

# 超弾性合金線の動力伝達軸への応用に関する研究 —繰返しねじり試験機の開発—

## Study on Application of Superelastic Alloy Wire to Power Transmission Shaft —Development of Repetitive Torsion Testing Machine for Superelastic Alloy Wire—

○落合龍生(電機大・院) 田宮高信(産技高専) 五味健二(電機大)  
鈴木拓雄(産技高専) 杉本聖一(産技高専) 富田宏貴(産技高専) 柴田芳幸(産技高専)

Tatsuo OCHIAI, Tokyo Denki University, 5 Senjyu-Asahi-Chou, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

Takanobu TAMIYA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

Kenji GOMI, Tokyo Denki University 5 Senjyu Asahi Chou Adachi ku Tokyo 120 8551

Takuo SUZUKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

Seiichi SUGIMOTO, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

Hiroataka TOMITA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

Shigeyuki SHIBATA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

### 1. 緒言

超弾性合金線は超弾性合金製の線材であり、外力によって非線形な変形を生じて、外力を除荷すれば元の形状に戻る性質をもつ。図1は材料に外力を負荷したときの外力と変形量の関係を模式的に示したものである。図に示すように、(a)通常の金属材料の場合には弾性域を超えて負荷を加え材料を変形させると、塑性変形を生じ、除荷後には永久変形が残る。それに対し(b)超弾性合金の場合には除荷後に永久変形を生じない。このような性質を応用して、眼鏡のフレームや釣り竿など様々な製品に応用されている<sup>(1)-(2)</sup>。

著者らは超弾性合金線を従来にない新しい用途へ応用するための研究に取り組んでおり、本研究では動力伝達軸への応用可能性について検討をおこなっている。先行研究において、著者らはロボットハンドの指を駆動する動力伝達軸へ適用し、低負荷であれば超弾性合金線がわん曲した状態であっても回転動力の伝達が可能であることを実証的に示した<sup>(3)-(4)</sup>。このような超弾性合金線の応用は、わん曲した動力伝達経路における動力伝達を容易にすることができ、動力源を駆動部から離れた位置に設置することによって、ロボットハンドの駆動部周りの軽量化や簡素化、小型化が可能になると期待される。

しかしながら、超弾性合金線をこのような用途に応用した場合の強度特性については研究が行われておらず、繰返しねじり負荷を加えた場合のねじり特性の変化、疲労特性は不明なままである。従来の研究として、回転曲げ試験が行われた事例<sup>(5)</sup>が報告されているが、ねじりモーメントが負荷された状態での回転曲げ試験は行われておらず課題は多い。

そこで本研究では、超弾性合金線を動力伝達軸として用いることを想定し、任意の曲率を与えた状態で繰返しねじりを加えたときに生じるねじり特性の変化の計測に取り組んでいる。この目的のために計測用の試験機の開発をおこなった。限られた条件ではあるが、開発した繰返しねじり試験機を用いて実験をおこなったので結果を含めて報告

する。

### 2. 繰返しねじり試験機の開発

本研究のように、超弾性合金線を動力伝達に応用した事例は少なく、繰返しねじりに対する強度特性や曲げを加えた状態での強度特性の変化に関する研究が十分とは言えない

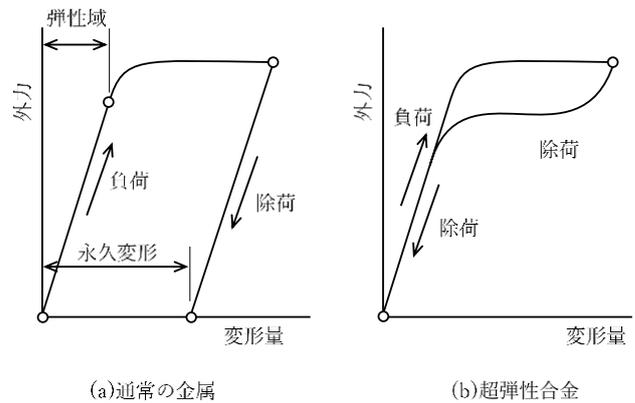


Fig.1 Comparison of stress-strain relationships of common materials and the superelastic alloy.

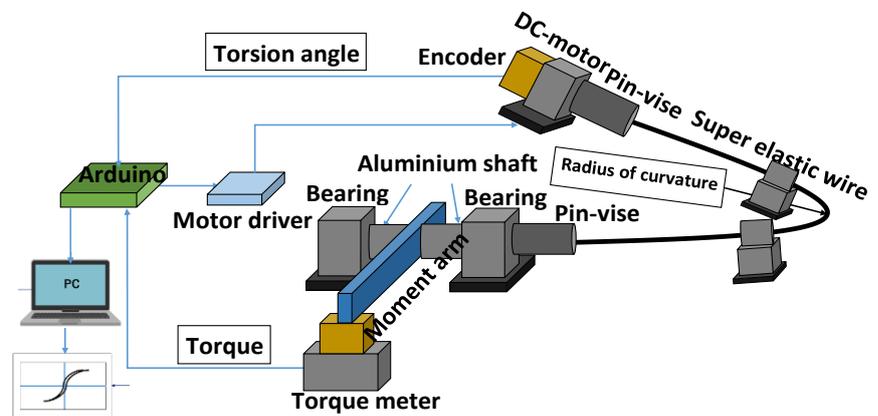


Fig.2 Schematic representation of repetitive torsion testing machine.

い。そこで本研究では、任意の曲率を与えた状態で繰返し  
のねじり荷重を加えることのできる繰返しねじり試験機の  
開発をおこなっている。

図 2 は開発した試験機の概略図である。超弾性合金線の  
両端はピンバイスで固定され、その一端には DC モータ  
から動力を入力する。動力源となるモータは、HAULHABER  
社製 DC モータ 3257G012CR を使用した。もう一端には回  
転自由な軸受けで並進方向を固定し、取り付けられたア  
ームをロードセルに接触させて回転を拘束して固定端とし  
た。ロードセルに生じる反力からねじりモーメントを計測  
することができる。また、超弾性合金線にねじりモー  
メントを負荷した際に生じる「よじれ(ねじれ座屈)」を  
抑制するため、ベアリングをガイドとして配置した。DC  
モータおよびベアリングは、マグネットベースで定盤上  
に固定される。マグネットベースを用いることにより、  
超弾性合金線に任意の曲率を与えて装置を配置する  
ことが可能である。なお、試験片となる超弾性合金  
の先端部は銅製スリーブに圧入した。これは、ピン  
バイスへの取付けによる損傷を防ぐとともに取付け  
の安定性向上を図るためである。

図 3 に曲げ半径 80mm の条件で試験装置を配置し、  
試験片を取り付けた状態を示す。図のように試験片  
の配置状態を台紙として設置し、それにあわせて  
マグネットベースを移動して曲げ半径を調整した。

本試験機の計測・制御には小型マイコン Arduino  
を用いる。ねじりモーメントは固定端のロードセル  
(共和電業社製 LTS-2KA) で反力を計測し求める。  
ひずみアンプには RobotShop 社製の Arduino 用  
シールド RBC-Onl-38 を用いた。ねじり角は DC  
モータに取付けられたロータリーエンコーダ  
(HAULHABER 社製 IERS3-250) により計測する。  
本試験機は角度制御を行う。計測したねじり角を  
制御信号とし、モータドライバ (Poulolu 社製  
VNH5019) を用いて DC モータの制御を行う。

### 3. 実験条件の設定

#### 3.1 入力するねじり角 $\varphi$ とひずみ $\varepsilon$ の関係

本実験ではねじりにより加える最大垂直ひずみが  
2.5% と設定した。これは Ni-Ti 系超弾性合金  
において超弾性効果が現れる 1.5% を充分に  
超える領域で特性評価をおこなうためである。  
本研究ではねじりを与えることとなるため、  
軸に対して 45 度方向に生じる主ひずみが  $\pm 2.5%$   
となる条件とし、ねじり角との関係を算出した。

図 4 は、1 辺の長さが 1 の正方形 ABCD  
において、辺 AB, CD に引張応力  $\sigma$  が、  
BC, AD に圧縮応力  $-\sigma$  が作用している  
状態を表している。このとき、正方形 EFGH  
には、単純せん断応力  $\tau = \sigma$  が作用する  
ことになり、本研究において直線配置  
(曲率半径  $\infty$ ) を仮定した条件で生じる  
応力状態に一致する。以下、この図の  
関係から幾何学的関係よりねじり角  $\varphi$   
と主ひずみ  $\varepsilon$  の関係を求める。

せん断ひずみ  $\gamma$  を考えれば、

$$\gamma = \angle HEF - \angle H'E'F' = \frac{\pi}{2} - 2\angle H'E'O \quad (1)$$

よって、次式が得られる。

$$\angle H'E'O = \frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2} \quad (2)$$

ここで、OE' と OH' の比を考え、  
上式を用いてせん断ひずみ  $\gamma$  と  
垂直ひずみ  $\varepsilon$  の関係を表せば次式が  
得られる。

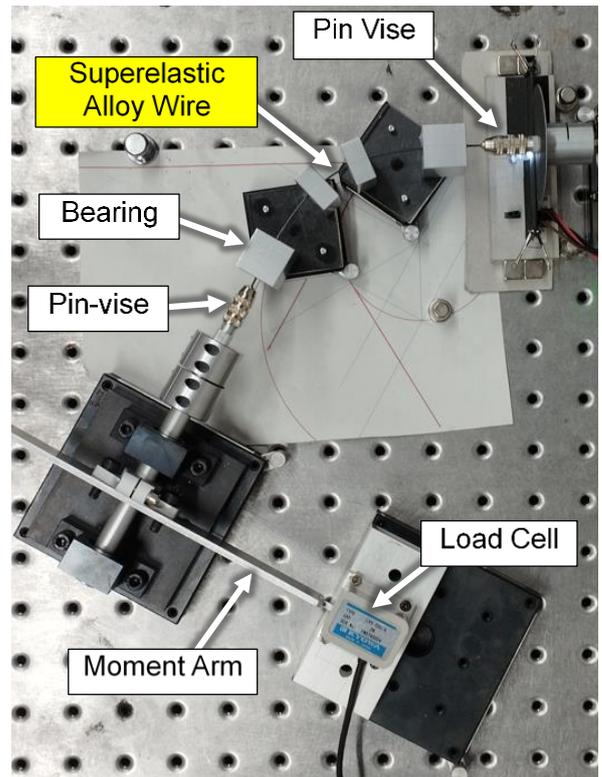


Fig.3 Torsion testing machine setup for bending radius R=80mm.

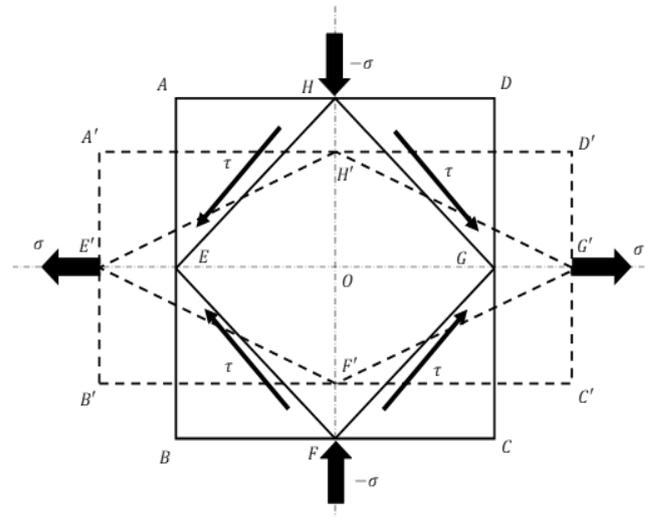


Fig.4 Deformation under the stress field of simple shear.

$$\frac{\overline{OH'}}{\overline{OE'}} = \tan(\angle H'E'O) = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \cong \frac{1 - \frac{\gamma}{2}}{1 + \frac{\gamma}{2}} \quad (3)$$

同様に OE' と OH' の比を考え、  
今度は垂直ひずみ  $\varepsilon$  との  
関係を表すと次式が得られる。

$$\frac{\overline{OH'}}{\overline{OE'}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{B'C'}} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (4)$$

となる。式(3)および(4)より、  
せん断ひずみ  $\gamma$  と垂直ひずみ  $\varepsilon$   
の関係は次式で表すことができる。

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{2} \quad (5)$$

次にねじりにより生じるせん断ひずみ  $\gamma$  について考える。図5は長さ  $L$ 、直径  $d$  の棒にトルク  $T$  が作用している状態を表した模式図である。図におけるおうぎ形  $BB'O$  の中心角  $\theta$  はねじり角である。このとき、棒に生じるせん断ひずみ  $\gamma$  は、

$$\gamma \cong \tan \gamma = \frac{BB'}{AB} = \frac{r\theta}{L} = \frac{\theta d}{2L} \quad (6)$$

となる。以上の関係から式(5)に(6)を代入して整理すれば、幾何学的関係よりねじり角  $\theta$  と主ひずみ  $\varepsilon$  の関係は次式となる。

$$\theta = \frac{4L}{d} \varepsilon \quad (7)$$

本研究において実験に用いた超弾性合金試験片の寸法は、 $d=1.0\text{mm}$ 、 $L=145\text{mm}$  である。よって式(7)より、入力するねじり角は  $\theta=830\text{deg}$  とした。実験は片側の繰り返しねじりとし、 $0\text{deg}$  から  $830\text{deg}$  までのねじりを繰り返した。

### 3.2 実験条件

実験条件は、上述の通り最大のねじり角を  $830\text{deg}$  (ねじりによる最大主ひずみ  $2.5\%$ ) とし、超弾性ワイヤに与える曲げ条件として次の3つを用いた。(a)第一に、曲げを加えない条件(曲率半径  $\infty$ )。 (b)第二に、先行研究のロボットハンド<sup>(1)</sup>で加えられる最大の曲げ条件(曲率半径  $80\text{mm}$ )。 (c)第三に、曲げの厳しい条件(曲率半径  $40\text{mm}$ )。曲げを加えると、ねじりによる応力に加え、曲げによる応力が重ね合され、複雑に変化し、それが損傷に影響を及ぼす。

本報告では、開発した試験機の実証実験を兼ねた、繰り返し回数は最大  $5000$  回までの結果を報告する。実験中には  $500$  回繰り返し毎にねじりモーメントとねじり角の関係(以降、ねじり特性)を計測している。

### 4. 実験結果

繰り返しねじり試験の結果、曲率半径  $R=\infty$  の条件では、 $5000$  回までに破断しなかった。一方、曲率半径  $R=80\text{mm}$  では  $1500$  回、曲率半径  $R=40\text{mm}$  では  $500$  回で、それぞれ曲げを加えた試験片中央付近で破断した。破断面の形状を確認すると、 $R=80\text{mm}$  では螺旋状であり、ねじりにより生じる主応力の作用面(軸に対して  $45$  度方向)に一致した。 $R=40\text{mm}$  の場合、破断面は軸に垂直であり、曲率が大きくなったことにより、曲げ応力が損傷の主の要因になったことが伺われた。なお、追加実験として  $R=80\text{mm}$  の条件に対し最大主ひずみ  $1.0\%$  の条件で実験を行い、 $5000$  回を超えても破断しない結果を得た。すなわち、曲げた状態で大きなねじり変形を加えると早期に損傷が生じることが分かった。

図6に、 $R=\infty$  の条件における繰り返しねじりによる特性の変化を示す。ねじり角最大時のねじりモーメントは変化せず、変形過程で低下する傾向が見られた。この結果は、変化が生じ始める  $20 \times 10^{-3}\text{Nm}$  を超えるトルク伝達時に注意を要することを示している。なお、先行研究のロボットハンドの場合、動作トルクは  $7 \times 10^{-3}\text{Nm}$  程度であり、実用上の影響は小さいと考える。図7は曲率半径による特性の変化を示している(繰り返し回数  $n=0$ )。  $R=80\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$  において、それぞれ  $R=\infty$  と異なる特徴的なねじり特性の変化が現れた。実験時の超弾性合金線の挙動を観察したところ、どち

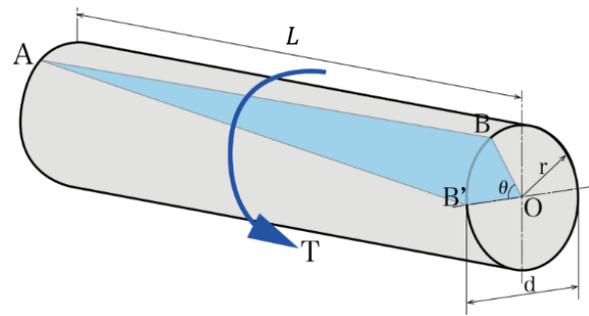


Fig.5 Deformation of a rod under torsion.

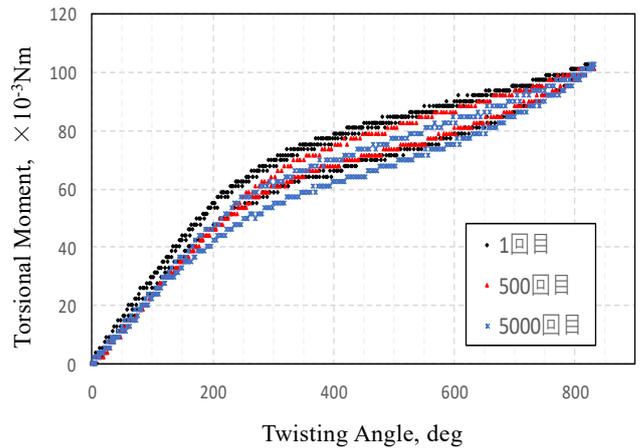


Fig.6 Changes in torsional properties with repeated torsion (Bending Radius  $R = \infty$ ).

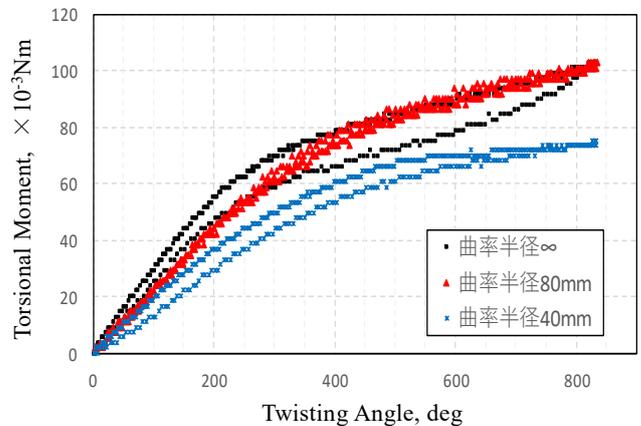


Fig.7 Variation of torsional properties due to bending Radius (at  $n=0$  cycle).

らにもねじり座屈による変形が見られ、 $R=40\text{mm}$  の場合に顕著であった。ねじり特性に現れた変化は、このような変形挙動の違いによるものと推察される。特に、 $R=40\text{mm}$  においてはねじり座屈によってトルクの伝達が行えなくなり、ねじりモーメントが低下したと考えられる。この結果は、 $R=40\text{mm}$  で破断面が軸に垂直であったことに対応していると言える。

本報では実験回数が限られており詳細な検討はこれからとなるが、曲率半径  $R=80\text{mm}$  程度とすれば、小さな動力伝達に超弾性合金線を動力伝達軸として応用できる可能性が高いことが実験的に示せたと考える。

今後は、さらに実験条件を変化させながら、繰返し回数  
の大きな条件の実験を行うとともに、破断面の観察を行い、  
破断に至るプロセスを明らかにすることが課題である。

## 5. 結言

本研究では、超弾性合金線の繰返しねじり試験機の開発  
および特性評価を行い、以下の結論を得た。

- 1) 開発したねじり試験機を用いて、ねじり特性および繰  
返しねじりによる特性変化を計測した。
- 2) 曲げを加えた場合のねじり特性の変化を計測し特性  
を変化させる要因を推察した。
- 3) 繰返しねじりによるねじり特性の変化および強度を  
計測し、繰返しねじりによる超弾性合金線の特性変化  
および曲げによる強度特性の変化を報告した。
- 4) 繰返し回数や曲率半径の条件を限定すれば、超弾性  
合金線を動力伝達軸として応用することは可能であ  
ることが示せた。

## 参考文献

- (1) 戸伏壽昭, 田中喜久昭, 堀川宏, 松本實, 形状記憶材  
料とその応用, コロナ社 (2004)
- (2) 宮崎修一, 佐久間俊雄, 渋谷壽一, 形状記憶合金の応  
用展開, シーエムシー出版 (2001)
- (3) 渡辺悠太郎, 田宮高信, ロボットハンドの動力伝達軸  
への超弾性ワイヤの応用および繰返しねじり試験機  
の開発, 日本人間工学会, 関東支部第50回大会, (2020  
- 12)
- (4) Yutaro Watanabe, Takanobu Tamiya, Application of  
Superelastic Alloy to Power Transmission of Robot Hand,  
The 5th International Conference on "Science of  
Technology Innovation" 2020, (2000-10)
- (5) Ana Maria Figueiredo, Paulo Modenesi, Vicente Buono,  
Low-cycle fatigue life of superelastic NiTi wires,  
International Journal of Fatigue, 31, pp.751-758 (2009).