# T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

## 論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題	   高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 第四報:長軸間   距離試験機の製作と周波数応答
Title	Basic Study for Drive Mechanism with Synthetic Fiber Rope -Fourth report: Testing Machine for Long-distance Transmission and Frequency Response Measurement-
著者	   高田敦, 遠藤玄, 鈴森康一, 難波江裕之, 水谷義弘, 鈴木良郎
Author	Atsushi Takata, Gen Endo, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, yoshihiro mizutani, Yoshirou Suzuki
掲載誌/書名	ロボティクス・メカトロニクス講演会2017講演論文集, Vol. , No. , pp.
Journal/Book name	Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Issue date	2017, 5
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者(最終)版です。 This file is author (final) version.

### 高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 一第四報:長軸間距離試験機の製作と周波数応答一

Basic Study for Drive Mechanism with Synthetic Fiber Rope -Fourth report: Testing Machine for Long-distance Transmission and Frequency Response Measurement-

> ○ 高田敦(東工大) 正 遠藤玄(東工大) 正 鈴森康一(東工大) 正 難波江裕之(東工大) 正 水谷義弘(東工大) 正 鈴木良郎(東工大)

Atsushi TAKATA, Tokyo Tech,takata.a.ac@m.titech.ac.jp Gen ENDO, Tokyo Tech Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech Yoshihiro MIZUTANI, Tokyo Tech Yoshiro SUZUKI, Tokyo Tech

Synthetic fiber ropes, which are lightweight and have high tensile strength and flexibility, have attracted attention as an alternative to stainless steel wire rope. This study clarifies various physical characteristics of synthetic fiber ropes to design a tendon-driven mechanism. This paper investigates a viscoelasticity model for Ultra High molecular weight Polyethylene (UHPE) rope and its dynamic property applied to a long distant antagonistic tendon-driven servo system. We confirm that UHPE can be modeled by four element model, and obtained its transfer function of a tendon-driven servo system. The validity of the transfer function was confirmed by a frequency response experiment.

Key Words: Tendon-driven, Synthetic fiber rope, Servo control

#### 1 緒言

日本の化学繊維の研究開発は世界トップレベルにあり,高機 能,高性能な化学繊維の開発が盛んである [1]. これらの化学繊 維を用いたワイヤにはステンレスワイヤと同等かそれ以上の引張 強度を持つものもあり,本研究ではそれらを高強度化学繊維ワイ ヤと呼ぶ.近年では,筋骨格ロボット [2] や四足歩行ロボット [3] などの駆動系として高強度化学繊維ワイヤが用いられている.

従来から利用されている金属ワイヤについては日本工業規格に ワイヤの構成,破断荷重,検査方法などが定められている.しか し,高強度化学繊維ワイヤについては繊維メーカが原糸の資料を 公開しているものの(例えば [4]),ワイヤとしての特性は引張強 度のみがメーカから提供される.化学繊維ワイヤが金属ワイヤに 代わって広く利用されるためには,ワイヤ特性の試験法の確立と 種類豊富な化学繊維ワイヤの特性比較が必要である.

本研究は高強度化学繊維を用いたワイヤ駆動のための諸特性を 明らかにしていくことを目的としている [5,6].本報ではワイヤ が機構の周波数特性に与える影響に注目する.長軸間距離試験機 を製作し,周波数応答測定を行う.長距離の動力伝達が容易であ ることはワイヤ駆動の利点であるが,ワイヤが長くなることで, ワイヤ特性が機構に与える影響が大きくなるため検証が必要であ る.また,長軸間距離試験機に用いたワイヤの粘弾性を測定する ことで,試験機の周波数特性をモデル化し,周波数応答の測定結 果と比較する.

#### 2 高強度化学繊維ワイヤの粘弾性測定

高強度化学繊維ワイヤは瞬間弾性,粘弾性,及び定常流の性 質を持つことから,その力学特性を表すモデルとして図1に示 す4要素モデル[7]がしばしば用いられる.しかし,高強度化 学繊維ワイヤには非線形な弾塑性が大きく現れ,線形性を仮定 した粘弾性測定の問題となる.繋留用の化学繊維ワイヤについ て,J.Floryらは弾塑性をラチェットとばねの並列要素により表 現し,4要素モデルと組み合わせたモデル(図2)を提案した[8]. このモデルが適用できるロープでは,使用する荷重を超える荷 重を事前に負荷することで,ラチェット要素の伸びがその荷重 でのひずみを保存するため,使用中の弾塑性ひずみの進展を抑 えられることに注目した.また,これをプリストレッチ処理と 呼ぶことにする.次に繰り返し荷重試験を動荷重試験機(島津 製作所:SERVOPULSER)で行い,本研究で対象とする直径2 mm の細い UHPE(超高分子量ポリエチレン) ワイヤ (ハヤミ工 産:DB-96HSL, 原糸は Dyneema®) についても J.Flory らのモ デルが適用できることを確認した.

続いて、プリストレッチ処理を施した UHPE ワイヤで定ひず み速度引張試験を引張試験機(島津製作所:AG-I) で行った. 図3の青線が荷重の時系列測定値である.この測定値と式(1)に 示す4要素モデルの理論解 $f_{model}(t)$ の残差2乗和を最小化する ことにより4要素モデルの粘弾性パラメータ $k_1$ ,  $c_2$ ,  $k_3$ ,  $c_3$ を求 めた.図1中の $k_1$ ,  $k_3$ がひずみ当たりの弾性係数,  $c_2$ ,  $c_3$ がひ ずみ当たりの粘性係数である.なお,  $\varepsilon$ は全ひずみ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ はそれぞれ対応する要素のひずみ,  $f_{model}$ は荷重である.残差2 乗和の最小化の結果が図3の赤線であり、粘弾性パラメータを 表1に示す.



Fig.1: Four element model Fig.2: J.Flory's model [8]

$$f_{\text{model}}(t) = \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A+B}{C}t\right) \left(\int_0^t \exp\left(-\frac{A+B}{C}x\right) dx\right) (D+B) - \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A-B}{C}t\right) \left(\int_0^t \exp\left(-\frac{A-B}{C}x\right) dx\right) (D-B) - \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A-B}{C}x\right) dx - \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A-B}{C}x\right) dx\right) (D-B) - \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A-B}{C}x\right) dx - \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A-B}{C}x$$

$$D = c_2 k_1 - c_2 k_3 + c_3 k_1$$



**Fig.3**: Curve fitting for identification of model parameters

#### 3 ワイヤの粘弾性と長軸間距離試験機の周波数特性

製作した長軸間距離試験機を図4に示す.この試験機は入力, 出力ともに、プーリの回転角度であるワイヤ駆動サーボ機構となっ ている.入力プーリは 150 W の DC モータ (MAXON MOTOR 製 301830) で駆動され,入力プーリの回転は拮抗する2本のワイ ヤにより出力プーリに伝達される. ワイヤの経路長は 15.2 m で ある.なお、プーリの回転角度は反時計回りを正とする.入力、 出力プーリの変位を回転センサ (オムロン製エンコーダ E6B2-CWZ1X) により分解能 0.18 deg で計測し、これらを入力値、出 力値とする. さらに, ワイヤ張力をそれぞれ入力, 出力プーリ付 近の計4点で計測する.実際の試験機では、試験機の全長を抑え るため、2本のワイヤは自由回転する中継プーリを3個経由して いる. 使用したワイヤは粘弾性測定を行った UHPE ワイヤと同 じものである. 試験機の伝達関数の導出には図5のモデルを用 いた. 図5の粘弾性パラメータ k1, c2, k3, c3 は表1に示す単 位ひずみ当たりのパラメータの値をワイヤ長さで除したものであ る.また,張力振幅 f は 2 本のワイヤの張力差の半分の値であ る. I は試験機の慣性モーメントであり、3DCAD モデルと材料 密度から求めた. C は粘性抵抗であり, ワイヤを張っていない状 態でプーリ軸を自由回転させ、そのときのプーリ軸の運動方程式 が $I\ddot{\phi} + C\dot{\phi} = 0$ であることから、軸の角速度の減衰を測定する ことで求めた.

この試験機の周波数特性測定を入力プーリの回転角度を正弦波 で変化させ,出力プーリの回転角度の応答を計測することで行っ た. ワイヤの非線形な弾塑性を抑制するためにプリストレッチ処 理として, UHPE ワイヤに約 300 N の荷重を事前に加えた. 試 験機に UHPE ワイヤを取り付けた際の張力は約 60 N である. 入力の正弦波は振幅を 8.0 deg とし,入力周波数は 0.1 Hz から 5.0 Hz まで掃引した. 慣性負荷として, 出力プーリの軸に試験 機の慣性モーメント *I* が 2.84×10<sup>4</sup> kg·m<sup>2</sup> となるおもりを固定 した.結果の時系列データを図 6 に示す.青線が入力,赤線が出 力であり,入力,出力のフーリエ変換により求めたボード線図が 図7の青線である.また、図5に示す試験機のモデルと表1の 粘弾性測定の結果より求めた伝達関数が式(2)であり、図7の赤 線である.周波数応答の測定値と伝達関数がおおむね一致するこ とを確かめ, 粘弾性測定によりワイヤ駆動機構の周波数特性をモ デル化できることを示した.よって、本報で用いた粘弾性測定, 伝達関数はワイヤ駆動サーボ機構の制御や設計の際のシミュレー ションに応用することができると考えられる.

#### 4 結論

本報では,高強度化学繊維ワイヤが駆動系の周波数特性に与え る影響を検証するために長軸間距離試験機を製作し,周波数特性 試験を行った.また,ワイヤの粘弾性測定から長軸間距離試験機 の伝達関数を求め,測定した周波数応答と比較しおおむね一致す ることを確認した.



Fig.4: Testing machine for long-distance transmission



Fig.5: Analytical model of testing machine



$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[\phi]}{\mathcal{L}[\theta]} = \frac{r_1}{\frac{Is^2 + Cs}{2r_2} \cdot \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{c_2s} + \frac{1}{k_3 + c_3s}\right) + r_2}$$
(2)

#### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開 発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです.

#### 参考文献

- 日本化学繊維協会 よくわかる化学せんい, http://www.jcfa.gr. jp/fiber/super/index.html 2017 年 3 月 1 日閲覧.
- [2] T. Kozuki, T. Shirai, Y. Asano, Y. Motegi, Y. Kakiuchi, K. Okada and M. Inaba, "Muscle-tendon complex control by "Tension controlled Muscle" and "Non-linear Spring Ligament" for real world musculoskeletal body simulator Kenshiro", 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 875-880, Aug 2014.
- [3] S. Kitano, S. Hirose, A. Horigome, and G.Endo, "TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energyefficient walking", ROBOMECH Journal, Vol. 3,NO. 1,p. 8, 2016.
- [4] 東洋紡, ザイロン 技術資料, http://www.toyobo.co.jp/seihin/ kc/pbo/technical.pdf 2017 年 3 月 1 日閲覧.
- [5] 遠藤 玄,洗 津,広瀬 茂男","高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 第一報:端部クランプ固定・曲げ比率が引張強度に与える影響",第 30 回日本ロボット学会学術講演会,4B3-2, Sep 2012.
- [6] 堀米 篤史, 遠藤 玄, 鈴森 康一, "高強度化学繊維によるワイヤ駆動のための基礎的検討 第二報:繰り返し曲げが引張強度に与える影響", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A1-Q08(1)-2A1-Q08(2), May 2015.
- [7] 中江 利昭, レオロジー工学とその応用技術, フジ・テクノシステム, pp. 55-56, 2001.
- [8] John F. Flory Vidar, Ahjem Stephen and J. Banfield, "A New Method of Testing for Change-in-Length Properties of Large Fiber-Rope Deepwater Mooring Lines", Offshore Technology Conference, 30 April - 3 May 2001, Huston, Texas U.S.A., 2001.