

## 第4章 基礎特性と制御

### 4.1 本章の概要

本章では、コンポーネント化された本アクチュエータの基礎特性を懸案となっている応答性を中心に検証する。本アクチュエータは、Fig.4.1のように生体筋と形態が似ており第3章の Fig.3.23・3.24のような義手やロボット等へ適用する場合、生体筋と同様の形態で適用されるものとする<sup>(1)</sup>。そこで、人体に装着する場合や接触する場合を考慮し冷却液温度を人体との適合性の良い36°Cに維持する。その上で、発生力・発生変位・応答周波数等の基礎特性について実験を行い生体筋と比較した。次に、生体筋は、通常2本1組の拮抗配置にて駆動され、それ自身にばね剛性の調整機能がある。本アクチュエータは、コンポーネント化にて筋膜を獲得し複数本隣接配置可能なので、モータユニットを生体筋により近い拮抗配置にして剛性制御実験を行い、その特性を検証する。

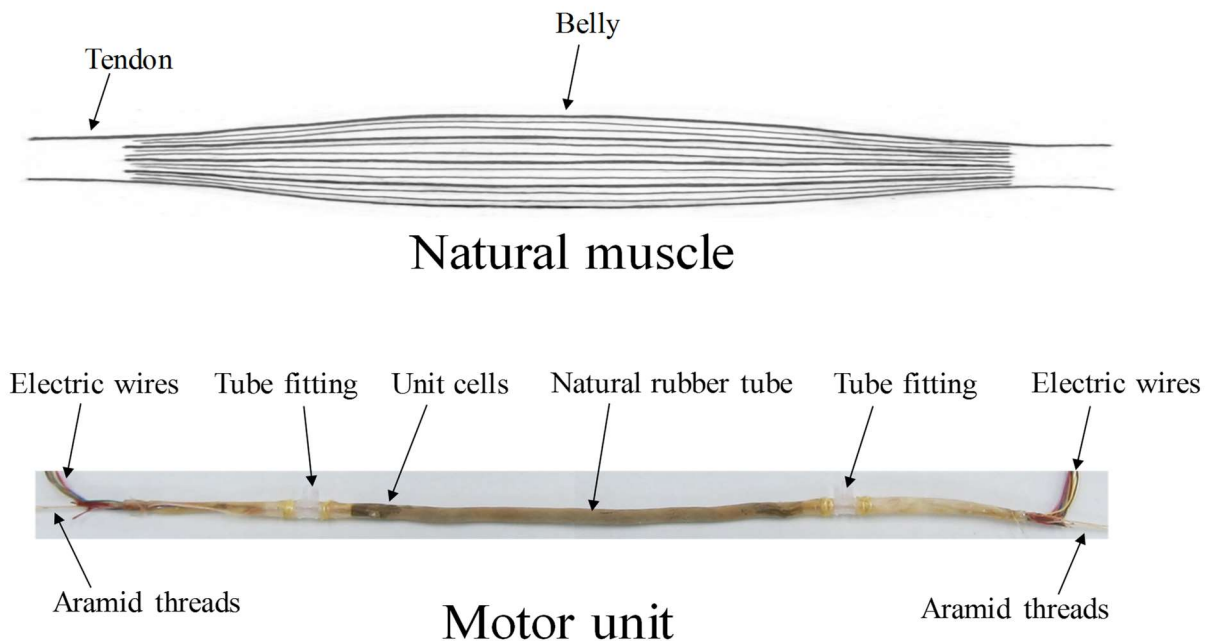


Fig.4.1 Natural muscle and motor unit <sup>(1)</sup>

## 4.2 基礎特性

### 4.2.1 実験装置と方法

本研究では、単セル単体とモータユニット単体の基礎特性を測定するための実験とモータユニット2本を拮抗状態にして実用に近い状態での実験を行った。以下にその実験装置の詳細を示す。

#### 4.2.1.1 単体特性実験装置

モータユニットの正確な基礎特性の検証には天然ゴムチューブを外す必要がある。しかし、巻フィルムチューブは構造的に冷却液をシーリングできないので冷却液中に保持する必要があった。そこで、冷却液を満たした大型メスシリンダー内に天然ゴムチューブを外したモータユニット1本を設置した。

Fig.4.2 にモータユニット単体の基礎特性実験装置の (a) 正面図と (b) 側面図を示す。この実験で使用した SMA ワイヤの仕様を Table 4.1 に、単セルの仕様を Table 4.2 に、モータユニットの仕様を Table 4.3 に、冷却用不活性液体の仕様を Table 4.4 に示す<sup>(2)</sup>。冷却液は、電気絶縁性の高い不活性液体で供給側と回収側のチューブポンプでモータユニットの上から下に向けて流されており、その液温はヒータと熱電対と攪拌機で構成された温調システムで 36°C に保たれている。

モータユニットの構成は、第3章 Fig.3.18 のように体積を小さくするため断面積が最小となる円に近づくよう単セルを7本束ね合せた。その総重量は 1.19g である。モータユニット上端部の糸はプーリー1に向かって時計回りに1回まわして掛けてあり、その糸の先端に 7N の分銅を掛けポテンショメータの回転角にて発生変位を検出する。プーリー1の同軸上には同径 ( $\phi 20\text{mm}$ ) のプーリー2が設けられており、2つのプーリーはヒステリシスクラッチにて分離・接続される。

プーリー2にも糸が向かって時計回りに1回まわしてあり、その上端部はデジタルフォースゲージに掛けられ、下端部には40Nの分銅が吊るされ0.4Nmのブレーキトルクが掛かっている。発生力の検出は、まずプーリー1とプーリー2を分離し、運動単位の糸に7Nの分銅を掛けて引き伸ばし予歪を与える。次に、プーリー1とプーリー2を接続してモータユニット内のSMAを通電加熱すると、モータユニットは収縮しようとするがプーリー2にブレーキが掛かっているため静止状態を保つ。するとヒステリシスクラッチを介してプーリー2に掛かった0.4Nmのトルクに反トルクが掛かりデジタルフォースゲージの表示が40N以下になる。この軽くなった分がモータユニットの発生力[N]である<sup>(3)</sup>。

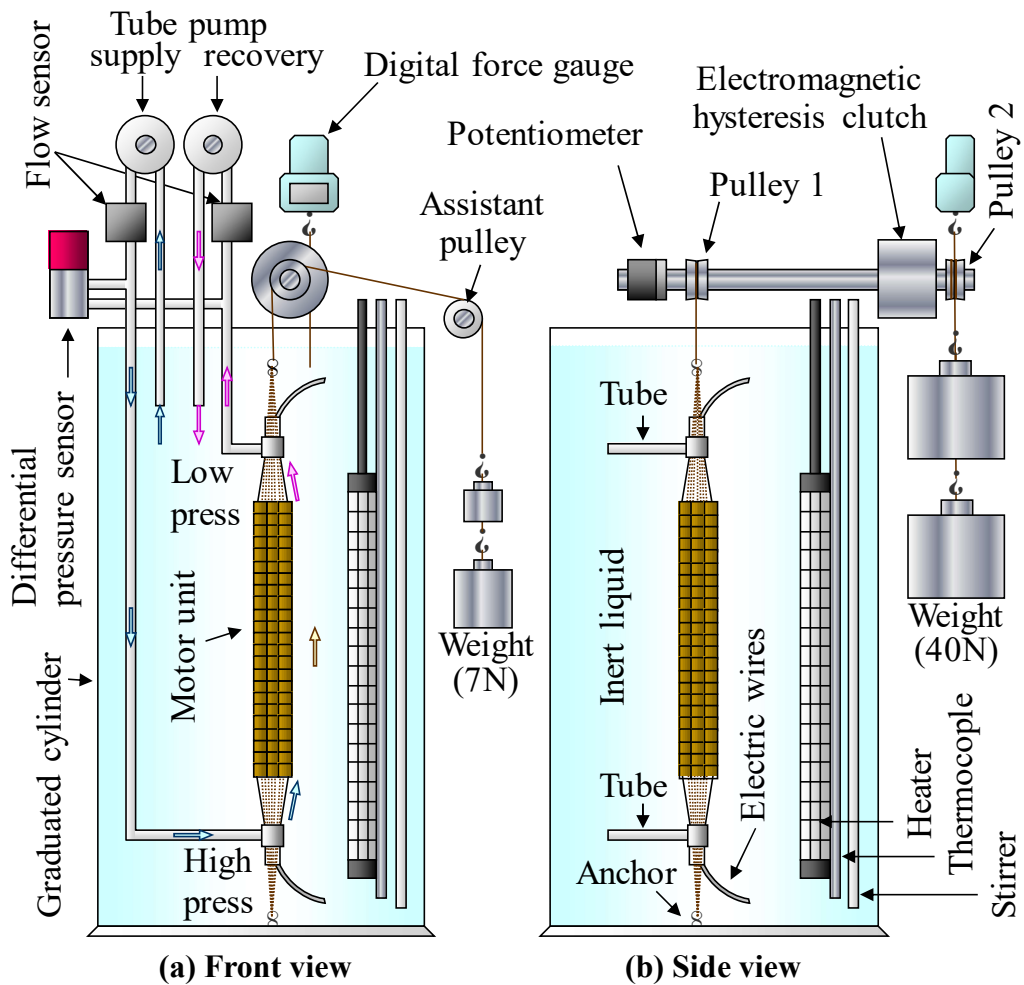


Fig.4.2 View of experimental apparatus at single motor unit type

**Table 4.1 Specifications of SMA wire**

Maker	mitsubishi cable industries, ltd
Model	SC-60-200-600
Material	Ti-Ni
Heat treatment	500°C, 1hour
Phase transformation temperature	60°C
Density	60000kg/m <sup>3</sup>

**Table 4.2 Specifications of unit cell**

Rolled film tube	Outer diameter [mm]	φ1.5
	Length [mm]	100
SMA coil spring	Coil outer diameter [mm]	φ0.6
	SMA wire diameter [mm]	φ0.2
	Length [mm]	80
	Weight [g]	0.11
Total weight [g]		0.17
Volume [mm <sup>3</sup> ]		177
Density [kg/m <sup>3</sup> ]		960

**Table 4.3 Specifications of motor unit**

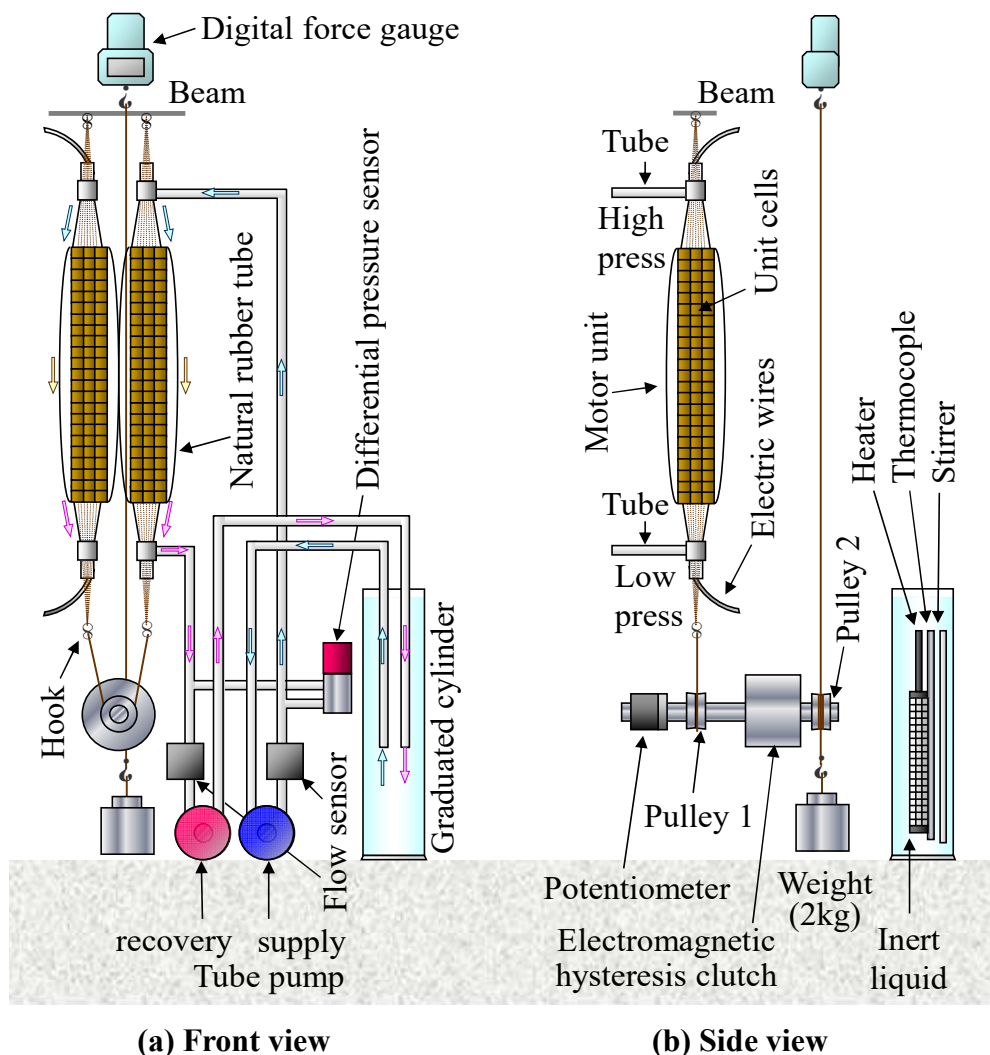
Unit cell number	7
Outer diameter [mm]	φ6.0
Minimum Length [mm]	100
Minimum Volume [mm <sup>3</sup> ]	2827
Weight (g)	1.19
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	421

**Table 4.4 Specifications of inert liquid <sup>(2)</sup>**

Hydrofluoropolyether (HFPE)	
Boiling point [deg.]	178
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1720
Specific heat [J/(kg·K)]	1092
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.087

#### 4.2.1.2 拮抗実験装置

Fig.4.3 に拮抗特性を測定するための実験装置の (a) 正面図と (b) 側面図を示す。冷却液はポンプでモータユニット上部から下部に向け流され、液温はヒータと熱電対と攪拌機で構成された温度調節器により人体と同じ  $36^{\circ}\text{C}$  に保たれている。左右モータユニット上端部の糸は横梁に固定され、下端部の糸はプーリー1に向かって反時計回りに1回まわして掛けてあり左右モータユニットを接続している。変位量は、ポテンショメータの回転角で検出する。プーリー1同軸上には同径 ( $\phi 20\text{mm}$ ) のプーリー2が設けられ、2つのプーリーはヒステリシスクラッチで分離・接続される。プーリー2には向って反時計回りに糸が1回まわして掛けてあり、その糸の上端はデジタルフォースゲージに掛けられ下端には20Nの分銅が吊るされ  $0.2\text{Nm}$  のブレーキトルクが掛かった状態になっている。左右のモータユニットの発生トルクの検出について、まず、プーリー1とプーリー2を分離し左右のモータユニットを繋ぐ糸を右側モータユニット下端のフックから外し、プーリーに糸を掛けたまま任意荷重の分銅を掛けて引き伸ばし予歪を与え、分銅を掛けたまま糸の長さを調整し、再び右側モータユニット下端のフックに糸を掛け分銅を外す。この時、分銅を掛け任意の予歪を与えた左側のモータユニットは予歪の無い右側のモータユニットを引っ張り、つり合ったところで止まる。次に、プーリー1とプーリー2を接続し冷却液を流したまま予歪を与えた左側モータユニットに通電する。すると、内部のSMAコイルばねが加熱され収縮しようとするが、プーリー2には  $0.2\text{Nm}$  のブレーキトルクが掛かっているためプーリー1は静止状態を保つ。この時ヒステリシスクラッチを介してプーリー2に掛かった  $0.2\text{Nm}$  のトルクに反トルクが掛かりデジタルフォースゲージの表示が20N以下になる。この軽くなった分が左側モータユニットの発生力[N]で、これに0.1を掛けたものがトルク[Nm]である。同様に右側も測定できる。



**Fig.4.3 View of antagonistic experimental apparatus at twin motor unit type**

この実験で使用した SMA ワイヤの仕様を Table 4.5 に、単セルの仕様を Table 4.6 に、モータユニットの仕様を Table 4.7 に、冷却用不活性液体の仕様を Table 4.8 に示す<sup>(4)</sup>。モータユニットは、第 3 章 Fig.3.18 と同様に断面積が最小となる円に近づくよう単セルを 7 本束ね合せた。その総重量は 0.63g である。冷却液は、電気絶縁性の高い不活性液体で、供給側と回収側のチューブポンプにてモータユニットの上から下に向けて流されており、その液温はヒータと熱電対と攪拌機で構成された温調システムで 36°C に保たれている<sup>(5)</sup>。

**Table 4.5 Specifications of SMA wire**

Maker	MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES, LTD
Model	SC-60-150-450
Material	Ti-Ni
Heat treatment	500°C, 1hour
Phase transformation temperature	60°C
Density	60000kg/m <sup>3</sup>

**Table 4.6 Specifications of unit cell**

Rolled film tube	Outer diameter [mm]	φ1.0
	Length [mm]	100
SMA coil spring	Coil outer diameter [mm]	φ0.45
	SMA wire diameter [mm]	φ0.15
	Length [mm]	90
	Weight [g]	0.06
Total weight [g]		0.09
Volume [mm <sup>3</sup> ]		78.5
Density [kg/m <sup>3</sup> ]		1150

**Table 4.7 Specifications of motor unit**

Unit cell number	7
Outer diameter [mm]	φ5.0
Minimum Length [mm]	100
Minimum Volume [mm <sup>3</sup> ]	1963
Weight (g)	0.63
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	321

**Table 4.8 Specifications of inert liquid <sup>(4)</sup>**

Perfluoropolyether (PFPE)	
Boiling point [deg.]	200
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1790
Specific heat [J/(kg·K)]	963
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.065

#### 4.2.1.3 パルス周波数変調駆動

生体筋は、小脳や脊髄から運動神経を通じて送り込まれる高さ約 110mV、幅約 0.5msec の神経インパルスに応じて収縮する性質を持ち、物を持ち上げる時などの筋力の加減は神経インパルスの入力頻度（周波数）を変化させることで調整される<sup>(6)</sup>。これはパルス周波数変調（Pulse Frequency Modulation, 以後 PFM）制御方式である。生体の神経インパルスの PFM 周波数帯域は 10～60Hz であり、その内訳は、遅筋（赤筋）で 10～20Hz、速筋（白筋）で 30～60Hz である<sup>(7)</sup>。

直流チョップ制御において、従来主流の PWM（Pulse Width Modulation, 以後 PWM）は、Fig.4.4 のように一定周期でスイッチングするためノイズを除去しやすい反面、軽負荷時にも一定周期でスイッチングを行うため効率が低下する短所がある。これと比べ PFM は、Fig.4.5 のようにノイズが除去しにくい反面、軽負荷時には周波数を落として動作するのでスイッチング損失が減少し効率が向上する長所がある。PFM も PWM も投入電力をデューティ比で調整する方式である<sup>(8)</sup>。デューティ比は以下のパラメータと式で表わせる。

$D$  : デューティ比（パーセント表示 :  $\times 100$  [%]）

$t$  : パルス幅 [s]

$f$  : パルス周波数 [Hz]

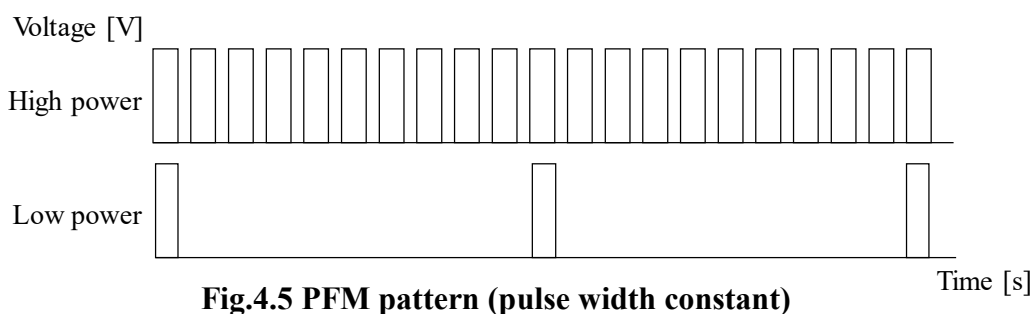
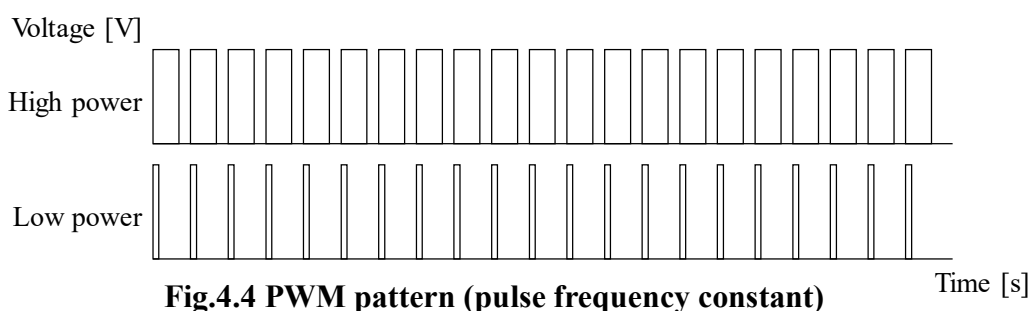
$T$  : 周期 [s]

$$D = tf = \frac{t}{T} \quad (4.1)$$

現在のスイッチング電源の多くは、この二方式を組み合わせて用いている。以前は、ノイズの除去が比較的容易な PWM 方式が主流だったが、近年の回路技術の発達によりノイズ除去が容易に行えるようになり、軽負荷時においてパワー効率で有利な PFM 方式に回路を切り替えて用いるケースが増えている<sup>(9)</sup>。



SMA アクチュエータは電力を一旦熱に変えるためパワー効率は一般のアクチュエータと比べ低い。よって本研究では、パワー効率が PWM より高く生体筋と同じ駆動方式でもある PFM を採用する。



## 4.2.2 ステップ応答特性

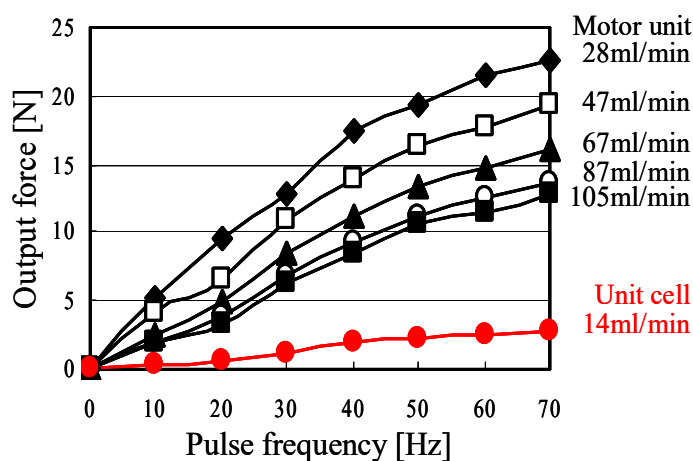
本研究では、生体神経インパルスピックアップし人工筋肉の制御に活用することを視野に入れている。そこで、4.2.1.1の単体特性実験装置と PFM 駆動を用いて制御性解明のためのステップ応答特性実験を行った。

### 4.2.2.1 発生力と発生変位の静特性

単セルとモータユニットは、一定冷却液流量のもとで一定周波数のパルス電圧を入力すると、それに応じた一定の力と変位を静的に発生する事が予備実験で確認されている<sup>(3),(5)</sup>。そこで、5種類の冷却液流量において単セルと運動単位に生体神経インパルスと同じ幅 (0.5ms) で同じ周波数帯域 (10~70Hz) である

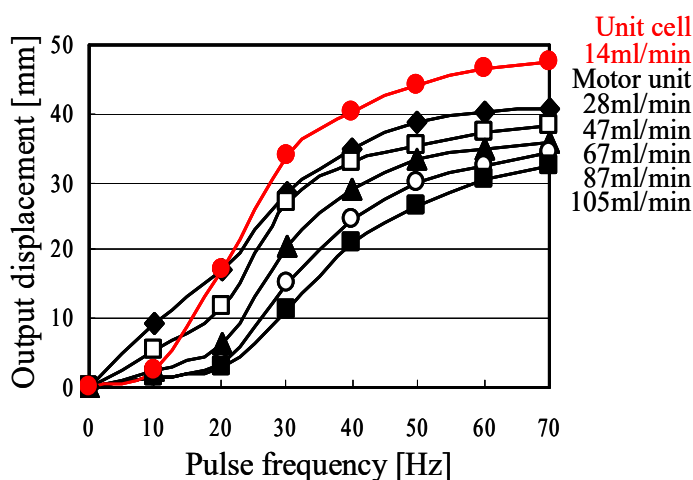
一定周波数の電圧パルス列を入力し、そのとき発生する力と変位をパルス周波数ごとに測定した<sup>(7)</sup>。

電圧パルスの高さは使用スイッチ素子の定格電圧 100V に固定した。冷却液流量の大きさはポンプの最低流量である 28ml/min から冷却液の流動力によって運動単位の変位が影響を受けない流量である 105ml/min までの範囲内の 5 種類で設定した。冷却液流量をパラメータにしてパルス周波数に対する発生力と発生変位の関係を求め、その結果を Fig.4.6 と Fig.4.7 に示す。



**Fig.4.6 Pulse frequency characteristics of motor unit and unit cell**

**(Output force, bias displacement: 48mm constant)**



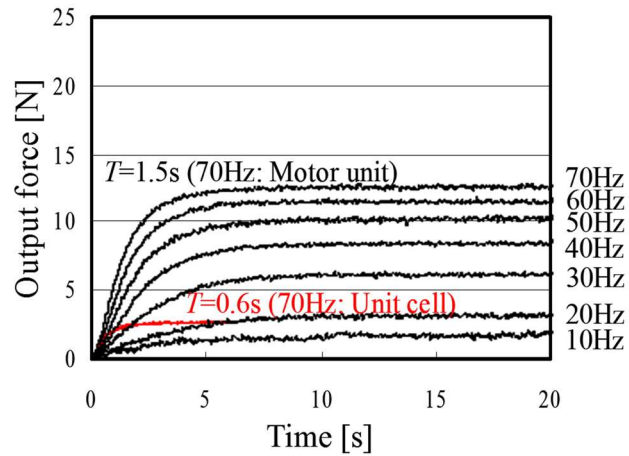
**Fig.4.7 Pulse frequency characteristics of motor unit and unit cell**

**(Output displacement, bias force: 1N const (unit cell) / 7N const (motor unit))**

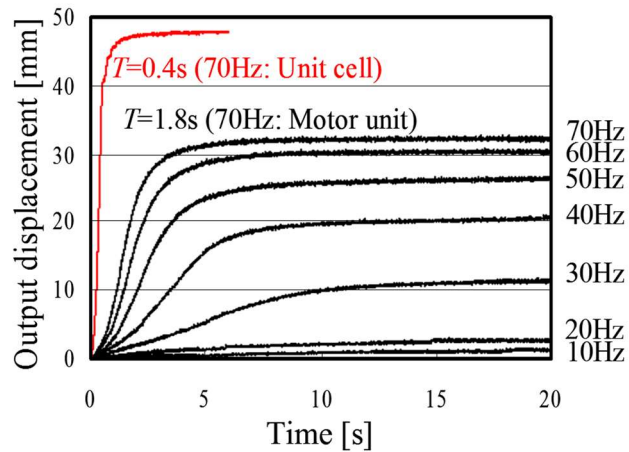
ただし、単セル 1 本については冷却液流量：14ml/min, パルス周波数：70Hz での結果である最高発生力：2.8N, 最高発生変位：48mm（もとの長さの 48%）を Fig.4.6 と Fig.4.7 に挿入した。Fig.4.6 と Fig.4.7 によれば単セル 1 本に対し 7 本束ね合わせたモータユニットでは冷却液流量：28ml/min, パルス周波数：70Hz で、最高発生力：22.5N, 最高発生変位：40.6mm（もとの長さの 40.6%）となった。この結果、単セルを 7 本束ね合せてモータユニットにした場合、発生力は単セルの本数とほぼ同数倍になっており、束ね合わせる単セルの本数に応じてモータユニットの発生力が大きくなることが明らかになった。一方、発生変位は単セルの約 85%であり、発生変位が若干小さいのは、単セルの束ね合わせによる摩擦の影響と考えられる。

#### 4.2.2.2 パルス周波数とステップ応答

モータユニットの冷却液流量は、単セルの約 7 倍の 105ml/min に固定してステップ応答の実験を行った。その結果を Fig.4.8 と Fig.4.9 に示す。比較のため、単セル 1 本の場合（冷却液流量：14ml/min, パルス幅：0.5ms, パルス周波数：70Hz）での発生力と発生変位のステップ応答を Fig.4.8 と Fig.4.9 中に示す。Fig.4.8 と Fig.4.9 は、0s 時に幅 0.5ms, 高さ 100V の各種周波数の電圧パルス列を加えた時のモータユニットと単セルの発生力と発生変位の時間的变化を表している。この結果から、モータユニットの場合でも単セル同様、いずれのパルス周波数においても発生力と発生変位のステップ応答は、近似的に一次遅れの特性を示す事がわかった。この Fig.4.8 と Fig.4.9 から時定数  $T$  について、単セル単独の発生力では 0.6s, 発生変位では 0.4s なのに対し、時定数が最も小さくなる 70Hz の場合でも単セルを 7 本束ね合せた運動単位の発生力では 1.5s, 発生変位では 1.8s であり、単セルと比べて発生力の時定数は 2.5 倍に、発生変位の時定数は 4.5 倍になることがわかった。



**Fig.4.8 Pulse frequency dependency on step response of motor unit and unit cell  
(Output force, bias displacement: 48mm constant)**



**Fig.4.9 Pulse frequency dependency on step response of motor unit and unit cell  
(Output displacement, bias force: 1N const (unit cell) / 7N const (motor unit))**

#### 4.2.2.3 パルス幅とステップ応答特性

4.2.2.2 でのべた時定数の延長化の原因は、第3章の Fig.3.18 のように単セルを束ね合わせると単セル間の隙間の体積がモータユニットの体積に加わり熱容量が増え、その加温に熱が消費され SMA の温度上昇時間が延長化したものと考えられる。そこで不足分の熱量をモータユニットに投入する電力で補うことを目的として、入力パルス幅を Fig.4.10 のように段階的に変え適正な投入電力を実験的に検討した。

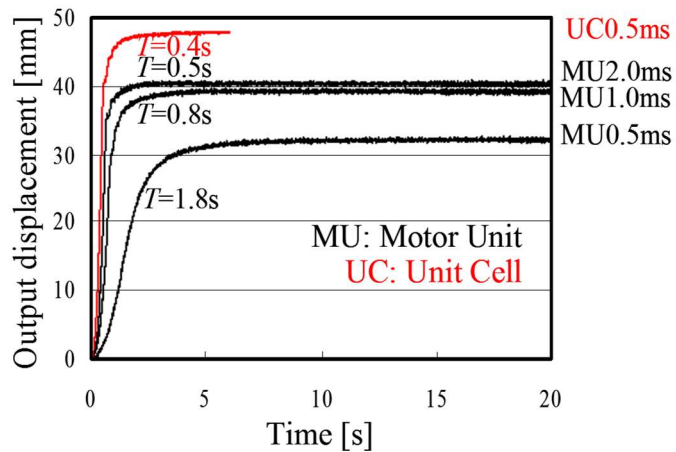
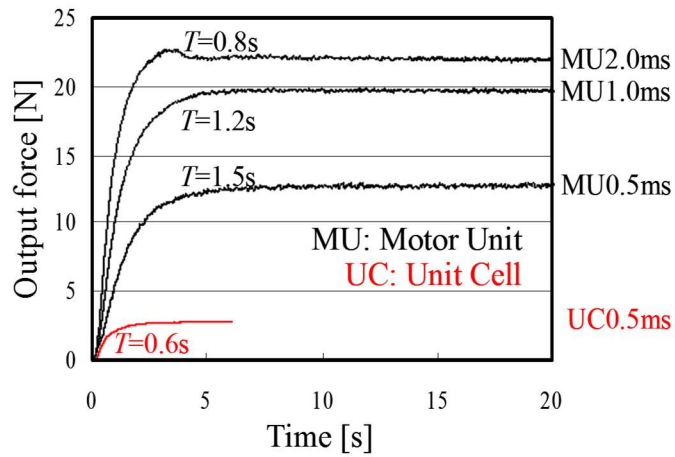
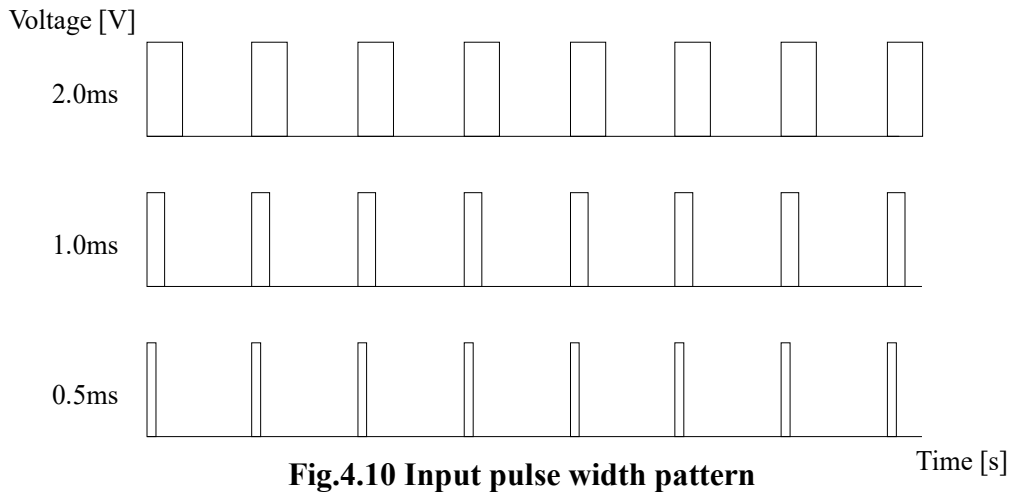


Fig.4.11 と Fig.4.12 にパルス幅をパラメータにしたパルス周波数 70Hz における発生力と発生変位のステップ応答を示す。パルス幅は、モータユニットでは 0.5, 1.0, 2.0ms で、単セルでは 0.5ms である。なお、モータユニットの場合の冷却液流量は Fig.4.8 と Fig.4.9 の場合と同様に 105ml/min, 単セルのそれは 14ml/min である。この Fig.4.11. と Fig.4.12 において、モータユニットの発生力のステップ応答の時定数  $T$  は一次遅れの波形から若干崩れるもののパルス幅 0.5ms のとき 1.5s であり、単セルの場合の 0.6s より 0.9s も長い。パルス幅を 2.0ms に拡大すると 0.8s となる。

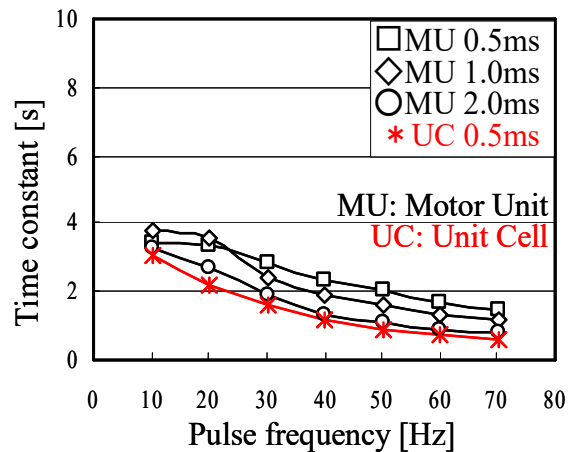
同様に発生変位のステップ応答の時定数もパルス幅 0.5ms のとき 1.8s で、単セルの場合の 0.4s より 1.4s も長い。パルス幅を 2.0ms に拡大すると 0.5s となる。このようにパルス幅を拡大すれば、単セルのレベルにまで時定数を短縮できることがわかった。

#### 4.2.2.4 パルス周波数と時定数

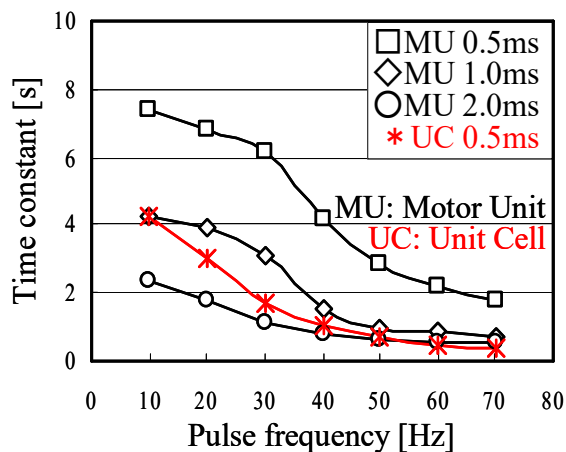
Fig.4.13 と Fig.4.14 にパルス幅をパラメータにした発生力と発生変位におけるパルス周波数に対する時定数の関係を示す。

この Fig.4.13 と Fig.4.14 から、パルス幅 0.5ms 以下、周波数 40Hz 以下では、投入電力が小さく時定数が大きくなる傾向があり、特に発生変位はこの傾向が発生力より大きいことがわかった。パルス幅 1.0ms 以上、周波数 40Hz 以上では、時定数が周波数の影響をあまり受けずにほぼ一定値に収束することがわかった。

この結果、パルス幅を制御することで周波数の時定数に及ぼす影響を調整できることがわかった。周知のように、時定数が入力レベルに影響を受ける制御系は一般に設計しづらい。本研究において用いられている PFM 制御では、周波数が入力レベルに該当する。したがって、これは本研究における人工筋肉の制御系を設計する上で大変重要な結果と考える。



**Fig.4.13 Pulse frequency dependency on time constant of motor unit and unit cell  
(Output force, bias displacement: 48mm constant)**



**Fig.4.14 Pulse frequency dependency on time constant of motor unit and unit cell  
(Output displacement, bias force: 1N const (unit cell) / 7N const (motor unit))**

#### 4.2.2.5 パルス周波数とパワー変換効率

Fig.4.15 にパルス幅をパラメータにしたパルス周波数に対する当該アクチュエータのパワー変換効率を示す. パワー変換効率の求め方について, 以下に使用するパラメータを示す.

$\eta$  : パワー変換効率 [%]

$m$  : 分銅の質量 [kg]

$g$  : 重力加速度 [9.8m/s<sup>2</sup>]

$L$  : 発生変位の定常値 [m]

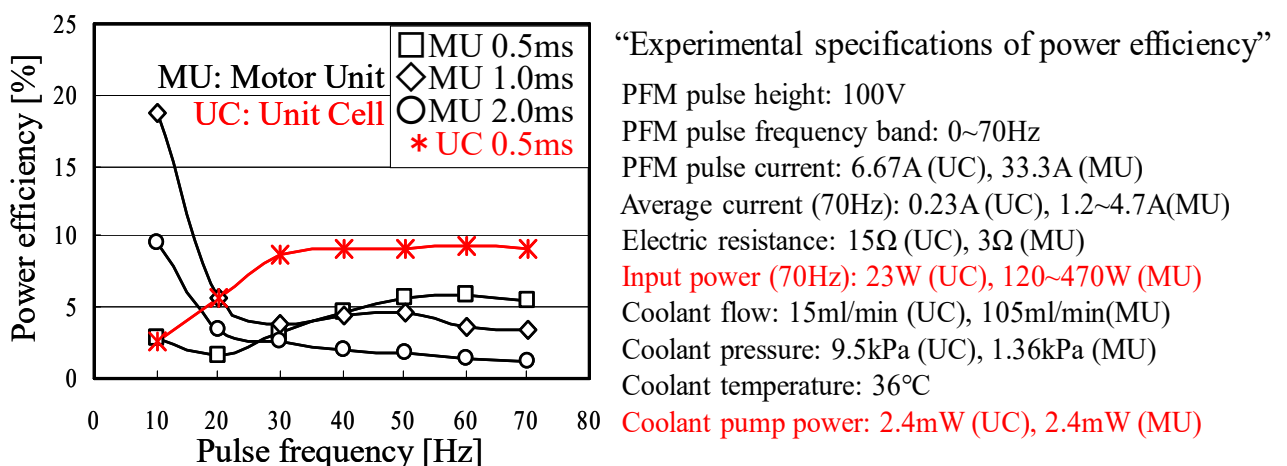
$T$  : 時定数 [s]

$P$  : 投入電力 [W]

$$\eta = \frac{mg (0.63 L / T)}{P} \times 100 \quad (4.2)$$

この式で、 $0.63 L / T$ は単セルまたは運動単位の平均速度[m/s]であり、これに分銅荷重  $mg$  [N]を掛けて仕事率[W]を求め、投入電力  $P$  [W]で割った値をパーセント表示してパワー変換効率  $\eta$  [%]とした。Fig.4.15 について、単セルのパワー変換効率はパルス周波数 30Hz 以上において約 9%で、従来、形状記憶合金のパワー変換効率は 10%程度とされており<sup>(10)</sup>、ほぼこの値が達成されている。これに対し運動単位のパワー変換効率は周波数 20Hz 以上において数%程度であった。パルス幅を拡大するとさらに低下することから、パルス幅を単純に拡大しただけでは省エネルギー面から問題が発生する可能性があると考えられる。

以上の結果から、運動単位はパルス幅を拡大すると時定数が周波数の影響を受けにくくなる高周波域で、パワー変換効率が低下する傾向が認められた。



**Fig.4.15 Pulse frequency dependency on power efficiency of motor unit and unit cell (Output displacement, bias force: 1N const (unit cell) / 7N const (motor unit))**



### 4.2.3 周波数応答特性

4.2.1.2 の拮抗実験装置を用いて単セルとモータユニットの周波数応答実験を行った。その結果を Fig.4.16 (ゲイン曲線) と Fig.4.17 (位相曲線) に示す。5Hz までの低周波領域において、単セルとモータユニットは特性がほぼ同じで、5Hz 以降、モータユニットはゲイン曲線において 12Hz (75rad/s) まで -20dB 以上だが、単セルは、-40dB 近辺まで低下することが分かった。位相曲線では、逆にモータユニットが -135deg.以下まで低下した。周波数応答特性のこの差の原因は、ゴムチューブの有無の差であると考えられる。ゴムの弾性が高周波において一定の振幅の保持に役立つ反面、ゴムの内部摩擦による粘性が位相の遅れを助長したものであると考える。

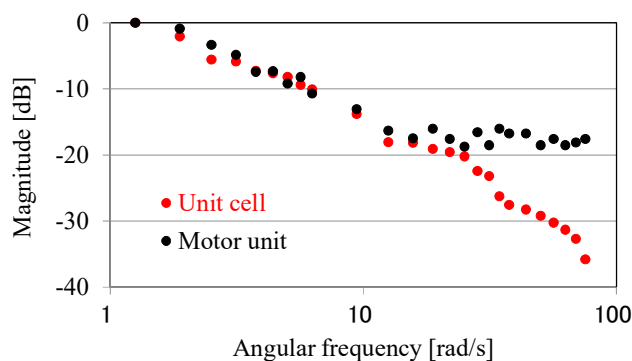


Fig.4.16 Magnitude plot on the bode plot

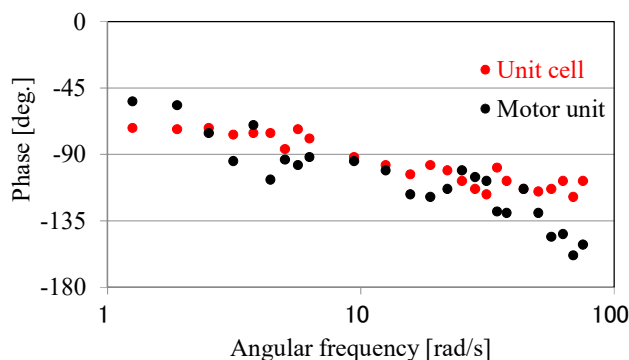


Fig.4.17 Phase plot on the bode plot

#### 4.2.4 生体筋との比較

Table 4.9 に生体筋と単セルとモータユニットの比較を示す。生体筋のデータは、単セルと同寸法のモデルを想定し、密度・発生圧力・発生変位など既知の値から重量・発生力・発生変位を換算して求めた<sup>(6), (7), (11)</sup>。

この比較表より、生体筋に対し単セルは、重量・密度・発生変位がほぼ同等で、発生力・発生圧力が約 3.5 倍と大きいことが分かった。

これに対しモータユニットは、発生変位が単セルでは 40%なのに対し 26%に留まり、発生圧力も生体筋と同等の 0.37MPa に留まった。

発生変位減少の原因は、天然ゴムチューブを引伸ばすことに発生力の一部が取られるためと考える。発生圧力が単セルより小さい理由は、天然ゴムチューブの肉厚の影響で外径が太くなったためと考える。

**Table 4.9 Compared natural muscle, unit cell with motor unit**

Item	Natural muscle	Unit cell	Motor unit
Outer diameter [mm]	φ1.0		φ5.0
Minimum length [mm]	100		
Minimum volume [mm <sup>3</sup> ]	78.5	1963	
Blood temperature [°C]	36		
Weight [g]	0.08	0.09	1.0
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1019	1146	509
Maximum output force [N]	0.31	1.1	7.2
Maximum output displacement [%]	40	40	26
Maximum output presser [MPa]	0.4	1.4	0.37
Maximum output force / weight	395	1246	734
Maximum output presser / density [kPa·m <sup>3</sup> /kg]	0.39	1.22	0.73

### 4.3 拮抗剛性制御

生体筋は通常 2 本 1 組の拮抗配置で駆動されており，それ自身に関節ばね剛性の調整機能がある．本アクチュエータは，コンポーネント化にて筋膜を構成し複数本のモータユニットを隣接配置することを可能とした．

ここでは，2 本のモータユニットを拮抗配置にすることで，より生体筋に近い拮抗状態での剛性制御実験で実測データを取得し，同時に差動式拮抗モデルを提案し解析して得た理論値と実測値を比較し特性を検証する．

#### 4.3.1 差動式拮抗モデル

前節では，モータユニット 1 本を使用してステップ応答実験により時定数を求めて応答性の検証を行った．しかし SMA アクチュエータであるモータユニットは，生体筋と同様に収縮時にのみ力を発揮し伸長時には外力で受動的に引き伸ばされる必要があった．そこで，コンポーネント化により筋膜を構成し複数本隣接配置可能となったモータユニットを 2 本使った 4.2.1.2 の Fig.4.3 の拮抗実験装置を使い拮抗配置によるオープンループ型剛性制御の実験を行った<sup>(12)</sup>．

##### 4.3.1.1 数式モデル

Fig.4.18 に本研究の差動式拮抗型モデルの概要を示す．モータユニット 1 (MU1) 及び 2 (MU2) 側のトルクを  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  として，剛性を  $k_1$ ,  $k_2$  とすると，それぞれのトルクは次のようになる．

$$\tau_1 = \tau_1^0 - k_1 \theta \quad (4.3)$$

$$-\tau_2 = \tau_2^0 + k_2 \theta$$

ここで  $\theta$  はプーリーの回転角度で， $\tau_1^0$ ,  $\tau_2^0$  は基準点 ( $\theta=0$  rad) でのトルクである．総合トルク  $\tau$  は次のようになる．

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_1 - (-\tau_2) \\ &= \tau_1^0 - \tau_2^0 - (k_1 + k_2)\theta\end{aligned}\tag{4.4}$$

以上より、 $d\tau/d\theta = -(k_1 + k_2)$  がモータユニットの剛性である。

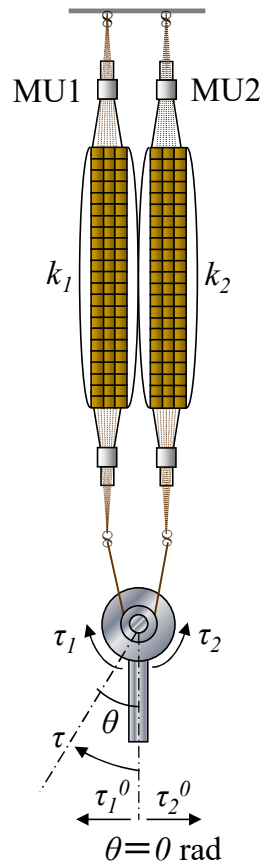
$k_1, k_2$  は SMA コイルばねの剛性にて決定され、変態点温度の前後で変化する。

単セル内の SMA コイルばねは、PFM 通電にて加熱される。通電量に対応する周波数と剛性の関係を Fig.4.19 に示す。(周波数範囲： $0 \leq f_1 + f_2 \leq 140\text{Hz}$ )

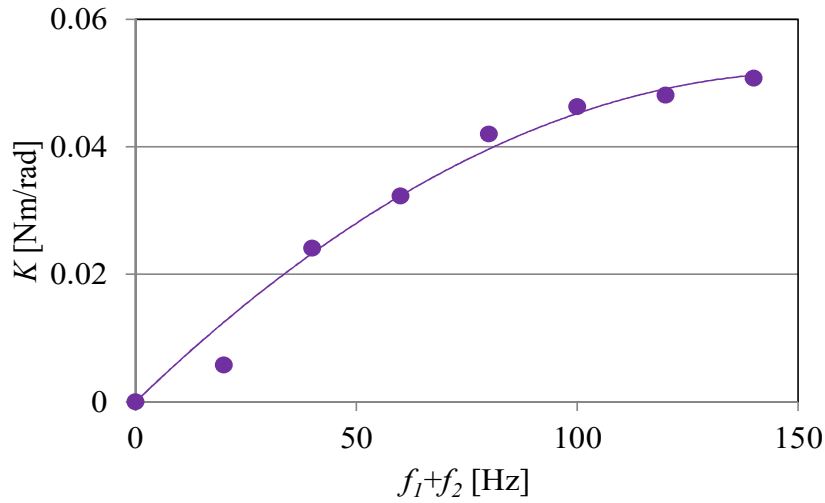
ここで、 $K = k_1 + k_2$  で  $f_1, f_2$  は MU1, MU2 に印加する電圧の周波数である。

これにより、 $K$  と  $f_1 + f_2$  の関係は、二次関数にあることが分かる。以下に近似式を示す。 $B, f_{s0}$  は定数である。

$$K = B(f_1 + f_2)[(f_1 + f_2) - f_{s0}]\tag{4.5}$$



**Fig.4.18 Differential antagonistic model**



**Fig.4.19 Stiffness / pulse frequency of motor units**

Fig.4.20 は  $\theta=0\text{rad}$  でのトルクと周波数の関係を示したものである。(周波数範囲： $0 \leq f \leq 70\text{Hz}$ )

以下に基準点でのトルクを示す。

$$\tau_1^0 = Af_1(f_1 - f_1^0) \quad (4.6)$$

$$\tau_2^0 = Af_2(f_2 - f_2^0)$$

ただし、 $A$ 、 $f_1^0$ 、 $f_2^0$ は定数である。

よって(4.4)式は、(4.5) (4.6)式より次のように整理できる。

$$\tau = A f_d (f_s - f_0) - B f_s (f_s - f_{s0}) \theta \quad (4.7)$$

ただし、 $f_s = f_1 + f_2$ 、 $f_d = f_1 - f_2$ 、 $f_0 = f_1^0 = f_2^0$ であり、

$$A = -13 \times 10^{-6} \text{Nm} \cdot \text{sec}^2, \quad B = -2 \times 10^{-6} \text{Nm} \cdot \text{sec}^2 / \text{rad}$$

$f_0 = 147.5\text{Hz}$ 、 $f_{s0} = 334.5\text{Hz}$  である。

モータユニットの力学モデルは(4.7)式である。

外力がないと仮定し、平衡点  $\tau = 0\text{Nm}$  の場合(4.7)式は次のようになる。

$$A f_d (f_s - f_0) - B f_s (f_s - f_{s0}) \theta = 0 \quad (4.8)$$

ここで定数  $C$  を定め、 $f_0 = C f_s$  とおくと次のようになる。

$$\theta = A f_d (1 - C) / B (f_s - f_{s0}) \quad (4.9)$$

こうして周波数の和  $f_s = f_1 + f_2$  [Hz] で剛性を決定し、その剛性において周波数の差  $f_d = f_1 - f_2$  [Hz] で角度を決定することができる。ただし、 $C = 2.75$  である。

(4.9)式は最終的に次のように整理できる。

$$\theta = G f_d / (f_s - f_{s0}) \quad (4.10)$$

ただし、 $G = -11.4 \text{ rad}$  である。

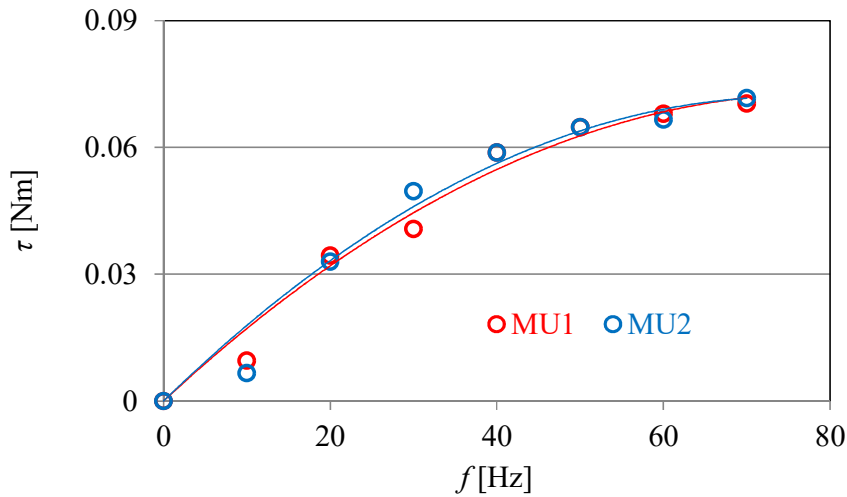


Fig.4.20 Torque / pulse frequency of motor units

次に、(4.5) (4.10)式を以下のように2元2次連立方程式として解く。

$$\begin{cases} K = B(f_1 + f_2)[(f_1 + f_2) - f_{s0}] & (4.5) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta = G f_d / (f_s - f_{s0}) = G(f_1 - f_2) / [(f_1 + f_2) - f_{s0}] & (4.10) \end{cases}$$

(4.10)を展開し  $f_1$  を求める式にする。

$$f_1 = [\theta f_{s0} - (\theta + G) f_2] / (\theta - G) \quad (4.11)$$

(4.11)を(4.5)に代入して整理すると次のようになる。

$$\left( \frac{\theta + G}{\theta - G} - 1 \right)^2 f_2^2 - \left( \frac{\theta + G}{\theta - G} - 1 \right) \left[ \frac{2\theta}{\theta - G} + 1 \right] f_{s0} f_2 + \left\{ \left[ \frac{\theta}{\theta - G} - 1 \right] \frac{\theta}{\theta - G} f_{s0}^2 - \frac{K}{B} \right\} = 0 \quad (4.12)$$

式(4.12)を変数 $f_2$ の2次方程式として解き、MU1の投入パルス周波数 $f_1$ と、MU2の投入パルス周波数 $f_2$ について、目標剛性を $K_d$ に、目標角度を $\theta_d$ とする2変数関数として整理すると以下のようになる。

$$\begin{cases} f_1(K_d, \theta_d) = \frac{\theta f_{s0}}{\theta - G} - \frac{\theta + G}{\theta - G} Z(K_d, \theta_d) \\ f_2(K_d, \theta_d) = -Z(K_d, \theta_d) \end{cases} \quad (4.13)$$

ただし、 $Z(K_d, \theta_d)$ は以下の通りである。

$$Z(K_d, \theta_d) = \frac{\left( \frac{\theta + G}{\theta - G} - 1 \right) \left( \frac{2\theta}{\theta - G} + 1 \right) f_{s0} + \sqrt{\left( \frac{\theta + G}{\theta - G} - 1 \right) \left( \frac{2\theta}{\theta - G} + 1 \right)^2 f_{s0}^2 - 4 \left( \frac{\theta + G}{\theta - G} - 1 \right) \left\{ \left( \frac{\theta}{\theta - G} - 1 \right) \frac{\theta}{\theta - G} f_{s0}^2 - \frac{K}{B} \right\}}{2 \left( \frac{\theta + G}{\theta - G} - 1 \right)^2} \quad (4.14)$$

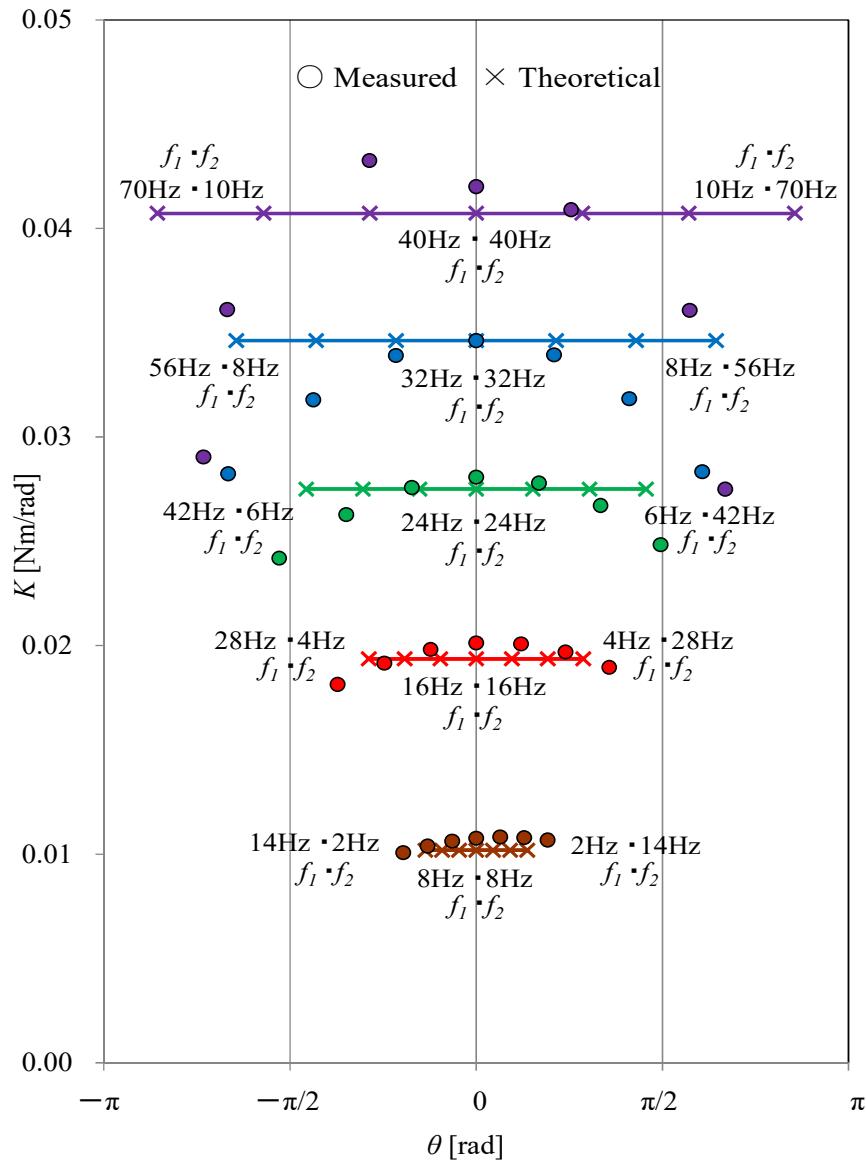
よって、目標剛性 $K_d$  [Nm/rad]と目標角度 $\theta_d$  [rad]は、パルス周波数 $f_1$  [Hz]をMU1に、パルス周波数 $f_2$  [Hz]をMU2に、投入することで決定できる。

ただし、係数 $G = -11.4$ rad,  $f_{s0} = 334.5$ Hz,  $B = -2 \times 10^{-6}$  Nm $\cdot$ sec $^2$ /radである。

#### 4.3.1.2 実験結果と考察

2本のモータユニットを拮抗状態にする際、片側に3.5N (350g)の分銅を掛けて引き伸ばして予歪(24mm)を与え、2本をつなぎ拮抗状態にした。実験は、(4.7)式に従いオープンループで剛性と角度を制御した。

その実験結果のグラフをFig.4.21に示す。図中の $f_1 \cdot f_2$ は、モータユニットMU1 $\cdot$ MU2に印加した周波数の組合せである。プーリー角度 $\theta$  (横軸)と剛性 $K$  (縦軸)は4.2.1.2拮抗実験装置において紹介したポテンシオメータとデジタルフォースゲージを使って測定した。グラフ上の凡例の○は測定値を、×は理論値を示す。(  $\theta$  範囲 :  $-120 \leq \theta \leq 132^\circ$  )



**Fig.4.21 Stiffness control for motor units**

周波数 $f_1 \cdot f_2$ の組合せ方は、最大の剛性を出力する組み合わせを10Hzと70Hzと決め、この1/5の周波数(2Hz・14Hz)を最小の剛性を出力する組み合わせとし、同様に2/5, 3/5, 4/5, 5/5の周波数の組み合わせを入力して実験した。判別し易くするため各組合せのデータは、1/5(2Hz・14Hz)を茶に、2/5(4Hz・28Hz)を赤に、3/5(6Hz・42Hz)を緑に、4/5(8Hz・56Hz)を青に、5/5(10Hz・70Hz)を紫に着色して表示した。



以上の結果から、(4.7)式によりモータユニットの力学モデルが表現できることがわかった。まだ目標値にずれはあるが、周波数の組合せで各剛性において角度を設定できることがわかった。

剛性と角度について、周波数の差が小さいと角度の範囲は狭くなるが剛性は一定になり、周波数の差が大きいと角度の範囲は広がるが、大角度での剛性が低下することがわかった。SMA アクチュエータは低温で与えられた負荷歪が高温で相変態により解消される時の発生力を利用する。それゆえ大角度の場合、短縮側は負荷歪を大きく解消して短縮しているため SMA 内部の負荷歪が小さくなり剛性が小さくなったと考える<sup>(13),(14)</sup>。

本研究では、生体筋自身にばね剛性調整機能があることから剛性制御の検討を行った。今回は、オープンループで実験したが、今後は、センサによるフィードバックを取り入れハイブリッド制御やインピーダンス制御等も検討し実用性を高めてゆく予定である。

#### 4.4 本章のまとめ

本研究では、基礎特性について検証した結果、生体筋に対し単セルは、重量、密度、発生変位がほぼ同等で、発生力・発生圧力が約 3.5 倍と大きいことが分かった。ただし、モータユニットは、天然ゴムチューブを引伸ばすことに発生力の一部が取られるため発生変位が 26%に留まり、40%の生体筋や単セルと比べ小さいものとなった。

また、生体筋自身にばね剛性調整機能があることから剛性制御の検討を行った。その結果、目標値にずれはあるが、周波数の組合せで各剛性において角度を設定できることがわかった。今回は、オープンループで実験したが、今後は、センサによるフィードバックを取り入れハイブリッド制御やインピーダンス制御等も検討し実用性を高めてゆく予定である。

## 参考文献

- (1) 金子丑之助: 日本人体解剖学 第一巻 骨学 靱帯学 筋学, 南山堂, pp. 327-331, 1951.
- (2) Specialty Polymers. EMEA@solvay.com: H-GALDEN, ZT180,  
<http://www.solvay.com>
- (3) 石川敏也, 中田毅: 人工筋肉を目指した形状記憶合金アクチュエータ (運動単位の特性), 日本機械学会論文集 (C 編), 74 巻 738 号, pp. 359-364, 2008.
- (4) Specialty Polymers. EMEA@solvay.com: ガルデン HT PFPE, HT200,  
<http://www.solvay.com>
- (5) 石川敏也, 中村太郎: 巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータのモバイル化と拮抗配置による剛性制御手法の検討, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 103-112, 2016.
- (6) 山本啓一, 丸山工作: 筋肉, (株) 化学同人, pp. 11-20, 1986.
- (7) 宮村実晴・矢部京之助: 体力トレーニング, 真興交易 (株) 医書出版部, pp. 18-19, 1986.
- (8) 菅谷光雄, 中村征寿: パルス回路, オーム社, pp. 18-24, 1990.
- (9) 前川貴, 池田剛志: 単 3 電池でいつまでも! PFM 電源制御の研究, トランジスタ技術 2013 年 7 月号, QC 出版社, pp. 183, 2013.
- (10) Hunter, I., Lafontaine, S., Hollerbach, J. and Hunter, P.: Fast Reversible NiTi Fibers for Use in Micro Robotics, Proceedings of the 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems – MEMS'91. Nara. Japan, pp.166-170, 1991.
- (11) ロルフ・ヴィルヘッド: 目でみる動きの解剖学, 大修館書店, pp. 13-18, 1996.

- (12) 佐川, 橋本, 佐藤: 形状記憶合金アクチュエータの剛性制御, 第3回  
日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 329-330, 1985.
- (13) 宮崎修一: 形状記憶合金のしくみ, パリティ, Vol. 19, No. 2, pp. 11-16, 2004.
- (14) 形状記憶合金協会: トコトンやさしい形状記憶合金の本, 日本工業新聞  
社, pp. 12-15, 2016.

# 第 5 章 SMA 長方形断面素線コイルばね

## 5.1 本章の概要

モータユニットは、第 4 章で述べた通り天然ゴムチューブに挿入して用いるため単セルのみだと 40%あった発生変位が 26%まで低下する問題があった<sup>(1)</sup>。

通常モータユニットは生体筋と同様に 2 本で 1 対の拮抗配置にして用いる。単セル同士を拮抗させるだけなら、1 本の単セルは、拮抗する相手側単セルの巻フィルムチューブと SMA コイルばねを引き伸ばすのみで良く、しかも巻フィルムチューブはコンプライアンスが極めて大きく、SMA コイルばねの発生力を十分活用することができる。

しかしモータユニット同士を拮抗させる場合、単セル内の SMA コイルばねの発生力の一部が拮抗する相手側モータユニットの天然ゴムチューブの伸長力に取られる。このため、発生力の損失が大きくなって利用できる力が小さくなり単セルで 40%あった発生変位を 26%まで大きく低下させていた。

この問題に対処する方法として、相手側の天然ゴムチューブを引き伸ばして有り余るほど十分な発生力が出せるよう SMA コイルばねのばね定数を大きくする方法を検討する。

SMA コイルばねのばね定数を大きくして発生力を強化するには、コイルばねの素線を単純に太くすれば良い。しかし、従来使用してきた SMA 円形断面素線コイルばねは、素線が太くなると熱容量が増して応答性が低下するため太くすることができず、現状の方法ではこれ以上発生力の向上は望めなくなっていた。

本章では、同外径において、より大きな発生力と応答速度が期待できる SMA 長方形断面素線コイルばねについて、まず他研究と設計手法について述べ、次に今回の試作品とその試験結果と考察を述べる。

## 5.2 関連する他研究について

長方形断面 SMA ワイヤを素線とする円筒コイルバネの研究の多くは、強磁性 SMA によって占められている<sup>(2)~(4)</sup>。強磁性 SMA は磁界の作用で形状記憶効果を発現する合金で、磁力線の影響を受けやすい長方形断面を採用したもの<sup>(2)</sup>、超弾性 SMA ワイヤを強磁性体で挟んで長方形断面にしたもの<sup>(3)</sup>、超弾性 SMA ワイヤと強磁性体を張り合わせて曲げ応力を取り出すもの<sup>(4)</sup>、などがあるが、これらの研究における SMA 長方形断面素線コイルばねのばね定数は、強磁性 SMA の特性を観測しやすくするため小さく設計されており、長方形断面を採用することで発生力や冷却力の強化を狙ったものは無い。

## 5.3 従来型 SMA コイルばねの問題点

本研究でこれまで使用してきた SMA コイルばねは、円形断面の SMA ワイヤを素線とする円筒状コイルばねであり、コイルの平均径を  $D$ 、素線径を  $d$  とした場合、そのばね指数は、 $c_c = D/d = 2$  であり変位量より発生力重視で設計されていた。5%にすぎない SMA アクチュエータの発生変位量を大きくするには、SMA ワイヤをコイルばね状にするのが一般的である。ただし、これには発生力が大幅に低下する問題があるため、ばね指数  $c_c$  を製作可能な限り小さくして歪を大きくすることで発生力の増強を図ったものとする<sup>(5)</sup>。

しかし、Fig.5.1 のようにばね指数  $c_c = 2$  は、一般の円形断面素線コイルばねが Fig.5.2 のように 4 以上あるのに比べ極めて小さく、通常のばね鋼でも製作が困難とされている<sup>(6)</sup>。このため、加工の困難な SMA でばね指数  $c_c = 2$  のコイルばねを製作するには、特殊な加工技術と多額のコストが必要となる。

そこで、ばね指数  $c_c = 2$  の SMA 円形断面素線コイルばねの再現とは異なる新しい手法を試みた。ここで、図中  $D_{out}$  はコイル外径を  $D_{in}$  はコイル内径を表す。

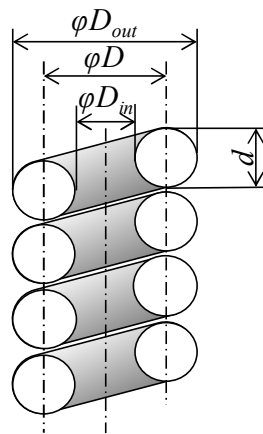


Fig.5.1 Coil spring made of SMA wire with circular cross section ( $c_c = 2$ )

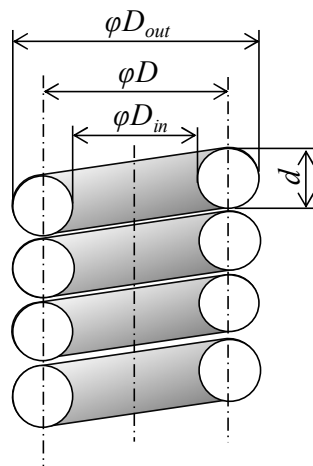


Fig.5.2 Coil spring made of SMA wire with circular cross section ( $c_c = 4$ )

#### 5.4 SMA 長方形断面素線コイルばね

SMA コイルばねの発生力を増強するには、Fig.5.3 のように単純に素線を太くすれば良い。ところが SMA アクチュエータは、加熱冷却で駆動するため、その熱の出入りの速度が応答速度に直結している。このため素線を太くして体積を増加すると重くなって熱容量の増加を招き応答性の低下を招く問題があった。またコイル外径が大きくなるため、太い巻フィルムチューブが必要になり、単セルを束ね合わせてモータユニットを製作したとき、生体筋のようなしなやかさと外観が失われ生体のように少ない空間に密集配置できなくなる問題が生じる<sup>(7)</sup>。

そこで、外径を変えずに発生力と放熱力を大きくする手法として、長方形断面素線の SMA コイルばねに注目し、特殊な技術を使用しなくても十分生産可能なばね指数  $c_r = 4$  以上において検討を行った。

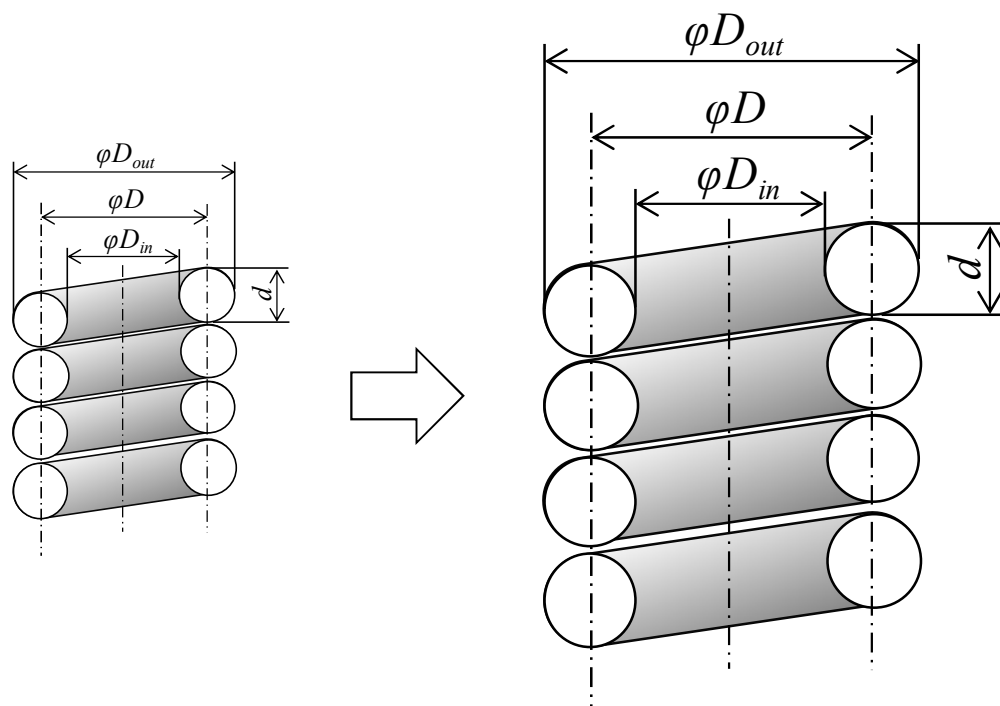


Fig.5.3 Comparison of coil spring about the wire thickness

#### 5.4.1 長方形断面素線コイルばねの特長

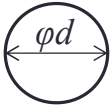
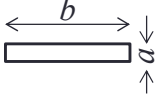








以下に長方形断面素線コイルばねの特長を示す<sup>(8)</sup>。

- ① ばね特性の直線性が円形断面のコイルばねよりも正確で設計しやすい。
- ② コイル外径に制約の有る限られた空間内において、円形断面より大きな断面積をもつ素線を用いる事ができるので多くのエネルギーを蓄えられ同外径の円形断面素線コイルばねより発生荷重が大きい。
- ③ 長方形断面素線のワイヤ幅は、コイルばねの軸方向に自由に広げることが可能なので、同じ内径の巻フィルムチューブに挿入できる外径を持つ円形断面素線コイルばねより表面積が大きくなる。

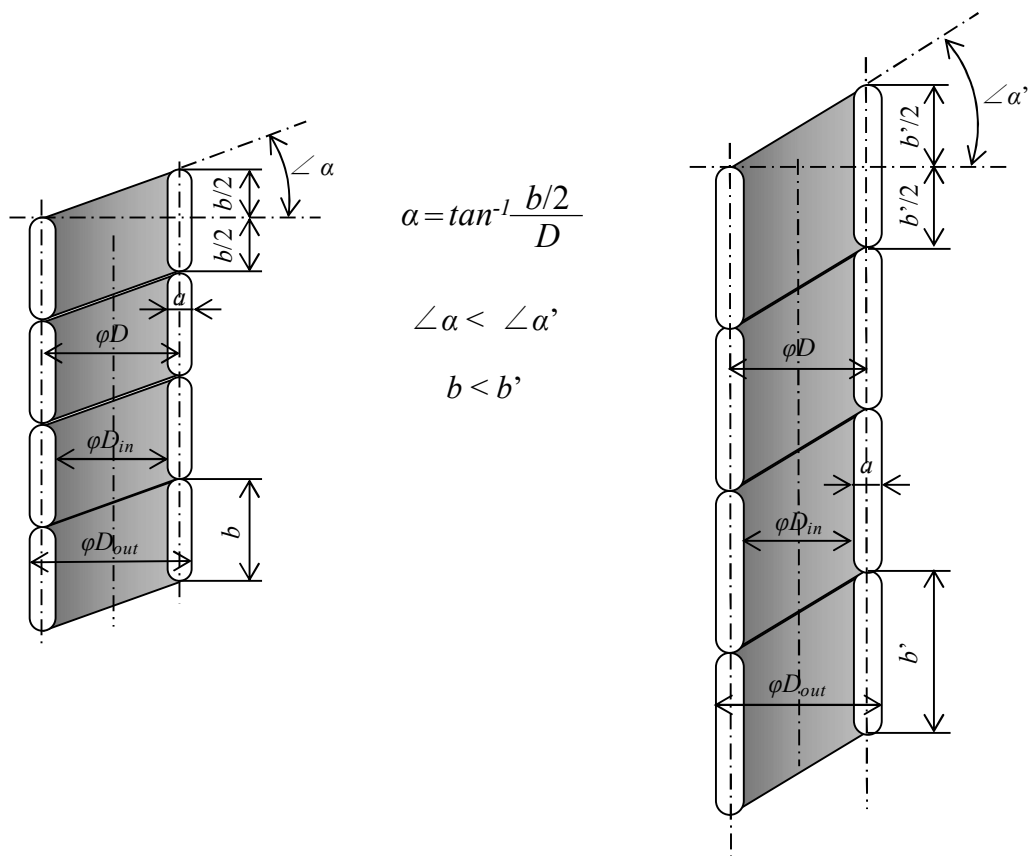
### 5.4.2 試作品とその仕様

本研究において使用中の巻フィルムチューブの寸法は，外径 1.0mm，内径 0.8mm，最小長さ 100mm だが，SMA コイルばねの寸法は，この内部に挿入することができる範囲でなくてはならない．そこで，この範囲に収まる寸法の SMA 長方形断面素線コイルばねの試作を目標に，通常の SMA 円形断面ワイヤを圧延により長方形断面ワイヤに加工し，ばね指数  $c_r=4$  以上のコイルばねの成形を目指した．Table 5.1 は圧延検討に使用したワイヤの仕様と写真である．SMA ワイヤは，外径  $\phi 0.15 \cdot 0.20 \cdot 0.25 \cdot 0.30\text{mm}$  の 4 種類を用いた．写真左側は SMA ワイヤの圧延前の状態を，写真右側は圧延後の状態を撮影したものである．また，Fig.5.4 に板幅  $b$  とコイルばねのピッチ角  $\alpha$  の関係を示す．

**Table 5.1 Results of rolling wires from circular to rectangular cross section**

Circular cross section (before rolling) $\phi d$ [mm]		Rectangular cross section (after rolling) $a \times b$ [mm]		Aspect rate $b/a$	Pitch angle ( $\phi D = 0.45\text{mm}$ ) $\angle \alpha$ [degree]
					
$\phi 0.15$		$0.1 \times 0.2$		2.0	24.0
$\phi 0.20$		$0.1 \times 0.4$		4.0	41.6
$\phi 0.25$		$0.1 \times 0.5$		5.0	48.0
$\phi 0.30$		$0.1 \times 0.7$		7.0	57.3

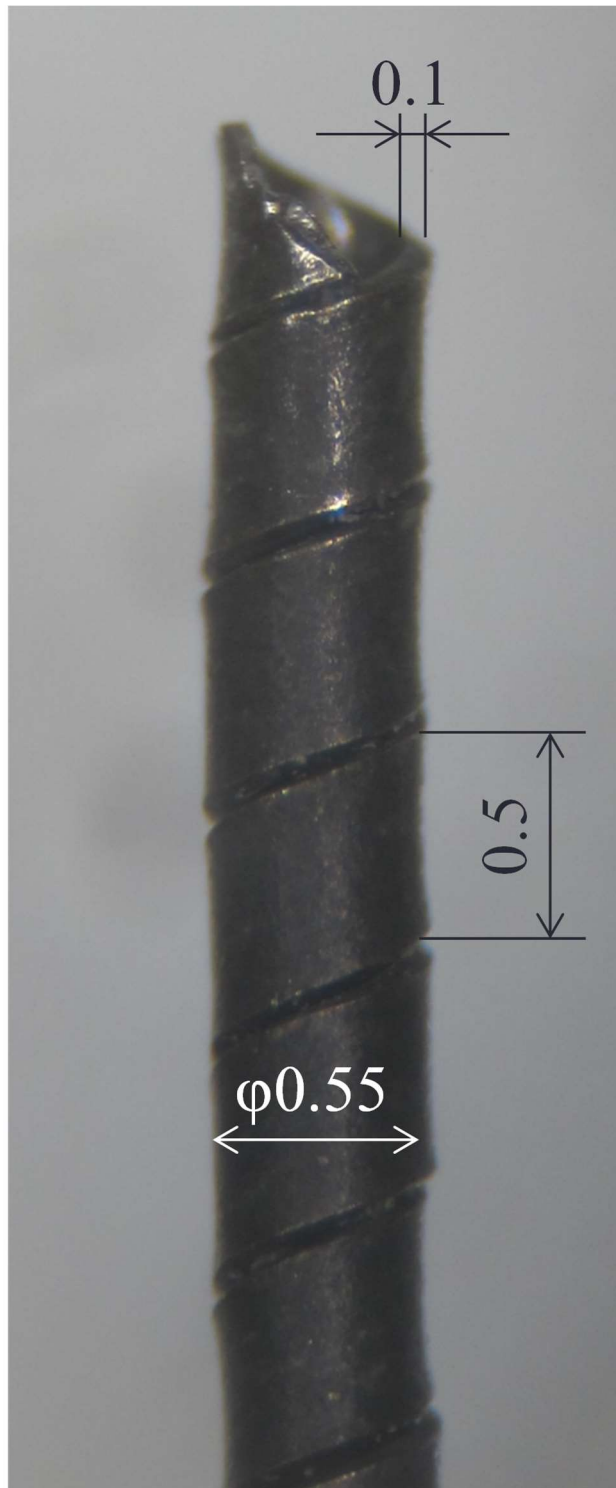




**Fig.5.4 Comparison of coil spring about the wire width and coil pitch angle**

コイルばね形成を施すワイヤを選択するに当たり、コスト面や加工の容易さも考慮しなければならない。Fig.5.4のように板幅  $b$  が大きくなるとコイルばねのピッチ角  $\alpha$  も大きくなる。一般にピッチ角が大きいとコイル成形加工が困難とされる<sup>(6)</sup>。長方形断面素線コイルばねは、板幅  $b$  が広いほどばね定数が大きくなり大きな発生力が得られる。しかし、 $\alpha = \tan^{-1}[(b/2)/D] = \tan^{-1}[b/(2D)]$  であり、板幅  $b$  が広いとピッチ角  $\alpha$  が大きくなってコイル成形が困難になる。

そこで、今回はコイル成形が比較的容易なピッチ角  $50^\circ$  以下で、なお大きな発生力が期待できる  $0.1 \times 0.5\text{mm}$  の長方形断面ワイヤを選択しコイル成形した。その試作品の写真を Fig.5.5 に、寸法重量等を Table 5.2 に示す。ここで Fig.5.4 の模式図と Fig.5.5 の写真は巻き方向が逆である。これは成形上の都合によるものであるが、性能は同等である。



**Fig.5.5 Photograph of prototype coil spring made of SMA wire with rectangular cross section (photomicrograph: ×55)**

**Table 5.2 Specifications of an SMA coil spring in the present model**

Term	Present model
$A_f$ : Phase transformation temperature [°C]	60
$a$ : Board thin [mm], rectangular cross section	0.1
$b$ : Board width [mm], rectangular cross section	0.5
$A=b/a$ : Aspect rate, rectangular cross section	5
$D$ : Coil average diameter [mm]	0.45
$D_{out}$ : Coil outer diameter [mm]	0.55
$D_{in}$ : Coil inner diameter [mm]	0.35
$C_r=D/a$ : Coil index number	4.5
$L$ : Coil adhesion length [mm]	90
$n_r=L/a$ : Coil turn number	180
Weight [g]	0.056
Volume [mm <sup>3</sup> ]	21.4
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2619

## 5.5 基礎特性

開発した SMA 長方形断面素線コイルばねのアクチュエータとしての基礎特性を評価する方法として、ばね特性とステップ応答特性の実験を行った。

### 5.5.1 ばね特性

SMA は、相変態温度を境にしてその金属格子がマルテンサイト相からオーステナイト相に移り変わる特性をもつ。

具体的には横弾性係数がアルミニウム並みに柔らかい値から鋼鉄より硬い値に変化する。したがって SMA アクチュエータを評価する場合、低温時と高温時のデータを取得する必要がある。この観点から実験装置を製作し実験した。

### 5.5.1.1 実験装置と方法

Fig.5.6 にばね特性試験装置を示し、Table 5.3 に冷却液として使用した不活性液体の仕様を示す<sup>(9)</sup>。今回試作の SMA 長方形断面素線コイルばねを室温の冷却液を満たしたメスシリンダー中に保持し、分銅を 0.5N ずつ増加し各荷重のたわみ量を測定して求めた。次に 100°C の冷却液中で同様の実験を行った。

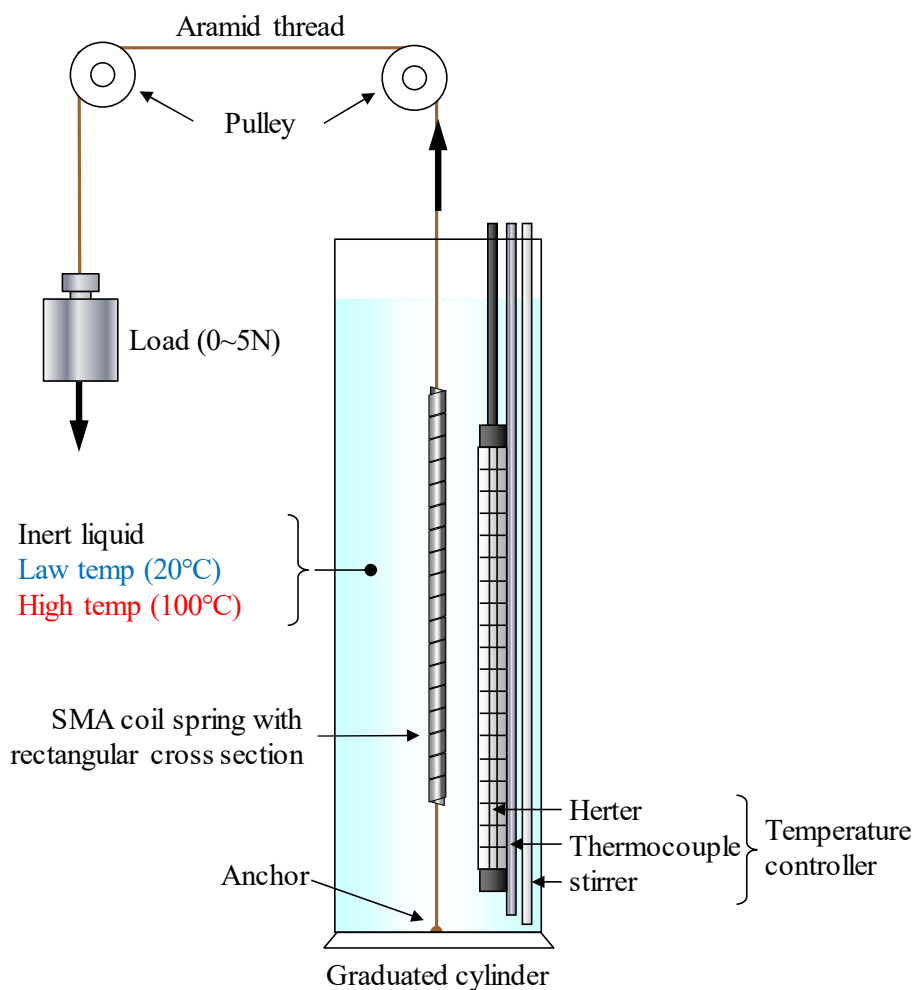


Fig. 5.6 Experimental apparatus for SMA coil spring characteristics

**Table 5.3 Specifications of inert liquid <sup>(9)</sup>**

Perfluoropolyether (PFPE)	
Boiling point [deg.]	200
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1790
Specific heat [J/(kg·K)]	963
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.065

PFPE について、粘度が水とほぼ同等のフッ素系不活性液体で、電子基板上の部品の除去作業において、半田を溶解するための熱媒体として多用される。

### 5.5.1.2 理論値計算式

今回試作した SMA 長方形断面素線コイルばねの実験結果を検討するため、その理論値計算式の算出について述べる。

#### 5.5.1.2.1 ばね定数

Fig.5.4 左を参考に SMA 長方形断面素線コイルばねのばね定数とせん断応力の簡略式を以下に示す。ただし、延伸力  $P_M$  は、低温時において印加変位  $\delta_M$  を SMA コイルばねに与えるために必要な力である<sup>(8),(10)</sup>。

$a$  : コイル中心線に垂直な辺の長さ [m], 板厚 [m]

$b$  : コイル中心線に平行な辺の長さ [m], 板幅 [m]

$D$  : コイル平均径 [m]

$D_{in} = D - a$  : コイル内径 [m]

$D_{out} = D + a$  : コイル外径 [m]

$L$  : コイル密着長さ [m]

$A = b/a$  : アスペクト比

$c_r = D/a$  : 長方形断面ばね指数 ( $r$  : rectangle)

$n_r = L/b$  : 長方形断面コイル有効巻数

$\gamma$  : ガンマ係数

$\beta$  : ベータ係数

$G$  : 横弾性係数 [Pa]

$G_M$  : 低温時 [Pa] ( $M$  : Martensite)

$G_A$  : 高温時 [Pa] ( $A$  : Austenite)

$P$  : 荷重 [N]

$P_M$  : 延伸力[N]

$P_A$  : 発生力 [N]

$\delta$  : たわみ[m]

$\delta_M$  : 印加変位 [m]

$\delta_A$  : 発生変位 [m]

$k_r$  : 長方形断面素線コイルばね定数 [N/m]

$k_{rM}$  : 低温時 [N/m]

$k_{rA}$  : 高温時 [N/m]

$\tau$  : せん断応力 [Pa]

$$k_r = \frac{P}{\delta} = \frac{a^2 b^2 G}{\gamma n_r D^3} \quad (5.1)$$

#### 5.5.1.2.2 ガンマ係数

ガンマ係数  $\gamma$  は, アスペクト比  $A=b/a$  とばね指数  $c_r=D/a$  にて決まる係数で, 文献(8)図 3.72 により求められる. このグラフでは横軸にアスペクト比  $A$  をとっており  $c_r$  をパラメータとして線図が与えられている. 本研究の SMA 長方形断面素線コイルばねは円形断面の SMA ワイヤを薄い平板線状に圧延したものを心線に巻いて固定し, 熱処理によってコイル状に成形して作る.

平板線状のワイヤを心線に巻く場合, 巻きやすく成形しやすい理由から  $a < b$

を選択すると、アスペクト比は  $A=b/a$  となる。ばね指数  $c_r$  は、現在の技術で生産可能な 4 以上としてパラメータ  $c_r=\infty$  の曲線を選択し作成したグラフを Fig.5.7 に示す。その近似曲線から(5.2)式を得た。

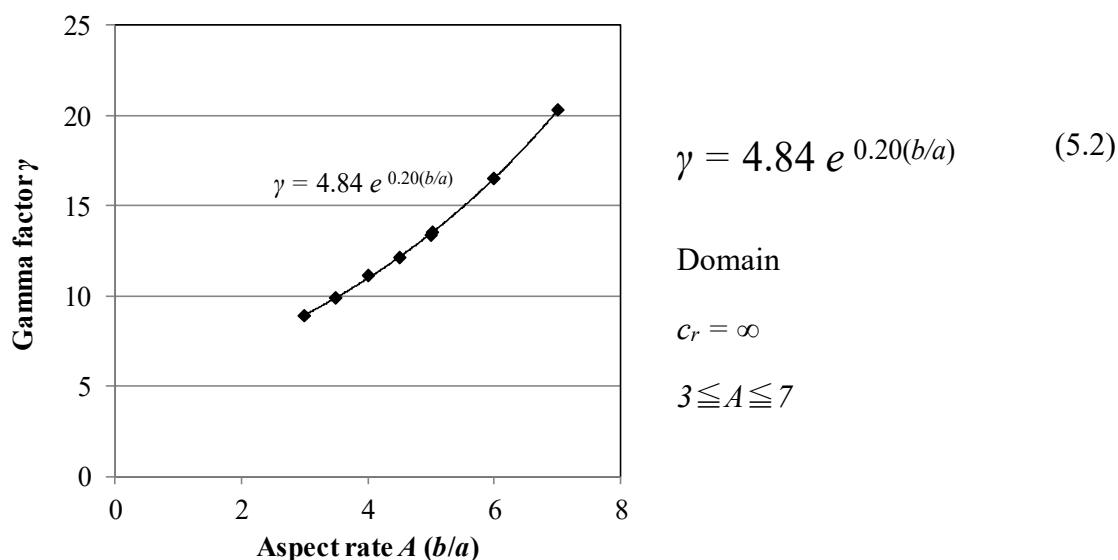


Fig.5.7 Relationship between the aspect ratio and the gamma factor <sup>(8)</sup>

### 5.5.1.2.3 ベータ係数

ベータ係数  $\beta$  は、アスペクト比  $A=b/a$  とばね指数  $c_r=D/a$  によって決まる係数で文献(8)図 3.73 により求められる<sup>(8)</sup>。このグラフでは、横軸にアスペクト比  $A$  をとっており、 $a < b$  ならば  $b/a$  を  $a > b$  ならば  $a/b$  をとり、 $c_r$  をパラメータとして線図が与えられている。ばね定数  $k_R$  は、ばね指数  $c_r$  が小さいほど大きくなるが、一般に 4 以下は製作が困難または不可能とされている。そこで、ばね定数を大きくすることができ製作も容易な  $c_r=4.5$  を採用した。

本研究の SMA 長方形断面素線コイルばねは円形断面の SMA ワイヤを薄い平板線状に圧延したものを心線に巻いて固定し、熱処理によってコイル状に成形して作る。そこで、平板線状のワイヤを心線に巻く場合、巻きやすく成形しやすい理由から  $a < b$  を選択してアスペクト比を  $A = b/a$  とした。その想定曲線を Fig.5.8 に示す。その近似曲線から(5.3)式を得た。

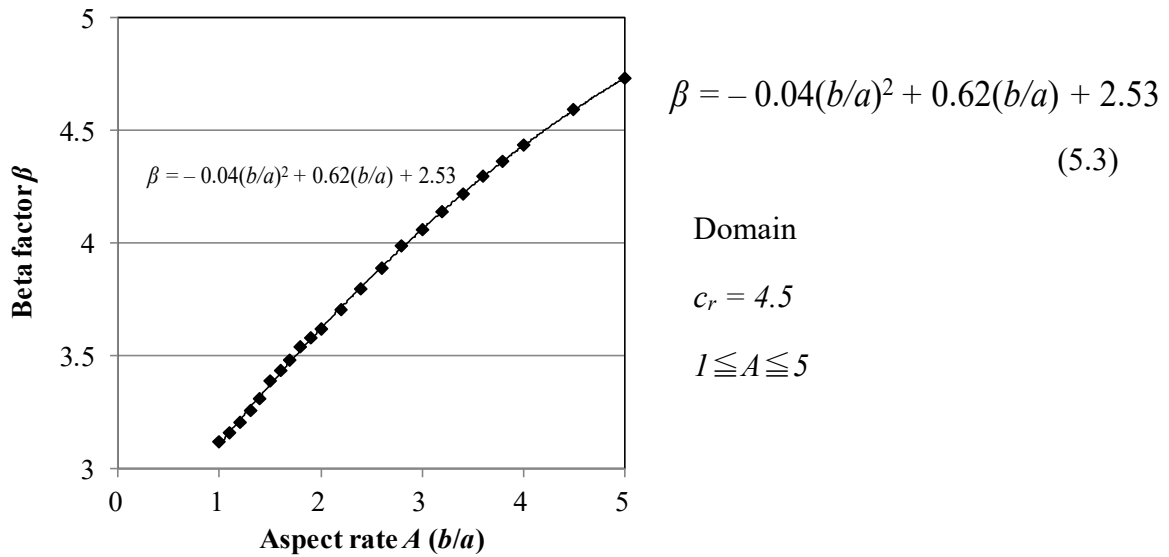


Fig.5.8 Relationship between the aspect ratio and the beta factor <sup>(8)</sup>

#### 5.5.1.2.4 横弾性係数

SMA の横弾性係数は、低温時と高温時の 2 値をとり、一般に低温時の横弾性係数  $G_M$  は 7~10GPa, 高温時の横弾性係数  $G_A$  は 17~22GPa とされている<sup>(10),(11)</sup>.

本章では、この値を参考に SMA 長方形断面素線コイルばねを設計し、たわみと負荷の実験を低温時と高温時に分けて行い取得したデータから各横弾性係数を算出する。

#### 5.5.1.2.5 最大せん断ひずみと寿命

最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  は、コイルばねの寿命にかかわる値であり、小さいほど繰り返し寿命が長くなる。一般に SMA コイルばねに十分な繰り返し寿命を持たせるには  $\gamma_{max} = 1.5\%$ 程度が適当とされている<sup>(10),(11)</sup>。(4.4)式に最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  と最大せん断応力  $\tau_{max}$  との関係を示す。

$$\gamma_{max} = \frac{\tau_{max}}{G} \quad (5.4)$$



### 5.5.1.3 実験結果と考察

ばね特性の実験結果を Fig.5.9 に示す。図中の実測値は四角点で理論値は直線で表し、実測値の低温（20℃）は青色で高温（100℃）は赤色で表した。

横弾性係数は、実測値の平均から低温時横弾性係数  $G_M$  が 6.10GPa（標準値：7～10GPa）を、高温時横弾性係数  $G_A$  が 17.4GPa（標準値：17～22GPa）を求め図中の理論値に反映した。低温時横弾性係数は標準よりやや小さいが、高温時横弾性係数は標準値だった<sup>(10)</sup>。また、最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  は生体筋の通常平均変位 20% で 4.3% であることがわかり十分な繰り返し寿命（ $10^7$  回）は得られないが通常使用程度（ $10^5$  回）には耐えられるものと考ええる。

以上の実験結果から、低温時において SMA の結晶構造がマルテンサイト相にある時のばね特性は実測値が理論値より若干小さいが傾きが合っていることがわかった。しかし、高温時においてオーステナイト相にある時は負荷約 3N 変位約 15mm まで比較的直線性が良いが、それ以降は実測値と理論値が大きくかい離することがわかった。これは SMA 特有の非線形特性のためと考える。

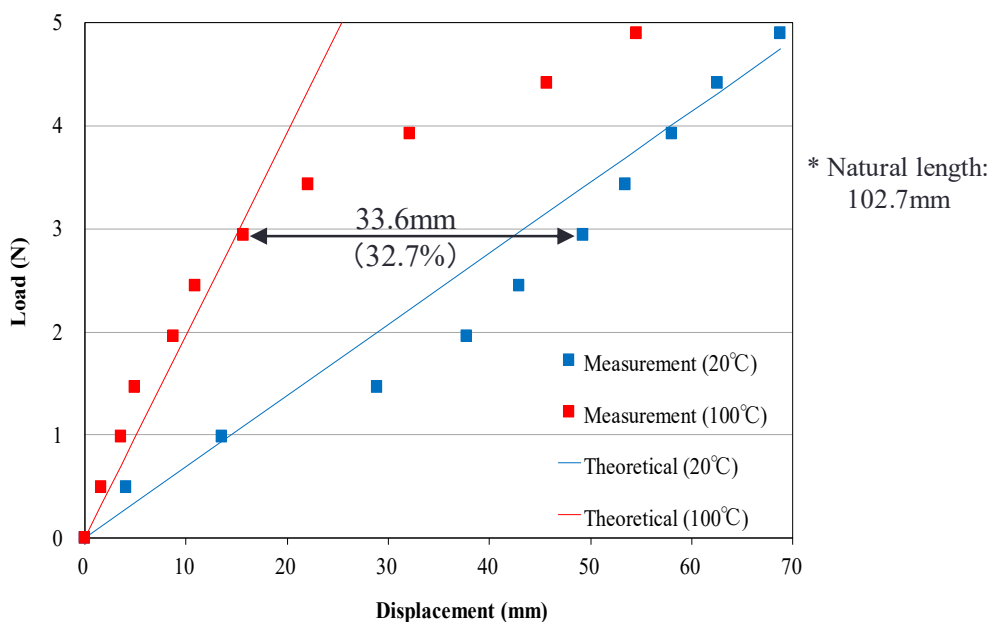


Fig. 5.9 Experimental results of SMA coil spring characteristics

## 5.5.2 ステップ応答特性

### 5.5.2.1 実験装置と方法

SMA 長方形断面素線コイルばねのアクチュエータとしての性能評価のため、ステップ応答特性実験を行った。Fig.5.10 にその実験装置を示す。冷却液は今回試作の SMA 長方形断面素線コイルばねに沿って流れるよう設置されている。

データは一次遅れ系とし、電力投入時の上りの時定数と電力遮断時の下りの時定数を測定した。ここで、冷却液の流量はポンプの印加電圧を調整して設定し温度はヒータ・攪拌機・熱電対からなる温度調節器にて設定される。従来使用してきた SMA 円形断面素線コイルばねのステップ応答実験も同様に行う。

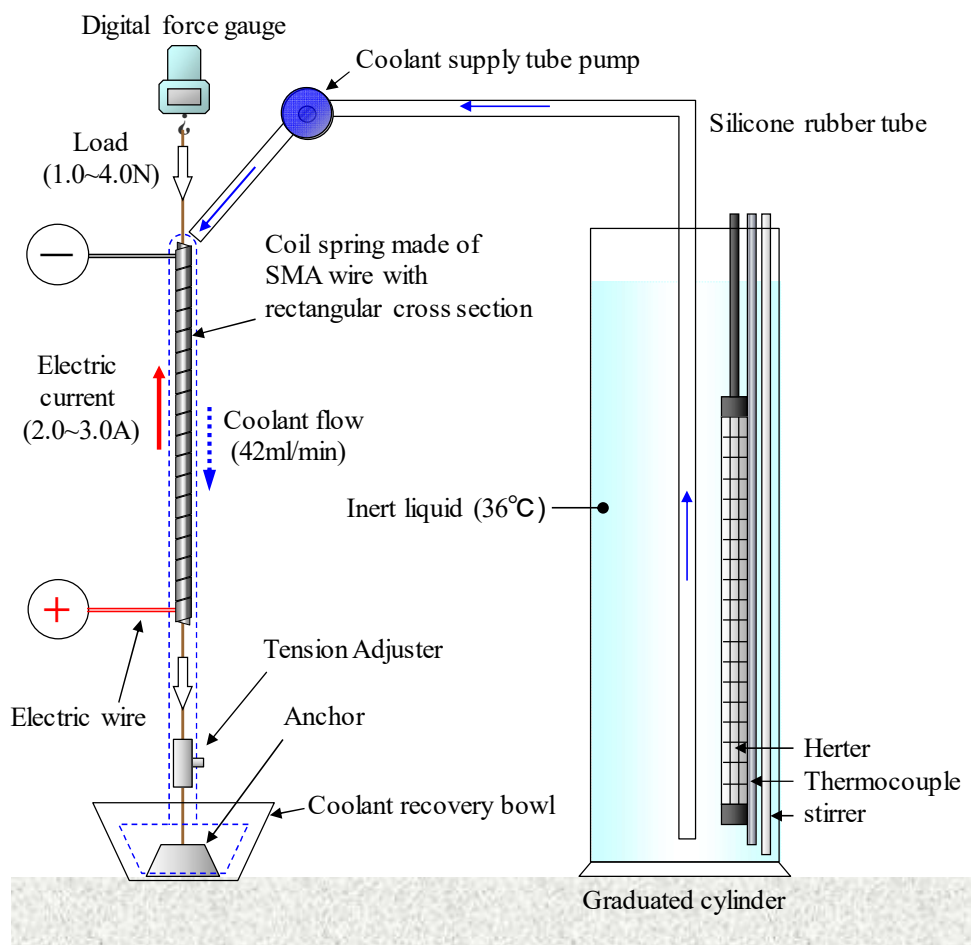


Fig. 5.10 Experimental apparatus for step response examinations

## 5.5.2.2 実験結果と考察

ここでは、上りと下りのステップ応答実験結果における代表的なデータを表示し、生体筋のステップ応答データと比較する。さらに冷却液温度と、これらの時定数の関係を明らかにする。

### 5.5.2.2.1 上りと下りのステップ応答

Fig.5.11 に SMA 円形断面素線コイルばねと SMA 長方形断面素線コイルばねの上りのステップ応答特性を、Fig.5.12 にそれぞれの SMA コイルばねの下りのステップ応答特性を示す。比較のための生体筋のステップ応答特性のデータは、文献(12)図 2 より求めた。これは、20°Cの生理的食塩水中においてカエルの腓腹筋（速筋）を一定の長さに保持して等尺状態に置き、電気刺激を加えた時に筋肉内に発生する音と発生力の時間変化のデータであり、この速筋の強縮特性データを一次遅れ系のステップ応答波形と考え時定数を測定し比較に用いた<sup>(12)</sup>。

ただし、このデータには強縮状態から弛緩状態に変化する下りのステップ応答データが無いので SMA 円形断面素線コイルばねと SMA 長方形断面素線コイルばねとの比較は上りのステップ応答データのみで行った。

このステップ応答実験において、冷却液は温度 36°C・流量 14ml/min 一定に保持され、通電流は 2.0A 一定として SMA 円形断面素線コイルばねと SMA 長方形断面素線コイルばねの電気抵抗値を測定して印加電圧を決定した。Table 5.4 に各 SMA コイルばねと同サイズに換算した生体筋の仕様を示す<sup>(13)~(15)</sup>。

この実験結果より、上がりステップ応答において円形断面は時定数が 453ms なのに対し長方形断面は 226ms と短く、同様に下りにおいても、円形断面は時定数が 360ms で長方形断面は 237ms であることがわかった。この結果、長方形断面の方が円形断面より加熱時の冷却性能が高いことがわかった。

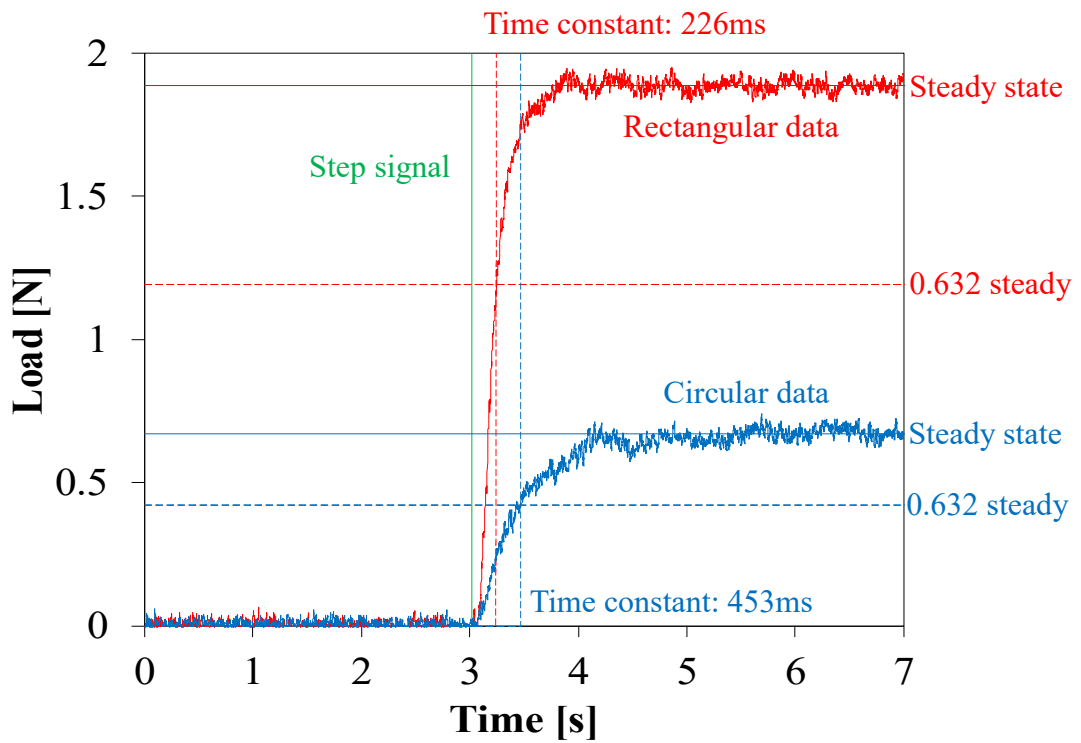


Fig.5.11 Time constants at step up (compare with circular and rectangular)

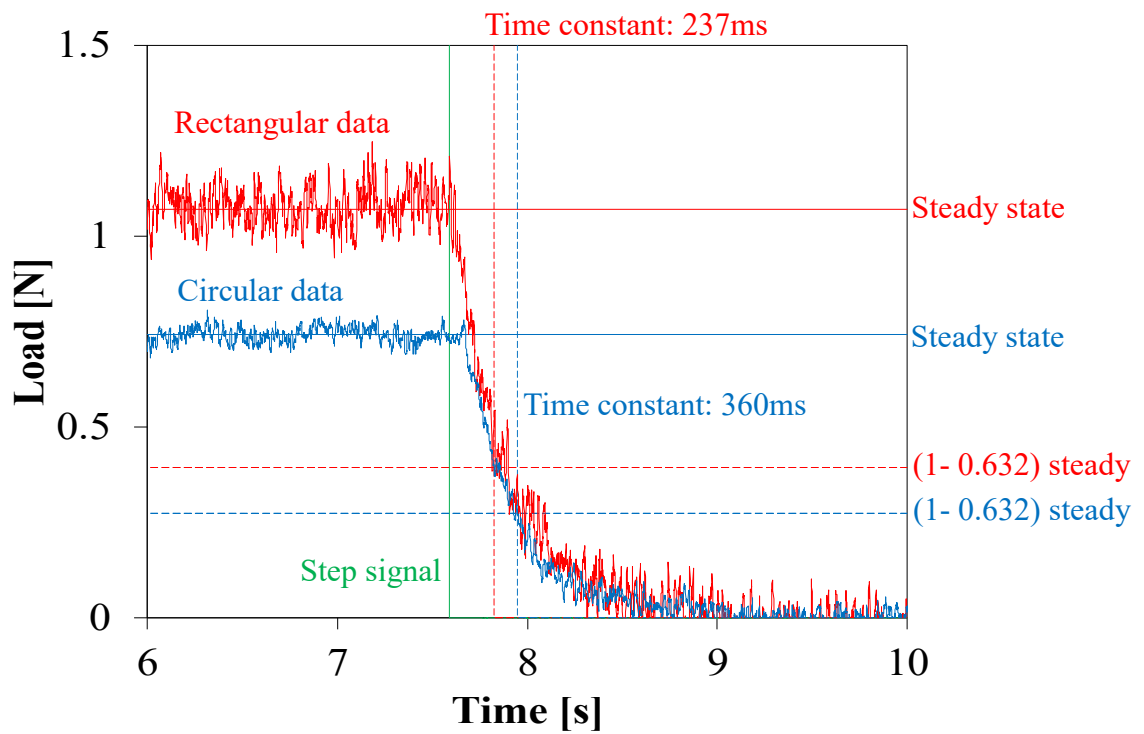


Fig.5.12 Time constants at step down (compare with circular and rectangular)

**Table 5.4 Specifications of SMA coil springs and same size natural muscle <sup>(13) ~ (15)</sup>**

Term	Natural muscle	Circular type	Rectangular type
$A_f$ : Phase transformation temperature [°C]	-	60	60
$d$ : Wire diameter [mm] , circular cross section	-	0.2	-
$a$ : Board thin [mm], rectangular cross section	-	-	0.1
$b$ : Board width [mm], rectangular cross section	-	-	0.5
$A=b/a$ : Aspect rate, rectangular cross section	-	-	5
$D$ : Coil average diameter [mm]	-	0.4	0.45
$D_{out}$ : Coil outer diameter [mm]	0.55	0.6	0.55
$D_{in}$ : Coil inner diameter [mm]	-	0.2	0.35
$C_c=D/d$ (circular), $C_r=D/a$ (rectangular): Coil index number	-	2	4.5
$L$ : Coil adhesion length [mm]	90	80	90
$n_c=L/d$ (circular), $n_r=L/a$ (rectangular): Coil turn number	-	400	180
$K_M$ : Stiffness [N/m], low temperature (20°C)	-	52	69
$K_A$ : Stiffness [N/m], high temperature (100°C)	-	160	197
$G_M$ : Transvers elasticity factor [GPa], low temp (20°C)	-	6.66	6.10
$G_A$ : Transvers elasticity factor [GPa], high temp (100°C)	-	20.5	17.4
Weight [g]	0.022	0.110	0.056
Volume [mm <sup>3</sup> ]	21.4	22.6	21.4
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1019	4863	2619
Maximum output force [N]	0.10	2.82	5.16
Maximum output displacement [%]	40.0	48.4	43.6

### 5.5.2.2.2 冷却液温度流量と時定数の関係

Fig.5.13 に冷却液流量をパラメータにした冷却液温度と時定数の関係を示す。時定数は、上りと下りのステップ応答波形から求めた。5.5.2.2.1 と同様に通電電流は 2.0A とし、低温時において負荷 2N で予歪を与えて実験を行った。

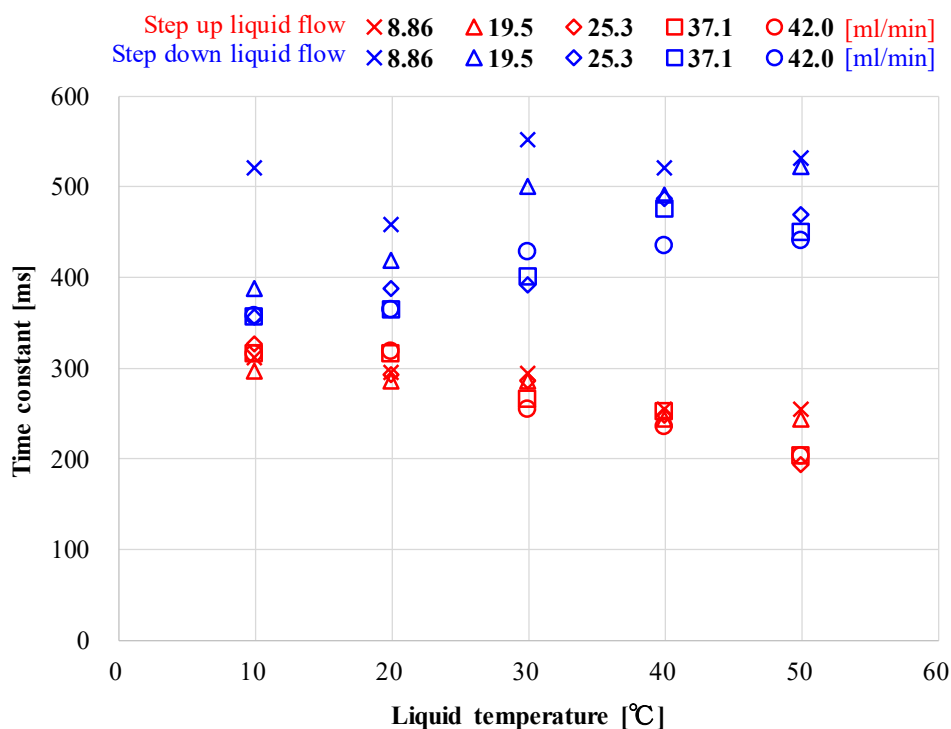


Fig.5.13 Liquid temperatures and time constants (liquid flow parameter)

この結果から、通電加熱による発生力の上りの時定数は液流冷却による下りの時定数より短く、温度が変態温度 60°C に近いほど早くなることがわかった。また、冷却液流量は上りの時定数にはほとんど影響しないが、下りの応答には約 20ml/min 以上必要なことがわかった。これは冷却液流量が、ある程度ないと加熱により発生した熱を十分除去しきれないためと考える。ただし、モータユニットには流動抵抗があり、その構造を破壊しないためにも、省エネの観点からも、流せる冷却液流量には上限が存在すると考える。

### 5.5.3 生体筋と従来型コイルばねとの比較

本研究で使用してきた SMA 円形断面素線コイルばねと、今回試作した SMA 長方形断面素線コイルばねをそれぞれ第 3 世代型巻フィルムチューブに挿入し単セルを作り同サイズの生体筋と比較したものを Table 5.5 に示す<sup>(13)~(15)</sup>。

**Table 5.5 Specifications of unit cells and same size natural muscle** <sup>(13)~(15)</sup>

Term	Natural muscle	Unit cell	
		Circular cross section	Rectangular cross section
Regular diameter [mm]	1.0		
Minimum length [mm]	100		
Minimum volume [mm <sup>3</sup> ]	78.5		
Blood temperature [°C]	36		
Weight [g]	0.08	0.14	0.12
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1019	1783	1529
Maximum output force [N]	0.31	2.82	5.16
Maximum output displacement [%]	40.0	48.4	43.6
Maximum output pressure [MPa]	0.4	3.59	6.57
Maximum output force / weight	395	2054	4385
Maximum output pressure / density [kPa*m <sup>3</sup> /kg]	0.39	2.01	4.30
Minimum time constant [ms]	100/200	453	226

Note) Minimum time constants in the column of natural muscle are fast-twitch (100ms) and slow-twitch (200ms).

この結果、今回試作の SMA 長方形断面素線コイルばねは単セルに使用した場合、発生変位・重量が生体筋と従来の SMA 円形断面素線コイルばねを単セルに使ったものとほぼ同等で、最大発生力が自重の約 4400 倍・SMA 円形断面素線コイルばね入り単セルの約 2 倍・生体筋の約 17 倍あることがわかった。また、長方形断面にすることにより放熱力が強化されたため時定数の改善が見られ、従来の SMA 円形断面素線コイルばね入り単セルの 3 分の 1、生体の速筋の約 2 倍、遅筋とほぼ同等である時定数 226ms が観測された。

生体筋の時定数について、文献(12)図 2 は、カエルの腓腹筋（速筋）を等尺状態に置き、電気刺激時に筋肉内に発生する「筋音」と発生力の時間変化のデータである。この発生力のデータを一次遅れ系のステップ応答波形と考え、時定数を算出して比較に用いた。この結果、速筋の時定数は約 100ms であることがわかった。一般に速筋の速さは遅筋の 2 倍とされているので遅筋の時定数は約 200ms となる<sup>(16)</sup>。今回試作の SMA 長方形断面素線コイルばねの時定数は 226ms で、これは速筋の約 2 分の 1 であり遅筋と同等の応答速度を達成したものと考える。

筋音（muscle sound）について、発生力と同時に生じる筋音は、生体における機械的振動であり、筋収縮時に筋繊維の外径が拡大し変形するときに生じる圧波（微細振動）であると推定される。生体部位の動きの情報を電氣的振動である筋電より多く含んでいることから、近年、医学・生理学方面で注目されている<sup>(17)</sup>。

#### 5.4 本章のまとめ

モータユニットには、単セルのみだと 40%あった発生変位が、天然ゴムチューブの影響で 26%まで低下する問題があった。そこで、天然ゴムチューブを引き伸ばしても十分有り余るほどの発生力が出せるよう SMA コイルばねの素線を太くすると熱容量が増し、応答性が低下する問題があった。このため現状では、これ以上発生力の向上は望めなくなっていた。



そこで、同外径において、より多くの弾性エネルギーを蓄えることができ表面積を大きくできることから、発生力と応答速度が期待できる SMA 長方形断面素線コイルばねについて試作・検討を行った。

その結果、今回試作の SMA 長方形断面素線コイルばねは、単セルに使用した場合、発生変位・重量が生体筋と従来の SMA 円形断面素線コイルばねを単セルに使用したものとほぼ同等で、最大発生力が自重の約 4400 倍・SMA 円形断面素線コイルばね入り単セルの約 2 倍・生体筋の約 17 倍あることがわかった。

また、長方形断面により放熱力が強化されたため時定数が、従来の SMA 円形断面素線コイルばね入り単セルの 3 分の 1 で、生体の速筋の約 2 倍で、遅筋とほぼ同等である時定数 226ms が観測された。また、冷却液流量は加熱時の時定数には関係ないが、冷却時の時定数を短縮するためには多いほど良いことがわかった。

## 参考文献

- (1) 石川敏也, 中村太郎: 巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータのモバイル化と拮抗配置による剛性制御手法の検討, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 103-112, 2016.
- (2) T. Wada, C. Lee, M. Taya: Design of FePd spring actuators, CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FADIGA, pp. 1-11, 2008.
- (3) Y. Matsunaga, T. Tagawa, T. Wada, M. Taya: Design of ferromagnetic shape memory alloy composites based on TiNi for robust and fast actuators, Smart Structures and Materials 2002, pp. 10.1117-12.474973, 2002.
- (4) K. Kusaka, M. Taya: Design of Ferromagnetic Shape Memory Alloy Composites, Journal of Composite Materials, pp. 1-26, 2007.
- (5) 山本, 前田, 伊藤: SMA マイクロコイルアクチュエータ, マイクロマシン技

- 術研究開発成果発表会予稿集, pp. 45, 1994.
- (6) 小玉正雄：ばねのおはなし, 日本規格協会, pp. 28-33, 1985.
- (7) 金子丑之助: 日本人体解剖学 第一巻 骨学 靭帯学 筋学, 南山堂, pp. 412-413, 1951.
- (8) 日本ばね学会編：ばね 第4版, 丸善株式会社, pp. 181-184, 2008.
- (9) SOLVAY: “Galden PFPE,” HT200, <http://www.solvay.com/en/markets-and-products/featured-products/Galden.html>
- (10) 船久保熙康：形状記憶合金, 産業図書株式会社, pp. 150-157, 1984.
- (11) 渥美光, 鈴木幸三, 三ヶ田賢次：材料力学 1, 森北出版 (株), pp. 7-10, 1981.
- (12) John V. Frangioni, Tao S. Kwan-gett, Lynn E. Dobbunz, Thomas A. McMahn: The mechanism of low-frequency sound production in muscle, pp. 775-783, 1987.
- (13) 山本啓一, 丸山工作：筋肉, (株) 化学同人, pp. 11-20, 1986.
- (14) 宮村実晴・矢部京之助：体カトレーニング, 真興交易 (株) 医書出版部, pp. 18-19, 1986.
- (15) ロルフ・ヴィルヘッド：目でみる動きの解剖学, 大修館書店, pp. 13-18, 1996.
- (16) 杉晴夫：筋肉はふしぎ, 講談社, pp. 108-145, 2003.
- (17) 坂本和義, 清水豊, 水戸和幸, 高野倉雅人：生体のふるえと振動知覚 メカニカルバイブレーションの機能評価, 東京電機大学出版局, pp. 87-90, 2009.

## 第 6 章 結論と今後の展開

### 6.1 結論

近年、必要が高まりつつある人間と同じ生活空間で共存できるロボットには、人間に近い形態と柔軟性が要求され、人間同様の内骨格構造の導入も試みられている。そのようなロボットに使用する人工筋肉アクチュエータとして SMA は、大きな力と変位を発生し柔軟性もあるため、多くの研究機関で研究されている。

SMA で人体サイズに適合する大きな発生力を得るには、太い SMA ワイヤが必要だが、加熱・冷却時間が長く消費電力も大きいので短時間で加熱・冷却できる細い SMA ワイヤを束ね合わせる方式が検討されている。しかし細い SMA ワイヤを束ね合わせると電氣的短絡・絡み合い等の問題が生じ、空気や水などの冷却媒体が圧損によりワイヤの束の中心まで届かないため、冷却が不均一になり応答時間に延長が生じる問題があった。このため、ワイヤの間隔をある程度以上空ける必要があり、実用上、装置体積の割に大きな力が得られない問題があった。

このような背景のもと、SMA アクチュエータについては、マイクロマシン等の小型システム向けの開発が中心となり、人体サイズのシステムへの応用研究は、十分には進められていない現状があった。

本研究では、以上の問題点を解決する手段として、SMA 専用の機械要素として耐熱性と柔軟性に優れる「巻フィルムチューブ (Rolled film tube)」を提案し、これに細い SMA コイルばねを挿入して「単セル」を組み立て、これを束ね合せて柔軟性とシーリング性に富む天然ゴムチューブに挿入し「モータユニット」を製作した。これを生体筋の代わりになるような人工筋肉を目指す前提から、その基本特性を生体筋との比較を念頭に実験を行い、さらに人体と同様の拮抗配置によるオープンループ型剛性制御手法の実験を行った。

その結果、基礎特性について、生体筋に対し単セルは、重量、密度、発生変位がほぼ同等で、発生力・発生圧力が約 3.5 倍と大きいことが分かった。ただし、モータユニットは、天然ゴムチューブを引伸ばすことに発生力の一部が取られるため発生変位が 26%になり生体筋や単セルの 40%と比べ小さいものとなった。

次に、生体神経インパルスと同じ幅で同じ周波数帯域のパルス列による PFM 駆動実験により、パルス周波数にほぼ比例して発生力と発生変位が得られる事がわかり、本 SMA アクチュエータに人体同様の制御が適用できる可能性が有る事がわかった。また、拮抗配置によるオープンループ型剛性制御手法の実験により、差動式拮抗型モデルによる力学モデルは、周波数の組合せで各剛性において角度が設定できることがわかった。この結果、ばね剛性を調整する機能をもった生体筋と同様の剛性制御が可能であることがわかった。

本研究のモータユニットには、発生力の一部が天然ゴムチューブの伸長に取られるため、発生変位が 26%に大きく低下する問題があった。この問題に対処するため、天然ゴムチューブを引き伸ばしても十分有り余るほどの発生力が出せるように SMA コイルばねのばね定数高める検討を行った。その結果、長方形断面素線コイルばねの採用により、軸方向に断面積を広げて弾性エネルギーを多く蓄積することでばね定数を高め発生力を同サイズの SMA 円形断面素線コイルばねの約 2 倍に増強しこの問題を解決した。これと同時に、表面積を拡大することで放熱力を増強し応答性を高め、従来の SMA 円形断面素線コイルばねの時定数が約 450ms であったところを生体の遅筋並みの約 230ms まで短縮することに成功した。

以上検出された時定数について、2 章で紹介した SMA アクチュエータの応答性問題の解決手段としての強制冷却方式について比較した Table 2.1 に、本研究で開発した SMA 長方形断面素線コイルばねのデータを挿入した Table 6.1 を次に示す。

この Table 6.1 から、冷却システムの性能については強制空冷式と強制油冷式が比較的有効と見られる。しかし、空圧や油圧を作り出すコンプレッサーなどの圧力源や、その圧力を貯えるタンクやアキュムレータが必要であり、加えてそのシステムを支えるエアフィルタ・圧力調整器・電磁弁などの補器類が必要となる。このため、小型軽量性を一番の特長とする SMA アクチュエータの利点が生かされない問題がある<sup>(1),(2)</sup>。

これに対し、流体を循環させるだけで大型の圧力源を必要としない不活性液体方式や<sup>(3)</sup>、熱電半導体のみで加熱冷却するペルチエ効果方式は<sup>(4)</sup>、小型軽量性を生かすことに配慮した例である。しかし、検出された時定数から、両者とも応答性問題の解決には遠い。この谷口らの不活性液体方式は、不活性液体を小型のポンプで循環させる点で本研究の方式と同等だが、応答性については、本研究の方が桁違いに時定数が短く良い結果を得ている。この理由として、厚さ 0.1mm 幅 0.5mm の SMA 長方形断面ワイヤで形成され表面積が大きい SMA 長方形断面素線を使う本研究のコイルばねと比べ、太さ  $\phi 0.5\text{mm}$  で熱容量が大きく比較的 surface area の大きい SMA 円形断面コイルばねを使用する谷口らの不活性液体方式は、加熱冷却に時間がかかるため応答性が低くなったものとする<sup>(3)</sup>。

**Table 6.1**

Media of forced cooling	Displacement (mm)	Time constant at heating (ms)	Time constant at cooling (ms)	Input power (W)
Air	35.3	145	114	50
Oil	0.05	7.96	7.96	53
Inert liquid	10.0	18400	15800	0.36
Electron (Peltier)	5.0	3500	3500	7.5
Present study	33.6	226	237	4.6

## 6.2 今後の展開

今後は、本質的に大量生産を必要とする本モータユニットの量産化を図り、具体的応用技術を探索し、ハイブリッド制御やインピーダンス制御等の制御手法についても検討し、省エネ駆動システム等も開発し、実用化を目指す予定である。以下にその詳細について述べる。

### 6.2.1 保温効果省エネルギー駆動

冷却液の流れを止めた状態で単セル 1 本と巻フィルムチューブを装着しない SMA 長方形断面素線コイルばね 1 本にそれぞれ分銅で荷重 0.5N を掛け、幅 4ms のパルス電圧 30V を 1 発入力した時の発生変位の時間的变化を Fig.6.1 に示す。この図から、パルス電圧入力後発生変位が最大になるまでの分銅の上昇時間は、単セルと SMA コイルばねは同じ約 10ms だが、最大変位が 0 に戻るまでの下降時間は SMA コイルばねが約 15ms であるのに対し、単セルの下降時間は約 150ms で 10 倍も長いことがわかる。これは、巻フィルムチューブに熱を蓄え温度を保持する能力があるためと考える。

この特性は、一定の位置を保持するのに有利と考える。具体的には Fig.6.2 のように平均変位量 4mm を一定に保つ場合、単セルでは入力パルスの間隔を 40ms にすれば良いが、SMA コイルばねのみではパルス間隔を 10ms にする必要がある。これから単セルの投入電力は SMA コイルばねの 1/4 で良いことがわかる。この定位置保持に有利に働く効果を「保温効果」と呼ぶ。

生体筋は、日常の直立・着座・荷物持ち等の場面において、アイソメトリック収縮（等尺性収縮）と呼ばれる定位置保持を行う場合が多い<sup>(5)</sup>。この保温効果をロボットの定位置保持に活用し運用を工夫する事で大幅な総合効率の向上が期待できる。現在、この効果を使った省エネルギー駆動技術の開発を検討中である。

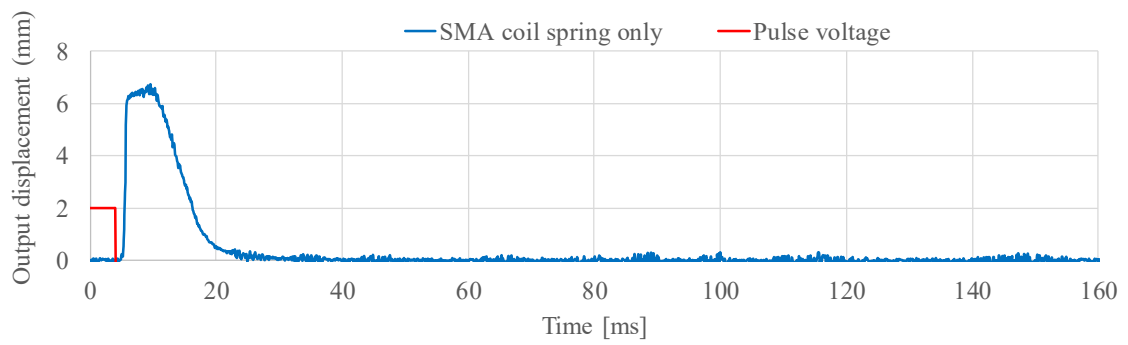
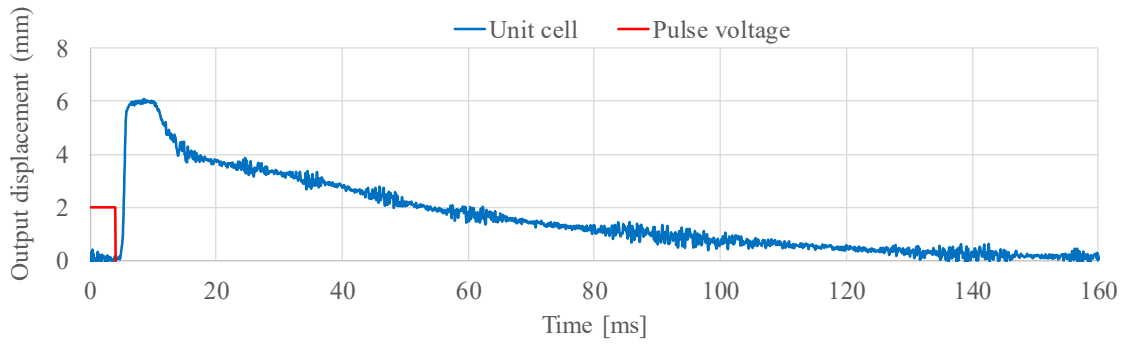


Fig.6.1 Thermal effect of a unit cell

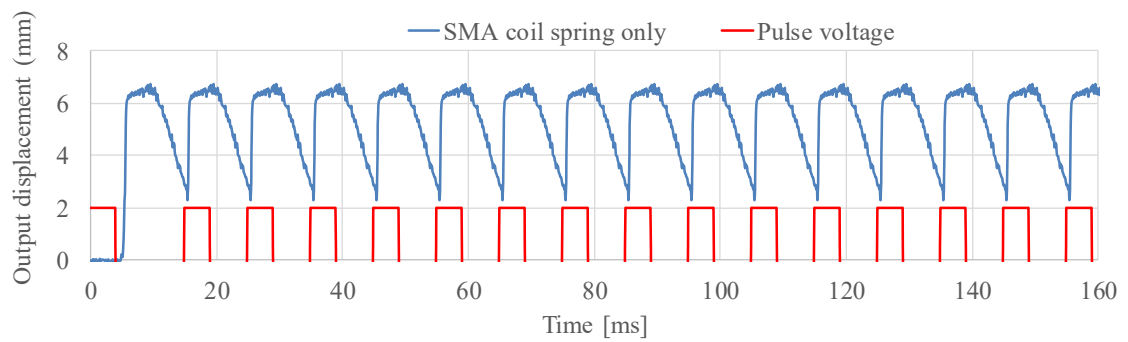
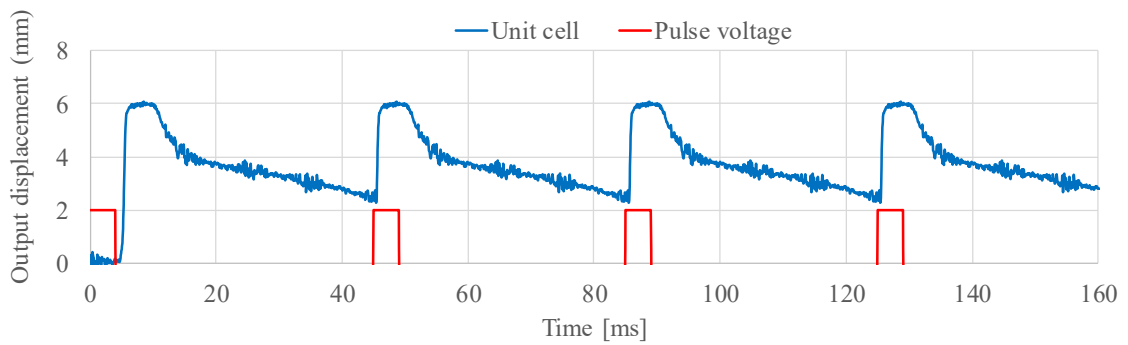


Fig.6.2 Constant position holding by thermal effect

### 6.2.2 モータユニットの量産化

生体筋は、最小単位の筋肉細胞が複数結束した構造をもち、筋肉細胞の組合せにより種々の形状の筋肉が形成されている<sup>(6)</sup>。モータユニットは、単独では通電で一方向に短縮するだけのアクチュエータだが、人体内のように複数密集配置することで精細かつ力強い動作を行うロボットや義手を実現するものとする。これにはモータユニットの量産化が必須である。

現在、モータユニット量産化計画が推進中であり、試作品数本を完成している。

### 6.2.3 柔軟性の高いロボットハンド

少子高齢化で生産年齢人口が減少し現場のさらなる自動化が求められる手作業やサービス業の分野や、急速に増加しつつある高齢者の介護・介助に代表される医療・福祉分野では、人体に近い構造と柔軟性と体温を持つロボットハンドの登場が望まれている<sup>(7)</sup>。人間の筋肉に近い形状と柔軟性と人体温と同じ冷却液温度を持つ本研究のモータユニットの量産化がかなえば、この要望に応えることができると思う。

現在、人体腕と同様構造のロボットハンド開発を計画中である。この内部には、人間の腕と同様の動きができるようモータユニットを配置する予定である。

### 参考文献

- (1) 石川敏也，島田公雄：空気圧制御による形状記憶合金の動特性の研究，昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会論文集，pp. 1-2, 1985
- (2) 横田眞一，吉田和弘，坂東賢一，須原正明：形状記憶合金アレイアクチュエータを用いた小形比例弁，日本機械学会論文集（B編），62巻593号，pp. 224-229, 1996.



- (3) 谷口浩成, 神橋政士, 橋本篤徳: 不活性液体による冷却機構を有する小型 SMA アクチュエータの試作, 日本 AEM 学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 274-279, 2014.
- (4) 齊藤春雄, 竹前忠, 矢野健太郎: サーモモジュールを応用した形状記憶合金 アクチュエータの研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 58 巻 545 号, pp. 133-137, 1992.
- (5) 牧川方昭, 吉田正樹: 運動のバイオメカニクス 運動メカニズムのハードウェアとソフトウェア, コロナ社, pp. 83-88, 2008.
- (6) 金子丑之助: 日本人体解剖学 第一巻 骨学 靱帯学 筋学, 南山堂, pp. 327-331, 1951.
- (7) 厚生労働省: 福祉用具・介護ロボットの開発と普及 2015, 厚生労働省 老健局高齢者支援課, pp.1-7, 2015.

# 謝辞

終わりに臨み，本論文の主査であり指導教官である

中央大学理工学部精密機械工学科教授 中村 太郎 先生

には，本研究について多岐に渡る研究者としての知識や技術を賜りました。  
心より感謝申し上げます。

本論文の審査において副査を務めてくださった

中央大学理工学部精密機械工学科教授 辻 知章 先生

中央大学理工学部電気電子情報通信工学科准教授 諸麥 俊司 先生

信州大学繊維学部機械・ロボット学科教授 橋本 稔 先生

には，貴重なご助言やご指摘をいただきました。深く御礼申し上げます。

公聴会に駆けつけてくださった

山形大学工学部機械システム工学科助教 戸森 央貴 先生

はじめ，中央大学大学院時代において色々お世話になった中村研究室の皆様に  
深謝申し上げます。

35年前，飛び込み持込みであるにもかかわらず1984年度卒業研究として  
SMA人工筋肉アクチュエータの研究を快くお認めいただいた

中央大学理工学部精密機械工学科助教 島田 公雄 先生

には，その後の研究人生の端緒となる学会発表の経験をさせて頂きました。  
心より厚く御礼申し上げます。

会社に勤務しながら休日や終業後に自宅研究室で研究を続けていた 2000 年から 2014 年まで、

東京電機大学情報環境学部名誉教授 中田 毅 先生  
には、14 年間にわたり定年退官されるまで終始懇切丁寧な研究のご指導ご鞭撻を賜りました。心より厚く御礼申し上げます。

巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータの共同開発にあたり、  
株式会社キャンパスクリエイト技術移転部取締役 高橋 めぐみ 様  
には、金子コード株式会社様との出会いの機会を調整していただきました。  
心より感謝申し上げます。

巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータの試作検討にあたり、  
金子コード株式会社事業統括本部本部長 渥美 安司 様  
には、ご期待いただき貴重なお金とお時間とご人材を投じていただきました。  
心より厚く御礼申し上げます。

リバネス研究費安川電機自動化賞受賞にあたり、  
株式会社リバネス地域開発事業部採用担当 宮内 陽介 様  
には、受賞を通し株式会社安川電機様との出会いの機会をいただきました。  
深謝申し上げます。

リバネス研究費安川電機自動化賞受賞を通し、  
株式会社安川電機マーケティング本部事業企画課担当課長 井部 一隆 様  
をはじめ安川電機の皆様には、喫緊の労働者・介護者不足に対応するロボットの重要技術としてご期待いただきました。心より厚く御礼申し上げます。

ハワイ大学留学における1か月の間、

ハワイ大学マノア校数学科助教授 Daisuke Takagi 先生

には、会ったばかりの外国人の私を親身にお世話していただきました。  
生涯、心に残る良い思い出になりました。深く御礼申し上げます。

最後に、長年にわたり研究を支えてくださった家族に深く感謝いたします。  
特に先日急逝した伯父の

元日本放送協会制作技術局次長 桑原 善雄 様

には、幼いころから数学や理科を教わり博士課程後期課程への進学や  
ハワイ大学留学に大変喜び期待していただきました。  
故人に格別の感謝と哀悼の意を表し、本論文を捧げたいと思います。

# 研究業績

本論文に関連する， 学術論文・国際学会・国内学会・関連特許・解説記事・受賞歴を以下に示す。

## 学術論文

1. 石川敏也， 中田毅：人工筋肉を目指した形状記憶合金アクチュエータ（巻フィルムチューブ方式の提案），日本機械学会論文集（C編），71巻703号，pp. 944-950, 2005.
2. 石川敏也， 中田毅：人工筋肉を目指した形状記憶合金アクチュエータ（運動単位の特性），日本機械学会論文集（C編），74巻738号，pp. 359-364, 2008.
3. 石川敏也， 中村太郎：巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータのモバイル化と拮抗配置による剛性制御手法の検討，計測自動制御学会論文集，Vol. 52, No. 3, pp. 103-112, 2016.

## 国際学会

1. Toshiya Ishikawa, Takeshi Nakada: Shape Memory Alloy Actuator Protected by Rolled Film Tube for Artificial Muscle, Proceedings of the 7<sup>th</sup> JFPS international Symposium on Fluid Power (TOYAMA 2008), pp. 841-846, 2008.
2. Toshiya Ishikawa, Takeshi Nakada: Shape Memory Alloy Actuator for Artificial Muscle (Characteristics of Motor Unit), Journal of Environment and Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 105-113, 2010.
3. Toshiya Ishikawa, Taro Nakamura: Improvement in SMA Artificial Muscle Actuator Protected by Rolled Film Tube, The 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM 2015), 1P1-01, 2015.

4. Toshiya Ishikawa, Taro Nakamura: Portability and Antagonistic Stiffness Control for an Shape Memory Alloy Artificial Muscle Actuator Protected by a Rolled Film Tube, 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2016), pp. 220-227, 2016.

## 国内学会

1. 石川敏也, 島田公雄: 空気圧制御による形状記憶合金の動特性の研究, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 1-2, 1985.
2. 石川敏也: 紡錘状人工筋肉アクチュエータの研究, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 659-660, 1987.
3. 石川敏也: 人工筋肉アクチュエータの研究 (巻フィルム適用 SMA タイプ・第1報), 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1177-1178, 1997.
4. 石川敏也: 人工筋肉とその応用 (巻フィルムチューブ適用 SMA タイプ), 第20回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM'99) 講演予稿集, pp. 350-357, 1999.
5. 石川敏也: 人工筋肉アクチュエータの研究 (巻フィルム適用 SMA タイプ・第2報) 2千年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 521, 2000.
6. 石川敏也, 中田毅: SMA 人工筋肉アクチュエータの研究 (巻フィルムチューブ方式), 日本機械学会第3回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, pp. 75-76, 2003.
7. 石川敏也, 中田毅: SMA 人工筋肉アクチュエータの研究 (第2報, モータユニットの特性), 日本機械学会東北支部第41期秋季講演会講演論文集, pp. 71-72, 2005.

8. 石川敏也, 中田毅 : SMA 人工筋肉アクチュエータの研究 (第3報, モーターユニット応答時間の改善), 平成18年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp. 58-60, 2006.
9. 石川敏也, 中村太郎 : 巻フィルムチューブ式 SMA アクチュエータによる拮抗型人工筋肉の開発, 第15回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SICE 2014) 講演会プログラム, pp. 0611-0613, 2014.
10. 石川敏也, 中村太郎 : 巻フィルムチューブ式拮抗型 SMA 人工筋肉アクチュエータ, 第33回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 1A3-06, 2015.
11. 石川敏也, 中村太郎 : 巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータの開発 (SMA 長方形断面素線コイルばねの試作), 日本機械学会 2016 年度年次大会総合プログラム, J1110201, 2016.

## 関連特許

1. 石川敏也 : 巻フィルムチューブ式形状記憶合金アクチュエータ, 特許第4026028号, 平成09年特許願第209556号, 平成9年7月1日出願, 特開平11-20018, 平成11年(1999)1月26日公開

## 解説記事

1. 石川敏也, 中田毅 : 生体的駆動を実現する形状記憶合金人工筋肉 (巻フィルムチューブ方式の提案とパルス周波数変調駆動による実験), 油空圧技術, 2009年7月号, 日本工業出版, 598. Vol. 48. No. 7, pp. 3-7, 2009.

## 受賞歴

1. 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014) 優秀講演賞 (2014.12.17) .
2. 株式会社リバネス主催リバネス研究費安川電機自動化賞 (2015.12.1) .
3. 中央大学学員会会長賞 (2016.3.16) .

## 中央大学における研究業績

以下に中央大学在学時における研究業績を示す.

### 学術論文

1. 石川敏也, 中村太郎: 巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータのモバイル化と拮抗配置による剛性制御手法の検討, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 103-112, 2016.

### 国際学会

1. Toshiya Ishikawa, Taro Nakamura: Improvement in SMA Artificial Muscle Actuator Protected by Rolled Film Tube, The 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM 2015), 1P1-01, 2015.
2. Toshiya Ishikawa, Taro Nakamura: Portability and Antagonistic Stiffness Control for an Shape Memory Alloy Artificial Muscle Actuator Protected by a Rolled Film Tube, 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2016), pp. 220-227, 2016.



## 国内学会

1. 石川敏也, 島田公雄: 空気圧制御による形状記憶合金の動特性の研究, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 1-2, 1985.
2. 石川敏也, 中村太郎: 巻フィルムチューブ式 SMA アクチュエータによる拮抗型人工筋肉の開発, 第15回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SICE 2014) 講演会プログラム, pp. 0611-0613, 2014.
3. 石川敏也, 中村太郎: 巻フィルムチューブ式拮抗型 SMA 人工筋肉アクチュエータ, 第33回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 1A3-06, 2015.
4. 石川敏也, 中村太郎: 巻フィルムチューブ式 SMA 人工筋肉アクチュエータの開発 (SMA 長方形断面素線コイルばねの試作), 日本機械学会 2016 年度年次大会総合プログラム, J1110201, 2016.

## 受賞歴

1. 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014) 優秀講演賞 (2014.12.17) .
2. 株式会社リバネス主催リバネス研究費安川電機自動化賞 (2015.12.1) .
3. 中央大学学員会会長賞 (2016.3.16) .