

修士学位論文要約（令和4年3月）

振動発電応用を目的とした超弾性合金の応力誘起相変態に関する研究

小澤 海斗

指導教員：石山 和志

Research on Stress-induced Phase Transformation of Superelastic Alloys
for Vibration Power Generation Applications

Kaito OZAWA

Supervisor: Kazushi ISHIYAMA

As a novel method of vibration power generation, we propose a method that utilizes the magnetic change associated with the stress-induced phase transformation of a superelastic alloy. In the measurement of the magnetic properties of the alloy, it was confirmed that the magnetic flux density decreased by applying a stress of about 450 MPa and returned to the original state by unloading. In the microstructure observation, the phase change between the parent phase and the martensite phase was confirmed by applying a stress of about 450 MPa. Furthermore, it was found that the magnetization change was obtained according to the martensite phase fraction, and the occurrence of a clear phase transformation was confirmed. A cantilever-type device using a Fe-Mn-Al-Ni alloy as a beam was vibrated at about 30 Hz, and when the displacement of the tip of the cantilever was about 7 mm or more, the output associated with the stress-induced phase transformation was obtained. Therefore, the usefulness of the new vibration power generation method was shown.

1. はじめに

近年、IoT デバイスの普及に伴い、インターネットにつながるモノの数が年々拡大している。しかし、デバイスに対して、人間が介入できない環境での電池交換など電力供給の方法が課題となっている。そのため、環境に存在する希薄なエネルギーを電力に変換する環境発電技術¹⁾が注目されており、特に振動エネルギーを利用した発電は低消費電力機器への電力供給源として有望視されている²⁾。振動発電の方式には磁歪材料の逆磁歪効果を利用するものなどがあるが、材料コストや生産性に課題がある。

そこで本研究では、逆磁歪効果とは異なる手法で大きな磁化変化を得る新たな振動発電を提案する。

2. 応力誘起相変態を用いた振動発電の提案

本研究では振動発電の新方式として、超弾性合金の応力誘起相変態を利用する手法を提案する。これは、応力変化に伴う合金の結晶変態を用いるものである。超弾性合金の母相の状態に曲げ伸ばしなどの応力を与えると、マルテンサイト相が誘起され大きく形状が変化する。この状態から除荷すると母相に戻るため、形状回復能力が大きな特徴である。そこで、この応力を振動によって繰り返し与えることで発電に適用できると考える。Fe-Mn-Al-Ni 系合金は母相が強磁性、マルテンサイト相が反強磁性³⁾であるため相変態に伴い磁性変化が起こる。これをコイルで検出できれば、理論

的には合金の飽和磁化に応じて電力に変換できるため、振動発電の方式として非常に有望だと考えられる。

3. 強磁性超弾性合金の磁気特性

Fe-35Mn-16Al-7.5Ni 単結晶合金の長手方向に圧縮応力を印加しながら測定可能な BH ループトレーサを構築し、磁気特性測定を行った。圧縮応力が印加された状態の試料に正弦波交流磁界を印加すると、磁束の時間変化に伴い、検出コイルには電圧が発生する。この電圧から磁束密度を算出し、BH ループを得た。図1に測定したBH ループを示す。応力

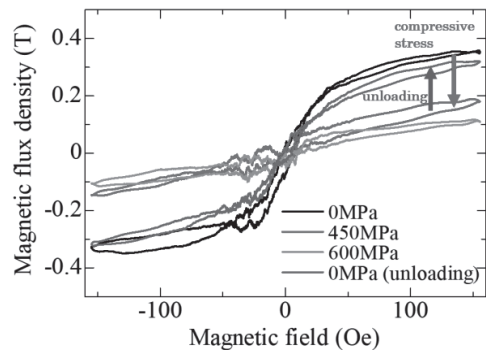


図1 Fe-35Mn-16Al-7.5Ni 合金の BH ループ

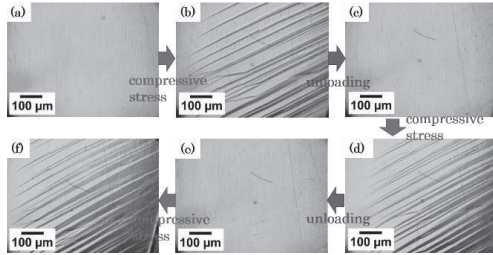


図2 Fe-35Mn-16Al-7.5Ni 合金表面の相変化

無印加時と、マルテンサイト変態臨界応力である 450 MPa 程度の応力印加時では約 0.18 T の磁束密度差を得た。さらに 600 MPa まで圧縮応力を印加したが、完全な非磁性相にはならなかった。しかし、除荷により合金の磁束密度がほとんど母相の状態に戻ることを確認したため、この時点では応力誘起相変態が起こった可能性が高いと言える。

4. 強磁性超弾性合金の結晶学的特性

Fe-35Mn-16Al-7.5Ni 単結晶合金について応力印加下での組織観察を行った。図2に合金表面の光学顕微鏡写真を示す。(a)が母相であり、450MPa 程度の圧縮応力を印加すると(b)のように表面起伏が出現し、マルテンサイト相を確認した。この状態で除荷すると(c)のようにマルテンサイト相が消失して母相に戻った。さらに応力の印加と除荷を繰り返すと(d)-(f)のように相が変化し、応力によって相変化を繰り返すことを確認した。以上の結果と図1のBHループから、誘起されたマルテンサイト相分率を導出すると、応力によって約50%のマルテンサイトが誘起されたことがわかり、マルテンサイト相分率に応じた磁化変化が得られた。さらに、SEM-EBSD測定では合金表面に現れた菊池パターンから、母相がbcc構造、マルテンサイトが残留した箇所はfcc構造と特定され、応力誘起相変態が明らかに発生していることを確認した。

5. 振動印加時の発電能力評価

カンチレバー構造の発電デバイスを作製し、加振器で振動を与えた際の発電能力を評価した。図3に作製した発電デバイスを示す。デバイスの機械的共振周波数は10-30 Hz付近で、デバイスの上部から約30 mmの高さに配置した磁石により約200 Oeの磁場を印加した。まず、周囲の磁場などによるコイル出力への影響を確認するため、カンチレバーの梁をAlとした予備実験を行ってからFe-Mn-Al-Ni合金での本実験を行った。

図4に振動印加時のコイル出力を示す。梁を非磁性のAlとした場合に出力が観測されないのに対してFe-Mn-Al-Niの場合は約30Hzの共振周波数において、上下にピークを持つコイル出力が現れた。これは先端変位が約7mm(pk-pk)以上になる

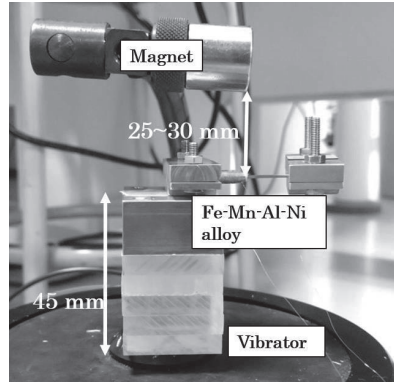


図3 カンチレバー型の発電デバイス

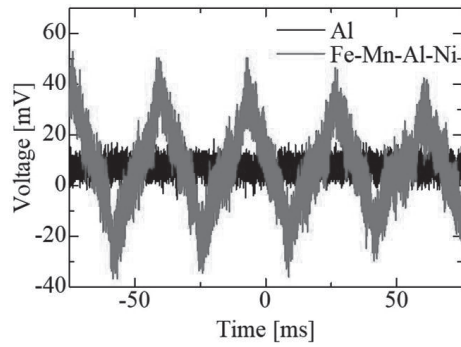


図4 共振時のコイル出力の測定結果

とより顕著に現れたため、応力誘起相変態に伴って発生した電圧だと推測できる。実測結果から、約0.9 mW/ccの発電量を見積もることができ、これは小型デバイスの駆動に十分な値である。

6. まとめ

本研究では、応力誘起相変態に伴う磁性変化を利用する振動発電の新たな方式を提案した。Fe-Mn-Al-Ni合金を梁としたカンチレバー型デバイスに振動を印加すると共振時に応力誘起相変態に伴う出力が得られ、小型デバイスを駆動させるのに十分な発電量を見込むことができた。以上より、前例のない振動発電に初めて成功し、その有用性を示した。今後、長時間の振動に耐える合金の選定などデバイスの改善を行えば、さらなる発展の可能性が大いに期待できる。

文献

- 1) K. Takeuchi, J. Surf. Finish. Soc. Jpn., **67**, 334 (2016).
- 2) I. Kanno, J. Surf. Finish. Soc. Jpn., **67**, 348 (2016).
- 3) T. Omori and R. Kainuma, Materia Japan., **54**, 398 (2015).