

温度で駆動する人工筋肉素子の性能実験

- 高齢者用ウェアラブル運動補助装置の開発を目指して -

チーム代表者名：小枝達也

所属：宇部工業高等専門学校機械工学科 機械材料研究室

1. はじめに（背景と実験の目的）

現在日本は超高齢化社会に突入しており、若年労働力人口減少、生活介護が必要な高齢者の増加など早急な解決が求められる種々の問題が表面化している。これらの諸問題を解決するためには、高齢者が健康で自立した生活を少しでも長く続けることが重要である。また、これを実現するためには加齢による筋力の低下を最小限に食い止める必要がある。その理由は、筋力低下が転倒の発生、日常生活動作の自由度の低下、入院、死亡率の高まりなど高齢期における諸問題の発生因子となるためである。

このように加齢とともに低下した運動機能を機械的に補助する装置が本研究で実現を目指すウェアラブル（身につけることができる）運動補助装置である。現在開発されている一般的な運動補助装置ではアクチュエータとしてモーターを使用しており、重量、騒音、価格、寸法など種々の問題があることから、高齢者が日常的に使用する事は難しい。

ここでは、高齢者が日常的に気軽に身につけることができる運動補助装置の実現を目指している。その第一歩として、本実験では温度によって駆動する人工筋肉素子の開発とその性能評価を行う。補助対象とする運動として立ち上がり動作を想定する。また、人工筋肉素子として、形状記憶合金（SMA）に着目する。一般的な運動補助装置に使用されるモーターの代わりに SMA を使用することで、軽量、小型、低価格、静音という特徴を持ったウェアラブル運動補助装置の開発が期待できる。

本実験では、SMA を用いた人工筋肉素子（SMA 人工筋肉素子）を使用して、加熱することで駆動する運動補助装置を作製し、その性能を評価し、実用化の可能性を検討する。

2. SMA 人工筋肉素子の駆動原理

SMA は、室温の状態では軟質であり容易に変形する。これを加熱（60℃程度）すると硬質で変形抵抗が高い状態に変化する。このようにある温度を境に材料の性質が変化するため、室温で変形が生じても高温に加熱することで形状回復が生じる。本実験では、この SMA の特性を人工筋肉素子として活用する。具体的には図 1 に示すように直線状態を記憶した SMA を膝関節部に装着する。装着者の立ち上がり動作に同期して SMA を加熱することで直線状態への形状回復が生じ、その発生力によって立ち上がり動作を補助するというものである（図 1(b)の状態）。

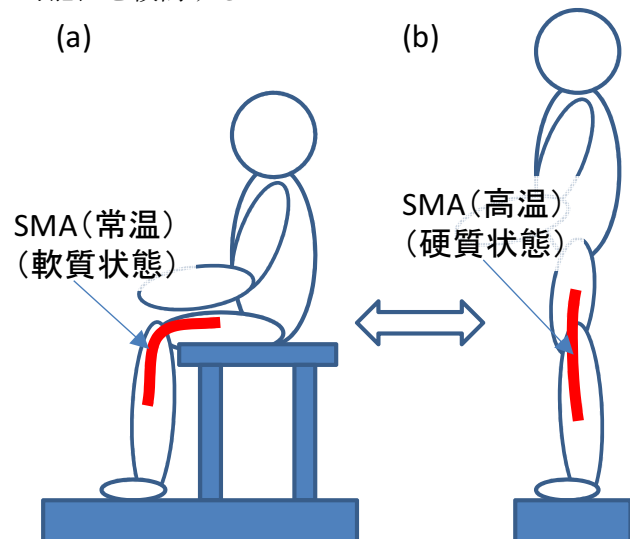


図1 SMA 人工筋肉素子を使用したウェアラブル運動補助装置駆動原理の模式図

(a) SMA が常温で軟質な状態。装着者の動作に合わせて SMA は容易に変形する。

(b) SMA が高温で硬質な状態。SMA は記憶されている直線状態に戻り、この際発生する力によって立ち上がり動作を補助する。

この運動補助装置では材料そのものが駆動部として機能するため、軽量、小型、低価格、静音を実現できる。さらに立ち上がりたときにだけ力を発生させることができ、それ以外の場合は装着者の運動を妨げない。すなわち加熱しない場合の SMA は軟質で変形しやすいため、通常は装着者の運動（ひざの曲げ伸ばし）を妨げない（図 1(a)の状態）。

3. 実験方法

(1) 膝関節を模した治具と実験装置の作製

図 2 に示すように膝の関節を模した治具と実験装置を作製した。この治具の関節 A に図 2 に示す SMA 人工筋肉素子を組み付ける。SMA 人工筋肉素子としては、直線状態を記憶した SMA を使用する。この SMA は市販品（株式会社ニラコ製）であり、直径は 0.7[mm]のものを使用した。また部品 C は動かないように固定し、関節 A で曲げ伸ばし運動が生じた場合、部品 B だけが上下方向に運動する。さらに、部品 B の上下方向変位および上下方向発生力 F [N]をそれぞれ作動トランスとロードセルで測定することができる。

また、本実験では通電による SMA の加熱を行った。図 2(a)に示すように SMA に電流を与え、その際の温度を K 型熱電対で測定した。

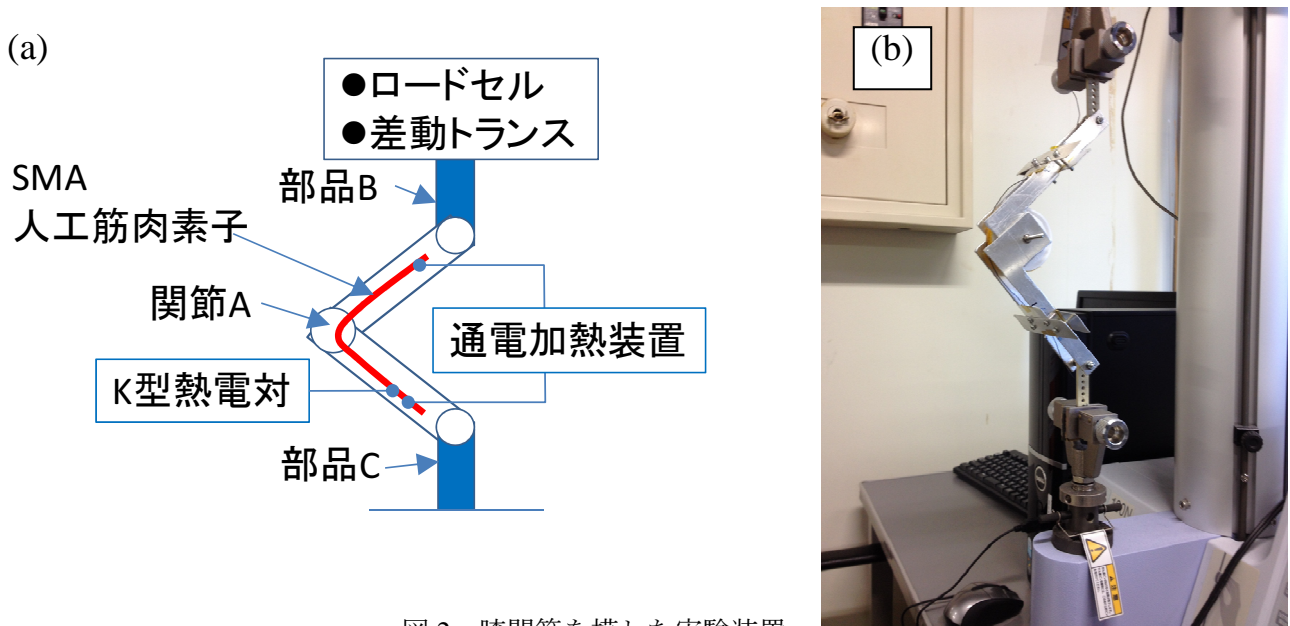


図 2 膝関節を模した実験装置
(a)実験装置の構成, (b) 実験装置外観図

(2) 発生力と応答速度の評価（静的特性）

図 2 に示した実験装置を使用して、SMA 人工筋肉素子に直流電流 I [A]を流し、SMA 人工筋肉素子の温度、形状回復による発生力 F と応答速度という 3 つの項目を評価した。

測定条件として、 I を 1 から 3[A]の範囲で 0.25[A]ずつ変化させ、通電時間 t [sec]と F [N]の関係を調べた。治具の関節部 A の開き角度は 90° で固定した。さらに実験に用いる SMA 人工筋肉素子の本数を 1~5[本]として、SMA 人工筋肉素子と発生力 F [N]の関係を調べた。

(3) SMA 人工筋肉素子の動的特性

関節部の運動に対して SMA 人工筋肉素子がどのような力学的応答を示すかを調べた。具体的には一定速度で図 2 の部品 B を上下運動させ、その際に SMA 人工筋肉素子から生み出される発生力 F [N]を測定した。この実験から SMA 人工筋肉素子によって、実際のヒトの運動（膝の曲げ伸ばし）をサポートできるかを検討した。

4. 実験結果と考察

4-1 発生力と応答速度の評価（静的特性）

(1) 電流 I と温度、発生力、応答速度の関係

図 3 は、治具の関節 A の開き角を 90° に固定し、1 本の SMA 人工筋肉素子に電流 I を通電した場合の発生力 F [N]と通電時間の関係を示している。ここで、 F は上方向（関節 A を伸ばそうとする方向）に生じる力を正としている。

図 3 から、いずれの条件においても通電時間の経過とともに発生力 F は上昇していることがわかる。この F の上昇は、通電によって加熱された SMA が直線状に形状回復しようとすることによって生じるものである。本実験においては、 2 [A]以上の電流によって、SMA は 100 [$^\circ\text{C}$]以上に加熱されることがわかった。また、電流 I を大きくすることによって取り出せる発生力 F は大きくなり応答速度も速くなるということが分かる。また、 1.25 A 以下の電流では発生力がほとんど上昇しない。本実験では、電流 3.0 A で約 0.35 N の発生力が取り出せることが分かった。通電時間は、 2.75 A と 3.0 A の発生力の変化がおよそ 25 秒で変わらなくなったので、約 25 秒あれば 1 本から得られる発生力を十分にとりだせることが分かった。

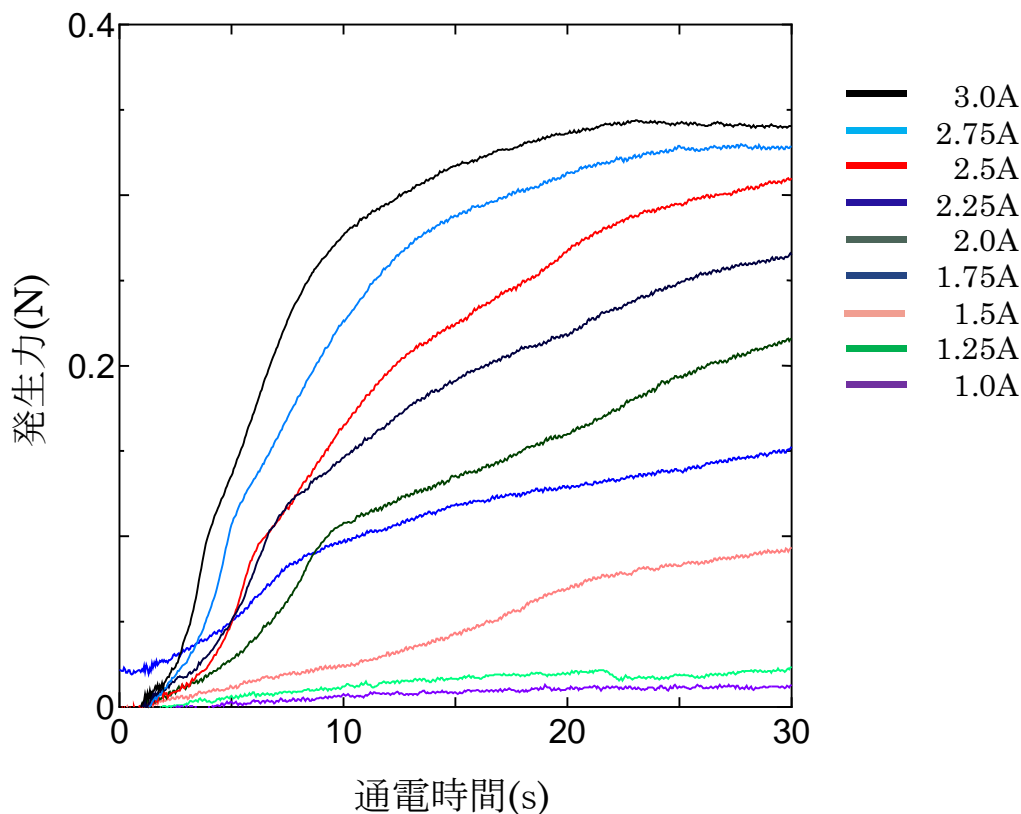


図 3 SMA 人工筋肉素子（1 本）の発生力 F と応答速度の関係（通電電流の影響）

(2) 発生力と SMA 人工筋肉素子本数の関係

SMA 人工筋肉素子の本数を 1~5 本として治具に装着し、本数と発生力の関係を調べた。図 4 は通電によって飽和値に達した発生力と SMA 人工筋肉素子の本数の関係を示している。

図 4 から、発生力は本数の増加によって単純に増加することを確認した。したがって、目的とする発生力に応じて SMA 人工筋肉素子の本数を決めることで、種々の運動補助が可能であることがわかった。

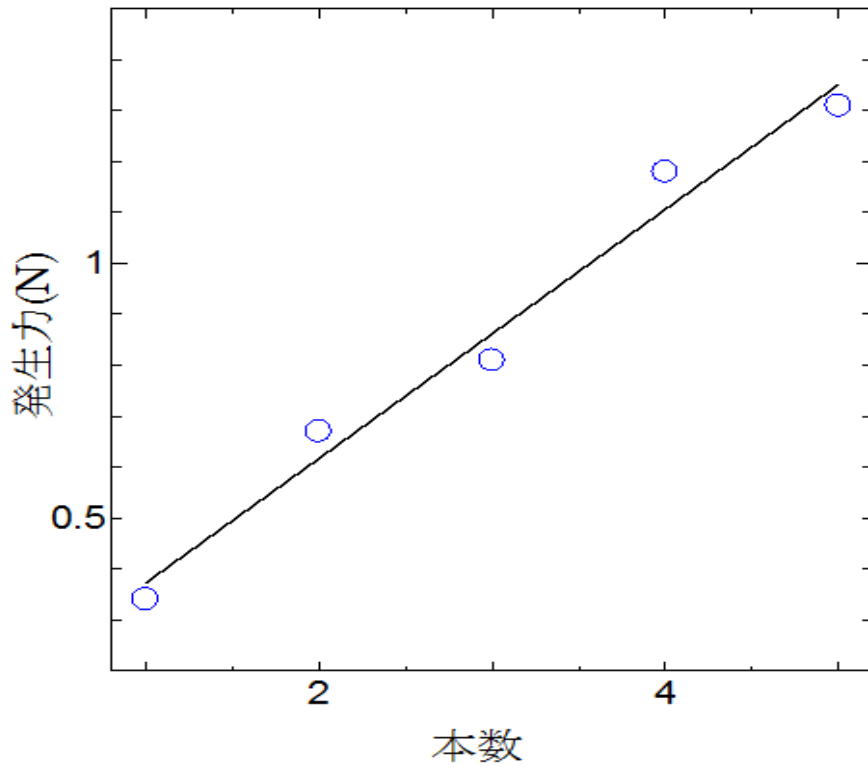


図 4 発生力と SMA 人工筋肉素子の本数の関係

4-2 SMA人工筋肉素子の動的特性

SMA人工筋肉素子が硬質（発生力が高い状態）で図2(a)の部品Bを一定速度で上下運動させ、関節Aの角度と発生力Fの関係を調べた。図5は関節Aの角度 θ と発生力Fの関係を示している。ここで、角度 θ は図5(a)に示す角度である。

図5に示すように、角度 θ が増加するほど（部品Bが下がるほど）発生力Fは上昇する。このことから、SMA人工筋肉素子では膝が曲がった状態ほど高い発生力を生み出すことができることを確認した。

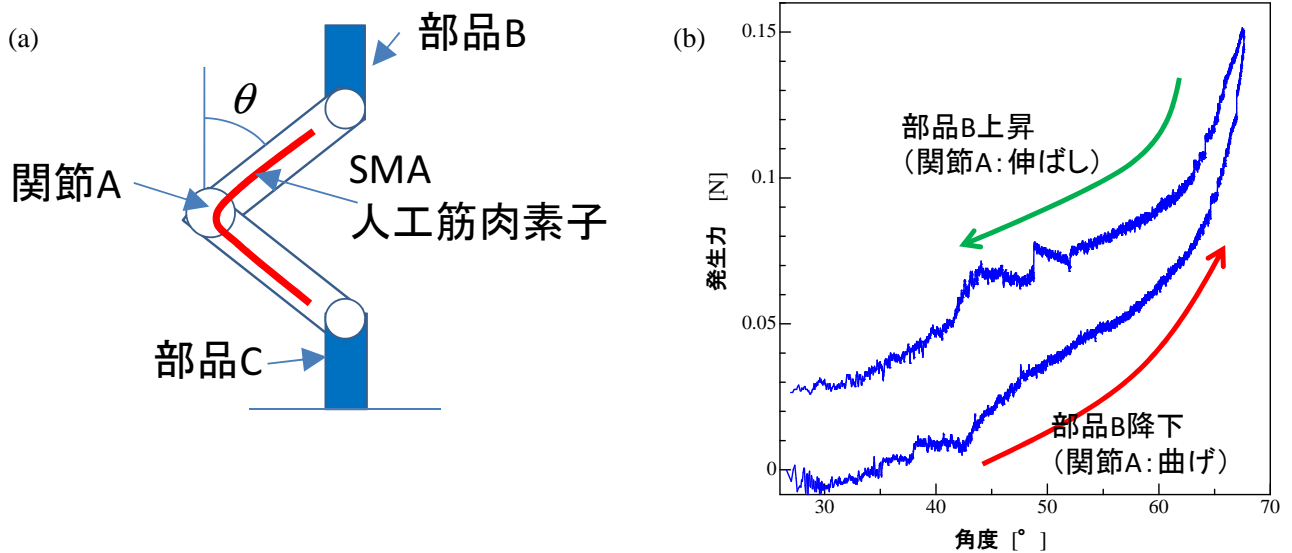


図5 SMA人工筋肉素子の発生力（曲げ角度と発生力の関係）

5 まとめと今後の展望・課題

本実験では、形状記憶合金（SMA）を用いたウェアラブルパワーアシスト機器の実現を最終的な目標として、形状記憶合金素子のアクチュエータとしての性能を調べた。得られた結果を以下にまとめる

- (1) 直径 0.7[mm]の SMA 線材（直線記憶）1 本を 90°に曲げ 3[A]の通電を施すと、SMA は 100°C 以上に加熱される。この加熱に伴い SMA の形状回復が生じ、約 25[sec]で 0.35[N]の力が生じることがわかった。
- (2) SMA が駆動する際、騒音がほとんど発生しないことを確認した。
- (3) SMA 線材の本数を増やすことで、発生力を増加させることができる。
- (4) SMA を曲げる角度が大きいほど、発生する力は大きくなる。

本実験で得られた結果をもとに、高齢者(体重 40[kg]と仮定)の立ち上がり動作を補助する場合に必要な形状記憶合金の本数を推算する。体重の 10%の約 40[N]を補助するために必要な SMA の本数は、115 本 ($0.35 \times 115 = 40.25$)である。SMA115 本は多いように見えるが今回使用した Ti-Ni 合金・直径 0.7[mm]線材の 200[mm]程度が 1 本およそ 1[g]なので 115 本でも質量 115[g]といった軽量なもので、実用に耐え得ると考えられる。応答速度や発生力を向上させることが今後の課題である。

謝辞

本実験を遂行するにあたり、株式会社八光電機からご支援をいただきました。ここに感謝の意を評します。また、実験に協力していただいた研究室の皆様に御礼申し上げます。