

形状記憶合金を応用したヒートエンジン

Shape-Memory Alloy Heat Engine

戸伏壽昭[†], 伊達功祐^{††}, 宮本浩司^{††},
Hisaaki Tobushi[†], Kousuke Date^{††}, Kouji Miyamoto^{††},

Abstract Since a solid-state heat engine using a shape memory alloy (SMA) works at the temperature difference of several ten degrees, the development of the SMA-heat engine to use the low-temperature thermal energy below 373 K is greatly expected from a view-point of global warming prevention. The working principle of the SMA-heat engine is discussed based on the recovery stress of the SMA. The output power characteristics of a tilt-disk offset crank SMA-heat engine and the working principle and traveling speed of a solar-powered car using a simple pulley SMA-heat engine are investigated. The subjects for the development of the SMA-heat engine are also discussed.

1. 緒言

エネルギー資源や地球環境などの問題を解決するためには、合理的なエネルギー利用システムを構築する必要がある。各種の熱機関や工場などから出る低温排熱、地熱、太陽光などは 373 K 以下の温度レベルにあり、このような低質のエネルギーは一部分しか有効活用されていない。このような 373 K 以下の低質の熱源を動力に変換する熱効率率は 10%以下と小さい。この為、実用化には多くの課題がある。これに対して、このような 373 K 以下の低質の熱源を動力に変換するエンジンとして、形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下 SMA)¹⁾⁻³⁾ を利用する固体ヒートエンジンが提案されている⁴⁾⁻⁵⁾。このエンジンはコンパクトで無公害のクリーンなヒートエンジンであることもあり、その開発が期待されている。形状記憶合金では低温度、低温度差でマルテンサイト (martensite 以下、M) 変態が起こり、この相変態に伴い 400~600 MPa の大きな回復応力が現れる。この回復応力は繰り返し利用することが出来る。

本論文においては、形状記憶合金ヒートエンジンの作動原理、エンジンの駆動力になる回復応力の特性およびヒートエンジンの開発について検討する。斜板オフセットクラ

ンク式形状記憶合金ヒートエンジンの出力特性および単純プーリー式形状記憶合金ヒートエンジンにより駆動するソーラーカーの作動原理および走行特性を検討する。さらに、形状記憶合金ヒートエンジンの実用化への課題を検討する。

2. 形状記憶合金ヒートエンジンの作動原理

形状記憶合金ヒートエンジンの作動原理を図 1 に示す。低温で変形した形状記憶合金コイルに w_2 の重りを加える (d)。これを加熱すると変位 h だけ縮む (a)。従って、この間に $w_2 h$ の有効な仕事を取り出せる (b)。重り w_2 を取り除き冷却すると SMA コイルは伸びる (c)。この冷却と加熱の工程 (a)~(d) を 1 サイクルとして、これを繰り返すと、各サイクルにおいて $w_2 h$ の仕事を取り出せる。これらの熱サイクルをスムーズに行わせるために、種々のタイプのヒートエンジンが考案されている。

3. 形状記憶合金ヒートエンジンの駆動力になる回復応力

形状記憶合金ヒートエンジンの駆動力になる回復応力の特性を図 2 に示す。回復応力の発生の状況を図 2 (a) の応力-

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 大学院 (豊田市)

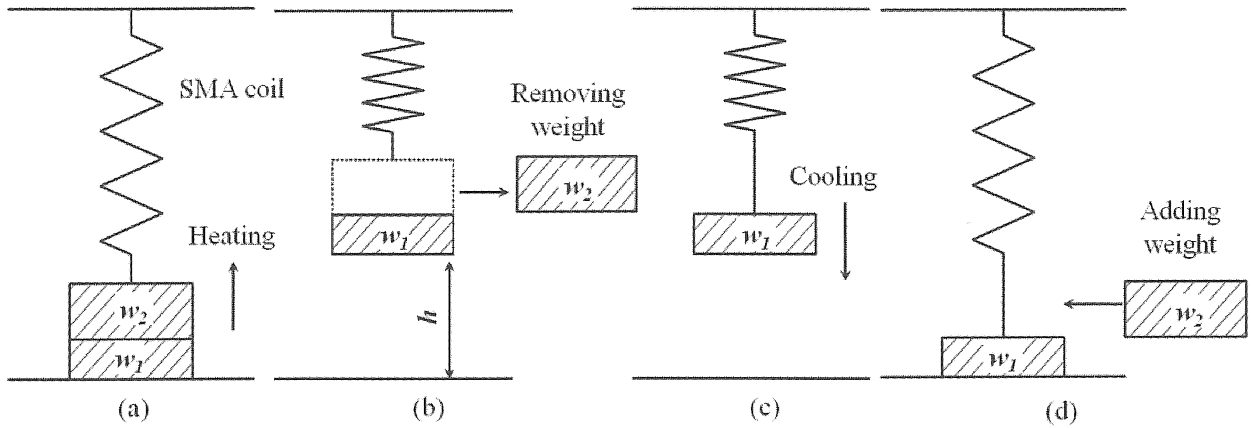
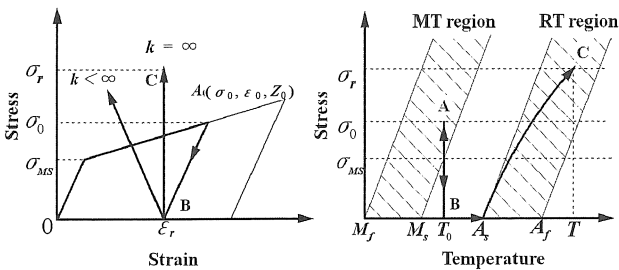


Fig.1 Working principle of SMA-heat engine



(a) Stress-strain diagram (b) Stress-temperature phase diagram

Fig.2 Stress-strain diagram and stress-temperature phase diagram showing the generation of the recovery stress

ひずみ線図に示す。また、図 2 (b)の応力-温度相図で予負荷後の回復応力発生時の温度依存性を示す。図において、 M_s 、 M_f 、 A_s 、 A_f はそれぞれマルテンサイト変態の開始と終了の温度、逆変態の開始と終了の温度を表す。最初に A_s 点以下の温度 T_0 で点 A まで負荷し、除荷する。除荷終了点 B で残留ひずみ ϵ_r が現れる。 ϵ_r を一定に保ち点 C まで加熱すると回復応力 σ_r が増加する。回復応力 σ_r は、逆変態の領域において温度の上昇に伴い増加する。回復応力は予負荷時の応力 σ_0 、ひずみ ϵ_0 、マルテンサイト相の体積分率 Z_0 などの

力学的条件および加熱と冷却の熱的条件に依存する。従って、SMA ヒートエンジンを開発するためには、回復応力の熱・力学条件への依存性を理解することが重要である。

4. 形状記憶合金ヒートエンジンの開発

これまで種々の形状記憶合金ヒートエンジンが開発されている⁴⁾⁻¹⁹⁾。提案された形状記憶合金ヒートエンジンの形式と出力特性を表 1 に要約して示す。

オフセットクランク式エンジンが Banks により最初に提案された⁴⁾。このエンジンでは形状記憶合金ワイヤーの曲げ変形が利用された。形状記憶合金コイルばねを利用する他のオフセットクランク式エンジンが Ginell らによって提案された⁵⁾。このエンジンの基本構造と作動原理を図 3 に示す。大円板と小円板の中心が距離 e_x だけ偏心している。2つの円板の円周上の点が形状記憶合金コイルばねで連結されている。湯中で生じるコイルばねの回復力 F_h は空気中での力 F_a より大きい。縮もうとする回復力の接線方向成分 F_{ht} により円板は矢印の方向に回転する。

斜板式エンジンが西川らにより提案された⁷⁾。このエンジ

Table 1 Type and output power of various SMA-heat engines

Type of engine	Driving element of SMA			Maximum output power [W]	Reference
	Shape	Number of elements	Type of deformation		
Offset crank	Wire	20	Bending	0.23	Banks (4)
Offset crank	Helical spring	—	Tension	20	Ginell (5)
Offset crank	Helical spring	6	Tension	1	Tobushi (18)
Simple pulley	Wire	5	Bending	0.28	Tobushi (18)
Simple pulley	Belt	1	Bending	1.2	Sato (14)
Twin crank	Helical spring	6	Tension	1.7	Iwanaga (16)
Tilt disk	Helical spring	—	Tension	6.2	Nishikawa (7)
	Wire	—	Elongation	305	Nishikawa (8)
Tilt-disk offset crank	Helical spring	12	Tension	0.6	Tobushi (19)
Reciprocating	Wire	2	Elongation	1.8	Sakuma (12, 13)
Reciprocating	Wire	1	Elongation	0.15	Kaneko (15)
Turbine	Belt	1	Bending	0.6	Tanaka (11)
Turbine	Helical spring	252	Tension	665	Tanaka (10)

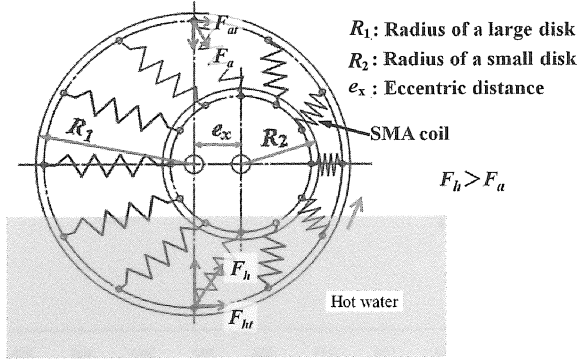


Fig. 3 Basic structure and working principle of an offset-crank SMA heat engine

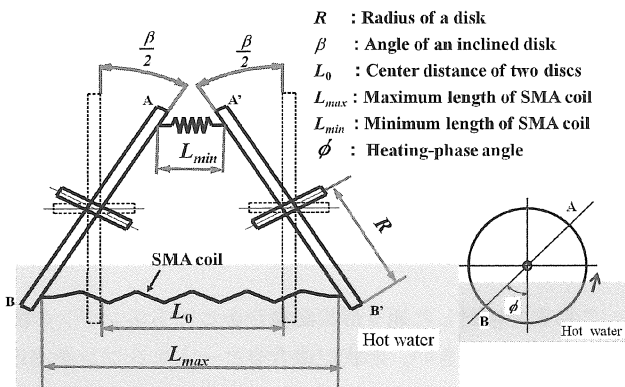


Fig. 4 Basic structure and working principle of a tilt-disk SMA heat engine

ンの基本構造と作動原理を図4に示す。2つの円板は斜板角 β だけ傾いている。2つの円板の円周上の点は、形状記憶合金コイルばねで連結されている。コイルばねの最大伸びの位置 BB' は、加熱領域の中心から加熱位相角 ϕ だけシフトしている。円板は、湯中においてより強く縮もうとする回復力の接線方向成分 F_{ht} に基づき回転する。

形状記憶合金素子の数が増加すれば、回転応力に基づく駆動力は大きくなる¹⁸⁾。従って、SMA素子が多くなればより高い出力が得られる。

5. 斜板オフセットクランク式形状記憶合金ヒートエンジン

斜板オフセットクランク式形状記憶合金ヒートエンジンは戸伏らによって提案された¹⁹⁾。

斜板オフセットクランク式エンジンの写真を図5に示す。このエンジンの基本機構は、斜板式エンジンとオフセットクランク式エンジンの組合せで構成される。形状記憶合金コイルばねは、2つの斜板の円周上の点を連結する。コイルばねの収縮しようとする回復力がこのエンジンの駆動力である。コイルばねの回復力は空気中より湯中のほうが強い。高温領域と低温領域における形状記憶合金コイルばねの収縮しようとする回復力の差が、このエンジンで最も重要な

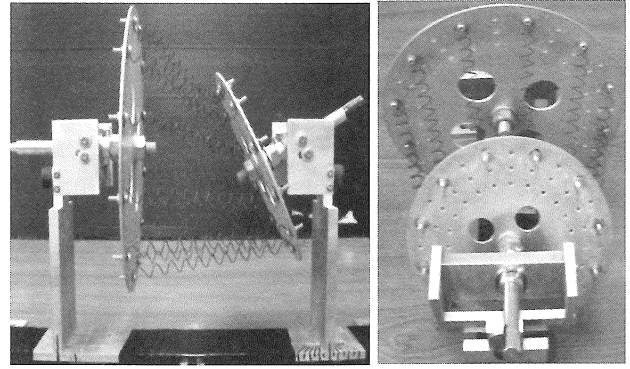


Fig. 5 Photographs of a tilt-disk offset crank SMA heat engine

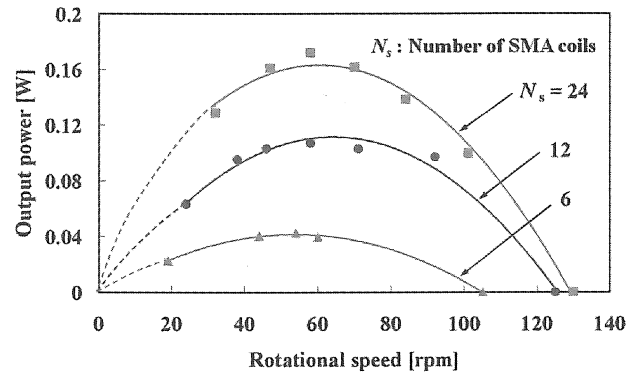


Fig. 6 Relationship between output power and rotational speed for various numbers of SMA coils N_s in the tilt-disk offset crank SMA heat engine

値である。円板は収縮力の接線方向成分に基づき回転する。実験は次の条件で行った：形状記憶合金ワイヤーの直径=0.7 mm、形状記憶合金コイルばねの平均径=8.7 mm、大円板の半径 $R_1 = 100$ mm、小円板の半径 $R_2 = 75$ mm、大小円板中心の偏心量 $e_x = 5$ mm、両円板の中心距離 $L_0 = 80$ mm、斜板角 $\beta = 20^\circ$ 、加熱位相角 $\phi = 0^\circ$ 、湯面と大円板の中心軸との距離 = 68 mm。実験で得られた斜板オフセットクランク式エンジンの出力と回転速度の関係を図6に示す。図6において、 N_s は形状記憶合金コイルばねの本数を表す。図6からわかるように、出力は形状記憶合金コイルばねの本数 N_s に比例して増加する。最大出力はコイルばね24本で回転速度60 rpmにおいて0.17 Wである。本エンジンの出力特性は種々の因子に依存する。出力は、形状記憶合金コイルばねの形状、2つの円板の中心間距離、2つの斜板の半径、加熱位相角、高温領域と低温領域の雰囲気媒体および温度などに影響を受ける。

6. 単純プーリー式形状記憶合金ヒートエンジンにより駆動するソーラーカー

単純プーリー式形状記憶合金ヒートエンジンにより駆動するソーラーカーの写真を図7に示す。フレネルレンズを用い太陽光で駆動する単純プーリー式形状記憶合金ヒートエンジンの基本構造と作動原理を図8に示す。単純プーリー

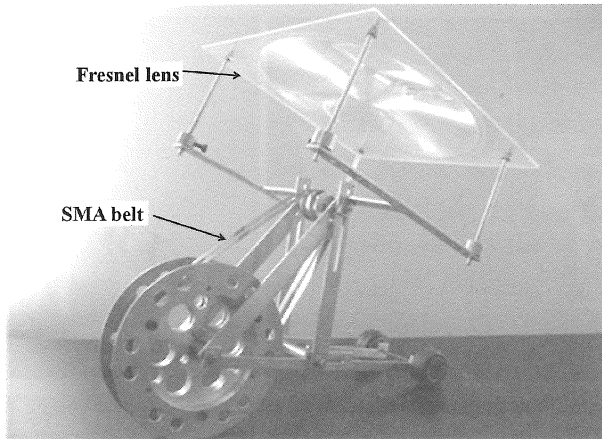


Fig. 7 Photograph of a solar-powered car driven by a simple pulley SMA heat engine

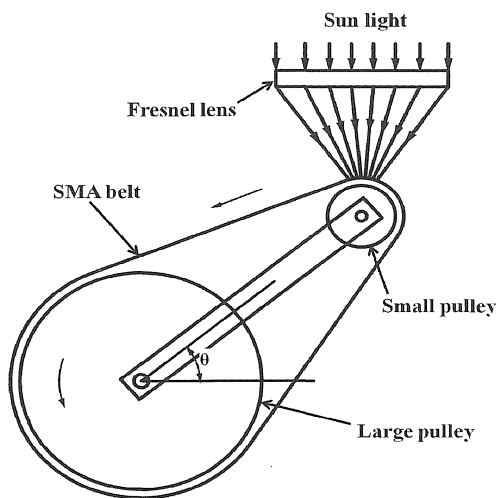


Fig. 8 Basic structure and working principle of a simple-pulley SMA heat engine driven by sun light using Fresnel lens

一式エンジンにおいては、2つのプーリーに形状記憶合金ベルトを巻掛けている。形状記憶合金ベルトは直線形状を記憶している。形状記憶合金ベルトは溶接によりループ形状にした。太陽光はフレネルレンズにより集光する。図8に示すように小プーリー上の形状記憶合金ベルトの左側の部分を太陽光により加熱すると、形状記憶合金ベルトは回復力により左方向に動く。形状記憶合金ベルトとプーリーとの間の摩擦によりプーリーは反時計方向に回転する。従って、図7に示すソーラーカーは左方向へ動く。小プーリー上の形状記憶合金ベルトの右側部分を加熱すると、形状記憶合金ベルトは右方向に動き、プーリーは時計方向に回転する。この結果、ソーラーカーは右方向に移動する。従って、小プーリー上の形状記憶合金ベルトの加熱位置を変化させることによりソーラーカーの走行方向を制御することが出来る。2つのプーリー間距離 = 115 mm、支柱角 $\theta = 40^\circ$ 、フレネルレンズと小プーリー間の距離 = 60 mm と 70 mm の場合について得られたソーラーカーの走行速度と気温との関係を図9に示す。フレネルレンズの焦点距離と直径はそれぞれ 152 mm と 76 mm であった。形状記憶合金ベルトに生じる回復応力は温度に比例して増加するので、走

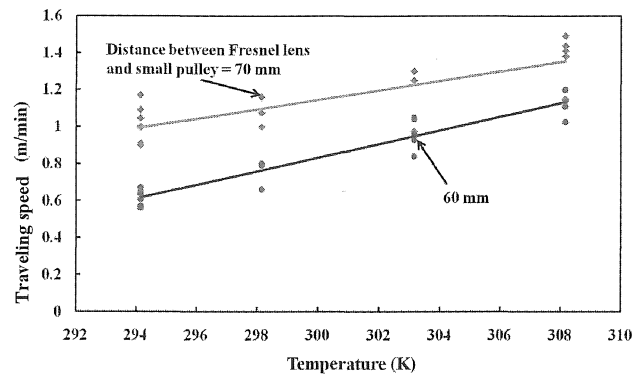


Fig. 9 Relationship between traveling speed and air temperature in the solar-powered car

行速度は気温に比例して上昇する。実験で得られたソーラーカーの最高平均速度は 1.49 m/min であった。

7. 形状記憶合金ヒートエンジンの実用化への課題

これまで検討した通り形状記憶合金ヒートエンジンの開発への期待は大きい。形状記憶合金ヒートエンジンを実用化するためには、解決すべき多くの課題がある。形状記憶合金ヒートエンジンの実用化への主な課題は次の通りである。

(1) 未利用の低温熱エネルギーの活用システムの構築

工場などから出る排熱、地熱エネルギー、温泉などの湯、太陽光等の 373K 以下の低質の熱エネルギーの大部分は利用されていない。これらの熱エネルギーを形状記憶合金ヒートエンジンで有効活用するシステムを構築する必要がある。

(2) 形状記憶合金を利用するエネルギーの有効な変換システムの開発

形状記憶のワイヤーやベルトの曲げおよび合金コイルばねの伸び縮みにおけるたわみは非常に大きい、生じる回復力は小さい。これに対し、変形量は小さいが形状記憶合金ワイヤーの引張りにおける回復力や形状記憶合金円管のねじりにおける回復トルクは非常に大きい。形状記憶合金素子に生じる大きな回復力を有効活用する形状記憶合金ヒートエンジンの機構を開発する必要がある。

(3) 形状記憶合金の機能劣化の改善

マルテンサイト変態応力は繰返し初期において減少する。回復応力はひずみと温度に比例して増加するが、回復応力が大きい場合繰返しによる回復応力の減少も大きい。マルテンサイト変態温度は熱サイクルと力学サイクルにより変化する。熱サイクルおよび力学サイクルによる変態応力、変態ひずみおよび変態温度の変化が少ない材料を開発することが必要である。

(4) 形状記憶合金の疲労寿命の改善

TiNi 形状記憶合金の耐食性は非常に高いが、大きなひずみを繰返し受けると腐食疲労の生じる可能性がある。疲労寿命の長い材料の開発が必要である。

(5) エネルギーの変換効率の改善

形状記憶合金ヒートエンジンは低質の熱エネルギーを活用するので、熱エネルギーの力学エネルギーへの変換効率は基本的に低い。しかしながら、エンジンのエネルギー変換効率の向上が必要である。

8. 結言

形状記憶合金ヒートエンジンの作動原理およびこれまでに開発された種々のヒートエンジンの特性を検討した。さらに、斜板オフセットクランク式形状記憶合金ヒートエンジンの出力特性及び単純プリー式形状記憶合金ヒートエンジンで駆動するソーラーカーの作動原理と走行特性を明らかにした。また、形状記憶合金ヒートエンジンの実用化への課題を示した。エネルギー資源や地球環境問題の解決の観点から形状記憶合金ヒートエンジンの実用化が期待される。

文献

- 1) 舟久保熙康編、形状記憶合金、(1984)、 pp. 1-60、産業図書。
- 2) Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M., eds., *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, (1990), pp. 1-35, Butterworth-Heinemann.
- 3) Otsuka, K. and Wayman, C. M., eds., *Shape Memory Materials*, (1998), pp. 1-49, Cambridge University Press.
- 4) Banks, R., Nitinol Heat Engines, *Shape Memory Effects in Alloys*, edited by J. Perkins, pp. 537-545, (1975), Plenum Press.
- 5) Ginell, W.S., McNichols, Jr. J. L. and Cory, J. S., Nitinol Heat Engines for Low-Grade Thermal Energy Conversion, *Mech. Eng.*, Vol. 101, No. 5, (1979), pp. 28-33.
- 6) Goldstein, D. M. and McNamara, L. J., eds., *Proc. NITINOL Heat Engine Conf.*, NSWC-MP-79-441, (1978), pp. 11.1-12.16.
- 7) 西川雅弘、渡辺健二、形状記憶合金を用いた斜板式熱駆動エンジンの動作特性と駆動素子の動特性、日本金属学会秋季大会シンポジウム講演予稿、(1983)、pp. 122-123.
- 8) Nishikawa, M., Kodera, M., Okata, I., Yamauchi, K. and Watanabe, K., Large Scale Tilt Plate Heat Engine Using SMA, *Proc. Int. Conf. Martensitic Transformations*, (1986), pp. 1041-1046.
- 9) 本間敏夫、祢津信彦、西田稔、松本実、守護嘉朗、大川淳、ニチノール熱エンジンの性能に関する研究、東北大学選鉱製錬研究所報告、37 巻、2 号、(1981)、pp. 213-222.
- 10) 田中宏、神田正宣、杉本佐美郎、毛利元男、奥田徹、田中利之、TiNi 形状記憶合金を用いた熱駆動エンジンの応用研究、日本金属学会秋季大会シンポジウム講演予稿(1983)、 pp.120-121 .
- 11) 田中誠、将来型エンジン、日本機械学会誌、93 巻、855 号、(1990)、 pp. 119-122.
- 12) Sakuma, T., Iwata, U. and Arai, M., Output Power Characteristics of Reciprocating Heat Engine Using Shape Memory Alloy, *JSME Int. J.*, Ser. B, Vol. 40, No. 4 (1997), pp. 599-606.
- 13) Sakuma, T. and Iwata, U., Working Characteristics of a Reciprocating-Type Heat Engine Using Shape Memory Alloys, *JSME Int. J.*, Ser. B, Vol. 41, No. 2 (1998), pp. 344-350.
- 14) 佐藤義久、小林大、小林由和、鈴木将史、形状記憶合金熱エンジンの出力特性に関する研究、日本機械学会論文集(B 偏)、74 巻、741 号(2008)、pp. 1154-1160.
- 15) Kaneko, K. and Enomoto, K., Development of Reciprocating Heat Engine Using Shape Memory Alloy - Ratchet Type Drive System with One-Way Clutch - , *Proc. Int. Conf. Shape Memory and Superelastic Tech.*, (2007), pp.359-368.
- 16) Iwanaga, H., Tobushi, H. and Ito, H., Basic Research on Output Power Characteristics of a Shape Memory Alloy Heat Engine (Twin Crank Heat Engine), *JSME Int. J.*, Ser. I, Vol. 31, No. 3 (1988), pp. 634-637.
- 17) Tobushi, H. and Cahoon, J. R., Mechanical Analysis of a Solar-Powered Solid State Engine, *Trans. CSME*, Vol. 9, No. 3 (1985), pp. 137-141.
- 18) Tobushi, H., Kimura, K., Iwanaga, H. and Cahoon, J. R., Basic Research on Shape Memory Alloy Heat Engine (Output Power Characteristics and Problems in Development), *JSME Int. J.*, Ser. I, Vol. 33, No. 2 (1990), pp. 263-268.
- 19) Tobushi, H., Okumura, K., Shimeno, Y. and Takata, K., Output Power Characteristics of Tilt-Disk Offset Crank Heat Engine Using Shape Memory Alloy, *Trans. Mater. Res. Soc. Japan.*, Vol. 26, No.1 (2001), pp. 171-174.