_c \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} = \frac{1}{2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

初期形状を決めるためには、まず式(7)より R_{gc} を与えることによって τ_c を求める。ここでは、その τ_c から張力 T_c を決定して、膜体の初期形状となる式(5)を決定することができる。

(2) 膜体の動き

膜体は、波流れの共存所に設置されていて、波と流れの影響を受けて弛緩と緊張を繰り返して動いている。このような膜体の動きを、次のよう仮定を設けて計算を行う。

波浪が流れの正の方向に運動するとき膜体は緊張していて、変形せずに一定形状を保っているとする。また、負の方向に運動し始めると、弛緩し流体の運動に追随して動くとする。そして、膜体上の各点は他の点に関係なく独立に運動し、膜体の運動は水平方向のみ考慮する。また、係留点付近の膜体は水粒子への追随性が悪いが、逆に膜体中央方向付近では、ほぼ水粒子に完全に追随しているとする。つまり、膜体の運動は水粒子の移動距離に追随すると仮定する。すなわち、膜体の微小時間 δt 秒後の変位を水粒子の運動速度に微小時間 δt を掛けたものとし、さらにそれに水粒子への追随の程度を表す係数を掛けた値とすることで、膜体の水粒子への追随性を考慮する。

ここで、水粒子への追随の程度を表す係数として上述の仮定を定式化するため図-8のように係留点A or Bと、膜体の中央の点Cを直線ACで結び、係数を次のように決定する。

$$a = 1 - x/B \quad \dots \dots \dots (8)$$

波流れ共存場において、流体の運動速度は定常流の流速 U と波浪の水粒子速度 u の和として考えられる。

波形は正弦波を考えると、

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad \dots \dots \dots (9)$$

このとき、波浪の水粒子速度(水平成分) u は

$$u = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。

ここで、角周波数 k は $\sigma^2 = g k \tanh kh$ から求めた値を用いる。

以上の条件下で膜体を等間隔で分割し、それぞれの時間ステップごとの膜上の点を直線で結び、膜の形状の変化を調べる。

(3) 衝撃展張力の発生条件

前述したように、外洋型オイルフェンスに発生する展張力は”展張力”，”緊張時に生じる展張力”，”衝撃展張力”の3通りに分類できると定義した。従って、

①緊張時に生じる展張力の発生条件

緊張時に生じる展張力は”1周期の間に張力が0に近くなる状態が発生する場合の展張力”であるから、張力が0になる膜体が弛緩する状態を条件とする。すなわち、膜長が最初の長さより小さくなると弛緩したものと

②衝撃展張力の発生条件

衝撃展張力は膜体が緊張した瞬間に発生することから、その瞬間における膜体の速度が衝撃展張力に大きな影響を与えているとみなすことができる。したがって、①の条件を満足した、膜体が弛緩されたものの中で再び緊張状態になるとき、すなわち膜の長さがもとの長さより大きくなる瞬間における膜中央部分の移動速度調べる。移動速度が大きい場合は展張力も大きく、逆も成り立つと考えられる。したがって、移動速度が極端に大きくなる条件を衝撃展張力の発生条件とする。

5. 実験結果との比較

図-9、10は実験結果と計算結果を重ね合わせたものである。図の中で破線は①の緊張時に生じる展張力の発生限界を表している。つまり、波線より上側の領域では弛緩状態が存在し緊張時生じる展張力が発生する領域である。この条件では、波長や R_g の影響をほとんどうけず、発生限界はすべてのケースでなめらかに右上がりの直線的な状態を呈している。これはフルード数が大きくなるほど、つまり流れの効果が強くなるほど波の効果が打ち消され弛緩しなくなると考えられる。

図中で実線は②の衝撃展張力の発生限界を示している。また、黒点の左下に添えてある小さい数字が膜体が緊張する瞬間の膜中央部の移動速度である。この実線も同じく、実線の上側は衝撃展張力が生じる領域を示す。計算値は波長、 R_g による変化は見られず、すべてのケースでフルード数の増加によって衝撃展張力が発生する H/h の値が増加する傾向が見られる。しかしながら、図中で点線で示した衝撃展張力の発生限界の実験値は図-7で示した発生限界であって計算結果とは逆の傾向を示している場合もある。これは、本モデルは膜の中央付近では膜が完全に水粒子に追随しているとみなしており、水粒子の動きで判断しているが、現実には膜体の材料や剛性などの影響によりこの仮定が完全なものではないことを示していると考えられる。すなわち、膜体の材料及び剛性の効果を発生限界にとり入れなければならないことを示している。

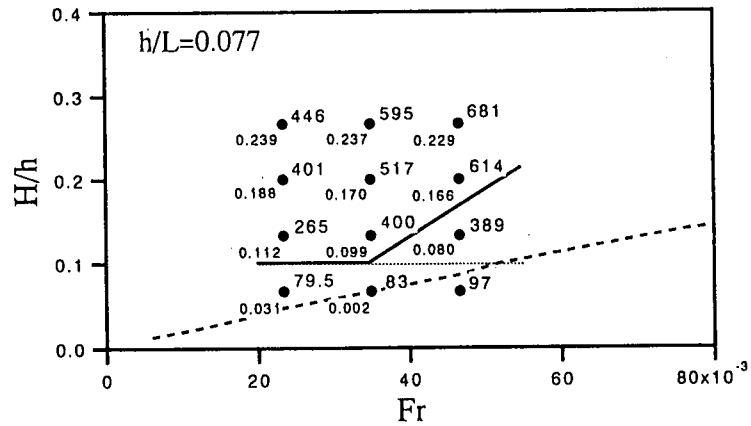


図-9 実験結果との比較

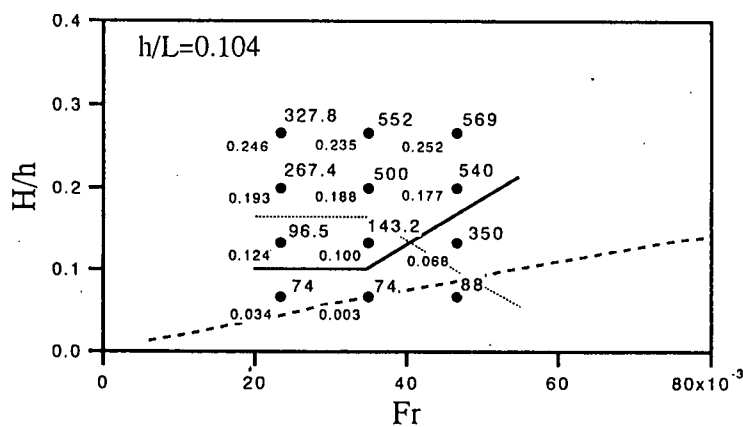


図-10 実験結果との比較

6. まとめ

本研究では、水理模型実験と簡単な幾何学的モデルを用いて外洋型オイルフェンスに発生する衝撃展張力の発生限界について検討を行った。得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) スカート部の剛性が小さい場合（カーテン型に対応）は、フルード数が 0.023-0.047 の範囲ではフルード数の増加によって衝撃展張力が発生する波高は減少する傾向がある。また、膜長が長くなるに従い衝撃展張力の発生する波高の値が減少する。すなわち、衝撃展張力の発生限界には流速と膜長が影響を及ぼす。
- (2) スカート部の剛性が大きい場合（フェンス型に対応）は、剛性が小さい場合に比べて衝撃展張力が発生しやすく、衝撃展張力の発生限界はオイルフェンスの材質が大きく影響を及ぼす。

以上、本研究では大胆な仮定に基づき衝撃展張力モデルを構築し、実験値と比較したが、図-10に見られるように実験結果を十分に説明できるモデル構築とはいえない。この原因を単にオイルフェンスの材質の差異にもとづくかどうかとも明らかでなく、今後上述の仮定の検証もあわせて行うべきであろう。

参考文献

- Milgram, J. H. (1971): Forces and motions of a flexible floating barrier, J. Hydraulics, Vol. 5, No. 2, pp. 41-51.
- Sawaragi, T., Aoki, S., and Liu, H. (1992): Wave-induced impulsive forces in tension cables of a floating silt curtain, Proc. Offshore and Polar Eng. Conf. pp. 339-346.
- 安成模・榎木亨・青木伸一・萬藤満：波流れ共存場に設置されたオイルフェンスに発生する衝撃展張力及びフェンスの挙動，海岸工学論文集，pp. 921-925. 1993.