

振動解析によるケーブル張力測定について

狩野 芳治*¹ 野本 昌夫*² 和田 一育*²
北山 淳逸*³

無人潜水機のテザーケーブルは、信号通信、電力供給を行う抗張力ケーブルで、非常に繊細で複雑な構造を有している。このケーブルの損傷の防止、無人潜水機の運動抑制の防止のためには、精度の良い索張力の管理が必要であり、この管理技術によって無人潜水機の索制御自動化が可能になると考えられる。現在の張力計測は、ロードセルや作動油圧計測によって行われているが、装置の大きさ、汎用性の欠陥もしくは精度の悪さ等の問題が残存している。我々は、この点を補う張力計測装置を開発するため、テザーケーブルの振動に着目し、この振動数と索張力の関係を求めて振動計測により索張力が得られることを確認した。ここでは、その関係式を誘導し、さらに、レーザー変位計で振動計測して高速フーリエ変換による振動数解析結果から索張力を得る試作装置を製作し、この計測方法の性能を確認した結果を報告する。

キーワード：テザーケーブル、張力、無人潜水機、ROV、レーザー、振動解析、FFT

On a Cable Tension Measurement by the Vibration Analysis

Yoshiharu KANO*⁴

Masao NOMOTO*⁵

Kazuyasu WADA*⁵

Jun-itsu KITAYAMA*⁶

To measure tension in a tether cable, we developed a new measuring system in which vibrations on the cable are analyzed. Vibrations of a tether cable are excited by forces due to waves winds, the motion of ships and so on. This system finds the vibration frequency spectrum by the Fast Fourier Transform method (FFT) from the measured vibration data, and calculates the tension in the tether cable by a formula which relates the vibration frequency to tension. This system is not simple,

* 1 川崎重工業(株) (研究時、深海開発技術部所属)

* 2 深海開発技術部

* 3 タイコシステムエンジニアリング(株) (研究時、東海大学学生)

* 4 Kawasaki Heavy Industries Co., Ltd. (Deep Sea Technology Dept.)

* 5 Deep Sea Technology Dept.

* 6 Taiko System Engineering Co., Ltd. (Student of Tokai Univ.)

but has some advantages over other systems which use a loadcell or oil pressure data measured at an electric hydraulic winch. These include ease of fitting, small size and light weight, and useability for different size tether cables. In this paper, we introduce this system in two steps. The first is the derivation of the formula from vibration theory, the second is the confirmation of the accuracy of this system by manufacturing the system and testing it.

Key words : Cable tension, ROV, Tether cable, Vibration Analysis, Razar
FET

1 はじめに

現在、有索式の無人潜水機では、海中のビークルは海上の母船とテザーケーブルで繋がれ、駆動用電力の供給を受けるとともに母船との間で諸データの送受信を行っている。そのため、テザーケーブルは送電用動力線、通信用光ファイバ（または通信線）、索張力に対抗する強度材及びその他のシース類からなる複雑な構造の複合ケーブルとなっている。さらに、これらの動力供給と通信の機能以外に、テザーケーブルには母船から繰り出されているテザーケーブルの自重による張力とビークル及び母船の運動等による張力変化やテザーケーブル自身の捻り等に耐え得る強度性能も要求される。特に、このテザーケーブルの強度に問題が生じれば、ケーブルの切断となり無人潜水機の紛失につながる。このように、テザーケーブルは無人潜水機システムを構成する多くの装置の中でも特に重要なものである。また、ランチャーやディプレッサーを有しない無人潜水機システムでは、このテザーケーブルが適当量繰り出されていなければ、無人潜水機がケーブルに引っ張られ、操縦者の与える指示に従った運動が不可能となる。

これらのことからよく分かるように、無人潜水機の運用時にはこのテザーケーブルが損傷を受けたり、無人潜水機を引きずったりする現象を避ける必要があり、そのためには常にテザーケーブルの正確な張力値を把握しておく必要がある。また、将来の無人潜水機の自動化のためには、現在行われている手動によるテザーケーブル繰り出し長さの管理を自動化することも考えられ、この技術開発の条件としても正確な張力値の把握は重要なものである。

我々は、この正確な張力値を計測する技術として、今までにない新しい手法であるテザーケーブルの振動解析による張力推定法を考案し、その精度を試作装置により確認したのでここに報告する。

2 テザーケーブル張力計測と振動波形

2.1 テザーケーブル張力計測法

従来、無人潜水機のテザーケーブルに作用する張力を検出するには、ジンバルシーブ等にロードセル等を取り付けてその負荷荷重を計測し、それにケーブル投入角やジンバルシーブの三軸変位角による補正を加えてケーブル張力を検出する方法、3個のシーブを直列に並べてケーブルを“く”の字形に通し、中央のシーブに作用する荷重を計測して検出する方法及びトラクションウィンチが油圧駆動の場合はその作動油圧を計測し、その圧力値より単純に換算してケーブル張力を得る方法等が一般に用いられている。

最初の方法はジンバルシーブを有するシステムしか使えないし、三軸変位角及び投入角の計測値から演算処理して行うため、比較的大きな装置となるとともに他の無人潜水機システムには使えない。二番目の方法も、シーブ溝の形状から他のシステムには使えないし、さらにシーブユニットを母船の甲板等に強固に固定する必要がある。精度は一、二番目とも使用に耐える程度の精度を有している。三番目は、少なくとも油圧駆動のトラクションウィンチの場合しか使用できず、二番目の方法と同様にシーブ溝の形状から他のシステムには使えない。精度は、作動油圧から変換するため機器の摩擦損失や配管抵抗等の影響を受け、非常に悪い。これらの特徴に対し、テザーケーブルの振動解析によ

る張力計測法は、精度よく、軽量かつ機器取付が容易であるとともに各種の無人潜水機にも使用できる汎用性を持った計測法と考えられる。

2.2 テザーケーブルの振動

一般に、海上の船舶から海中にケーブルを付けて物体を投入した場合にはケーブルが振動することは良く知られている。無人潜水機を海中に投入したときもこの例に漏れず、やはりテザーケーブルが振動している。これは、船舶の動揺、風、波浪等の外力の変動周期がテザーケーブルの固有周期と一致してテザーケーブルの起振力となる。また、周期が一致しない場合でも、はじめは外力の周期で強制振動させられるが、テザーケーブルの非線形性から振動がテザーケーブルの固有周期に変化すると考えられる。

テザーケーブルの振動を確認するために、「ドルフィン-3 K」運用時にジンバルシーブとラムテンションの間でテザーケーブルに加速度変換器を取り付け、その振動を計測した。図1にその振動波形を示す。この図からわかるように、テザーケーブルは非常に明確な振動数で振動しており、テザーケーブルの振動解析が比較的容易であることも想像できる。

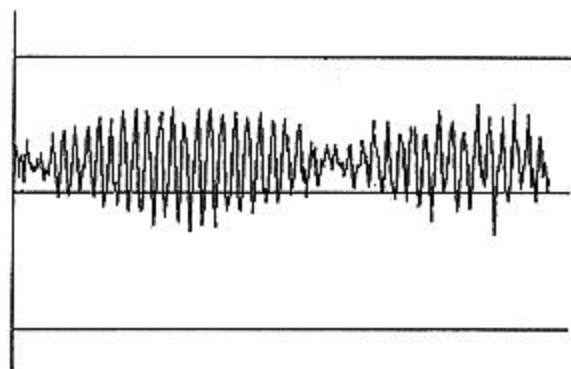


図1 D3K運用時テザーケーブル振動波形

Fig.1 Vibration of tether cable

3 索張力推定基礎式

空中における索の固有振動数と索張力の関係は、弦の運動方程式と波動方程式から得られる。

(1) 弦の運動方程式

空中の二点間にて張力Tでピンと張られた弦が横振動をする場合、運動方程式は弦上の任意の一点の力の釣合から与えられる。いま、原点を弦の

一端に取り、原点から他端の方向にx軸を、x軸と直角方向にy軸を設定し、弦はxy平面内で振動するとする。このときの弦の運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\eta} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

但し、 η : 弦の線密度

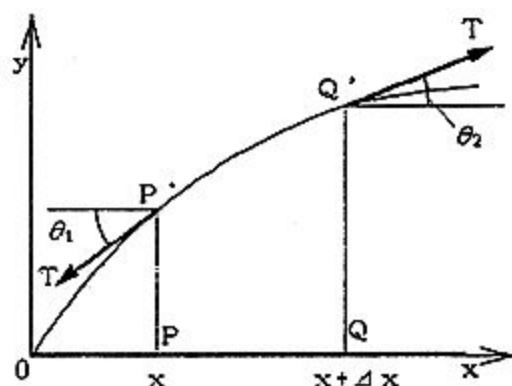


図2 弦の張力

Fig.2 Tension of string

(2) 波動方程式

波が一定の伝搬速度Cで弦上を波形を変えずに進行する場合には、時刻tにおける波形が時間 Δt 経過した時刻(t + Δt)における波形と比較して、波形が $\Delta x (= C \times \Delta t)$ 進んだだけで波形は変わらないという条件から、波動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

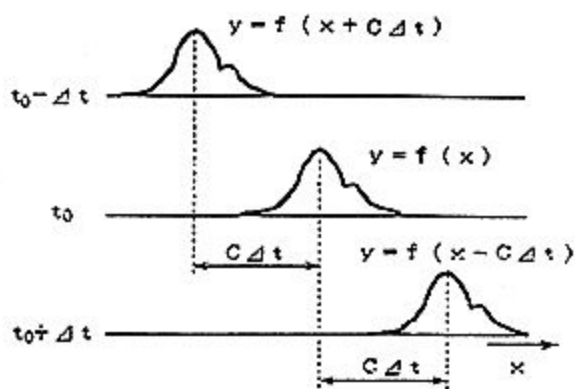


図3 波の移動

Fig.3 Transmission of string

(3) 推定基礎式

運動方程式(3.1)と波動方程式(3.2)から、

$$C = \sqrt{\frac{T}{\eta}} \dots\dots\dots(3.3)$$

の関係式が得られる。また、長さLの弦の一次振動では次の三式の関係が成り立つ。

$$f = \frac{1}{\lambda} \times C \dots\dots\dots(3.4)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$\eta = \frac{W}{g} \dots\dots\dots(3.6)$$

但し、f：弦の振動数

λ：波長

W：弦の単位長さ当たりの重量

g：重力加速度

以上の式(3.3)、(3.4)、(3.5)、(3.6)から次に示す弦の振動数と張力の関係式が得られる。

$$T = \frac{4W}{g} \times f^2 \times L^2 \dots\dots\dots(3.7)$$

4 計算モデルの違いによる影響

(3.7)式は理想化された弦の振動問題における振動数と張力の関係式であり、テザーケーブルとこの理想化された弦の振動問題とは計算モデルが一部異なる。これらの違いを洗い出し以下のとおり推定張力に与える影響を考察した。

- ・テザーケーブルの付加質量の影響
- ・テザーケーブルの曲げ剛性の影響
- ・テザーケーブルの送り速度の影響
- ・境界条件の違いによる影響

4.1 付加質量の影響

流体中で物体が運動を行う時、物体周囲の流体も物体とともに運動する。この流体の運動は物体の運動により誘起されるもので、この流体質量を物体の付加質量という。弦の振動問題では弦は無限に細いと仮定されているため、この付加質量は無視されているが、テザーケーブルは有限断面を有しており、実際にテザーケーブルの振動により

周囲の空気が一緒に運動するためこの影響を考慮する必要がある。

今、ある振動数で振動するテザーケーブルを考えた場合、付加質量を考慮したときの索張力をT、無視した場合の索張力をT₀とすると、(3.7)式からTは次式で与えられる。

$$T = 4 \times \left(\frac{W}{g} + m \right) \times f^2 \times L^2$$

$$= 4 \times \pi r^2 \times (\rho_c + \rho_A) \times f^2 \times L^2 \dots\dots(4.1)$$

但し、 $m = \rho_A \pi r^2$

m：付加質量

ρ_c：テザーケーブルの平均密度

ρ_A：空気の密度

r：テザーケーブル断面半径

この(4.1)式中の $\pi r^2 \times (\rho_c + \rho_A)$ をテザーケーブルの見かけの質量と呼び、この式から判るように、テザーケーブル質量が空気質量の分だけ増加するのに比例して索張力も大きくなるように補正されている。従って、この影響を定量的に確認するためには、テザーケーブルの平均質量と空気の質量を比較すると明確になる。

一般に、テザーケーブルの比重は1.0~1.5程度であり、テザーケーブルの平均密度と空気の密度は以下のとおりである。

$$\rho_c = 102 \sim 153 \text{ kgsec}^2/\text{m}^4$$

$$\rho_A = 0.132 \text{ kgsec}^2/\text{m}^4$$

この値を使って、(3.7)、(4.1)式より索張力を求め、テザーケーブルの比重をパラメータに付加質量の索張力に与える影響を図4に示す。

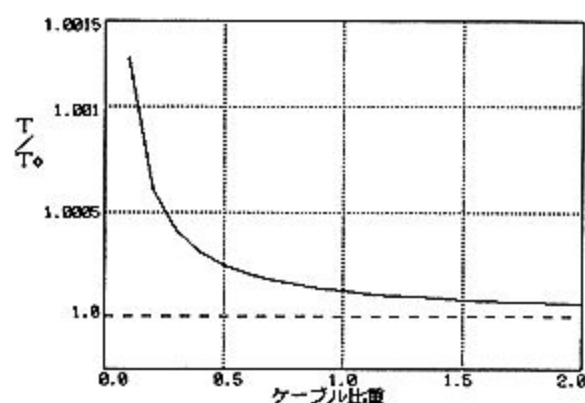


図4 付加質量の影響

Fig.4 Effect of added mass

前述したように、テザーケーブルの比重は一般的に1.0~1.5であることを考えると、付加質量を考慮した場合の索張力の増加率は0.1~0.2%である。

4.2 テザーケーブルの曲げ剛性の影響

理想化された弦の振動問題では、弦の剛性（曲げ剛性、捻り剛性、剪断剛性等）は考慮されていない。これらの諸剛性の内、テザーケーブルの横振動に最も影響を与えるものは曲げ剛性である。ここでは曲げ剛性が考慮されていない(3.7)式に対し曲げ剛性の補正項を導出し、その影響を確認する。

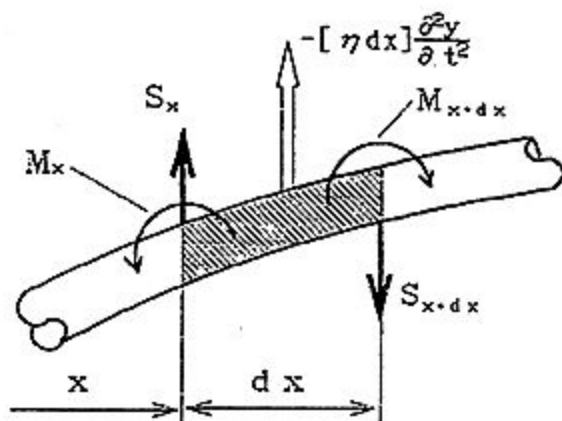


図5 曲げ変形による力
Fig.5 Forces by bending

テザーケーブルの曲げ変形を考える場合、テザーケーブルの長さ dx の微小部には図5に示す部材力が作用している。一般的に、これらの部材力と変形の関係は次式で表される。

$$M = -EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

$$S = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right\} \quad (4.3)$$

但し、 E ：テザーケーブルの縦弾性係数

I ：テザーケーブルの断面二次モーメント

ここで、 EI はテザーケーブルの全長にわたって一定であるので定数と考え、この微小部の運動方程式を求めると次式となる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EI}{\eta} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad (4.4)$$

次に、テザーケーブル振動波形を次に示す余弦関数と仮定し、さらにこの偏微分方程式から得られる一般解の任意定数を境界条件を用いて決定する。

$$y = Y(x) \cos(\omega_n t - \phi)$$

但し、 ω_n ： n 次振動の円振動数

ϕ ：位相角

〈境界条件〉

$x = 0$ 及び $x = L$ において

変位： $y = 0$

$$\text{曲げモーメント：} M = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

その結果、次の関係式が得られる。

$$\omega = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\eta}}$$

但し、 ω ：一次振動の円振動数

さらに、 $\omega = 2\pi f$ の関係より次の振動数と曲げ剛性の関係式が得られる。

$$f = \sqrt{\frac{\pi^2}{4L^4} \frac{EI}{\eta}} \quad (4.5)$$

この(4.5)式は曲げ剛性を考慮したときの振動数と曲げ剛性の関係式であり、一方、張力の作用する場合の振動数と張力の関係式は(3.7)式から次式の形で得られる。

$$f = \sqrt{\frac{1}{4L^4} \frac{T}{\eta}} \quad (4.6)$$

今考えている曲げ剛性を有するテザーケーブルに張力が作用する場合の関係式を得るためには、上記(4.5)、(4.6)式を合成する必要がある。この合成を行う条件は次式で与えられる。

$$f^2 = f_0^2 + f_1^2 \quad (4.7)$$

但し、 f ：曲げ剛性と張力を同時に考慮した一次振動固有振動数

f_0 ：張力が作用する場合の一次振動固有振動数

f_1 ：曲げ剛性を考慮した場合の一次振動固有振動数

(4.7)式に(4.5), (4.6)式を代入すると, 次式の曲げ剛性と張力を同時に考慮した一次振動固有振動数計算式が与えられる。

$$f = f_0 \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2 T}} \quad \text{.....(4.8)}$$

この(4.8)式がテザーケーブルの曲げ剛性の補正を加えた基礎式であり, この式から索張力を与える式を導き出すと次式のようになる。

$$T = \frac{4WL^2}{g} f^2 - \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{.....(4.9)}$$

この式は(3.7)式の索張力推定基礎式と比較して判るように, 右辺の第一項は基礎式そのものであり, 第二項がテザーケーブルの曲げ剛性による補正項である。

この影響を定量的に確認するために, 索径: 15mmφ, 30mmφ (ドルフィン-3K用ケーブル) 及び45mmφ (10K用試作ケーブル) についてケーブル長さと補正張力の関係を調べた。その結果を図6に示す。このとき計算に用いた剛性を示すパラメータ値は以下のとおりである。

索径	縦弾性係数	断面二次モーメント
15mmφ	1000kg/mm ²	2485mm ⁴
30mmφ	1054kg/mm ²	39760mm ⁴
45mmφ	1154kg/mm ²	201290mm ⁴

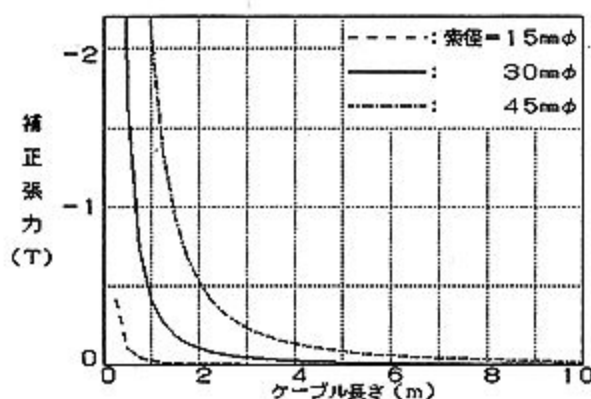


図6 ケーブル曲げ剛性の影響

Fig.6 Effect by bending rigidity

図6よりケーブルの曲げ剛性の最も大きい索径45mmφのテザーケーブルの場合が最も補正張力が大きく, 索径30mmφ, 15mmφの順に小さくなっていく。

また, ケーブル長さが短くなるほど振動振幅に与える曲げ剛性の影響は大きく, 補正張力が極端に増大する。補正張力の最も大きい索径45mmφのテザーケーブルでは, ケーブル長さが5.0m以下になると補正張力が100kg以上になると考えられる。

4.3 テザーケーブルの送り速度による影響

テザーケーブルは, 常に繰り出し・巻き取りによる索長コントロールがなされており, そのためいつもシーブ間で移動している。この移動する速度の影響は, 第3章で述べた弦長Lで両端が固定されている弦の振動に基づく張力推定基礎式では考慮されておらず, ここでは(3.7)式による張力推定値に及ぼす影響を確認する。このテザーケーブルの送り速度の影響は, 第3章で基礎式を導き出した波動方程式を使って得られる。

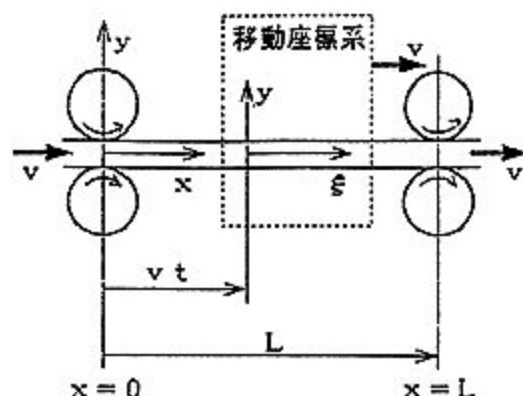


図7 移動媒体に固定された移動座標

Fig.7 Coordinate fixed on a cable

第3章では送り速度のない計算モデルを使ったが, ここでは図7に示すようにテザーケーブルとともに送り方向に移動するξ-y移動座標系を考え, ケーブル長さL離れた2点にシーブを考えて無限長のケーブルが移動できる計算モデルを使うと, 波動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} \quad \text{.....(4.10)}$$

ここで, 次式に示すξ-y移動座標系からx-y固定座標系に変換式を用い,

$$\xi = x + v t$$

但し, v: テザーケーブルの送り速度

さらに, 次式のシーブの位置における変位の拘

束条件をこの偏微分方程式の解に適用する。

$$x = 0$$

$$x = L \text{ において, } y = 0$$

この結果、送り速度を考慮した場合の固有振動数は次式で与えられる。

$$f = f_0 \left(1 - \frac{\eta v^2}{T} \right) \dots \dots \dots (4.11)$$

但し、 f : 送り速度の影響を考慮した場合の固有振動数

f_0 : テザーケーブルの移動のない場合の固有振動数

この(4.11)式と(3.7)式の張力推定基礎式から索張力に及ぼす送り速度の影響を示す次式が得られる。

$$\frac{T}{T_0} = \left(1 - \frac{\eta v^2}{T} \right)^2 \dots \dots \dots (4.12)$$

但し、 T : 送り速度の影響を考慮した場合の索張力

T_0 : テザーケーブルの移動のない場合の索張力

一例として「ドルフィン-3 K」のテザーケーブルを対象に、(4.11)式で与えられた張力比 (T/T_0) を索張力が500kg、1000kg及び2000kgである場合について計算した結果を図8に示す。「ドルフィン-3 K」運用時に作用する張力は、通常2ton以下であり、またテザーケーブル送り速度は60m/min以下であることを考慮すると、図8から送り速度の索張力に及ぼす影響は、0.1%以下であることがわかる。

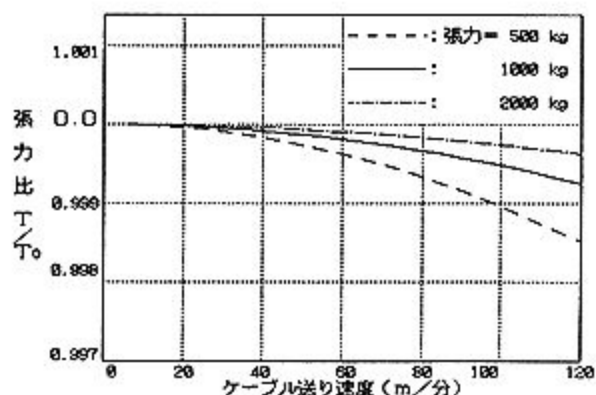


図8 ケーブル送り速度の影響

Fig.8 Effect by the velocity of a cable

4.4 境界条件の違いによる影響

(3.7)式の張力推定基礎式を得るための弦の振動計算モデルでは、両端間距離 L で弦の両端は固定されている。一方、テザーケーブルでは、同じ距離 L 離れたシーブを介してさらに連続して繋がっている。この条件の違いは、二点間の振動が両端で拘束され、二点間の外側へ伝播するか否かである。弦の振動計算モデルでは、両端で固定され弦も連続していないので振動は両端で止まるが、テザーケーブルでは、シーブを介して両端の外側へ連続し、両端間の振動が外側へ伝播して固有振動数が小さくなることが考えられる。このため、ここではこの両端の境界条件の違いによる影響を検討する。4.1~4.3の検討では解析的に影響を調べたが、この両端の境界条件の違いによる影響については解析的に影響を考察するのは非常に複雑なので、ここではテザーケーブルの振動シミュレーションを行うプログラムを作り、10K用試作テザーケーブルの振動試験結果との比較によりその正確性を確認してこの影響を検討する。

4.4.1 振動シミュレーション

シミュレーションとは、計算機上で数値的に運動方程式を解き、物体のさまざまな現象の再現を行うもので、ここではテザーケーブルの振動現象を対象にしている。シミュレーションを行うには、まず現象を忠実に再現できる振動シミュレーションモデルを作成する必要がある。モデルは、図9に示すようにテザーケーブルの質量は大きさがなく質量だけを有する質点に、伸び縮み変形は質点間に配置される質量のないバネにして、これらを複数組連続して繋ぐLumped Mass法を用いている。また、両端部はシーブで上下から挟み込み、シーブ形状による変位の制限も考慮されたモデルとなっている。次に、運動方程式は各質点とバネの力の釣合から与えられる。図10に i 番目の質点に作用する力を示す。この図から水平、垂直方向の力の釣合により次式が得られる。

$$m_i \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = F_{i1} \cos \theta_{i1} + F_{i2} \cos \theta_{i2}$$

$$m_i \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F_{i1} \sin \theta_{i1} + F_{i2} \sin \theta_{i2} + m_i g$$

但し, m_i : i 番目の質点の質量
 F_{11} : バネ 1 の伸びによる反力
 F_{12} : バネ 2 の伸びによる反力
 θ_{11} : バネ 1 と水平方向のなす角
 θ_{12} : バネ 2 と水平方向のなす角
 g : 重力加速度

この 2 式からルンゲクッタの方法を用い, すべての質点の Δt 秒後の水平, 垂直方向の変位を求めて, Δt 秒後の位置が決定される。この数値演算を繰り返すことによりテザーケーブルの計算モデルを振動させることができる。このシミュレーションプログラムのフローチャートを図 11 に示す。

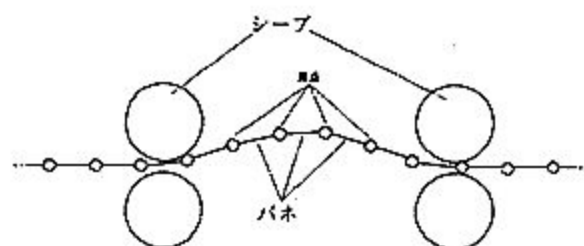


図 9 シミュレーションモデル
 Fig.9 Simulation model

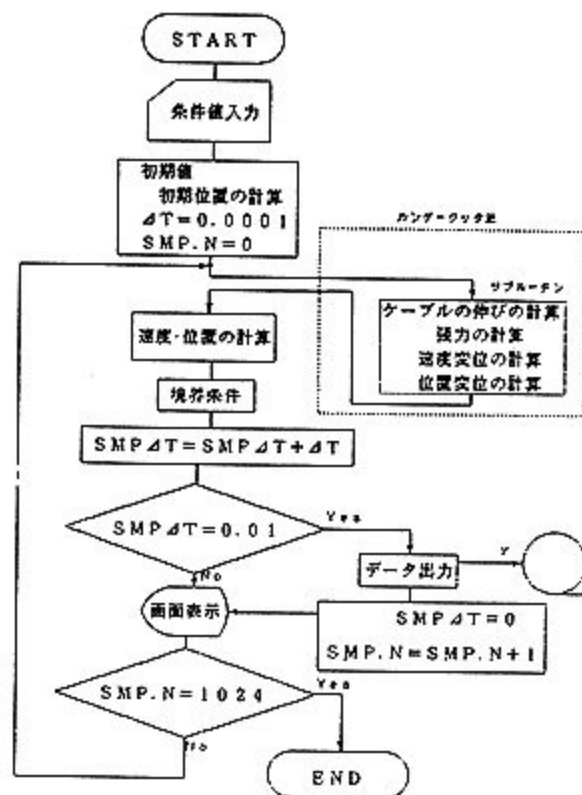


図 11 シミュレーションプログラム フローチャート
 Fig.11 Flow chart of simulation program

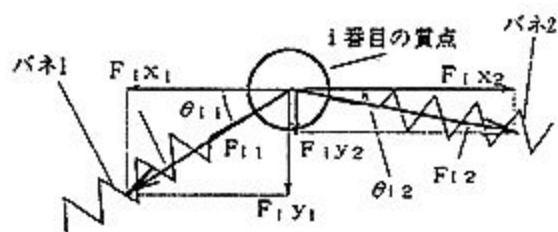


図 10 質点に作用する力
 Fig.10 Forces on a mass

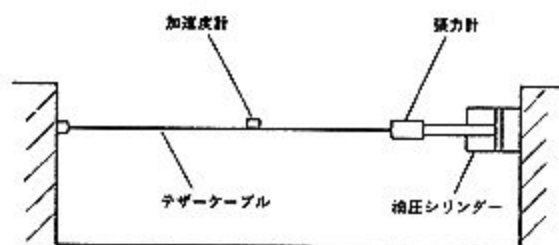


図 12 ケーブル振動試験
 Fig.12 Vibration test system

4.4.2 テザーケーブル振動試験

10 k 用試作テザーケーブルの振動試験が平成元年 3 月に東京製綱所で実施された。試験要領は以下のとおりである。

(1) 試験装置

図 12 に試験装置の概略図を示す。試験装置は水平に張られた長さ約 30m のテザーケーブルの一端を固定し, 他端には張力計を取り付けて, さらに

張力付加用の油圧シリンダーを介して固定されている。また, テザーケーブルの中央部には振動計測用の加速度変換器が取り付けられ, 弦を弾くようにして振動させられるテザーケーブルの垂直加速度を検出するようになっている。このときのテザーケーブルの固有振動数は検出された垂直加速度を高速フーリエ変換 (以後, FFT と呼ぶ) 処理して得られる。

(2) 張力付加条件

テザーケーブルの一端に取り付けられた油圧シリンダーを使ってテザーケーブルに張力を付加する。試験では、張力を6種類変えて計測している。

(3) 試験結果

長さ30.3mのテザーケーブルに対して付加張力を6種類に変化させ計測されたテザーケーブルの各々の固有振動数を表1に示す。

公称荷重 (tf)	平均荷重 (tf)	1次振動数 (Hz)
6	5.32	3.20
8	7.25	3.70
10	9.32	4.15
12	11.22	4.50
14	13.30	4.90
16	15.24	5.20

表1 ケーブル振動試験結果

Table 1 Results of vibration test

4.4.3 影響の確認結果

前項のテザーケーブル振動試験の計測条件を振動シミュレーションプログラムに与え、そのシミュレーションで得られた固有振動数を表2と図13に、さらにテザーケーブル振動試験結果との比較結果を図14に示す。

この比較結果から、シミュレーションと試験結果にほとんど差がなく、このシミュレーションが十分ケーブルの振動を再現できていることが判断できる。また、表2と図13から、両端のシーブの位置でテザーケーブルを固定した場合とシーブからさらに両側に各々30m, 60m延ばして固定した場合においても、テザーケーブルの振動数はまったく変化しないことが分かる。これらのことから、ケーブルの境界条件の違いによる固有振動数に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

拘束距離 (m)	0	30	60	60 (自由端)
荷重 (tf)	周波数 (Hz)			
5.32	3.22	3.22	3.22	3.22
7.25	3.71	3.71	3.71	3.71
9.30	4.20	4.20	4.20	4.20
11.22	4.59	4.59	4.59	4.59
13.30	4.98	4.98	4.98	4.98
15.24	5.27	5.27	5.27	5.27

表2 シミュレーション解析結果

Table 2 Results of the simulation

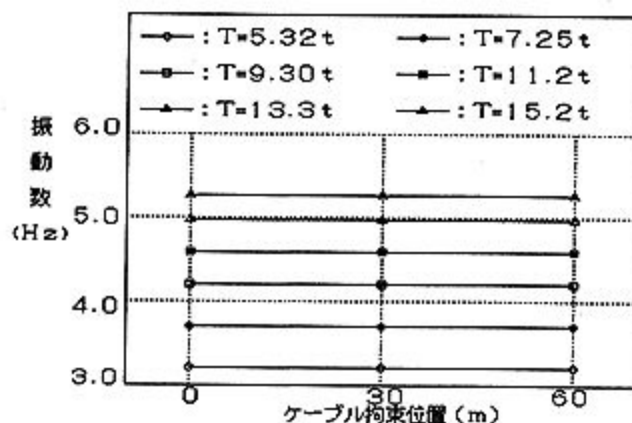


図13 シミュレーション解析結果

Fig.13 Results of the simulation

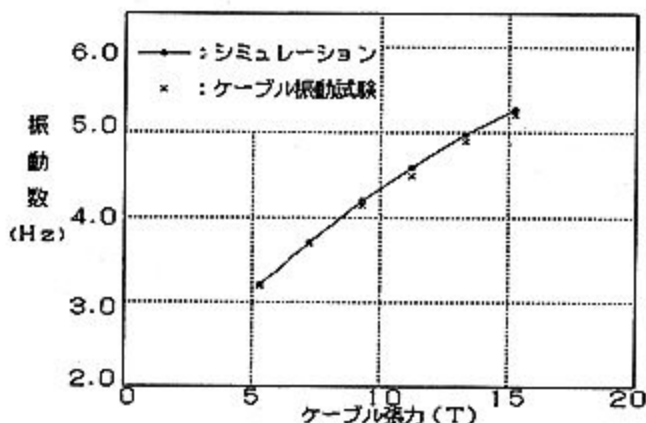


図14 シミュレーション解析精度

Fig.14 Comparison between results of the simulation and the test

5 張力変換式

(3,7)式の張力推定基礎式に対し、4章でこの基礎式に影響を与える可能性があると考えられる付加質量、ケーブル曲げ剛性、ケーブル送り速度及び境界条件の違いによる影響について検討を加えてその影響の程度を調べた結果、このケーブル振動数の計測によるケーブル張力の測定においては、ケーブル曲げ剛性の影響を考慮した次式で十分な精度が得られると考えられる。

$$T = \frac{4WL^2}{g} f^2 - \frac{\pi^2 EI}{L^2} \dots\dots\dots (5.1)$$

6 ケーブル張力測定装置

5章で得られた張力変換式を用いて、実際に船上で使用可能なケーブル張力測定装置を試作した。以下にこの装置を紹介し、その性能確認結果を示す。

6.1 装置概要

装置は、テザーケーブルの振動を検出するセンサ部、信号変換部及び演算処理部から成る。その構成機器ブロック図を図15に示す。

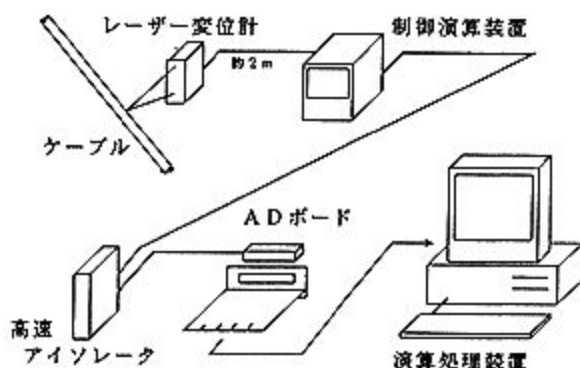


図15 計測システムブロック図
Fig.15 Tension measuring system

(1) センサ部

センサの使用を決定する際に次の点について考慮した。

- ①ROVシステム運用時は常にテザーケーブルは巻き込み・繰り出しが行われており、加速度変換器等のテザーケーブルに固定して使用されるものは用いられない。

- ②テザーケーブルの振動数を計測するには、振動加速度、速度及び変位等の波形を計測できるものに限定される。

- ③①により非接触式のセンサを使用する場合、超音波、磁気及び光学式等のセンサが候補としてあげられるが、船上では周囲に磁性体が存在すること、機器の駆動等による騒音レベルが高いこと及び太陽光の下でセンサを作動させること等、周囲の環境条件を十分考慮する必要がある。

この結果、市販の各種センサの中からレーザー変位計を選択した。

(a) レーザ変位計

本装置で使用したレーザー変位計の要目は以下の通りである。

- ①メーカー：オムロン(株)
- ②型 式：形3Z4M-J1222
- ③光 源：半導体レーザー(波長:720nm)
- ④測定範囲：±30mm
- ⑤測定中心距離：100mm
- ⑥分解能：50μm
- ⑦応 答 速 度：1ms, 20ms切換式(本装置では、1msで使用)
- ⑧出 力：±10v/F.S.及び4~20mA/F.S.

(2) 演算処理部

ここではセンサから送られる変位信号を使い、テザーケーブルの固有振動数を検出して5章で得られた張力変換式により張力を算出する。また、本処理部は張力値を表示する機能も有している。

演算処理部の主たる処理は、テザーケーブルの振動変位信号から固有振動数を検出する処理と、その固有振動数から張力を算出する処理に大きく分けられ、前者では、振動解析で最も一般的でデジタル処理に適している高速フーリエ変換(FFT)を用いて信号の周波数解析を行い、さらに、その解析で得られたパワースペクトラムから最大ピークの振動数を採し出す。また、後者では、あらかじめ与えられているテザーケーブル曲げ剛性、ケーブル長さ及び単位当たりの重量のデータと計測された固有振動数を使って、(5,1)式で張力を演算し、表示部と補助記憶装置に出力される。

構成機器とその仕様は以下のとおりである。

(a) 中央演算部 (パーソナルコンピュータ)

①メーカー：日本電気㈱

②型 式：PC9801EX21

(b) 表示部 (CRT)

①メーカー：三菱電気㈱

②型 式：XC-1498C(14インチカラーディスプレイ)

(c) 振動解析プログラム

①メーカー：マイクロテクニカ㈱

②機 能：高速フーリエ変換 (FFT)

なお、張力変換プログラムは、我々の手で製作したもので、振動解析プログラムから出力されるパワースペクトラムのデータから最大ピークの振動数を探しだし、張力変換式を使って、張力の算出・表示をさせるものである。

(3) 信号変換部

ここでは、センサ部から出力される電気信号を演算処理部の入力仕様形式の信号に変換する作業を行う。この信号変換部は、高速アイソレータとAD変換器から成っている。

(a) 高速アイソレータ

センサ部から出力される電気信号として電圧信号もしくは電流信号のどちらかを選択できるが、船上では、センサ部は暴露部、演算処理部は室内に設置することが考えられ、信号伝送ケーブル長が数10メートルとなって、電圧信号ではノイズによりデータの精度が悪化することから出力信号として電流信号を選択する必要がある。一方、市販のAD変換器では電圧信号をデジタル信号に変換するタイプがほとんどである。これらのことから、AD変換器に信号が与えられる前段で、電流信号を電圧信号に変換する必要性が生じ、本器がその変換を行っている。仕様は、以下のとおりである。

①入力信号：4~20mA

②出力信号：±10V

(b) AD変換器

本器は、高速アイソレータで電圧信号に変換された変位データを演算処理部の入力信号形式であるデジタル信号に変換するものである。本器は中央演算部のバスラインに接続されている中央演算部外部スロットに差し込まれるボードタイプの12ビット高速変換器で、中央演算部で処理中のプログラムからデータを受け取る信号を受けて、バス

ラインに変換データを出力する。

6.2 電気信号系統

本装置では、レーザー変位計から出力され、ディスプレイの張力計測結果表示までデータは電気信号の形で取り扱われている。図16に電気信号系統を示す。

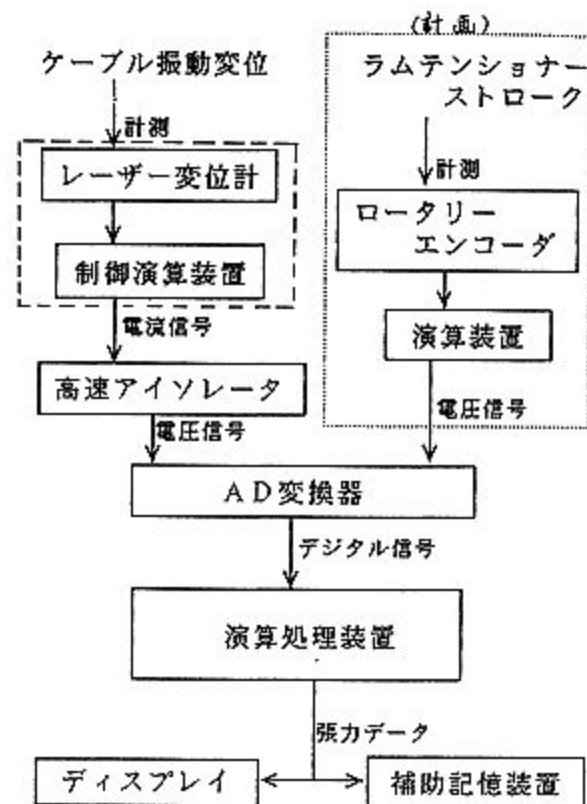


図16 計測システム電気信号フローチャート

Fig.16 Electric diagram of the tension measuring system

まず、レーザー変位計で計測されたテザーケーブル変位データは、その値に応じてアナログ型の4mA~20mAの直流電流信号に変換され、出力される。この信号は数十メートルの長さの同軸ケーブルで高速アイソレータに伝送され、AD変換器の入力信号形式のアナログ型の±10V直流電圧信号に変換される。AD変換器では中央演算部の入力信号形式である12ビットデジタル信号に変換され、中央演算部にバスラインを介して伝送される。このデータを高速フーリエ変換処理し、得られた固有振動数を使ってテザーケーブルの負荷張力が算定される。

最後に、この張力値は、表示部に表示されるとともに、補助記憶装置にもデータとして格納される。以上の簡単な信号処理が本装置では繰り返し行われる。

7 性能確認試験

性能確認試験は、シリコンゴム製丸紐を使った室内実験とドルフィン-3 K用No.4 テザーケーブルの振動試験の2種類実施した。

7.1 室内実験

本装置の性能を確認するために、直径10mmφのシリコンゴム製丸紐を張力を負荷した状態で振動させ、この装置で変位計測から張力値の演算・出力までの一連の処理を行わせる性能確認試験を実施した。試験装置の概略を図17に示す。まず、2式のシーブを間隔1mおいて水平に固定し、このシーブに振動させるシリコンゴム製丸紐を掛け、一端を固定して他端に張力付加用の錘りを吊り下げて、張力を一定に保つようにされている。振動計測センサであるレーザー変位計は、2式のシーブの中央にシリコンゴム製丸紐から100mm離してレーザービームが丸紐の中央に当たるように固定されている。

実験は、この丸紐を手で弾くことにより丸紐に振動を与え、その振動変位を計測・解析した。また、付加張力を2kg、3kg、4kgの3種類変えて計測した。実験結果を図18に示す。この実験では、テザーケーブルに比較してシリコンゴムの縦弾性係数が非常に小さく、張力付加時では単位長さ当たりの重量が無付加時に比べ大きく減少するため、この影響を試験に反映させるため単位長さ当たりの重量のデータを付加張力に合わせて修正している。

試験結果では、図18を一覧するだけで判断できるようにかなり精度の良い計測結果が得られている。

7.2 テザーケーブル張力計測試験

平成2年1月、ドルフィン-3 K用No.4 テザーケーブルの振動試験が藤倉電線㈱で行われ、そのときに本装置の性能確認試験を実施した。この試験では、演算処理部を搬入できず、この装置を二分して試験時はレーザー変位計だけを実験場に持ち込み、演算処理部は実験時には用いなかった。その結果、この性能確認試験の計測要領は以下のとおりとした。

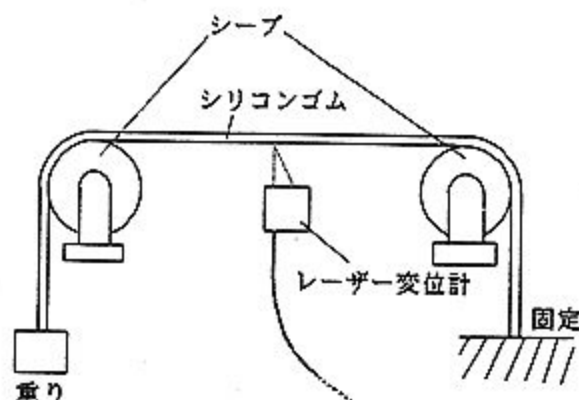


図17 室内実験

Fig.17 Confirmation test in room

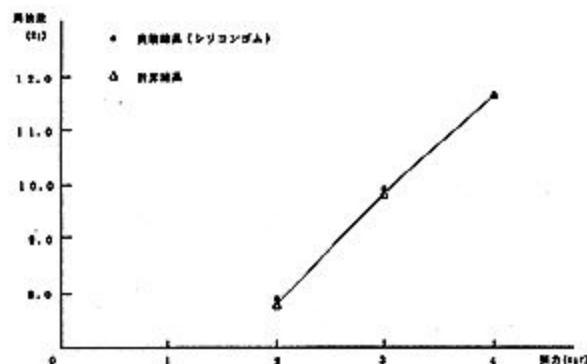


図18 室内試験結果

Fig.18 Results of the confirmation test in room

(1) 振動試験時

テザーケーブルの振動はレーザー変位計で計測し、高速アイソレータで電圧信号に変換して、アナログ式データロガーで磁気テープに記録する。

(2) 振動試験後

データが記録された磁気テープをアナログ式データロガーで再生し、AD変換器を経由して本装置の演算処理部で解析・演算処理し、張力を算定する。

この試験では、データの記録・再生にアナログ式データロガーを使用しているが、その他の機器はすべて本装置構成機器であり、特に性能確認に悪影響を及ぼす要素はほとんどないと考えられる。

本振動試験の要領は、以下のとおりである。

- ①試験装置：アムスラー引張試験機
- ②付加張力：0～3,000kgf
- ③張力付加機構：テザーケーブルに一端をウェッジを使って固定し、他端を試験機の油圧シリンダに接続して油圧シリンダ駆動により張力付加する。
- ④ケーブル長さ：約7m
- ⑤起振要領：ケーブル中央部を手で弾く。

以上の試験で得られた結果を図19に示す。この図から分かるように、付加張力と計測張力の差は非常に小さく、良い精度の結果が得られている。

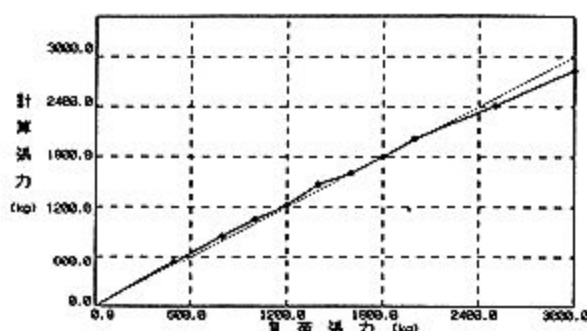


図19 張力計測試験結果

Fig.19 Results of the confirmation test by a tether cable

7 考 察

この張力測定法についてこれまで張力算定基礎式を導出し、この導出に条件として考慮されていない付加質量の影響、曲げ合成の影響、送り速度の影響及び境界条件の影響に関して各種方法でその程度を確認して次の張力変換式を作り上げた。

$$T = \frac{4WL^2}{g} f^2 - \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

さらに、第6章ではこの式の精度を確認するために二種類のまったく違う材料のケーブルを使って性能確認試験を実施したが、ともに良好な結果が得られ、この張力変換式に良好な精度が確認できた。一方、この試作装置による性能確認試験において実用に向けて以下の大きな問題があるのも露呈した。今後、この問題を解決しテザーケーブ

ル張力計測装置として実用化をさらに進める必要があると考えられる。

7.1 張力計測所要時間

この装置のテザーケーブル張力計測所要時間は、振動数が10Hz程度で5～6秒である。この所要時間の大半は高速フーリエ変換に必要な時間である。実用化するには、計測のリアルタイム性が必要であり、さらに所要時間の短縮化が必要と考えられる。

この試作装置では、振動解析に高速フーリエ変換(FFT)が用いられているが、このFFTの性格として次式の関係がある。

$$\text{①変換最大振動数 } f_{\text{MAX}} = \frac{1}{2t}$$

$$\text{②分解能 } \Delta f = \frac{1}{nt} = \frac{2}{n} \cdot f_{\text{MAX}}$$

$$\text{③サンプリング時間 } T = nt$$

但し、 t ：サンプリング周期

n ：サンプリング数

T ：サンプリング時間

この関係から、サンプリング時間と分解能は精度向上のために分解能を小さくするとサンプリング時間が増加するという反比例の関係にあり、また、サンプリング数を増加させると、最大振動数に対する分解能が向上することが分かる。したがって、同じサンプリング時間で計測するにはテザーケーブルの振動数を高く設定し、同時にサンプリング数を増加させることが分解能(張力計測精度)を改善できる。一方、テザーケーブルの振動数を高くすることはケーブル長さを短くすることであり、このことはテザーケーブルの振動振幅を小さくし、計測誤差の増大や計測不可能の状態を引き起こす可能性がある。これらの相反する問題の解決のためには、さらに検討を加える必要があるとともに、まったく違う別の振動解析法を探し出し適用することも考える必要がある。

8 おわりに

この研究により、テザーケーブルの負荷張力がその振動数から次式で十分な精度で得られることが分かった。

$$T = \frac{4WL^2}{g} f^2 - \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

また、試作の結果、採用した機器構成で十分な精度の負荷張力が得られることも分かった。しかしながら、計測時間に関しては、振動解析に高速フーリエ変換を採用したことによるむずかしさも明確になり、実用化のためには、今後さらにこの振動解析について、計測時間と精度及び他の振動解析法の適用等の問題を検討する必要があると考えられる。

(原稿受理：1991年5月21日)