Study on the Characteristics of a New Power Generation System with the Application of the Shape Memory Alloy Engine

Yoshihisa Sato Member (Daido Institute of technology, satoy@daido-it.ac.jp)

Naotsugu Yoshida Member (Daido Institute of technology)

Yukinori Tanabe Student Member (Daido Institute of technology)

Hideki Fujita Senior Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Norio Ooiwa Non-member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Keywords: shape memory alloy, SMA engine, energy conversion, new power generation system, unused thermal energy

1. Introduction

It is necessary to develop the new power generation system using the unused low temperature thermal energy around 100 degrees C from a viewpoint of global warming prevention. Even if a shape memory alloy is bent in normal temperature, when it is warmed, it has the character which returns to the original straight form. Using this character of a shape memory alloy, unused thermal energy will be able to transform into rotation energy, and finally it can change into electric energy. We solved this energy conversion mechanism and the validity of this theory was indirectly verified by experiment. Furthermore, the power generation characteristic of the SMA engine was obtained by experiment.

2. Experiment

The conceptual figure of the SMA engine which made the SMA belt two or more parallel is shown in Fig. 1. The experiment was carried out using the experiment equipment shown in Fig. 1, and the output characteristic result is shown in Fig. 2. In Fig. 2, a thin line shows the output characteristic at the time of making the number of a SMA belt increase with 1, 2, 3 and 5, on the other hand, a thick line shows MPP(Maximum Power Point). From the experiment result shown in Fig. 3, the output power per SMA belt is presumed to be 300 mW.

Fig. 1. Outline of experiment equipment

3. Conclusion

Precious data required for a system design was obtained from the experiment. We designed 100 W type SMA power generation system based on these data, it will become as shown in Fig. 4.

Fig. 2. Maximum Power Point of SMA power generation experiment equipment

Fig. 3. Maximum output power per SMA belt

Fig. 4. Conceptual figure of 100 W type SMA power generation system

形状記憶合金を用いた新発電システムの発電特性に関する研究

正員 佐藤 義久* 正員 吉田 尚嗣*
 学生員 田辺 幸典* 上級会員 藤田 秀紀**
 非会員 大岩 徳雄**

Study on the Characteristics of a New Power Generation System with the Application of the Shape Memory Alloy Engine

Yoshihisa Sato*, Member, Naotsugu Yoshida*, Member, Yukinori Tanabe*, Student Member,
 Hideki Fujita**, Senior Member, Norio Ooiwa**, Non-member

It is necessary to develop the new power generation system using the unused low temperature thermal energy around 100 degrees C from a viewpoint of global warming prevention. Even if a shape memory alloy is bent in normal temperature, when it is warmed, it has the character which returns to the original straight form. Using this character of a shape memory alloy, unused thermal energy will be able to transform into rotation energy, and finally it can change into electric energy. We solved this energy conversion mechanism and the validity of this theory was indirectly verified by experiment. Furthermore, the power generation characteristic of the Shape Memory Alloy Engine was obtained by experiment.

キーワード：形状記憶合金，形状記憶合金熱エンジン，エネルギー変換，新発電システム，未利用熱エネルギー

Keywords: shape memory alloy, SMA engine, energy conversion, new power generation system, unused thermal energy

1. はじめに

天然資源の枯渇，CO₂の排出抑制の観点から再生可能エネルギー及び未利用エネルギーの有効活用を図っていく必要がある⁽¹⁾。本論文では，このような社会環境を背景に形状記憶合金エンジンを用いて，従来，海・河川などに捨てられていた低温の未利用熱エネルギーを回収して発電に利用する新発電システムの出力特性について述べる。形状記憶合金（Shape Memory Alloy，以下 SMA と略称する）は 1951 年，リード氏らによって偶然発見され，爾来種々の応用開発が盛んに行われ^{(2)~(4)}。しかし，形状記憶合金の価格が高い，加工性が悪い，寿命が短い等が原因で実用化はごく限られた範囲にとどまっていた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。形状記憶合金の“変形させても，高温に加熱すると元の形状に戻る”性質を利用した熱エンジンのアイディアも既に多数考案されてい

る^{(7)~(9)}。しかしながら，その多くは玩具あるいは実験装置の範囲にとどまっている。その理由は熱エネルギーを運動エネルギーに変換するメカニズムを解明し，形状記憶合金エンジンの回転数，出力などを数式で表現し，発電システムの設計・製作に応用するという試みがなされていなかったからである⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。そこで，著者らは形状記憶合金平角線をリング状にして，高温輪と低温輪の 2 つの車輪に掛けた形状記憶合金エンジン（以下，SMA エンジンと略称する）の回転メカニズムを解明し，SMA 平角線の形状・寸法，ヤング率，高温輪・低温輪の半径から SMA エンジンの回転数 n [rpm]，出力 P [W] を予測する理論式を導き，回転数に関しては理論値と実験値がよく一致することを実験的に検証した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。さらに，形状記憶合金ベルトを複数本並列にした発電実験を行い，形状記憶合金を用いた新発電システムの発電出力特性を把握したので報告する⁽¹⁴⁾。尚，形状記憶合金を用いた新発電システムは工場排熱，火力発電所の低圧タービン出口蒸気，変電所の変圧器油の排熱，地熱，ガス給湯器・冷暖房器の廃熱，自動車のエンジン排熱，あるいは南極，北極，宇宙ステーションなど燃料供給が困難な場所での発電システムに応用できるものと考えている。

2. 形状記憶合金エンジンの回転力発生メカニズム

従来，SMA ベルトの張力差（非対称性）により回転力が

* 大同工業大学工学部電気電子工学科
 〒457-8530 名古屋市南区滝春町 10-3
 Department of Electrical and Electronic Engineering Faculty of Engineering, Daido Institute of Technology
 10-3, Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8530

** 中部電力（株）電力技術研究所
 〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1
 Chubu Electric Power Co., Inc.
 20-1, Aza-Kitasekiyama, Odaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459-8522

発生すると考えられていたが、SMA エンジン実験装置の動きを詳細に観察すると、高温輪側の接点近傍（図 1 の点 2 近傍）の SMA ベルトが振動していることを発見した。点 1 で高温輪に接した SMA ベルトが加熱され、点 2 でまっすぐになろうとする力が高温輪を蹴り、低温輪を介してループになっている為引き戻されて振動しているのではないかと考え、以下のような回転メカニズムを考えた。SMA ベルトは点 1(t_1) で高温輪に接触し、熱を受けながら回転し、点 2(t_2) で高温 (A_f 温度) になり、元のまっすぐな形状に戻ろうとする。このときの曲げモーメントが作用反作用の原理により高温輪を蹴り、回転モーメント M_h を発生させる。その後 SMA ベルトは点 3(t_3) で低温輪に接して冷え始め、点 4(t_4) で冷え切る。

点 2 における SMA の曲げモーメント M は材料力学⁽¹⁵⁾より

$$M = \frac{E_1 I}{r} \dots\dots\dots (1)$$

但し、 E_1 はヤング率、 I は SMA の断面 2 次モーメントである。この曲げモーメント M が作用反作用の原理により高温輪の回転モーメント M_h となるので、摩擦損失等を無視すれば

$$M = M_h \dots\dots\dots (2)$$

一方、回転モーメント M_h は SMA ベルトの張力差 $\times$ 半

図 1 SMA エンジンの回転力発生メカニズム
Fig. 1. Torque generating mechanism of SMA engine.

径 r とも表されるので

$$M = M_h = \frac{E_1 I}{r} = r(F_2 - F_1) \dots\dots\dots (3)$$

但し、 F_1 , F_2 は SMA ベルトの張力である。出力輪（低温輪側）の回転モーメント M_L は

$$M_L = R(F_2 - F_1) \dots\dots\dots (4)$$

となり、(3), (4) 式より

$$M_L = \frac{RE_1 I}{r^2} \dots\dots\dots (5)$$

出力輪の軸出力 P は回転モーメント（回転トルク）と回転角速度 ω の積として求められるので、

$$\begin{aligned} \text{軸出力 } P &= \omega (\text{低温輪の回転数}) \times M_L \\ &= \frac{RE_1}{r^2} \cdot I \cdot \omega \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

但し、SMA ベルト (b : 幅, h : 厚さ) の断面 2 次モーメント I は $I = bh^3/12$ であるから、(6) 式は以下の通りとなる。

$$P = \frac{RE}{r^2} \cdot \frac{bh^3}{12} \cdot \omega \dots\dots\dots (7)$$

以上の通り、SMA エンジンの体格、すなわち SMA ベルトの形状・サイズ (b , h) と車輪の大きさ (r , R) を決めれば (7) 式より SMA エンジンの出力 P [W] が評価できる。しかし、(7) 式には回転角速度 ω という未知数が入っており、まだ SMA エンジンの体格のみから出力を予測できる理論式には至っていない。

3. SMA エンジンの回転数と出力

回転角速度 ω をエネルギーバランス、すなわち高温輪から形状記憶合金に入る熱エネルギーと低温輪で吸収されるエネルギーおよび回転エネルギーから評価する。SMA エンジンが静止している状態では、点 1 から点 2 のお湯に浸かっている SMA ベルト全体がまっすぐになろうとするが対称性のため自力回転はしない。しかし、最初に外部から回転力を加えて回転させると、SMA ベルトのお湯に浸かった部分が加熱され、 A_f 温度に達するとまっすぐになろうとする力で高温輪を蹴り、回転が持続する。回転数は徐々に上がり、ちょうど点 2 で A_f 温度になるような回転数に収束する。したがって、エネルギーバランスは以下になる。

〈3・1〉 SMA ベルトのひずみエネルギー 応力 σ 、ひずみ ε の SMA ベルトの単位体積当たりのひずみエネルギーは $1/2 \cdot \sigma \varepsilon = 1/2 \cdot E \varepsilon^2$ であるから、点 1 から点 2 までの SMA ベルトが得るひずみエネルギーは

$$E_{in} = \underbrace{\frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1}_{\text{単位体積あたりの歪みエネルギー}} \cdot \underbrace{bhr\theta_1}_{\text{SMA 平角線の体積}} \quad \text{となる。}$$

応力 $\sigma_1 = \varepsilon_1 E_1$ であり、ひずみに関しては SMA ベルトの曲げ半径 r (高温輪の半径) に対して SMA ベルトの厚さ h は十分小さいので、厚さ方向の中心線部分は変化せず、内径側には圧縮力、外径側には張力が働き、圧縮・伸びをそれぞれ $\pm \Delta \ell$ とすると、内径側では $2\pi r - \Delta \ell = 2\pi(r - h/2)$ が成立し、外径側では $2\pi r + \Delta \ell = 2\pi(r + h/2)$ が成立するので、 $\Delta \ell = 2\pi \cdot h/2$ となる。したがって、ひずみ ε_1 は $\varepsilon_1 = \Delta \ell / \ell = 2\pi \cdot (h/2) / 2\pi r = (h/2) / r = h/2r$ となるので、点 1 から点 2 までの SMA ベルトが得るひずみエネルギーは

$$\begin{aligned} E_{in} &= \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 b h r \theta_1 = \frac{1}{2} E_1 \varepsilon_1^2 b h r \theta_1 \\ &= \frac{1}{2} E_1 \left(\frac{h}{2r} \right)^2 b h r \theta_1 = \frac{E_1 b h^3 \theta_1}{8r} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

同様にして点 3 から点 4 では SMA ベルトから低温輪側へ以下の熱エネルギーが奪われる。

$$E_{out} = \frac{1}{2} E_2 \varepsilon_2^2 b h R \theta_2 = \frac{E_2 b h^3 \theta_2}{8R} \dots\dots\dots (9)$$

〈3・2〉 エネルギーバランス SMA 平角線のエネルギーバランスは下式の通りとなるが、

$$E_{in} - E_{out} = \text{回転エネルギー} + \text{摩擦損失} + \text{大気中への放熱}$$

摩擦損失と大気中への放熱を無視すると、エネルギー差 $E_{in} - E_{out}$ が高温輪および低温輪の回転エネルギーに変換されていると考えることができる。

SMA エンジンの回転エネルギーは、

$$\frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} \left\{ J_1 \left(\frac{R}{r} \right)^2 + J_2 \right\} \omega_2^2 \dots\dots\dots (10)$$

但し、 J_1 , J_2 はそれぞれ高温輪、低温輪の慣性モーメントである。したがって、出力輪の回転角速度は次式で求め

られる。

$$\omega_2^2 = \frac{b h^3 r^2 \left(\frac{E_1}{r} \theta_1 - \frac{E_2}{R} \theta_2 \right)}{4 (J_1 R^2 + J_2 r^2)} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、実験で用いる R , r , SMA ベルトの形状・長さでは $\theta_1 \cong \theta_2 \cong \pi$ と見なせるので、SMA エンジンの回転角速度 ω と、出力 P は下式で求められる。

$$\omega^2 = \frac{\pi b h \left(\frac{E_1}{r} - \frac{E_2}{R} \right)}{4 \left\{ J_1 \left(\frac{R}{r} \right)^2 + J_2 \right\}} \dots\dots\dots (12)$$

$$P = \frac{R E_1}{r^2} \cdot I \cdot \omega \dots\dots\dots (13)$$

(12) 式の回転角速度 ω を、(13) 式に代入すれば SMA ベルトの形状 (幅 b , 厚さ h)、特性 (ヤング率 E_1 , E_2) と、車輪半径 (r , R) のみから出力 P を求めることができる。

4. 基礎実験 (SMA エンジンの回転数)

提唱した理論の妥当性を検証するため図 3 に示す実験装置を用いて (12) 式から求めた回転数 $n (= \omega/2\pi)$ と実測値とを比較検討した。幅 $b = 5 \text{ mm}$, 厚さ $h = 0.7 \text{ mm}$ の平角線 SMA ベルトの場合、高温輪の半径 (r)、低温輪の半径 (R) をパラメータとした SMA エンジンの回転数 $n (= \omega/2\pi)$ および出力を (12), (13) 式で計算すると図 4 の通りとなる。

回転数を推定する (12) 式の分子の括弧内の項 E_1/r , および E_2/R は SMA ベルトの曲げモーメント (1) 式に対応し、前者は SMA ベルトがまっすぐになるときに高温輪を蹴る力に対応し、後者は SMA ベルトが低温輪で再度曲げられるときの力に相当するので、蹴る力の方が大きくなければ回転しないことを意味している。SMA エンジンの車輪半径と回転数の関係把握のための予備実験の結果、 $R \geq 1.5r \sim 2r$ では非常に良く回ると同時に理論値と実験値が比較的良好に一致したが、 R が r に近づくにつれて回り方

図 2 SMA ベルトの歪エネルギーと熱エネルギーの関係

Fig. 2. Relation between the distortion energy and thermal energy of SMA belt.

図 3 SMA 実験装置

Fig. 3. SMA experiment equipment.

図 4 SMA エンジンの理論回転数と出力

Fig. 4. Theoretical rotation speed and power.

図 5 理論回転数と実験値の比較

Fig. 5. Comparison of the theoretical rotation speed and experiment value.

が悪くなり、 $R < r$ では回転が連続せず、また再現性に乏しく、回転数は測定できなかった。以上の予備実験結果を反映した回転実験結果を図 5 に示す（但し、 $R \geq r$ の領域について）。

SMA エンジンの高温輪の半径を $r = 5\text{ cm}$ と固定し、低温輪の半径 R を $R = 5, 6.25, 7.5, 9, 10, 12.5, 15\text{ cm}$ と順次大きくして行ったときの低温輪の回転数 $n[\text{sec}^{-1}]$ の実験値を図 5 に○印で示す。図 5 において (12) 式から求めた理論値を——線で示す。同様に高温輪の半径 $r = 7.5\text{ cm}$ の場合の実験値を×印、理論値を----で示す。図 5 から明らかなように $R > 2r$ の領域において理論値と実験値がよく一致することが分かる。

5. 発電特性実験

次に SMA ベルトを用いた新発電システムの可能性を実証し発電特性を把握するため、図 7～図 9 に示すような実験装置を設計・製作した。SMA ベルトの本数を 1 本、2 本、3 本、5 本と増加させて行った場合の発電機出力を測定し、形状記憶合金を用いた新発電システムの出力特性を把握した。

〈5・1〉 実験装置 出力特性実験装置は高温輪の半径を

図 6 発電機の無負荷出力特性

Fig. 6. No-load output characteristics of the generation.

図 7 発電特性実験装置概観

Fig. 7. Power generation experiment equipment.

$r = 5\text{ cm}$ 、低温輪の半径を $R = 15\text{ cm}$ とし、厚さ 10 mm のアルミ合金 (A2017) 板を円板に加工し、幅 6 mm 深さ 10 mm の溝を外周に加工した。この円板を SMA ベルトの本数に合わせ 1 枚～5 枚積層する。図 7 に実験装置の概観を示す。図 8 および図 9 に発電機と負荷抵抗を接続した SMA ベルト 5 本、円板 5 枚の場合の実験装置概念図を示す。発電機は自転車オートライト (シマノ製 SIMANO-HB-NX22) を用いた。発電機の内部抵抗は 2.5Ω であり、その無負荷出力特性は図 6 に示す通りである。SMA エンジンをを用いた新発電システムの出力特性は図 8 に示すように発電機負荷として抵抗 ($1\Omega \sim 200\Omega$) を接続して電圧 [V]–電流 [A] を測定した。

SMA ベルトは幅 $5\text{ mm} \times$ 厚さ $0.7\text{ mm} \times$ 長さ 2.3 m の大同特殊鋼 (株) 製 KIOKALLOY-R3 を使用した。

〈5・2〉 実験結果 SMA ベルトの本数を 1 本、2 本、3 本、5 本と順次増加させて行ったとき、その各々の場合について、抵抗を $1, 2, 5, \dots, 100, 200\Omega, \infty$ (開放) の 10 通り切り替え、出力電圧、出力電流を測定した結果を図 10 に示す。図 10 に示す SMA ベルトの本数が 1, 2, 3, 5 本の各々の場合の最大出力点 MPP (Maximum Power Point) は

図 8 出力試験装置概要

Fig. 8. Outline of output experiment equipment.

SMA ベルトが 1 本の場合は 187 mW (1.7 V–110 mA), 2 本の場合は 462 mW (2.2 V–210 mA), 3 本の場合は 784 mW (2.8 V–280 mA), 5 本の場合は 1155 mW (3.5 V–330 mA) である。この特性をまとめて図 11 に示す。この最大出力を SMA ベルトの本数で割算し, SMA ベルト 1 本当たりの出力に換算して図示すると図 12 の通りとなる。図 12 の曲線は 300 mW に収束するものと考えられる。収束値を 300 mW と仮定すると SMA ベルト 1 本の場合, 実験装置の損失は 113 mW となる。SMA ベルトが 2 本の場合の損失は $(300 \text{ mW} - 231 \text{ mW}) \times 2 = 138 \text{ mW}$, SMA ベルトが 3 本の場合の損失は $(300 \text{ mW} - 261 \text{ mW}) \times 3 = 117 \text{ mW}$ となり, SMA ベルト 1 本当たりの理想的な出力は 300 mW (実験装置の損失は約 120 mW) であることがわかる。SMA ベルトの本数が 5 本の場合の測定値が曲線からズレているが, この原因は SMA ベルトの本数が 1, 2, 3 本のお湯の温度が約 90°C 以上であったが, SMA ベルトの本数が 5 本の場合は SMA ベルトがお湯をハネ飛ばし湯量が減少してしまい, お湯の温度が約 80°C と 10°C も低下してしまったことによるものと考えられる。したがって, 適切な湯槽を設ければ, SMA ベルト 1 本当たり 300 mW の電気出力が得られるものと推定される。

以上の実験結果より, SMA エンジンを用いた新発電システムは SMA ベルトを複数本並列にすることにより, ほぼ比例関係で出力を増加させることができ, SMA ベルト 1 本当たり 300 mW の出力が期待できるので, これをベース

図 9 並列出力試験装置主要部詳細

Fig. 9. Detail view of main part of the output examination equipment.

図 10 SMA 発電実験装置出力特性

Fig. 10. Output characteristics of the SMA power generation experiment equipment.

図 11 SMA 発電実験装置の最大出力点

Fig. 11. Maximum Power Point of SMA power generation experiment equipment.

図 12 SMA ベルト 1 本当当たりの最大出力

Fig. 12. Maximum output per SMA belt.

図 13 100 W 出力実機概念図

Fig. 13. Conceptual figure of the 100 W type SMA power generation system.

に 100 W 出力機を試設計すると図 13 の通りとなる。

尚, SMA エンジンを用いた新発電システムの効率については SMA エンジンを用いたカルノーサイクル熱機関と仮定した場合, 高温輪の温度 (89°C), 低温輪の平均温度 (48°C) が熱機関としての動作温度に相当するので, SMA エンジンの最大効率は $\eta = 1 - T_{\text{低温輪}}/T_{\text{高温輪}} = 1 - 321\text{K}/362\text{K} \approx 11.3\%$ 程度であると考えられる。

6. まとめ

形状記憶合金を用いた新発電システムの出力特性について検討し, 以下の成果を得た。

(1) SMA エンジンの出力および回転数を求める次式を導き, 回転数に関しては理論値と実験値がよく一致することを実験的に検証した。

$$P = \frac{RE_1}{r^2} \cdot I \cdot \omega, \quad \omega^2 = \frac{\pi b h^3 r^2 \left(\frac{E_1}{r} - \frac{E_2}{R} \right)}{4 (J_1 R^2 + J_2 r^2)}$$

但し, R : 低温輪半径, r : 高温輪半径, E : SMA ベルトのヤング率, I : SMA ベルトの断面 2 次モーメント, J : 慣性モーメント

(2) SMA ベルト (幅 5 mm, 厚さ 0.7 mm, 長さ 2.3 m) 5 本を並列運転した実験装置で最大 1.16 W (3.5 V–0.33 A) の電気出力を得ることができた。

(3) SMA ベルト (幅 5 mm, 厚さ 0.7 mm, 長さ 2.3 m) 1 本当たり 300 mW の電気出力が得られることがわかり, 実機開発の基礎データが得られた。

以上の成果を基にさらにデータを蓄積し, 実機の開発に貢献していきたい。

(平成 18 年 1 月 31 日受付, 平成 18 年 6 月 22 日再受付)

文 献

- (1) 嶋田隆一・監修・佐藤義久 著: 図説 電力システム工学 電気をつくる・送る・ためる!, ISBN4-621-07070-3, 丸善 (2002)
- (2) 本間敏夫・清水謙一・大塚和弘・鈴木雄一: 「形状記憶合金の応用と開発」, S・D・C, pp.293–301 (1986)
- (3) 宮崎修一・佐久間俊雄・渋谷壽一: 「形状記憶合金の特性と応用展開」, C・M・C, pp.220–225 (2001)
- (4) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一: 形状記憶合金の機械的性質, ISBN4-8425-9311-3, 養賢堂 (1993)
- (5) 鈴木雄一: 「実用形状記憶合金」, ISBN4-7693-2073-6, 工業調査会 (1987)
- (6) 石川昇治・木梨貞男・三輪 学: 「形状記憶合金応用アイデア集」, ISBN4-7693-2074-4, 工業調査会 (1987)
- (7) W.S. Ginell, J.L. McNichols, Jr., and J.S. Cory: “Nitinol Heat Engines for low-grade thermal energy conversion”, *Mech. Eng.*, Vol.101, No.5, pp.26–33 (1979)
- (8) H. Tobushi and J.R. Cahoon: “Mechanical Analysis of a Solar-Powered Solid State Engine”, *Trans. Canadian Soc. Mechanical Engineers*, Vol.9, No.3, pp.137–141 (1985)
- (9) H. Iwanaga, H. Tobushi, and H. Ito: “Basic Research on the Output Power Characteristic of Shape Memory Alloy Heat Engine (1 st Report)”, *JSME Series A*, Vol.54, No.497, pp.177–180 (1987)
- (10) H. Iwanaga, H. Tobushi, and H. Ito: “Basic Research on the Output Power Characteristic of Shape Memory Alloy Heat Engine (2nd Report)”, *JSME Int. J. Series*, Vol.31, No.3, pp.634–637 (1988)
- (11) H. Tobushi, K. Kimura, H. Iwanaga, and J.R. Cahoon: “Basic Research on the Output Power Characteristic of Shape Memory Alloy Heat Engine (2nd Report)”, *JSME Series A*, Vol.55, No.509, pp.165–169 (1989)
- (12) Y. Sato, N. Yoshida, and H. Fujita: “Study on the new generation system using Shape Memory Alloy”, 2004 Tokai-Section Joint Conference of the Eight Institute of Electrical and Related Engineers, p-044 (2004) (in Japanese)
- (13) 佐藤義久・吉田尚嗣・藤田秀紀: 「形状記憶合金を用いた新発電システムの可能性に関する研究」, 平成 16 年度電気関係学会東海支部連合大会, p-044 (2004)
- (14) Y. Sato, N. Yoshida, and H. Fujita: “Study on the new generation system using Shape Memory Alloy”, 2005 National Convention Record IEE Japan, 7-077, p.110 (2005) (in Japanese)
- (15) 佐藤義久・吉田尚嗣・藤田秀紀: 「形状記憶合金を用いた新発電システムの可能性に関する研究」, 平成 17 年電気学会全国大会, 7-077, p.110 (2005)

- (14) Y. Sato, N. Yoshida, Y. Tanabe, and H. Fujita: "Study on the new generation system using Shape Memory Alloy", 2005 Tokai-Section Joint Conference of the Eight Institute of Electrical and Related Engineers (2005) (in Japanese)
佐藤義久・吉田尚嗣・田辺幸典・藤田秀紀:「形状記憶合金を用いた新発電システムの可能性に関する研究」, 平成 17 年度電気関係学会東海支部連合大会 (2005)
- (15) 門田和雄:新しい機械の教科書, ISBN4-274-08751-4, オーム社 (2004)

佐藤 義 久 (正員) 1950 年生。1976 年 3 月東京工業大学大

学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了, 1998 年東京工業大学総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士課程修了, 工学博士。1976 年 (株) 東芝入社, 核融合・加速器・超電導機器のシステム設計に従事 (JT-60, SSC, Spring-8, SMES)。新エネルギー技術開発部長, 電力技術管理部長を経て 2003 年 4 月より大同工業大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。電気学会論文賞 (平成 12 年), 同著作賞 (平成 15 年) 受賞。現在, 小型風力発電システム, 形状記憶合金を用いた新発電システム, 小型バイオマス発電等の再生可能エネルギーの実用化開発に従事。専門分野は電力貯蔵, エネルギー変換工学, パワーエレクトロニクス。日本機械学会員。

吉 田 尚 嗣 (正員) 1981 年生。2004 年 3 月大同工業大学工

学部電気工学科卒業。2006 年 3 月大同工業大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻修了, 主として都市型風力発電システムの実用化開発, 無線端末 Bluetooth による風力発電システムの運転制御・データ収集システムの開発, 形状記憶合金を用いた新発電システムの研究に従事。2006 年 4 月東芝三菱電機産業システム (株) 入社, パワーエレクトロニクス機器の設計に従事, 現在に至る。

田 辺 幸 典 (学生員) 1982 年生。2005 年 3 月大同工業大学工学部電気工学科卒業。2005 年 4 月大同工業大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻入学, 主として小型風力発電システム用新翼の開発, 形状記憶合金を用いた新発電システムの研究に従事, 現在に至る。

藤 田 秀 紀 (上級会員) 1951 年生。1973 年 3 月名古屋大学工学部電気工学科卒業。1995 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了, 工学博士。1973 年 4 月中部電力 (株) 入社, 主として電力系統技術の実務と研究開発に従事。2005 年 7 月 (財) ファインセラミックスセンターに出向。博士 (工学), IEEE 会員。

大 岩 徳 雄 (非会員) 1972 年生。1995 年 3 月名古屋工業大学工学部機械工学科卒業。1997 年 3 月名古屋工業大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。1997 年 4 月中部電力 (株) 入社, 電力技術研究所配属, 主として新エネルギー発電業務に従事, 現在に至る。