

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 論題(和文) | 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 |
| Title | |
| 著者(和文) | 遠藤玄, 洗津, 広瀬茂男 |
| Authors | Gen Endo, Shin Sen, SHIGEO HIROSE |
| 出典 / Citation | 日本ロボット学会学術講演会, , 4B3-2 |
| Citation(English) | , , , 4B3-2 |
| 発行日 / Pub. date | 2012, 9 |
| 権利情報 / Copyright | 本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2012 The Robotics Society of Japan. |

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

遠藤 玄 (東京工業大学) 洗 津 (東京工業大学) 広瀬 茂男 (東京工業大学)

1. はじめに

近年、高い性能・機能を有する化学繊維の開発が盛んに行われており、特に強度約 2[GPa] 以上、弾性率約 50[GPa] 以上の高強度・高弾性率の繊維を一般に「スーパー繊維」と呼ぶ [1]。本分野の製造では日本は世界のトップレベルの技術水準にあり、様々な繊維が開発・販売されている (図 1)。これらの化学繊維の中には、従来機構駆動系として用いられてきたステンレスワイヤと同等かそれ以上の強度を有するものもあり、かつ、密度は約 1/5 ~ 1/8 程度と著しく軽量である。またステンレスワイヤに比してしなやかに曲がることから機構をコンパクトに構成できる可能性がある。実際、このような特長を活かして腱駆動 [2][3]、人工筋アクチュエータ [4][5]、能動内視鏡 [6][7] 等の研究で用いられている。

ところで従来の金属製のワイヤロープについては日本工業規格において機械・建設・索道・エレベータなどの一般用 (JIS G3525:2006)、航空機用 (JIS G3535:1998)、医療器械や原子炉・運動器具など操作用 (JIS G3540:1995) などの規定があり、破断荷重や耐久性の試験方法が詳細に規定されている。また用途に応じて設計上の安全率も各種法令により明確に定められている。

一方で化学繊維については原系についての繊維物性を公開しているものの (例えば [8])、ロープとして構成した際の特性については、多くの場合明らかではなく、ほとんどは単に引張強度のみがメーカから提供される。また実用化されている用途としてはロープ・釣り糸・漁網・レジャー用品・防護服などであり、駆動伝達系として用いられている例はほとんどない。したがってロボットに代表されるような機械駆動系の機構要素として化学繊維が本当に金属製ワイヤロープの代替となり得るかどうかは、今後様々な特性試験を行い詳細に比較検証する必要があると筆者らは考える。実際、筆者らは超高分子量ポリエチレン繊維について過去にいくつかの実験を行い、報告しているが [9]、その後新しい

図 1 主要なスーパー繊維 [1]

| 繊維名 | 商品名 | メーカ | 用途 |
|---------------|--------|---------|-----------------------------------|
| バラ系アラミド繊維 | テクノーラ | 帝人テクノ | タイヤコード、ベルト、防弾服、防護服、航空機部材、コンクリート補強 |
| | トワロン | プロダクツ | |
| | ケブラー | 東レ・デュポン | |
| 超高分子量ポリエチレン繊維 | ダイニーマ | 東洋紡績 | ロープ、防護服、スポーツ・レジャー用品、釣り糸、漁網 |
| ポリアリレート繊維 | ベクトラン | クラレ | ロープ、漁網、スポーツ・レジャー用品、電気資材、成型品 |
| PBO繊維 | ザイロン | 東洋紡績 | 防護材、ベルト、ロープ、セイルクロス、各種補強材、耐熱クッション材 |
| 炭素繊維 | トレカ | 東レ | スポーツ、レジャー用品、航空・宇宙部材、自動車材、風力発電ブレード |
| | テナックス | 東邦テナックス | |
| | パイロフィル | 三菱レイヨン | |

繊維も開発されていることからさらなる検討が必要である。

本研究は今後継続的に諸特性を明らかにして行く予定であるが、本報では特にワイヤ端部のクランプ固定および曲げ比率が強度に対してどのような影響を及ぼすかについて検証する。これらに着目した理由は、一般に表示されている引張強度のみを見ると一見素晴らしい特性に思えるが、端部の固定方法やワイヤの曲げ比率などに依存して、大きく強度低下が起きる懸念があるためである。

2. 公称引張強度

化学繊維ワイヤの引張強度については化学繊維フィラメント系試験方法 (JIS L 1013) などに試験方法が規定されているものの、高強度ゆえ計測が難しいこともあり、実際には各メーカ独自の手法を用いているのが実情のようである。化学繊維ワイヤを製作・販売しているメーカの一つに引張強度計測の方法についてヒアリングをしたところ、図 2 に示す試験装置を用いているとの回答を得た。「引張試験機の上下に直径の大きなドラムプリー ($\phi 255[\text{mm}]$) を設置し、それに試料を 2 回巻きつけた後、端部をクランプで固定し、速度 300[mm/min] で引張る。クランプ部以外で破断したときの力を引張強度とする。」

ドラムプリーを用いる理由は、後述するオイラーのベルトの定理により巻きつけることにより試料とドラム間の摩擦力で張力を支え、試料端部の固定に必要な保持力を低減するためである。また大きな曲率で曲げることによる強度低下を防ぐため、ドラムプリーは試料直径に比して 60 倍以上の大きな値となっている。

このような試験方法で得られた引張強度はいわば理想的な条件下での最大引張強度であり、実際の機構メカニズム設計の際に同条件を常に満たすことはスペース的に極めて困難である。したがって設計上の容積制約を加味した上で実質的な引張強度を把握する必要がある。

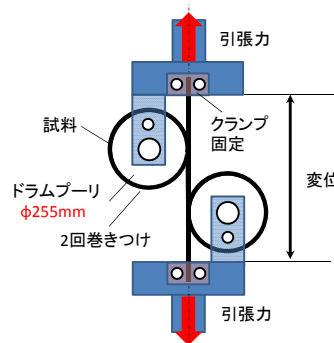


図 2 公称引張強度測定装置の例

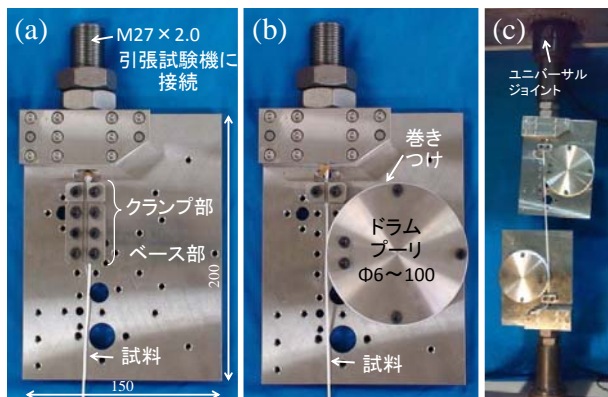


図3 試験治具外観

3. 試験装置と試料

本報ではワイヤ端部のクランプ固定およびワイヤの曲げ比率と引張強度との関係を計測する．図3に製作した試験治具外観を示す．ベース部は板厚 20[mm] の SUS303 で製作し，ワイヤが引張試験機の軸線に来るよう設計した．図3(a)にクランプ固定の様子を示す．長さ 15,30,45[mm] のクランプブロックを製作し，ブロックのエッジは糸面取りとした．これらのブロックを組み合わせることでクランプする長さで保持力の関係を調べる．図3(b)にワイヤの曲げ比率と引張強度の関係を調べる装置を示す．曲げ比率とは，プーリ直径を D ，ワイヤ直径を d とした場合の D/d のことであり，俗に「デーバーデー」とも呼ばれる．本実験装置ではドラムプーリの直径を $\phi=6 \sim 100$ [mm] まで様々に製作した．図3(c)に引張試験機（島津製作所：AG-I，最大引張力 100[kN]）に取り付けた様子を示す．試験機にモーメントが作用しないよう，上部治具はユニバーサルジョイントを介して接続している．

試験したワイヤはいずれも線径 2.0mm の (1) 超高分子量ポリエチレン繊維（ハヤミ工産：DB-60，原系はダイニーマ）(2) 心材を PBO 繊維（ザイロン），外側は超高分子量ポリエチレン繊維（ダイニーマ）を編んだもので保護したワイヤ（ハヤミ工産：DY-20ZL）(3) ステンレスワイヤ（朝日インテック：7 × 19）の 3 種類である．(1) は現在ロボット研究に多く利用されており，低価格・低摩擦・軽量・高耐水性・高耐摩耗性などの利点があるが，一方で伸びが大きいという問題がある．一方で PBO 繊維は現在の有機繊維で最高強度であり，伸びが非常に少ない利点があるが耐摩耗性が低いという欠点がある．よって表面のみダイニーマを用いた (2) を選択した．(3) は比較対象として選定した．それぞれの公称引張強度は (1)1649[N]，(2)3209[N]，(3)2845[N] である．以降便宜上 (1)(2)(3) をそれぞれダイニーマ，ザイロンダイニーマ，ステンレスワイヤと呼ぶことにする．

4. 実験

4.1 クランプ固定強度実験

クランプする長さを 15 ~ 75[mm] まで変化させた場合の最大引張力を図4に，典型的な破断部の様子を図5に示す．クランプ部品はベース部に対して M5 キャップスクリューで締結されているがその締め付けトルクは試料 (1) は 6.5[Nm]，(2)(3) は 19.5[Nm] とした．

まず (1) ダイニーマについてはクランプ長さが

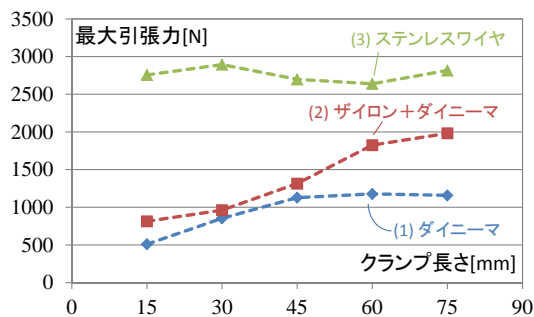


図4 クランプ長さで最大引張力

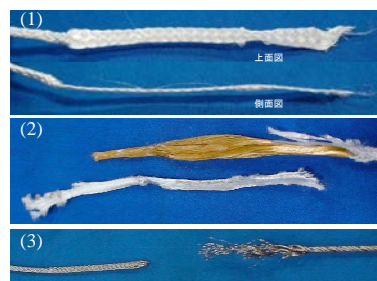


図5 破断の様子:左側でクランプ．(1) ダイニーマ (2) ザイロンダイニーマ (3) ステンレスワイヤ

45[mm] 以上ではクランプの下端部で引きちぎれるように破断した (図5(1))．またクランプ部は図5(1)に見られるように紙のように薄く潰されていた．15,30[mm] ではクランプによる摩擦力が十分ではなく試料が滑ることによってクランプ上部で扱かれるようにして破断した．(2) では外側を覆っているダイニーマのみが破断し，被覆が剥かれるようにしてクランプ部から滑りぬける様子が確かめられた．この様子はクランプ長さに依存しておらず，心線のザイロンが破断することもなかった．(3) ではクランプ長さに関係なくほぼ一定の引張力で破断していることが分かる．破断はクランプ下部の点で起こり，破裂音とともに一気に破断した．

最大の引張力を公称引張強度で除した値を強度効率とすると，(1)71%(2)62%(3)102%であり，ステンレスワイヤでは強度低下が全く見られないのに対し，化学繊維ワイヤでは 30 ~ 40% の低下が生じることが明らかになった．本実験結果はステンレスワイヤの固定法として一般的な挟み込みによるクランプを行うだけでは化学繊維の場合十分な固定ができないことを示している．

4.2 オイラーのベルトの定理

回転しない固定軸にワイヤを巻きつけることで高い張力を保ったまま固定することが可能であり，バイオリンやギター の弦，船の帆などに用いられている．この効果はオイラーのベルトの定理として定式化されている [10]．図6のようにワイヤ端部に $T_1, T_2 (T_2 > T_1)$ の張力が作用しているとき，巻きつき角を θ_w ，摩擦係数を μ とすると最大の張力 T_2 は次式で表される．

$$T_2 = T_1 e^{\mu \theta_w} \quad (1)$$

$\phi 100$ の SUS303 製プーリに対し (1)(2)(3) のワイヤを半周 ~ 3.5 周巻きかけ，一端に $T_1 = 9.8$ [N] の一定力を錘によって加え，他端をバネ秤を介して引張ることによってワイヤが滑り出した時の力 T_2 を測定する．結果を近

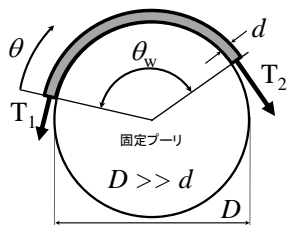
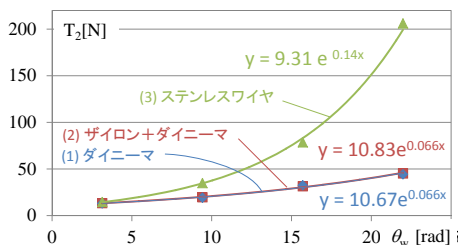


図6 オイラーのベルトの定理

図7 巻きつき角 θ_w と端部張力 T_2 の関係

似曲線式とともに図7に示す．結果から(3) ステンレスワイヤについては指数関数的に摩擦で支えられる張力が増大していることが分かるが，(1)(2)については殆ど線形であることが分かる．これは(3)では近似式から摩擦係数は0.14であるのに対し，(1)(2)では0.066とおよそ半分の小さな値であるためである．これは式(1)右辺をマクローリン展開し2次以上の項を微小として無視すると1次線形に帰着できることから説明できる．以上から摩擦係数の小さな化学繊維では巻きつけによる摩擦力増大の効果はステンレスワイヤほどは得られないことが分かり，固定プーリ表面にゴム材を巻くなどの何らかの対策が必要であることが示唆される．

4.3 曲げ比率 D/d と引張強度

金属製ワイヤの場合，プーリ直径 D とワイヤ直径 d の曲げ比率 D/d が小さくなると強度低下が起こることが一般に知られている [11]. 特に $D/d < 10$ の領域では強度低下が著しく，極端な例では $D = d$ ，すなわちワイヤ自己直径と同径の丸棒に引っ掛けて引張ると，約半分の引張力で破断する．よって用途に応じて最小の D/d が関連法規（例えばクレーン構造規格）などで定められており，その値は概ね 10 ~ 40 程度である．

化学繊維ワイヤはしなやかに曲がることから，高い曲率で曲げて，コンパクトな機構とする場合も数多い．このような場合，強度低下は起こらないのであろうか？

プーリ径を 6 ~ 100 [mm] の範囲で変化させ最大の引張力を調べた．ワイヤの固定はプーリに 5 ~ 8 回巻きつけた後，端部を長さ 15 [mm] のクランプで挟み込み固定した．クランプ部で滑りまたは破断が見られた場合は再実験を行った¹．結果を図8に示す．グラフより $D \geq 50$ [mm] の領域ではどのワイヤも最大引張力に変化は見られないが， $D \leq 30$ [mm] 付近から強度低下が見られる．図9は縦軸を強度効率，横軸を D/d として書き直したグラフである．強度低下の傾向は化学繊維もステンレスワイヤと同様で $D/d = 3$ の場合には 15 ~ 25% 程度の強度低下が発生することが分かった．

¹ただし試料(1) プーリ径 50 [mm] の測定では複数回の再実験で上下クランプ部どちらかで必ず破断が起きてしまい正確な計測は出来なかったため参考値として白抜きのプロットで掲載する．

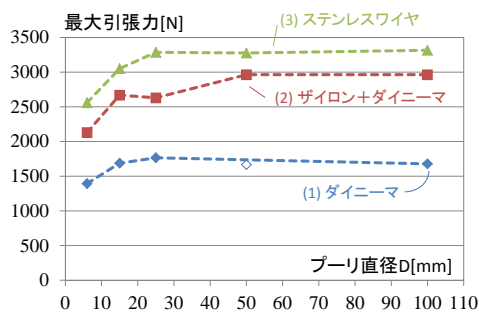
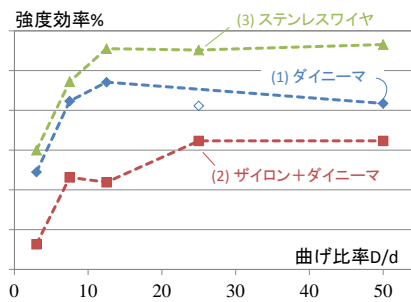


図8 プーリ直径と最大引張力の関係

図9 曲げ比率 D/d と強度効率の関係

5. まとめ

本報告では高強度化学繊維をワイヤ駆動系として用いる場合の基礎的検討が必要であることを指摘し，端部処理や曲げ比率によって強度低下が起こることを実験的に明らかにした．

謝辞

実験には東京工業大学機械物理工学専攻轟・水谷研究室の引張試験機を使用しました．また水谷義弘准教授，鈴木良郎助教には貴重な助言・指導を賜りました．ここに感謝いたします．

参考文献

- [1] 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>
- [2] 上月他：“人体模倣筋骨格ヒューマノイド健志郎の胸郭・肩の設計-肋骨状曲面を有する肩甲・胸郭構造の設計-”，Robomec，1A1-K11，2012.
- [3] 山野，高松，細田：“馴染み把持を実現する劣駆動人間型ロボットハンドの開発”，Robomec，1A1-A11，2008.
- [4] 岩田他：“高水圧 McKibben 型人工筋の開発と軽量スプレッターへの応用”，Robomec，2P1-A17，2009.
- [5] 潮崎他：“細型高収縮力人工筋の開発とテンセグリティ構造体への応用”，Robomec，1A2-C26，2010.
- [6] 熊谷，脇元，鈴森：“空圧駆動柔軟デバイスを用いた剛性変化型大腸内視鏡の開発-剛性変化デバイスの開発と基礎特性の確認-”，Robomec，2A1-K11，2009.
- [7] 倉田，高山，小俣：“管内螺旋捻転機構に関する研究”，Robomec，2A1-K13，2009.
- [8] 東洋紡績(株) 技術資料 ザイロン (R) <http://www.toyobo.co.jp/seihin/kc/pbo/technical.pdf>
- [9] 広瀬，内田，Chu：“新しいワイヤ駆動系についての考察”，Robomec，1CI2-3，1998.
- [10] E. R. Snow: The Load Deflection Behavior of Cable/Pulley Transmission Mechanism, Thesis (M.S.) Massachusetts Institute of Technology, 1994. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/36477>
- [11] 機械設計便覧編集委員会編：機械設計便覧（第3版），丸善，pp.812-823，1992