

# 垂下型汚濁防止膜の係留力に関する模型実験

田端竹千穂\* ・ 八尋明彦\*\* ・ 播本一正\*\*\*  
相澤幹男\*\*\* ・ 平石哲也\*\*\*\* ・ 永松宏一\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

近年、関西国際空港や中部国際空港、東京湾横断道路等に代表される大規模かつ大水深の海洋工事が増加し、埋め立て、浚渫、土捨て等の工事にともなう海水のごりの防除のため、汚濁防止膜を設置することが必須の条件になっている。汚濁防止膜は恒久的な構造物でなく、工事中の限られた期間に設置され、工事終了とともに撤去される。このように、汚濁防止膜は仮設構造物として扱われるが、膜のふかれ変形など水理的に難しい問題を含んでいるために、青木ら (1998)、安ら (1993)、榎木ら (1990, 1991)、前野ら (1996) によって汚濁防止膜に作用する流体力や係留ロープに発生する張力に関する研究がなされているものの、実際の設計への実用化には至っていない。

汚濁防止膜には浮沈式と固定式とがあり、浮沈式は水面のフロートからカーテンを吊り下げる垂下型のみであるが、固定式ではさらに自立型・中間フロート型・通水型・枠型に分類される。現在、垂下型汚濁防止膜の設計には海洋工事汚濁防止協会 (1993) による要領書が用いられているが、これは比較的波浪の穏やかな内湾域において適用されてきたものであり、厳しい海象条件における設計法として適用できるか否かを検討しておくことが必要である。また、高波浪下において安全かつ経済的な設計を行うには、適切に係留力を推定するモデルの設定が求められる。

本研究は、関西国際空港二期地区の用地造成にあたり、汚濁拡散防止のために工事区域に展張される垂下型汚濁防止膜に関して、水理模型実験によって作用する外力と係留ロープに発生する張力との関係を求め、適切な張力算定モデルの設定を行うことを目的とするものである。

## 2. 実験方法

流れ発生装置を有する三次元造波水槽に縮尺 1/25 で垂下型汚濁防止膜模型を設置し、係留ロープに作用する張力および浮体に作用する波高と流速を測定した。模型は長さ 20 m の膜を 5 基設置することで三次元的な展張状態を再現しており、6 本のアンカーロープすべてと、中央の膜模型の 2 箇所でテンション部の張力を測定した (図-1 参照)。張力測定には小型張力計を用い、アンカーロープでは図-2 に示すようにアンカー部に張力計を取り付けた。また、テンション部では浮き玉で作ったフロートの内部に張力計を埋め込んだ。係留ロープには現地適用予定のワイヤーとほぼ同じ伸び特性となる釣り糸を基本的には用いた。ただし、作用する外力が厳しくなると衝撃的な張力が発生するため、張力の低減対策として、ワイヤーによる係留ラインの上部半分 (22.5 m) を弾性チェーンに置き換えたときの効果も検討した。

実験では、膜構造が係留力に及ぼす影響を調べるために、フロート径、膜丈長、膜重量を変化させた。フロート径  $\phi$  は 600 mm を基本に 800 mm と 1000 mm に変化させ、膜丈長  $d$  は 5.0 m を標準長として、2.5 m と 10.0 m に変化させた。膜の空中重量  $W$  は、膜丈長が 5.0 m の場合に、カーテン下部に取り付けた重錘を含めて 34.6 kgf/m (339.3 N/m) になるように調整したものを標準重量とした。また、貝等の生物がカーテンに付着して膜重量が増加したケースとして、84.6 kgf/m (829.6 N/m) と 134.6 kgf/m (1,320.0 N/m) になるように錘をカーテンにできるだけ均等に取り付けた。係留点間隔は、19.5 m 間隔を標準長として、現地展張条件にあわせた 18.5 m 間隔についても検討した。

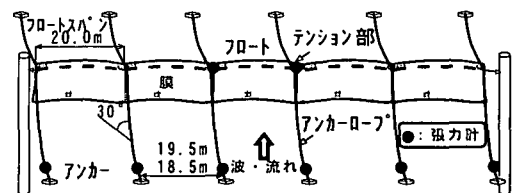


図-1 垂下型汚濁防止膜模型の設置状況

\* 正会員 工修 運輸省港湾局技術課長 (前関西国際空港(株)工務部長)  
\*\* 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局工務第一課長 (前関西国際空港(株)工務部設計課長)  
\*\*\* 関西国際空港(株)工務部設計課  
\*\*\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長  
\*\*\*\*\* 正会員 工修 (株)エコ環境水理部横浜分室

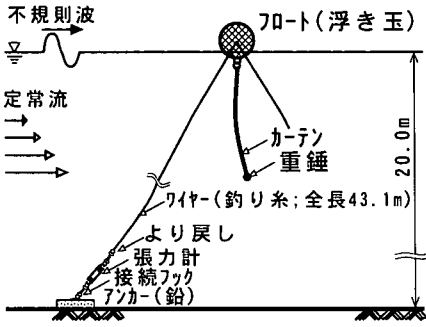


図-2 張力計の取り付け方法

作用させた波浪は不規則波，流れは定常流であり，波高・周期と流速の組み合わせを数種類に変化させることで波の場，流れの場および波・流れ共存場において発生する張力の特性を調べた。波浪条件は，有義波周期  $T_{1/3} = 6.2\text{ s}$ ， $7.5\text{ s}$  の2種類であり， $6.2\text{ s}$  に対しては有義波高  $H_{1/3} = 1.0, 2.0, 2.5, 2.8\text{ m}$  の4条件を， $7.5\text{ s}$  では  $3.7\text{ m}$  の1条件を作用させた。また，平均流速は， $\bar{U} = 0.25, 0.50, 0.75\text{ m/s}$  の3種類である。

データ収集のサンプリングタイムは  $0.025\text{ s}$  であり，膜の形状が安定してから，流れだけを作用させる場合には約  $60\text{ s}$  間について，波作用時には約  $500$  波について測定を実施した。流れだけを作用させる実験では，計測期間中の平均値を，波を作用させる実験では，計測期間中に出現した変動張力の中の最大値を最大張力として，これを代表張力とした。また，6本のアンカーロープでは，両端の係留力は中央のロープの約  $1/2$  になったため，アンカーロープは中央部4本について，テンション部は2測点の最大張力の平均値を解析に適用した。

### 3. 張力の出現特性

#### (1) 流れの場における係留力と膜のふかれ変形

流れの場においてアンカーロープに作用する張力の変化を図-3に示す。流速が大きくなるにしたがって張力が増加するが，発生する張力は，後述する波の場や波・流れ共存場で発生する張力に比べて非常に小さな値と

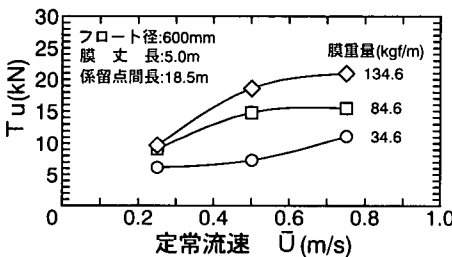


図-3 流れの場におけるアンカーロープ張力

なっている。膜重量別には，重量が増加するほど発生張力が大きい。これは，膜重量の増加によって，膜のふかれ変形量が小さくなり，膜に作用する流圧力面積が増加するためと考えられる。

次に，流れによるふかれ変形に伴う膜の有効高さ  $d_e$  を，小田ら (1996) および青木ら (1998) にならって，次式から算定する。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = \beta \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 = \beta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\bar{U} h}{h - d_e}\right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで， $\sigma$  は膜単位長さ当たりの流体力， $\bar{U}$  は膜下部で縮流した平均流速， $\beta$  は実験定数， $h$  は膜の設置水深である。計算では，式 (2) を式 (1) に代入して，繰り返し計算により  $d_e$  を求める。上式を用いると，次式のような無次元表示式を得る。

$$\frac{d_e}{d} = \text{func}\left(\frac{h}{d}, \frac{0.5 \rho \bar{U}^2 d}{W}\right) \dots\dots\dots (3)$$

図-4には，膜の有効高さの実験値と計算値の比較を示す。小田ら (1996) は， $\beta$  に  $1.1$  を提案しているが，本実験では  $\beta$  に  $1.5$  を用いることで実験値をほぼ説明できる。また，実験値のばらつきは大きいものの，変化特性は計算値と比較的よく一致しており，計算法の妥当性が確認できる。なお，小田ら (1996) に比べて，膜の有効高さが小さめに見積もられたのは，重錘の取り付け方や膜の展張条件の違いと思われる。

#### (2) 波の場および波・流れ共存場における係留力

波と張力の時系列変化の一例を図-5に示す。作用波は， $H_{1/3} = 2.8\text{ m}$ ， $T_{1/3} = 6.2\text{ s}$  である。図によると，浮体前面の波高がある程度大きくなり，ロープが緊張状態になった瞬間に，衝撃的な鋭い波形を持つ張力が作用することがわかる。波・流れ共存場では，鋭いピークを持つ波形がいくつかみられ，流速が大きいほど1波ごとの張力も大きい。しかし，定常流速が  $0\text{ m/s}$  の場合には，波

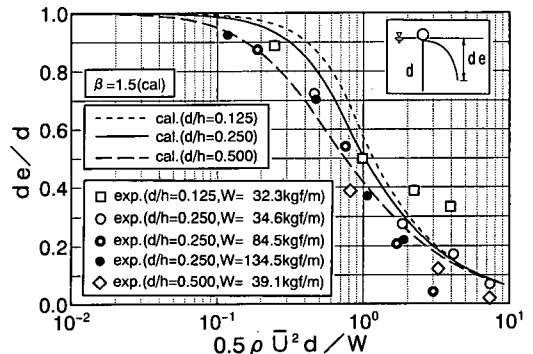


図-4 膜の有効高さの実験値と計算値の比較

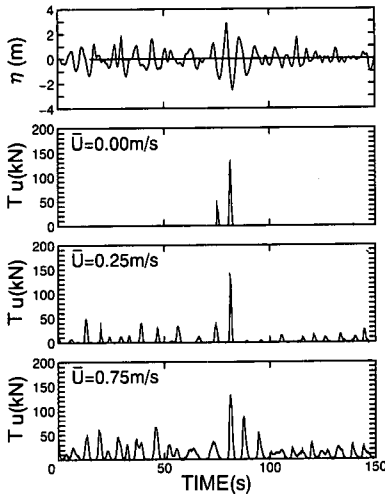


図-5 波と張力の時系列変化

高が大きくなる限り、ほとんど張力が発生しないことから、波が作用してフロートの位置が変化しても、ロープが弛緩しているときには大きな張力が発生しないと考えられる。

次に、波浪や流速条件を変化させた実験結果を総合的に評価するため、次式に示す波と流れを足し合わせた2乗流速  $U^2$  と係留力との関係を検討した。

$$U^2 = \frac{H^2 g}{8d} \frac{1}{\cosh kh \sin kh} \{ \sinh kh \cosh kh - \sinh k(h-d) \cosh k(h-d) + kd \} + \frac{\bar{U} H \omega}{kd \sinh kh} \{ \sinh kh - \sinh k(h-d) \} + \bar{U}^2 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $H$  は成分波ごとの波高、 $k$  は波数、 $\omega$  は角振動数である。

図-6 に、2乗流速  $U^2$  とアンカーロープの張力  $T_u$  の

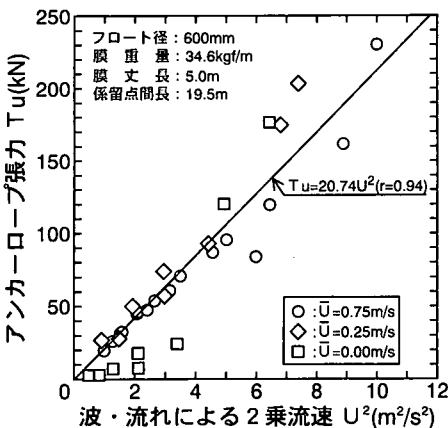


図-6 2乗流速とアンカーロープの張力の関係

関係を示す。なお、不規則波群中の最大波高、1/10最大波高、有義波高、平均波高を、変動張力の統計諸量に対応させてプロットしている。図によれば、両者は比例関係にあり、 $U^2$  の増加に伴って張力が増加している。ただし、定常流速が0 m/s の場合には(波の場)、回帰直線からはずれる傾向にあり、 $U^2$  の大きな衝撃張力の発生するケースを除けば張力は小さくなっている。したがって、波の場では、ロープが伸びきるような大きな波高が作用しない限り、発生する張力は波・流れ共存場ほど大きくならないと考えられる。

(3) 垂下型汚濁防止膜の構造が係留力に及ぼす影響

垂下型汚濁防止膜の構造様式が係留力に及ぼす影響を調べるために、まず、フロート径の違いによるアンカーロープとテンション部の張力を比較した結果を図-7に示す。図によると、アンカーロープおよびテンション部ともに、張力が小さな領域、すなわち波浪や流速が小さな条件下では、フロート径の違いによる張力の差異はほとんどみられない。ところが、発生張力が大きな領域では、フロート径の大きい方の張力が明らかに大きくなっていることがわかる。したがって、係留ロープが伸びきった瞬間に発生すると考えられる衝撃張力は、フロートの質量に係わる慣性力の大きさに強く影響を受けているものと考えられる。

次に、膜重量の違いによる張力の比較を図-8に示す。図によれば、一部の条件を除いて膜重量の増加にしたがって発生張力が大きくなり、張力比率の上限は、アンカーロープで1.5倍、テンション部で2.0倍程度となる。このように、貝等が膜に付着して重量が増加する場合には、浮体全体の質量が増加して、同時に慣性力が大きくなるため、発生張力が大きくなるものと考えられる。したがって、係留ロープの切断を避けるためには、適宜、付着生物を除去することが必要であるが、安全な設計を

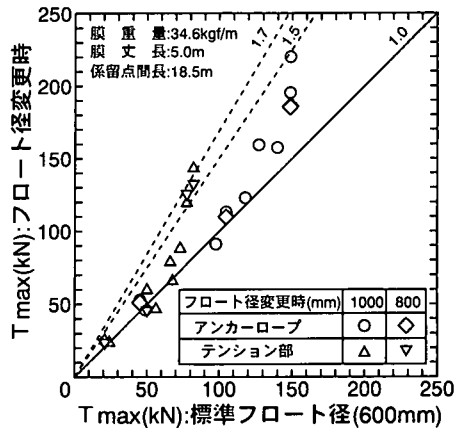


図-7 フロート径の相違による係留力の比較

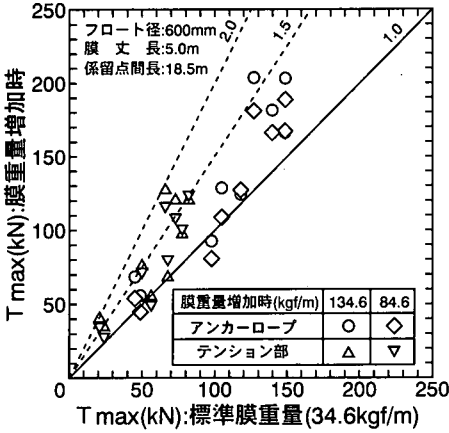


図-8 膜重量の相違による係留力の比較

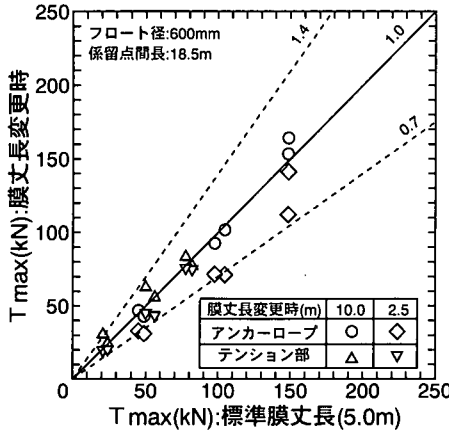


図-9 膜丈長の相違による係留力の比較

行うためには、予想される付着生物の重量を考慮することも必要と考えられる。

さらに、図-9に示す膜丈長に違いによる張力を比較した結果によると、膜丈長が最も短い2.5mの場合に張力が小さくなる傾向がみられるけれども、張力比率はアンカーロープおよびテンション部ともに1.0付近に分布しており、明確な違いはみられない。以上を総合すると、波の場合あるいは波・流れ共存場において発生する張力は、膜が受ける抗力よりも、フロートの運動を介して発生する張力が卓越すると考えられる。そこで、係留ラインの設計条件に相当する高波浪下における係留力を推定する方法として、フロートの運動と係留ロープの伸び特性を考慮した張力算定モデルの構築を試みる。

#### 4. 張力算定モデルによる係留力の推定

垂下型汚濁防止膜のアンカーロープに作用する張力の簡易推定法として、ここでは、フロートは水粒子運動と

同じ運動をし、運動エネルギーが係留ワイヤーまたは弾性チェーンの弾性力が有するエネルギーに変換されるものとした。水粒子の運動によるフロートの最大水平速度  $U_{max}$  は次式で表される。

$$U_{max} = \alpha u_{max} + \bar{U} = \alpha \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh kh}{\sinh kh} + \bar{U} \dots (5)$$

ここで、 $\alpha$  は不規則波の非線形性による水粒子速度の増加の割合で、ここでは  $\alpha = 2$  を採用した (平石・富田, 1997)。また、 $u_{max}$  は波による最大水平速度である。フロートが有する運動エネルギーは次式で表される。

$$E = \frac{1}{2} m_B (1 + \kappa_B) U_{max}^2 \dots (6)$$

ここで、 $m_B$  はアンカーと係留点を繋ぐアンカーロープ1本あたりのフロートの質量であり、本研究においては、長さ20mの1基分の膜が1本のアンカーロープで支持されていると考えて、1基分に含まれるフロートの質量を合計した。 $\kappa_B$  は付加質量である。ここでは、あらかじめ  $(1 + \kappa_B)$  を質量係数  $M$  とする。通常、 $M$  は1以上の値になると考えられるが、汚濁防止膜に使用するフロート群のようにフレキシブルな構造を有する場合には、それぞれのフロートの運動が、すべての係留ラインに影響を及ぼすとは考えられないので、 $M$  は1以下の値をとることもある。係留ロープの弾性エネルギーとの釣り合い方程式は以下ようになる。

$$E = \frac{1}{2} M m_B U_{max}^2 = \frac{1}{K} x_{max}^2 \dots (7)$$

ここで、 $K$  はアンカーロープの伸び率 (N/m) で、 $x_{max}$  はアンカーロープの伸び量である。上式で示した釣り合い方程式から  $x_{max}$  が計算できるので、 $T_{umax} = K x_{max}$  として最大張力が計算できる。なお、衝撃張力の発生を防止するために弾性チェーンを挿入するときには、次式で合成伸び率を計算する。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \dots (8)$$

ここで、 $k_1$  はワイヤーの伸び率、 $k_2$  は弾性チェーンの伸び率である。ワイヤーおよび弾性チェーンの伸び率は、実験で用いた釣り糸模型及び弾性チェーン模型の引っ張り試験から求めた。なお、本実験で用いた弾性チェーンの伸び率は約436 kN/mであり、合成係留ラインの伸び率は約338 kN/mになる。これに対して、43.1mの係留ラインをすべてワイヤーにした場合の伸び率は、約785 kN/mとなった。

計算モデルに含まれる質量係数を測定するために、まずワイヤーで係留された汚濁防止膜のアンカーロープに作用する最大張力の実験値と計算値との比較を行った。図-10は、直径600mmのフロートにより構成された汚

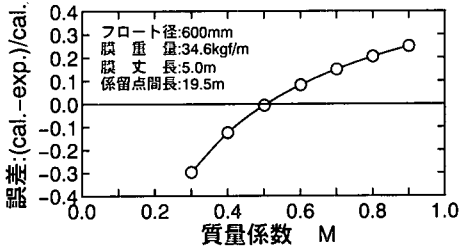


図-10 質量係数による計算誤差の変化

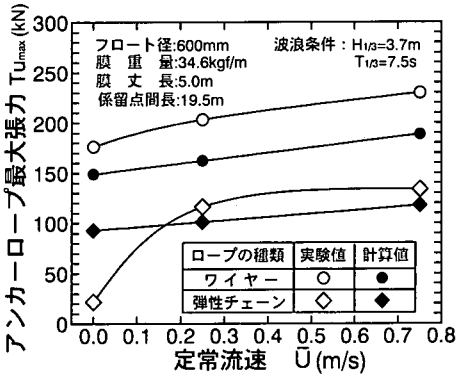


図-11 係留力の実験値と計算値の比較

致していない。これは、弾性チェーンが水中である程度の質量を有しており、中間シンカー的な働きをして、小さな定常流速では汚濁防止膜のアンカーロープが伸びきらないためと考えられる。 $\bar{U}$ が0.25 m/s以上になると、弾性チェーンの計算精度は高くなる。汚濁防止膜の構造を変化させたほかのケースにおいても計算誤差は20%以内で最大張力を推定でき、本近似モデルによる係留ラインの設計が可能であることがわかった。

5. おわりに

本研究では、水理模型実験と簡便な張力算定モデルを用いて垂下型汚濁防止膜の係留力の算定法について提案した。主要な結論を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 流れだけを作用させる場合の係留力は極めて小さく、高波浪作用時の係留ロープが緊張した瞬間に、衝撃張力が発生する。
- (2) 波の場および波・流れ共存場において発生する張力は、膜が受ける抗力よりも、フロートの運動を介して発生する張力が卓越する。
- (3) 本研究で提案した張力算定モデルにより、比較的高い精度で係留力を推定できる。

最後に、本研究を行うに当たって、鳥取大学上田茂教授を座長とする検討会において貴重な御指導、御意見を賜った。ここに、委員各位をはじめ、関係諸機関に感謝の意を表す次第である。

参考文献

青木伸一・岡野 聡・榎木 亨 (1998): 自立式汚濁防止膜の有効高さおよび係留力の実用計算法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 796-800.

安 成模・榎木 亨・青木伸一・萬藤 満 (1993): 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と係留力の実用計算法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 921-925.

小田一紀・重松孝昌・野口達矢・武田将英 (1996): 汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1151-1155.

海洋工事汚濁防止協会 (1993): 汚濁防止膜の設計・施工要領, 65 p.

榎木 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の特性, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 311-316.

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.

平石哲也・冨田康大 (1997): 波浪による衝撃張力に対する浮標システムの安全対策, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 881-885.

前野賀彦・石川元康・田中克往・東 博之・川本博文 (1996): 現地観測に基づく汚濁防止膜の効力係数に関する一考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 996-1000.

濁防止膜に作用する最大張力における計算値と実験値の誤差である。誤差は、(計算値-実験値)/計算値として求めた。計算ケースでは、膜の水中重量を無視し、定常流速は0 m/sとした。また、作用波高は $H=1.8 H_{1/3}$ として入力した。図では、縦軸に“誤差”を、横軸に質量係数 $M$ とした。図に示すように、質量係数が0.5のときには誤差は0となり、計算では質量係数 $M$ を0.5とすることで精度のよい計算ができることが明らかとなった。

次に、質量係数 $M$ を0.5と設定して、定常流が作用した場合の計算値と実験値を比較した。図-11は、係留ラインをすべてワイヤーとした場合と、上部の半分を弾性チェーンで置き換えた場合に相当する。作用波は、 $H_{1/3}=3.7$  m,  $T_{1/3}=7.5$  sである。図の横軸および縦軸は、それぞれ定常流速 $\bar{U}$ およびアンカーロープの最大張力 $T_u$ を示す。

ワイヤーの場合には、計算値が実験値よりやや小さくなっているが、その誤差は定常流速 $\bar{U}$ の0.75 m/sの場合でも17%であり、ほぼ最大張力を高精度で推測していると考えられる。弾性チェーンの場合には、その誤差は小さく、11%である。ただし、 $\bar{U}=0$  m/sの場合には、実験張力が22 kNと非常に小さくなっており、計算値と一