

## 形状記憶合金ワイヤを用いた音響センシングの特性評価

光武 弘輝<sup>†</sup> 重宗 宏毅<sup>‡</sup> 澤田 秀之<sup>‡</sup>早稲田大学先進理工学部<sup>†</sup>早稲田大学理工学術院<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

これまで、さまざまな用途や状況に対応するセンサが開発されてきた。センサには周波数応答性、分解能等の計測特性があり、適切なセンシングを行う上で重要となる。本稿では、形状記憶合金（Shape Memory Alloy : SMA）ワイヤを用いた音響センサを提案し、その計測特性を評価する。SMA ワイヤへの音響入力条件を変化させて周波数応答を計測することによって、計測特性の評価と考察を行う。

## 2. 測定原理

本章では、SMA が持つ固有の性質と、これを用いた振動測定原理について述べる。

## 2.1 形状記憶効果

SMA は低温状態でマルテンサイト相と呼ばれる結晶構造を持ち、加熱により温度が上がると相変態が起こり、オーステナイト相に変化する。これを形状記憶効果という。SMA ワイヤの場合、加熱することによって形状記憶効果が引き起こされ、長さ方向に数%収縮する[1]。

## 2.2 超弾性現象

SMA は物理的負荷を与えることで応力励起マルテンサイト相に変化する。この相変態は可逆的であり、除荷すれば元の結晶構造に戻る。これを超弾性現象という。このとき SMA には通常の金属とは異なる電気抵抗変化が生じる[2]。この電気抵抗変化を計測することで、SMA にかかる負荷を間接的に計測できる。

## 3. SMA を用いた音響センシング

前章で述べた SMA の2つの性質を利用し、音響のセンシングに応用する。図1に、本研究で製作した SMA ワイヤを用いた音響センシングデバイスを示す。SMA ワイヤと紙製の円形振動板をハトメ端子と接着剤を用いて圧着接合させ、SMA ワイヤの中央部を支柱にひっかけて振動板を吊るす構造としている。振動板を用いることにより、音による空気振動を効果的に SMA ワイヤに伝えることができる。また、SMA ワイヤは

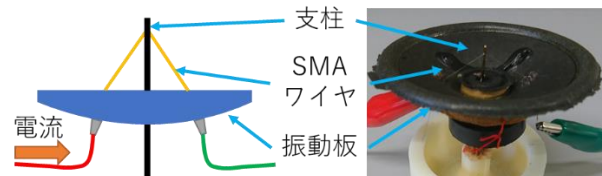


図1 SMA を用いた音響センシングデバイス

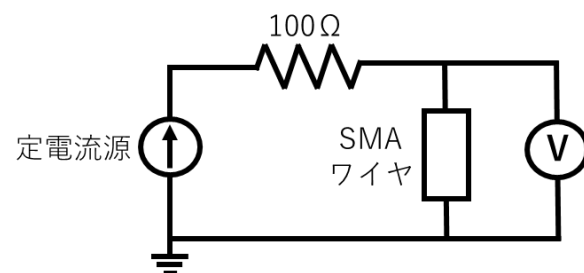


図2 計測回路図

直径が  $75\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$ 、長さが  $2.4$  と  $4.4\text{cm}$  の、計4種類を用意した。

図2に計測回路の概略図を示す。計測中はハトメ端子を介して SMA ワイヤに定電流を流し続ける。音を振動板に当てると振動が起こり、その振動に応じて SMA ワイヤに負荷が生じ、電気抵抗が変化する。オームの法則に従って電圧変化を計測することにより、音響信号測定が可能である。また SMA ワイヤは、電流に応じて内部温度が増加するため、SMA ワイヤの結晶構造を変化させることができる。しかし、SMA の温度を正確に計測することは困難であるため、電流を流した時の SMA ワイヤの長さ変化から結晶構造を推定する。10mA の電流を流した状態では SMA ワイヤの収縮が見られないため、結晶構造はマルテンサイト相であり、一方 SMA ワイヤが収縮する限界の電流が流れている状態では、オーステナイト相であると考えられる。実測した各 SMA ワイヤの収縮限界電流値は、 $\phi=75\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$  の各々について 100mA、130mA であった。また、収縮限界以下の電流では2つの相が混ざった中間相の状態であると考えられる。この電流値以上の電流を流すと温度が過剰に上昇し、SMA ワイヤが焼き切れる危険性があるため、実験では上記の限界電流値以上の電流は流さないこととした。

## 4. 周波数特性の計測実験

製作したセンシングデバイスに 125Hz から

Evaluation of acoustic sensing using a shape memory alloy wire

<sup>†</sup>H. Mitsutake, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

<sup>‡</sup>H. Shigemune, H. Sawada, Faculty of Science and Engineering, Waseda University

575Hz までの単音を 50Hz 刻みで当て、その時の電圧変化を記録する。与える単音は各々同程度の音圧になるように調整をしている。

計測データは高速フーリエ変換を施し、スペクトル解析を行う。スペクトルデータから、入力周波数に対応するパワー値を録音感度  $A$  [dB]

$$A = 20 \log_{10} \frac{D}{D_0} \quad (1)$$

$D$  : 計測データのパワー

$D_0$  : 基準となる入力のパワー

として算出する。周波数-録音感度のグラフより、音響の計測特性を評価する[3]。

さらに、計測特性の SMA ワイヤのサイズ依存性と相状態依存性について考察した。4 種類の SMA ワイヤに対して、10mA と各 SMA ワイヤの収縮限界電流、そしてその間の電流値 ( $\phi=75\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$  について各々 40mA, 50mA) をそれぞれ流し、計測を行った。

異なるサイズの SMA ワイヤと各電流値に対する計測結果を図 3, 4 に示す。2つのグラフを見ると、各 SMA ワイヤのサイズにおいて、200Hz-300Hz までの感度が相対的に高く、400Hz を超えると感度が減少する傾向があることがわかる。

直径について比較をすると、 $\phi=75\mu\text{m}$ ,  $L=44\text{mm}$ , 100mA の場合、最大感度値が 275Hz で約 -30dB であるのに対し、 $\phi=100\mu\text{m}$  では  $L=24\text{mm}$ , 130mA の場合で約 -50dB と感度が低下していることが見て取れる。このことから、SMA ワイヤの直径によって計測特性が変化することが示され、細いほど感度が高くなるといえる。

また、 $\phi=100\mu\text{m}$  の SMA ワイヤについて、 $L=44\text{mm}$ , 130mA では 225Hz で感度が最大になっているのに対し、 $L=24\text{mm}$ , 130mA では 175Hz で最大となった。このことから、SMA ワイヤの長さによって感度特性が変化することが示唆された。

また、 $\phi=75\mu\text{m}$ ,  $L=44\text{mm}$  の SMA ワイヤについてグラフを見ると、275Hz において、10mA と 100mA 感度の差が約 70[dB] あり、40mA と 100mA の差も 50dB 以上ある。さらにグラフの概形も 100mA で変化している。一方で 10mA と 40mA の結果を見ると、感度が 275Hz において 10dB 程度変化はあるが、グラフの概形は近い。このように、各 SMA ワイヤのサイズで共通して、SMA ワイヤの相状態後に感度特性が変化し、かつ感度も上がる傾向が見られた。この実験結果より、計測特性が SMA ワイヤに与える電圧によって変化するのではなく、結晶構造によって変化することが示唆される。また、高温時の状態であるオーステナイト相の SMA ワイヤのほうが、応力

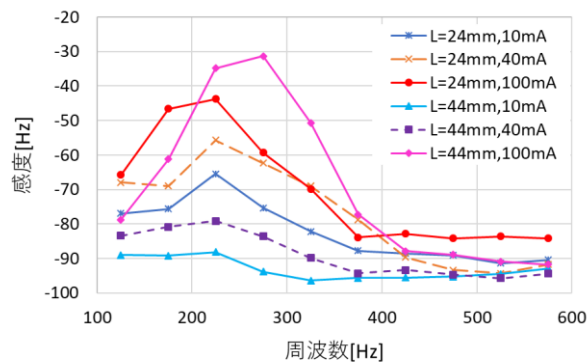


図 3  $\phi=75\mu\text{m}$  における周波数-感度グラフ

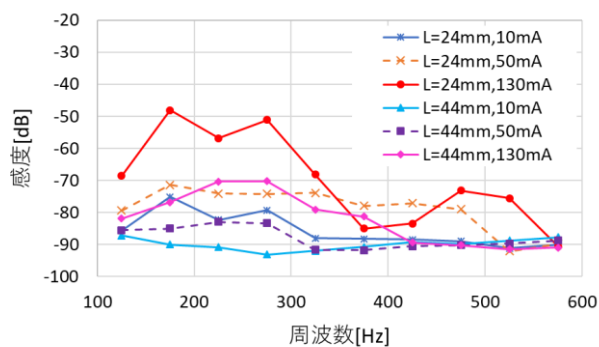


図 4  $\phi=100\mu\text{m}$  における周波数-感度グラフ

に対する電気抵抗値が変化しやすく、微小振動に対する計測に向いていることが示された。

## 5. まとめ

本研究では、形状記憶合金の性質を利用した音響センシング手法について、周波数特性の評価を行った。計測結果より、200-300Hz の録音感度が比較的大きくなることがわかり、この周波数帯の音の計測に適しているといえる。また、計測特性が SMA ワイヤのサイズと結晶構造に依存することが示唆された。今後は、本実験の結果を踏まえて実験装置の設計を改良し、人の音声や音楽等の音響の計測を試みていく。

## 参考文献

- [1] 水上陽介, 澤田秀之, “形状記憶合金糸を用いた触覚ディスプレイと微小振動の発生確率密度制御による触覚感覚の呈示”, 情報処理学会論文誌 Vol.49, No.12, pp. 3890-3898, 2008.
- [2] J. S. Ruth D and K. Dhanalakshmi, "Shape Memory Alloy Wire for Force Sensing," IEEE Sensors Journal, Vol. 17, No. 4, pp. 967-975, 2016.
- [3] 暁清文, 荒木宏昌, “圧電セラミック素子を利用した生体植込み型マイクロホンの研究”, AUDIOLOGY JAPAN, 25-2, pp. 75-78, 1982.