

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               | <a href="http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html">http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html</a>                                            |
| 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。<br>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 — 第四報：長軸間距離試験機の製作と周波数応答 —

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 鈴木康一 (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 (ハヤミ工業: 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  $f_{\text{model}}(t)$  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、 $f_{\text{model}}$  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。

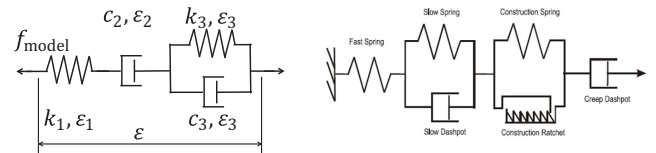


Fig.1: Four element model Fig.2: J.Flory's model [8]

$$f_{\text{model}}(t) = \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A+B}{C}t\right) \left( \int_0^t \exp\left(-\frac{A+B}{C}x\right) dx \right) (D+B) - \frac{k_1 \rho}{2B} \exp\left(-\frac{A-B}{C}t\right) \left( \int_0^t \exp\left(-\frac{A-B}{C}x\right) dx \right) (D-B) \quad (1)$$

$$A = c_2 k_1 + c_2 k_3 + c_3 k_1$$

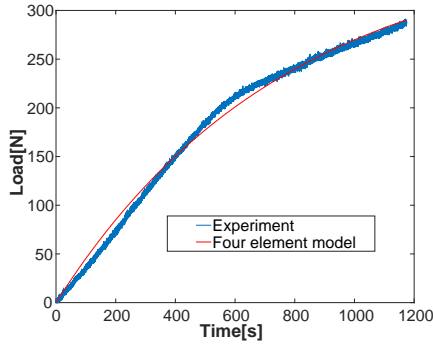
$$B = \sqrt{c_2^2 k_1^2 + 2c_2^2 k_1 k_3 + c_2^2 k_3^2 + 2c_2 c_3 k_1^2 - 2c_2 c_3 k_1 k_3 + c_3^2 k_1^2}$$

$$C = 2c_2 c_3$$

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

**Table 1:** ひずみ当たりの弾性係数, 粘性係数

| $k_1$ [N]          | $c_2$ [N·s]        | $k_3$ [N]          | $c_3$ [N·s]        |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $6.64 \times 10^4$ | $4.47 \times 10^7$ | $4.68 \times 10^5$ | $4.62 \times 10^5$ |



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

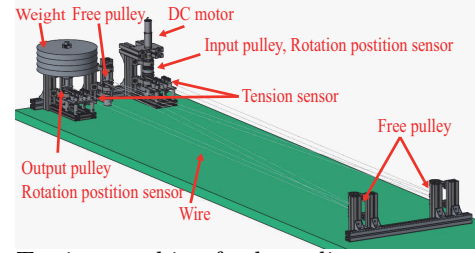
### 3 ワイヤの粘弾性と長軸間距離試験機の周波数特性

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、プリーの回転角度であるワイヤ駆動サーボ機構となっている。入力プリーは150 WのDCモータ (MAXON MOTOR製 301830) で駆動され、入力プリーの回転は拮抗する2本のワイヤにより出力プリーに伝達される。ワイヤの経路長は15.2 mである。なお、プリーの回転角度は反時計回りを正とする。入力、出力プリー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、出力プリー付近の計4点で計測する。実際の試験機では、試験機的全長を抑えるため、2本のワイヤは自由回転する中継プリーを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  $k_1$ ,  $c_2$ ,  $k_3$ ,  $c_3$  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リー軸を自由回転させ、そのときのプリー軸の運動方程式が  $I\dot{\phi} + C\phi = 0$  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。

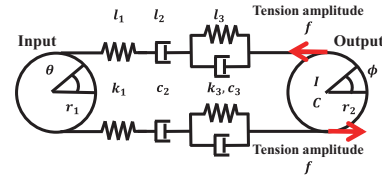
この試験機の周波数特性測定を入力プリーの回転角度を正弦波で変化させ、出力プリーの回転角度の応答を計測することで行った。ワイヤの非線形な弾塑性を抑制するためにプリストレッチ処理として、UHPEワイヤに約300 Nの荷重を事前に加えた。試験機にUHPEワイヤを取り付けた際の張力は約60 Nである。入力の正弦波は振幅を8.0 degとし、入力周波数は0.1 Hzから5.0 Hzまで掃引した。慣性負荷として、出力プリーの軸に試験機の慣性モーメント  $I$  が  $2.84 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  となるおもりを固定した。結果の時系列データを図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認でき、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と示した。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

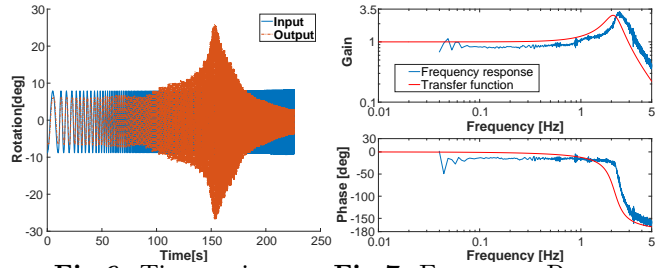
本報では、高強度化学繊維ワイヤが駆動系の周波数特性に与える影響を検証するために長軸間距離試験機を製作し、周波数特性試験を行った。また、ワイヤの粘弾性測定から長軸間距離試験機の伝達関数を求め、測定した周波数応答と比較しおおむね一致することを確認した。



**Fig.4:** Testing machine for long-distance transmission



**Fig.5:** Analytical model of testing machine



**Fig.6:** Time series

**Fig.7:** Frequency Response

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

### 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

- [1] 日本化学繊維協会 よくわかる化学せきい, <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 Biomechanics, 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 energy-efficient 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.