

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420081

研究課題名(和文)ワイヤロ-プの内部摩擦の微分幾何学的考察

研究課題名(英文)Study of internal friction of wire rope in terms of differential geometry

研究代表者

今戸 啓二 (IMADO, Keiji)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：80160050

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ワイヤロ-プの内部摩擦による捩り振動の振幅減衰は、素線同士のマクロ滑りが支配的範囲では、等差級数的に減衰する。マクロ滑りの殆ど生じない小さな振幅状態では、指数関数的減衰である。捩りばね定数と摩擦トルクは張力に比例する。ワイヤロ-プの軸に垂直な素線の断面形状を求める式を、楕円近似法を拡張することで求めた。素線同士の接触螺旋を表わす式を、素線の中心螺旋の式を元に求めた。

研究成果の概要(英文)：An amplitude of damped torsional vibration due to an internal friction of a wire rope decreases from an arithmetic series like damping to an exponential damping according to the magnitude of an amplitude. Torsion spring constant and frictional torque are proportional to the tension of wire rope.

Simple approximate expression for a cross sectional profile of wire was derived by modifying an elliptical approximate method. The approximate expression used a simple base function so as to deform it like an exact cross section by using four constants. The cross sections obtained in this modified ellipse method corresponded well to the exact cross sections. A contact helix equation was also derived. Some basic properties of the contact helix were examined by using the contact helix equation obtained.

研究分野：機械工学、トライボロジ-、設計工学、福祉工学

キーワード：ワイヤロ-プ 微分幾何 内部摩擦

1. 研究開始当初の背景

ワイヤロープは大きな負荷能力と適度な柔軟性を持つため、様々な所に使われているが、実働中の張力は殆ど評価していないのが現状である。そのためワイヤロープの緩みや破断等に起因した事故は少なからず発生しており、実働中のワイヤロープの張力を、簡便に測定できる装置の開発が強く望まれている。張力測定法としては材料力学のテキストの例題として紹介されている垂直変位法は、大きな張力下にあるワイヤロープに対しては、長いスパンと大きな垂直力を必要とし、それに伴う張力増加とワイヤロープ断面が変形することで垂直変位が精度良く得られず殆ど役に立たない。他にも偶力を与える方法、横振動の周波数スペクトルより求める方法、横振動の振動数から求める方法などもある。しかしながら何れの方法も精度が悪い、高価・複雑なため現場では使えない等の多くの課題があり殆ど普及していない。

我々はワイヤロープの螺旋構造に着目し、ワイヤロープの捻じり剛性が張力に比例して増加することを実験で確認した。しかしながら、張力が複雑に変化すると、張力変化に伴いワイヤロープの内部摩擦も変化して、捻じりトルクによる張力の推定精度は低下する。そこで原点に立ち返り、ワイヤロープの基礎的研究として、数本の素線を撚り合せた最も簡単な場合を想定し、内部摩擦の理解に必要な接触曲線の方程式や、張力と接触応力状態との関係を考察することにした。

2. 研究の目的

後付式のワイヤロープ張力測定装置の開発や、ワイヤロープの疲労被害の究明には、ワイヤロープの内部摩擦を理論的に解明することが必要である。柔軟性の高い細い素線同志を撚り合せたワイヤロープのような構造体の内部摩擦は、構造が複雑なため、素線同志の接触線の方程式や、接触線が曲線となる場合の接触応力状態を求める式は未だ得られていない。本研究は数本の素線を撚り合せた最も簡単な場合を想定し、力学と微分幾何学を融合させた考察を行い、理論・実験の両面から、ワイヤロープの内部摩擦を理解するのに必要な、接触曲線の方程式、張力と接触応力状態の関係を求めることを目的とする。

3. 研究の方法

撚り合わせた2本の素線間の摩擦力評価のため、図1に示す摩擦力評価装置を試作した。装置は2本の鋼の丸棒にブロックA、Cをねじで固定している。一方、ブロックBはねじを介して固定ブロックCに連結し、紐の張力Fはねじにより加え、大きさはひずみゲージで検出する。プーリにつけたアームの先端に力Pをフォースゲージより与え、プーリにトルクを加えると素線同士にはマクロ的滑りが生じる。滑り始める直前の値を測定す

ることで、トルクから各素線に作用する張力が計算でき、その張力差が摩擦力となる。実験ではデジタルカメラで撮影した装置写真から、計算に必要な紐とプーリーとの接点、紐同士の交点、プーリーの中心点等を読み取り利用した。

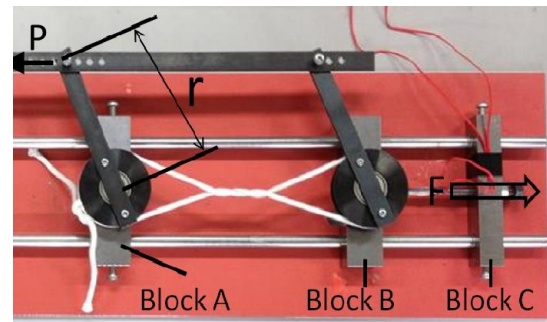


図1 素線間摩擦力測定装置

ることで、トルクから各素線に作用する張力が計算でき、その張力差が摩擦力となる。実験ではデジタルカメラで撮影した装置写真から、計算に必要な紐とプーリーとの接点、紐同士の交点、プーリーの中心点等を読み取り利用した。

図2に図2にねじり振り子式ワイヤロープ内部摩擦評価装置を示す。右はその拡大図である。張力は下のねじより与え、ひずみゲージで測定した。実験で使用したワイヤロープの直径は $\phi 5\text{mm}$ 、ねじり部の長さは $L=210\text{mm}$ である。 $\phi 300\text{mm}$ 、重さ 8.66kg 、慣性モーメント $I=0.0973\text{kgm}^2$ の鋼製主円板をワイヤロープの中央部にテーパをつけた軸を介して設置している。ワイヤロープのねじり剛性の異方性を相殺させるため、中央部をねじる構造とした。ねじり角度を求めるため、主円板の縁には角度目盛を貼り付けている。ねじり角を非接触で求めるため、僅かに傾斜させた $\phi 60\text{mm}$ の鋼製小円板を主円板の上部に置き、渦電流型非接触変位センサーと対向させた。変位センサーの出力電圧と円板の回転角度との関係は線形ではないため、スプライン補間を利用して電圧から振り角を求めた。実験は初期ねじり角 $\theta_0=60^\circ$ まで手でねじり、素早く手を離して自由振動させ、ワイヤの張力増加過程と減少過程の両過程で実験した。この装置に類似した、張力を主円盤の自重で与える方法でも実験を行っているが、共通部が多く装置についての説明は省略する。

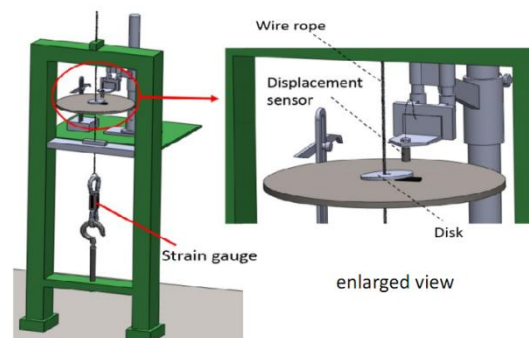


図2 ワイヤロープ内部摩擦評価装置

4. 研究成果

図3に素線の巻き数を1.5巻きと2.5巻きとした場合の、プーリー間張力Fと素線間摩擦力fとの関係を示す。巻き数nの増加に伴

い摩擦力 f の増加すること、巻き数 n の多い程、プーリー間の力 F に対する摩擦力 f の勾配 df/dF の大きくなる事が分かる。図 4 は巻き数 $n(=1.5)$ を一定にして、撚り合せ部の長さ h を 40mm と 50mm とした場合の素線間摩擦力 f を示す。 h が長くなれば螺旋ピッチの長くなることを意味し、ワイヤロープでいえばより角の小さくなることを意味する。図 4 より、撚り合わせピッチを短くすると、より角は大きくなり、摩擦力の増加すること、プーリー間張力 F に対する摩擦力 f の勾配 df/dF の大きくなる事が分かる。 $h=40\text{mm}$ の摩擦力の大きくなる原因は、素線のより角が大きくなり、プーリー間張力 F に対する実際の素線張力が大きくなるためである。

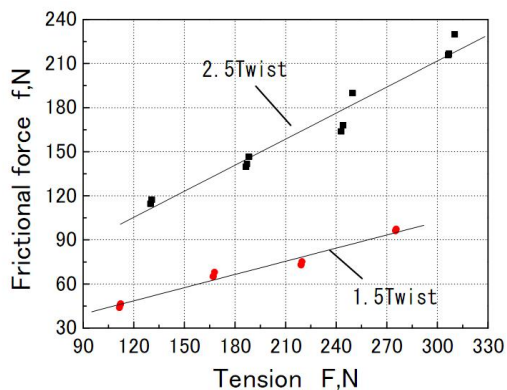


図3 プーリー間張力 F と摩擦力 f の関係

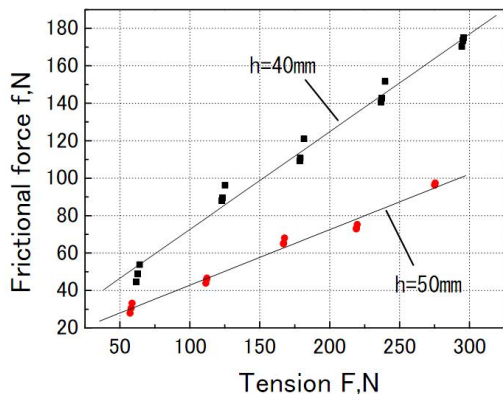


図4 プーリー間張力 F と摩擦力 f の関係

図 5 にワイヤロープ張力 $T=631\text{N}$ における、ねじり振動振幅の変化を示す。内部摩擦により減衰していることが確認できる。ねじり振動の初期においては振幅はほぼ等差級数的、その後は指数関数的に減衰する。等差級数的減衰は素線同士のマクロ的滑り、指数関数的減衰状態では微視的滑りに起因するものと考えられる。図 6 にワイヤロープの振りばね定数と張力の関係を示す。張力上げ下げ両過程において、ばね定数は張力に比例して大きくなる事が分かる。このことは振りトルクより張力が推定可能なことを意味する。

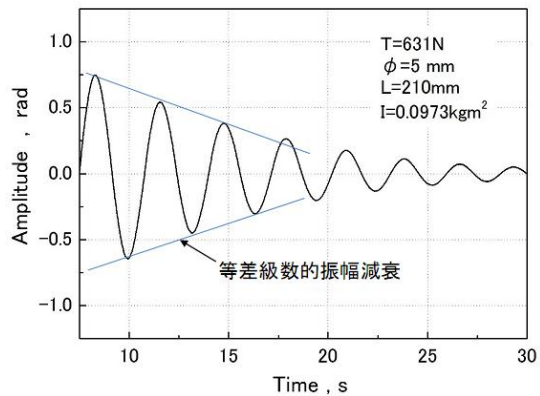


図5 ワイヤロープのねじり振動振幅の減衰

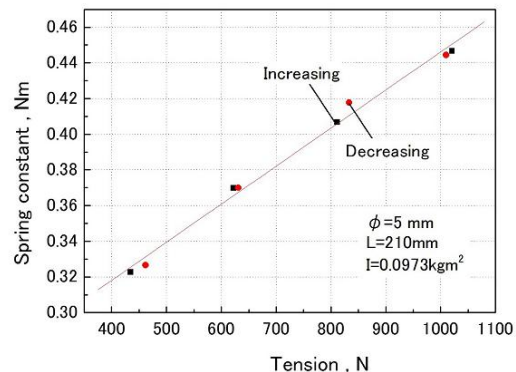


図6 ワイヤロープ張力と振り剛性の関係

これまでの実験結果より、ワイヤロープの内部摩擦を理論的に考察するには、素線同士の接触線の方程式が必要となるが、そのためには素線の断面曲線を知る必要がある。

螺旋状に巻かれた素線同士の接触線を求めるには、ワイヤロープを垂直に切断した際の、素線の断面曲線の式が必要になる。理論的には位相の異なる断面曲線方程式を連立して解けばその重根が接点となる。しかしながら、断面曲線の方程式を求めることさえ容易ではなく、素線の切断面を G.A.Costello は楕円近似している。一方、K.Feyrer はパラメータを利用することで、極座標系で厳密な方程式を導出した。楕円近似は取り扱いが容易なもの、より角の増加とともに精度は低下する。図 7 にワイヤロープのより角 α と素線の断面曲線の例を示す。

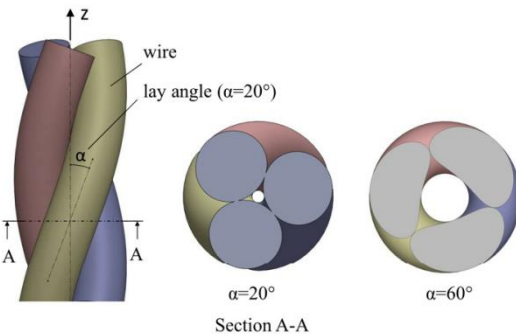


図7 螺旋のより角 α と素線の断面曲線の例

断面曲線に対する接線を求めるため、厳密式を微分すれば、極めて複雑となり実用的ではなくなる。そのため K.Feyrer の著書の中に

は接触線の式は求めている。小野進のワイヤロープの微分幾何学の著書にも素線同士の接点を通過する共通法線は試行代入法で求めるとのみ書かれているだけである。そこで素線断面曲線を求める場合、楕円近似による容易さと、厳密式の正確さの両立を目指した修正楕円近似法を考案した。主な計算手順は次の通りである。

1. より角 α が与えられた場合の近似楕円を計算する。
2. 原点から近似楕円上の点までの距離 R と偏角 ϕ を求める。
3. R に修正係数 f_R を乗じることで近似楕円を修正する。

修正係数 f_R は θ をパラメータとする素線の中心螺旋の位置ベクトル \mathbf{r} の式、

$$\mathbf{r} = a \cos \theta \mathbf{i} + a \sin \theta \mathbf{j} + b \theta \mathbf{k} \quad (1)$$

の係数 a と b の比 b/a で整理した。 b/a が大きい程より角 α は小さくなる。図 8 に修正係数 f_R の偏角 ϕ に対する変化を示す。図 9 に K.Feyrer の式を利用して求めた正確な素線断面曲線を青で、考案した修正楕円近似法で求めた断面曲線を赤で示す。基礎となる近似楕円も破線で示している。修正楕円近似法で求めた断面曲線は、正確な断面曲線に殆ど一致していることが確認できる。

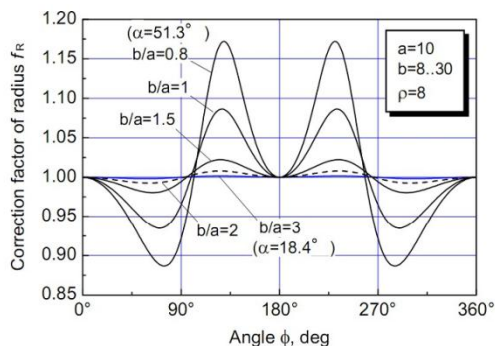


図 8 動径修正係数 f_R の偏角 ϕ に伴う変化

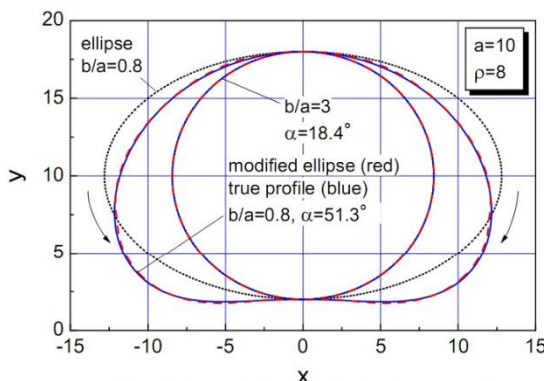


図 9 修正楕円近似と正確な断面曲線の比較

つぎに、素線の断面形状が計算できれば、ワイヤロープの中心から断面形状を挟む 2 つの接線が計算できる。ワイヤロープが半径 ρ の n 本の素線で構成されていれば、2 つの接線の交角が $2\pi/n$ となる点が接点になる。この点は数値計算により求められ、その点の

座標を (x_P, y_P, z_P) とする。素線の中心螺旋から接触点への位置ベクトル \mathbf{R}_P と、中心螺旋に対する接線ベクトル \mathbf{t} が直交していることを利用した方程式

$$\mathbf{R}_P \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (2)$$

を θ について解き、その解を θ_P とする。つぎに中心螺旋のパラメータ θ_P における主法線ベクトル \mathbf{n}_P を、接線ベクトル \mathbf{t} の回りに角度 ϕ_P

$$\phi_P = \cos^{-1}(\mathbf{n}_P \cdot \mathbf{R}_P / |\mathbf{R}_P|) \quad (3)$$

だけ回転させると、目的とした接触線の方程式が得られる。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \cos \theta + B \sin \theta \\ A \sin \theta - B \cos \theta \\ b\theta + C \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$A = a - \rho \cos \phi_P, B = \frac{\rho b \sin \phi_P}{\sqrt{a^2 + b^2}}, C = \frac{\rho a \sin \phi_P}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

(4)より接触線の曲率 κ_C や捩率 τ_C が計算できる。

$$\kappa_C = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{A^2 + B^2 + b^2}, \tau_C = \frac{b}{A^2 + B^2 + b^2} \quad (5)$$

(5)から接触点応力が計算できる。図 10 に中心螺旋、断面曲線、接触線を計算した一例を示す。計算の正しいことが確認できる。

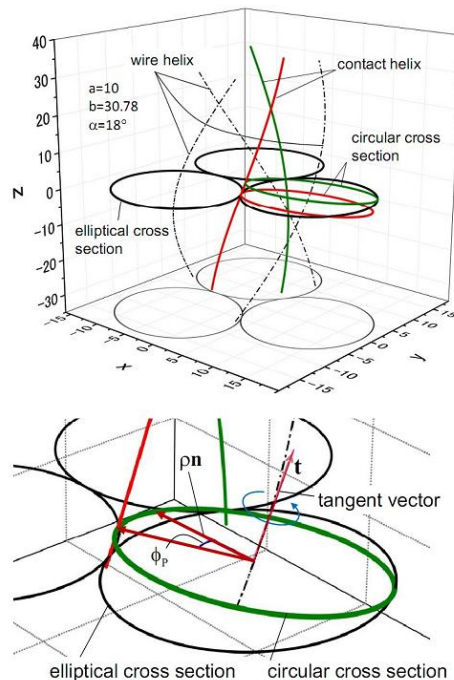


図 10 三本の素線からなるワイヤロープの断面図、素線中心螺旋、接触螺旋、及び断面拡大図と接線ベクトル \mathbf{t} 、法線ベクトル \mathbf{n} の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① Keiji IMADO, Kiyoshi TERADA, Novel coupling applicable in off-centered condition, Bulletin of the JSME vol.3 No.1, 2016, pp.1-9. 査読有 DOI:10.1299/mej.15.00328

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① 今戸啓二, ワイヤロープの接触螺旋に関する基礎的研究, トライボロジー会議 秋 2016, Oct. 12-14, 2016, (新潟県・新潟市)
- ② K. Imado, Approximate expression for cross sectional profile of wire and contact helix equation for study of internal friction of wire rope, NordTrib 2016, Jun 14-17, 2016, Hämeenlinna (Finland)
- ③ 今戸啓二, ワイヤロープの内部摩擦に関する基礎的研究, トライボロジー会議 2016, May 23-25, 2016, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京・渋谷区)
- ④ Keiji Imado and Kiyoshi Terada, Development of Novel Coupling of Looped Belt Type, ITC TOKYO 2015, Sep. 16-20, 2015, Tokyo University of Science (東京・葛飾区)
- ⑤ Keiji Imado, Kiyoshi Terada, Thomas Harran, Novel Joint Applicable in Off-Centered Condition, ICMMDT2014, April 22-25, 2015 沖縄コンベンションセンター (沖縄県・宜野湾市)
- ⑥ 峯尾仰生, 三浦篤義, 今戸啓二, ねじり振り子を利用したワイヤロープの内部摩擦に関する研究, 日本機械学会 九州支部講演会, Mar. 13, 2015, 福岡大学 (福岡県・福岡市)
- ⑦ 今戸啓二, 峯生仰生, 三浦篤義, ねじり振り子を利用したワイヤロープの内部摩擦の評価, トライボロジー会議, Nov. 11-7, 2014, いわて県民情報交流センター (岩手県・盛岡市)
- ⑧ 峯尾仰生, 岡田直大, 今戸啓二, 縋り合せた素線間の摩擦に関する基礎的研究, トライボロジー会議 春 東京, May 19-21, 2014, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京・渋谷区)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今戸 啓二 (IMADO, Keiji)
大分大学・工学部・教授
研究者番号：80160050

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()