

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

安 成 模*・樫 木 亨**・青 木 伸 一***・萬 藤 満****

1. ま え が き

近年タンカーの座礁による油の流出事故が続出し、地球的な規模での海洋汚染が問題になっている。このような外洋に流出した油の拡散を防止し、同時に回収効率を向上させるために用いられるオイルフェンスの設計法についてはこれまで十分な検討が行われていなかった。

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浮体と異なる点は、外力的作用によって構造物が変位するだけでなく、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、多くの場合過大な設計となるが、フェンスが弛緩状態から緊張状態に遷移する際に衝撃的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なものである。オイルフェンスに及ぼす流体力とフェンスの変形に関する理論的研究は、これまでMilgram (1971)など数例あるが、これらはいずれも流れや曳航によって生じたつりあい位置からの微小変形に対するもので、弛緩状態と緊張状態とを繰り返すような状況に対するものではない。

本研究は、オイルフェンスが波流れ共存場に展張される場合、あるいは波浪中を曳船される場合を想定し、クリティカルな設計条件を与えらると思われる緊張時の衝撃展張力の予測モデルを構築・検討するとともに、滞油性能の重要な要素となる、フェンスの波運動との相対的な動揺の特性について実験的に検討するものである。

2. 水理模型実験

実験に使用した造波水槽は、長さ30 m、幅0.7 m、高さ1 mの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。本研究で対象とするオイルフェンスは、図-1に示すようにフェンスの上・下部ともに展張ケーブルを配し、両端が水路側壁に固定されているものであり、上・下展張ケーブルにはそれぞれ張力測定用にリングゲージ

が取り付けられてある。リングゲージは、直径2 cmのアルミニウム製のリングに2枚のひずみゲージを貼ったものである。

実験に用いたフェンスは表-1に示すように、展張幅 $B/\cos \theta$ 及び膜長 l をそれぞれ3通り変化させ、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。また張力測定と同時に鉛直上方と水平方向からフェンス

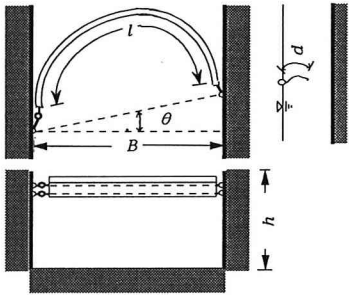


図-1 模型オイルフェンスの設置状況

表-1 模型オイルフェンスの諸元

膜の深さ (d)	3 cm		
膜長 (l)	81 cm	108 cm	180 cm
展張幅 ($B/\cos \theta$)	68.0 cm	70.4 cm	78.5 cm
フロートの径 (ϕ_f)	2 cm (発泡スチロール)		
カーテンの厚さ (t_c)	0.29 mm		
カーテンのヤング率 (E_c)	45.9 kgf/mm ²		
鋼ワイヤーの径 (ϕ_w)	0.37 mm		
鋼ワイヤーのヤング率 (E_w)	21×10^{10} N/m ²		
ナイロン糸の径 (ϕ_N)	0.52 mm		
ナイロン糸のヤング率 (E_N)	0.2×10^{10} N/m ²		

表-2 流れおよび波浪の諸元

水深 (h)	30 cm			
定常流の流速 (U)	5 cm/sec	9 cm/sec	13 cm/sec	
波高 (H)	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm
周期 (T)	1.2 sec	1.8 sec	2.4 sec	
入射角 (θ)	0°	15°	30°	

* 学生員 工修 大阪大学 工学部 土木工学科
** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部 土木工学科
*** 正会員 工博 大阪大学助手 工学部 土木工学科
**** 正会員 工修 香川県 土木部

全景を2台のビデオカメラで同時撮影することによりフェンスの動揺・変形量を測定した。

3. 展張力の特性

波と流れの作用を受けているフェンスは緊張状態と弛緩状態を繰り返しており、弛緩状態にあるときには展張力は0に近い値を示しているが、フェンスが緊張する瞬間に張力は急激な立ち上がりを見せる。図-2は同じ外力条件での、鋼ワイヤーとナイロン糸の場合の展張力の時系列を示したものである。これよりいずれの場合も衝撃的な張力を見ているが、剛性の大きい鋼ワイヤーの方がナイロン糸より展張力が大きく、またピークまでの立ち上がり時間もナイロン糸に比べて小さい。このような衝撃的に発生する張力をここでは衝撃展張力と呼ぶ。実験ケースによっては、このような衝撃的な張力を見さない場合もみられたが、ここでは張力の代表値 T として、測定された張力の時系列のうちの最大値を採用した。また、以下では展張力の代表値 T を定常流の流速 U を用いて式(1)のように無次元化した無次元展張力 C_T に対する種々の無次元パラメータの影響を考察する。

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_w U^2 B d} \dots\dots\dots (1)$$

ここに ρ_w は水の密度である。

図-3および図-4は、鋼ワイヤーのケースについて、 C_T に対する B/l の影響を異なる h/L 及び H/L についてみたものであるが、 C_T は B/l の増加に伴い明らかに増大傾向を示している。また、波形勾配 H/L と C_T はほぼ比例関係にあるが、 h/L についてはほとんど差がみら

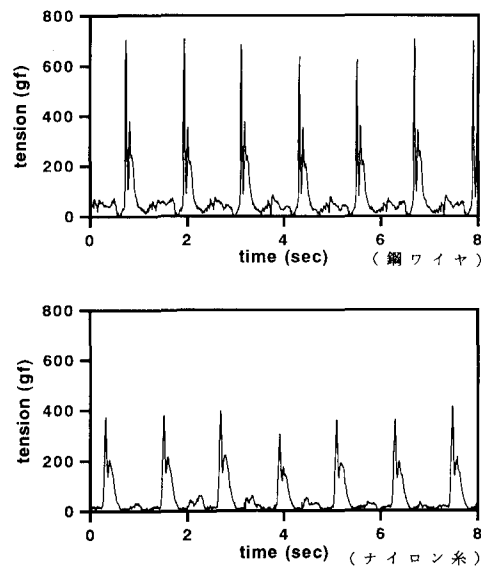


図-2 展張力の時系列

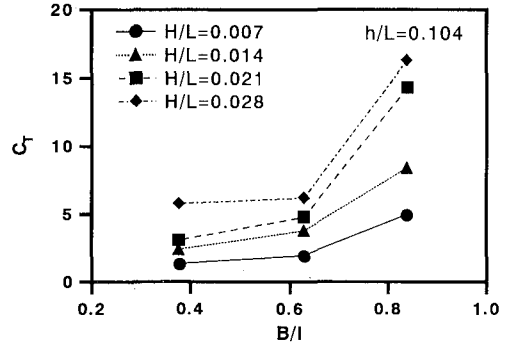


図-3 C_T と B/l の関係(鋼ワイヤー, $U=9$ cm/sec, $\theta=0^\circ$)

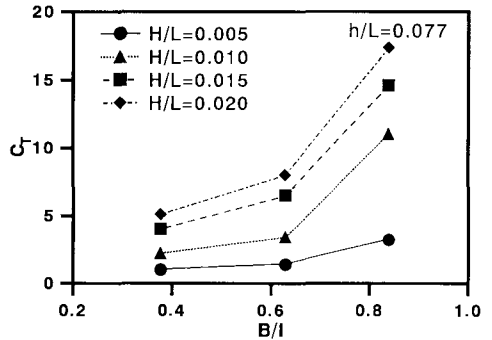


図-4 C_T と B/l の関係(鋼ワイヤー, $U=9$ cm/sec, $\theta=0^\circ$)

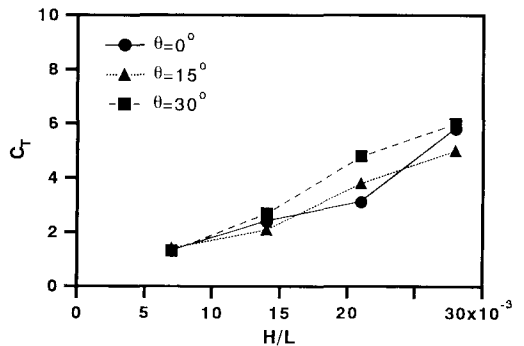


図-5 C_T と H/L の関係(鋼ワイヤー, $U=9$ cm/sec, $l=180$ cm)

れない。図-5は波流れの入射角 θ が異なるケースについて、 H/L の影響を示したものであるが、 θ については有意な差異は確認できない。

4. 衝撃展張力の予測モデル

一様流中でフェンスが緊張する場合、緊張する瞬間に流れは急激に変化し、流れの運動量が短時間に変化する。したがって、衝撃的な流体力はその反作用として発生すると考えることができる。さらに流れとともに移動する

座標系からみれば、この現象は、フェンスが緊張した瞬間から、静止流体中をフェンスが流れと反対方向に急激に運動し始めるようにみえる。つまり、一様流中でフェンスが緊張するときにフェンスに働く流体力は、同じフェンスが静止流体中で加速度運動するときを受ける流体力と同じである。したがってフェンスの運動加速度すなわち、流体が減速される加速度がわかれば、付加質量理論を用いて、フェンス断面に発生する衝撃流体力を見積ることが出来る。このような考えに基づき本研究で提案するモデルは、衝撃展張力をフェンスが流れの運動量を急変させることによって発生する力であるとみなし、その大きさを決定づける運動量の時間変化を、ケーブルまたは、フェンススカート部の弾力的な変形に求めるものである。つまり、展張力は、流体力とフェンスの弾性変形の釣合から求めることができるとするものである。

(1) モデル A

スカート部の伸び剛性がケーブルのそれよりも大きい場合には、スカート部の伸び変形が無視できると考えられる。図-6 は流体中にあるフェンスを示している。いま、 $y-z$ 平面に平行な 2 次元断面を考え、スカート部が変形せずに水平方向に運動すると仮定する。フェンスが緊張した瞬間を $t=0$ とし、微小な時間 Δt 内にこのフェンスの中央部が y 方向に δ だけ変位したとする。この変位の加速度が一定とみなされる程度に Δt を十分小さくとれば、 δ を仮定することによりフェンス中央断面の加速度が次のように決定される。

$$\frac{du}{dt} = \frac{2(\delta - U_0 \cdot \Delta t)}{\Delta t^2} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 U_0 は $t=0$ でのフェンスの運動速度であり、波流れ共存場では波および流れの流速の和に等しいとして与えている。この運動にともなうフェンス中央断面に作用する流体力 σ_c は、平板の付加質量 M (樫木ら, 1991) を用いて次式のように表すことができる。

$$\sigma_c = M \frac{du}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

このような流体力が流れと平行なフェンスの各断面に作用し、その総和としてケーブルに発生する張力が決定される。この張力によるケーブルの弾性変形によって、フェンス中央部が δ' だけ変位したとする。この移動量 δ' は先に仮定した移動量 δ と一致しなければならないので、もし $\delta' \neq \delta$ であるなら変位量 δ を仮定しなおして計算を繰り返し、 $\delta' \approx \delta$ となればこのときの伸び及び張力を採用して次のステップに進む。このようにして順次 Δt をとってフェンスが変位しなくなるまで計算を続ける。従って、流体力は Δt 時間内のフェンスの変位量によって決まり、逆にフェンスの変位量は加速度から決まる流体力によって決定されるため、展張力は両者のつりあい

関係を解くことによって求めていることになる。

図-7 は実験を行った展張力を縦軸にとり、それに対応するモデル A の計算値を横軸にとって比較したものである。なおこの図は、モデル A が適用できるケースとしてケーブルがナイロン糸であるケースを採用している。この図より、やや実験値の方が大きい値を示しているが、計算値は実験値をほぼ予測していることがわかる。また、図-8 は式 (4) で与えられる無次元展張力 C_F^* のフルード数に対する影響を計算値と実験値とを比較して示したものである。

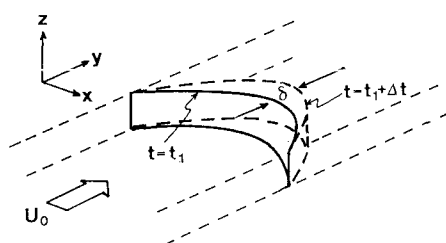


図-6 フェンスの変形

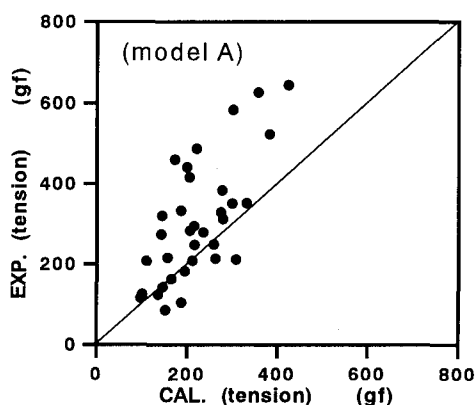


図-7 展張力の実験値と計算値の比較 (ナイロン糸)

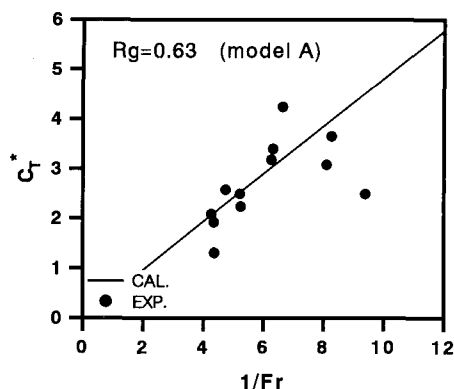


図-8 C_F^* に及ぼす F_r の影響

$$C_T^* = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_w u^2 B d} \dots\dots\dots (4)$$

ここに C_T^* は平均流速を用いて無次元化した式 (1) の C_T とは異なり、波動運動を含めた水粒子速度の最大値 u を用いて無次元化している。計算結果は、 C_T^* がフルード数 $Fr = u/\sqrt{gh}$ の逆数に比例するという実験結果をよく説明している。したがって、本モデルはナイロン糸を用いた場合の実験値を定性的・定量的に説明していることが分かる。

(2) モデル B

ケーブルの伸び剛性がスカート部のそれより十分大きい場合にはケーブルの伸び変形が無視できると考えられ、スカート部の弾性変形から衝撃展張力を求めることができる。計算手順はモデル A と同様であるがモデル A ではケーブルの変位を仮定して計算を進めるのに対し、モデル B ではスカート部の弾性変形量を仮定して計算を進める点が異なっている。付加質量の計算法等、計算モデルの詳細は榎木ら (1991) および Sawaragi et al. (1992) と同様であるが、今回は斜め入射の場合にも適用できるように拡張している。

図-9 は鋼ワイヤを用いた実験で得られた展張力を縦軸にとり、それに対応するモデル B の計算値を横軸にとって比較したものである。計算値は実験値を大きく上回っており、モデル B を鋼ワイヤーのケースに適用することはできないことが分かる。この原因としては、今回使用したモデルフェンスのスカート部の剛性が高く、スカートの伸び変形よりもフェンスの幾何学的な変形によって運動量変化が支配されたためではないかと考えられる。

5. フェンスの追従性の検討

(1) 追従性を表すパラメター

波浪中でオイルフェンスが運動する場合、その滞油性

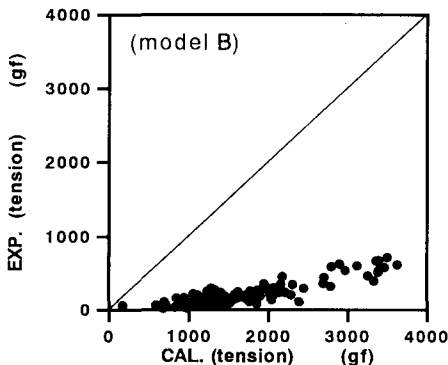


図-9 展張力の実験値と計算値の比較 (鋼ワイヤー)

能に直接影響を及ぼすのが、鉛直方向でのフェンスの水粒子への追従性である。すなわち、水位変動およびフェンスの Heave 運動が正弦的であると仮定するならば、両者の振幅及び、その位相がほぼ等しくなると追従性が高いといえる。本研究では Heave に関するこの追従性を表現する無次元パラメターとして $\Psi_\eta = (|\Psi_3 - \eta|/\eta)$ を導入する。ここに、 Ψ_3 は Heave 運動、 η は水位変動の複素振幅である。また、滞油性能に大きな影響を及ぼさう一つの要因は水平方向でのフェンスと水粒子との相対速度であろう。そこで、Sway 運動に関しては $\Psi_u = (|\Psi_2 - u_2|/u_2)$ を導入して検討する。ここに Ψ_2 は Sway の運動速度の、 u_2 は水粒子速度のフェンス断面の Sway 方向成分の複素振幅である。この場合、水粒子速度は実験結果から得られた流速をフェンスの展張位置における水面の水粒子速度に換算したものである。したがって、 Ψ_η 及び Ψ_u が 0 に近いほど追従性がよいと判定できる。

(2) 鉛直方向の追従性

図-10 及び図-11 は横軸にフェンス端部からフェンスに沿って測った長さ s をフェンス長さ l で除した値 s/l を、縦軸に Heave 運動に伴うフェンスの水粒子への追従性を表すパラメター Ψ_η をとったものである。図-10 には波高 H と周期 T の異なるケースに対する Ψ_η の変化をプロットしてある。まず、 $H=4$ cm のケースの追従性は $H=6$ cm のケースのそれに比べ、フェンスの至るところで良いことがわかる。また、 T の大きい方が追従性が良くなっている。図-11 は定常流の流速 U の影響を示したものである。 U が大きい方が s/l の全域において追従性がよくなっている。この他フェンス長さ l の影響については、 l が大きいほど良い追従性を示した。

(3) 水平方向の追従性

図-12 及び図-13 は水平方向の追従性を明らかにするために横軸に s/l を、縦軸に Sway 運動に伴うフェンスの水粒子への追従性を表すパラメター Ψ_u をとったも

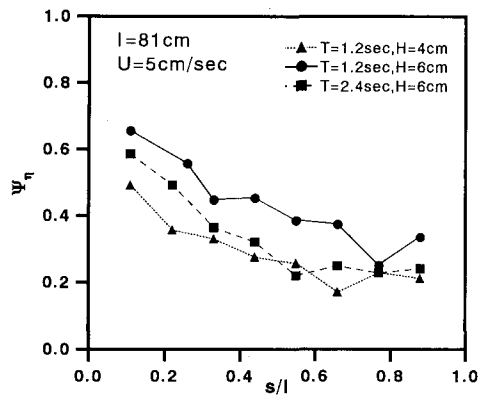


図-10 鉛直方向の追従性 (周期と波高の影響)

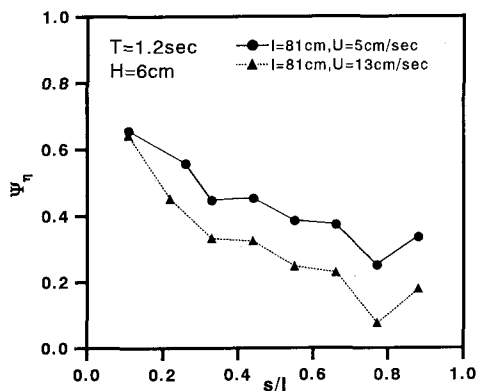


図-11 鉛直方向の追従性（流速の影響）

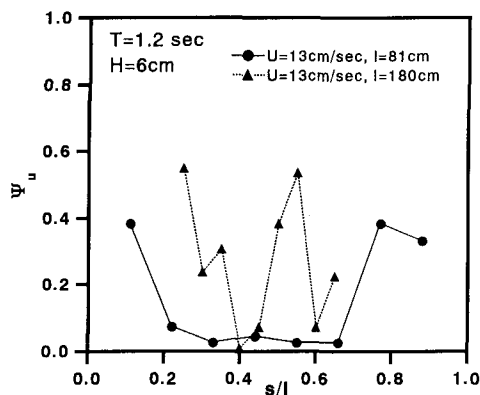


図-13 水平方向の追従性（フェンス長の影響）

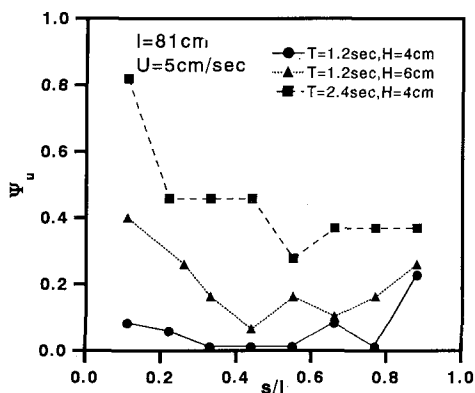


図-12 水平方向の追従性（周期と波高の影響）

のである。図-12は波高 H と周期 T の影響を示したものであるが、 $H=4$ cmのケースは $H=6$ cmのケースに比べフェンスの至るところで追従性がよいが、Heaveの結果とは逆に T が小さい方が追従性が向上していることが分かる。図-13はフェンス長さ l の影響を示したものであるが、フェンス長さ l が大きいほど追従性が悪くなっていることが分かる。このように水平方向の追従性が鉛直方向の追従性と反対の傾向を示すのは、周期が小さくかつフェンスが短い場合ほど、フェンスが剛体的に水平運動するのに対し、これらの値が大きくなると、剛体運動に比べてフェンスの水平面での変形が大きくなり、これにともなうSwayの追従性が低下するものと考えられる。

6. あとがき

(1) 波形勾配が大きく開口比が大きくなると展張力は増大する。また、衝撃展張力はフェンスの材質の影響

を大きく受ける。

(2) 衝撃展張力の予測モデルAはケーブルがナイロン糸の場合には適用可能である。ケーブルに鋼ワイヤを用いた場合は今回提案した予測モデルは適用できない。

(3) オイルフェンスの鉛直方向の追従性は定常流の流速、フェンス長、周期が大きいくほど、また波高が小さい方が追従性がよくなる。水平方向の追従性は鉛直方向の追従性とは逆に周期と膜長が大きいく方が悪く、鉛直及び水平方向の追従性は必ずしも同一の傾向を示さないことが分かった。

以上、従来著者らが行ってきた膜体構造物の研究結果をオイルフェンスに適用し、その精度を実験的に検証したが、フェンスの材質によってはモデルの適用が困難な場合があることが判明した。また、オイルフェンスの追従性について従来これに着目した研究は少なく、今後その理論的解明は残された課題である。

本研究は、(財)能村膜構造技術振興財団の援助を受けて行ったものであり、ここに深甚の謝意を表します。また加井野勝司君(奥村組)には実験、データ整理等で御協力頂いたことを記して感謝致します。

参考文献

- Milgram, J. H. (1971): Forces and motions of a flexible floating barrier, J. Hydronautics, Vol. 5, No. 2, pp. 41-51.
- 榎木 亨・青木伸一・劉 海波 (1991): 垂下式汚濁防止膜に発生する衝撃展張力のモデル化, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 95-100.
- 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.