

# 形状記憶合金を用いたクリーン熱エンジンの開発

宇部工業高等専門学校 専攻科 生産システム工学専攻 1年 辻野 真平

## 1. 諸言

近年、自動車の排ガスや工場の排煙などの大気汚染が環境問題として取り上げられている。形状記憶合金（Shape Memory Alloy, 以下SMA）は、熱湯などの小さな熱エネルギーで伸縮運動をすることができ、この特性をクリーンなエンジンとして利用できるのではないかと期待されている。これまでに、いくつかのSMA熱エンジンモデルが提案されている。しかしながら、これまでの熱エンジンは大出力が得られにくく、SMAの疲労寿命や加熱、冷却の方法など、解決しなければならない課題も多く、実用化には至っていない。

本実験で提案する熱エンジンは、SMAコイルバネの往復運動を利用したレシプロタイプSMA熱エンジンである。SMAをコイルバネにすることで駆動範囲を拡大させ、疲労寿命を増大させる効果が期待できる。さらにクランク機構を採用することで、出力の増大も図ることができる。

本実験の目的はSMAを用いた新しいレシプロタイプ熱エンジンを開発することである。そのためにSMAおよびSMAコイルバネの特性を明らかにする。さらに、SMAの往復運動を制御するための通電法による加熱システムを構築する。また、レシプロタイプ熱エンジンを作製し、その作動試験を行う。

まず2章において、SMAの基本特性や変形挙動および形状回復現象のメカニズムについて説明する。また、応用が期待される分野について述べる。次に3章において実験に使用するTi-Ni SMA線材の基礎データを検討した結果に関して、その評価方法や具体的特性を述べる。さらに得られた結果に基づきTi-Ni SMAコイルばねを作製し、その特性を調べる。次に4章では、本実験において開発するSMAコイルばねを用いたレシプロタイプ熱エンジンの作動原理および仕様について述べる。また、5章では複数のSMAコイルばねを独立して加熱・冷却するための通電法による加熱システムについて説明する。さらに6章において、実際に作製したレシプロタイプ熱エンジンの性能を調べ、考察を行う。

## 2. 形状記憶合金の基本特性

### 2.1 形状記憶合金の特徴

SMAは金属材料の1種であり、その他の金属にはないいくつかの特異な性質を有している。その1つとして、見かけ上は塑性変形していてもある温度まで加熱することで元の形状に戻るといった形状記憶効果（Shape Memory Effect, SME）が挙げられる。一般的な金属材料における可逆ひずみ（弾性限度）は0.2%程度であるが、代表的なSMAであるTi-Ni合金では約10%と極めて大きいことが知られている。また、SMAは超弾性（Superelasticity, SE）と呼ばれる性質も兼備している。その他にも強度、耐食性、耐摩耗性などの特性も優れて

いる。

## 2.2 形状記憶・超弾性挙動

### 2.2.1 マルテンサイト変態

金属材料における SME あるいは SE とは、マルテンサイト変態に起因する現象である。以下にマルテンサイト変態と SMA の変形挙動の関係を説明する。

マルテンサイト変態は、無拡散変態のうちせん断変形によって結晶構造が変化するものである。まず、マルテンサイト変態を示す金属材料の代表的なものである鋼を例にとりマルテンサイト変態を説明する。鋼において高温で安定な結晶構造は面心立方構造で  $\gamma$  鉄と呼ばれる。これを徐冷していくと、体心立方構造の  $\alpha$  鉄に変態する。ところが、 $\gamma$  鉄から急冷して相分離を抑えると、 $\gamma$  鉄が低温においても残存する。急冷の途中で  $\gamma$  鉄は体心立方構造の  $\alpha'$  相に変わる。ここで、記号「 $\alpha'$ 」は、マルテンサイト相を意味し、 $\alpha'$  はこのマルテンサイト相が  $\alpha$  (bcc) 相をもとにした構造であることを示している。 $\gamma$  相は  $\alpha'$  相を生み出したことになり、母相 (Parent 相, P相) とも呼ばれる。鋼以外の合金にも同様の現象が発見されるに至り、マルテンサイトという言葉は広く一般的に使われるようになってきた。そのような材料の中に SMA があり、SME は P 相に戻るマルテンサイト逆変態に伴う形状回復現象である。

しかし、一般的な鉄合金はマルテンサイト変態を示す一方で SME が現れない。その一因は、鉄合金のマルテンサイト変態が起こると、多量の転位が導入されることにある。すなわち形状変化を伴うマルテンサイト変態が起こっても、マルテンサイト相と母相の界面は接合している。この界面は晶癖面と呼ばれる。晶癖面で割れが生じないためには、マルテンサイト変態後も変形しない面が晶癖面として選択されなければならない。一般的には、マルテンサイト変態に伴う格子変形だけでは、このような無ひずみの晶癖面は存在しない。そのような晶癖面を作るために、マルテンサイト変態が起こると格子変形とは異なる別の変形の導入が必要となる。この変形のことを格子不変変形と呼んでいる。格子不変変形には、転位によるすべり変形や双晶変形がある。

一般的な鉄合金の場合には、格子不変変形として多量の転位が導入され塑性変形を起こし、加工硬化する。このことがマルテンサイト変態により材料が硬くなる理由の1つでもある。しかし、このことは鉄合金において SME が現れない理由にもなっている。一方、多くの形状記憶合金では、格子不変変形は双晶により行われるため、逆変態とともに双晶は消え去り、SME が発現することになる。

### 2.2.2 形状記憶・超弾性の発現機構

SME や SE のメカニズムを図2-1を用いて説明する。

まず、図2-1(a)で示す P 相をマルテンサイト変態温度以下に冷却すると、(b) に示すようにマルテンサイト相の結晶構造に変わる。この際に実際の結晶ではマルテンサイト兄弟晶

(バリエント) が形成される。兄弟晶とは、結晶構造は同じで、結晶方位が異なるマルテンサイト晶のことであり、(b)にはAとBで示された2種類の方位の兄弟晶が示されている。個々の兄弟晶は、P相から見ると、せん断ひずみを生じているが、冷却により形成された兄弟晶は、お互いのひずみを緩和し合うように自己調整して形成されるため、巨視的には試料形状は変化していない。

一方、SMAに現れるマルテンサイト変態では、AとBの境界が低応力で簡単に移動する。マルテンサイト相状態の試料に外力が加わると、(c)のように外力に対して優先方位の兄弟晶Aが成長し、試料は巨視的にせん断変形することになる。この試料を加熱すると、すべてのマルテンサイト晶はP相に逆変態し、その結果試料形状も(a)のように完全に元の形に戻る。これがSMEである。

マルテンサイト変態は、変態温度以下に冷却した場合に生ずるものであるが、変態温度以上でも外力を負荷すれば変態を誘起することができる。これは、上述のようにマルテンサイト変態がせん断変形によって引き起こされるため、外力が変態を助けるからである。そこで、マルテンサイト逆変態温度以上の温度で外力を加えると、直接(a)から(c)への破線の経路をたどり、優先方位のマルテンサイト兄弟晶 A のみが形成され、試料には巨視的せん断ひずみが生じる。逆変態温度以上では、マルテンサイト相はエネルギー的に不安定であるため、外力を除くだけで(c)から(a)への経路でP相への逆変態が生じ形状は元に戻る。これがSEである。

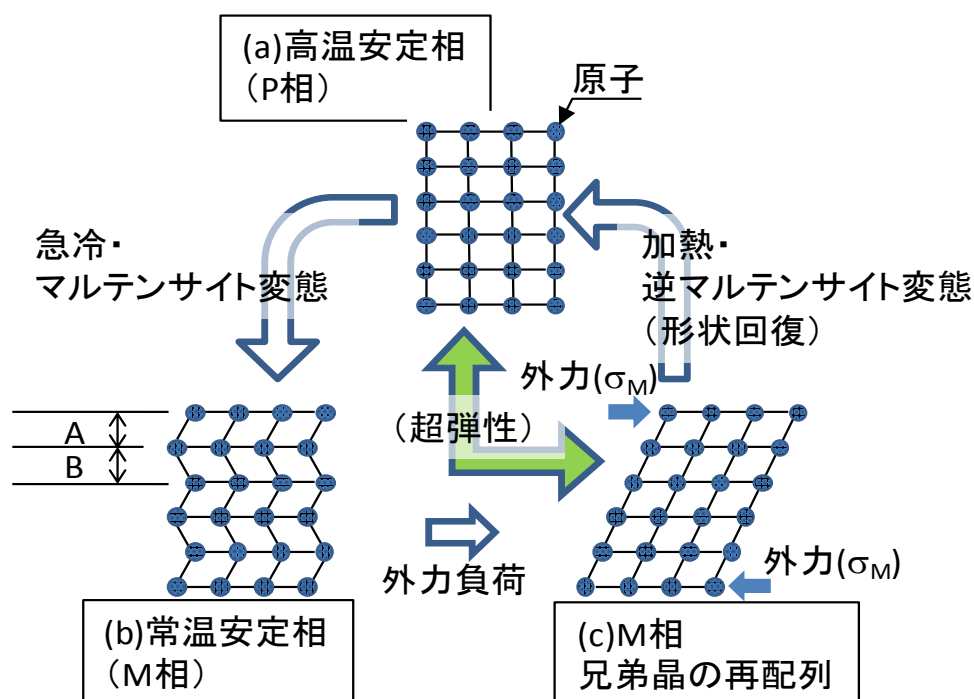


図 2-1 SMA のメカニズム

## 2.3 形状記憶合金の応用

上述したユニークな特性を有している SMA は、医療や家電、航空・宇宙産業などにおける機能性材料として既に実用化されている。さらに近年では、センサーやアクチュエータとして機能するスマート材料としての応用も期待されている。その理由の第一は、SMA 素子を使用することによる装置の小型化にある。すなわち、SMA では駆動部分が合金そのものであり、動作機構も単純であるため容易に小型化を実現できる。第二の理由は、動作特性が温度以外の環境条件に左右されないことである。Ti-Ni SMA は特に耐食性が良く、水中や薬剤中にアクチュエータ本体をそのまま設置できる。第三の理由は、動作環境がクリーンで騒音を発生しないことである。第四の理由は、SMA の柔軟性である。すなわちマルテンサイト相にある SMA は低応力での変形が可能であり柔軟な性質を有している。さらに SME を示す高温域（温度がマルテンサイト逆変態よりも高い温度域）においては超弾性を示す状態となっている。したがって過大な負荷が加えられた場合でも適当に緩和されアクチュエータや相手部材を損傷しにくいという特徴を有する。

## 3. 形状記憶合金および形状記憶合金コイルばねの特性

### 3.1 形状記憶合金の熱的・機械的性質

#### 3.1.1 材料および試験片

SMA の基本特性として熱的性質と機械的性質を明らかにするために熱分析と引張試験を行った。実験に使用した材料は市販の Ti-Ni SMA 線材（株式会社ニラコ、直径 0.3mm）である。この Ti-Ni SMA 線材より適当な長さの試験片を切り出し、実験に供した。

#### 3.1.2 Ti-Ni 形状記憶合金の熱的性質

熱分析には示差走査熱量測定装置（Shimadzu, DSC60）を使用した。上述した Ti-Ni SMA 線材から長さ 5 mm 程度の試験片を 7 本切り出し、アセトン中での超音波洗浄を施した後、アルミニウム製のセル内に平行に配置し実験を行った。実験条件として、試験環境は大気中で加熱速度は 10°C/min である。

図 3-1 は、常温から 90°C までの DSC 測定結果である。加熱中にはマルテンサイト逆変態による吸熱反応、冷却中にはマルテンサイト変態による発熱反応が生じていることが分かる。図 3-1 より、この材料の逆マルテンサイト変態開始温度  $A_s$ 、終了温度  $A_f$ 、マルテンサイト変態開始温度  $M_s$ 、終了温度  $M_f$  をそれぞれ測定した結果、 $A_s = 53$ 、 $A_f = 77$ 、 $M_s = 55$ 、 $M_f = 48$  °C であることが分かった。

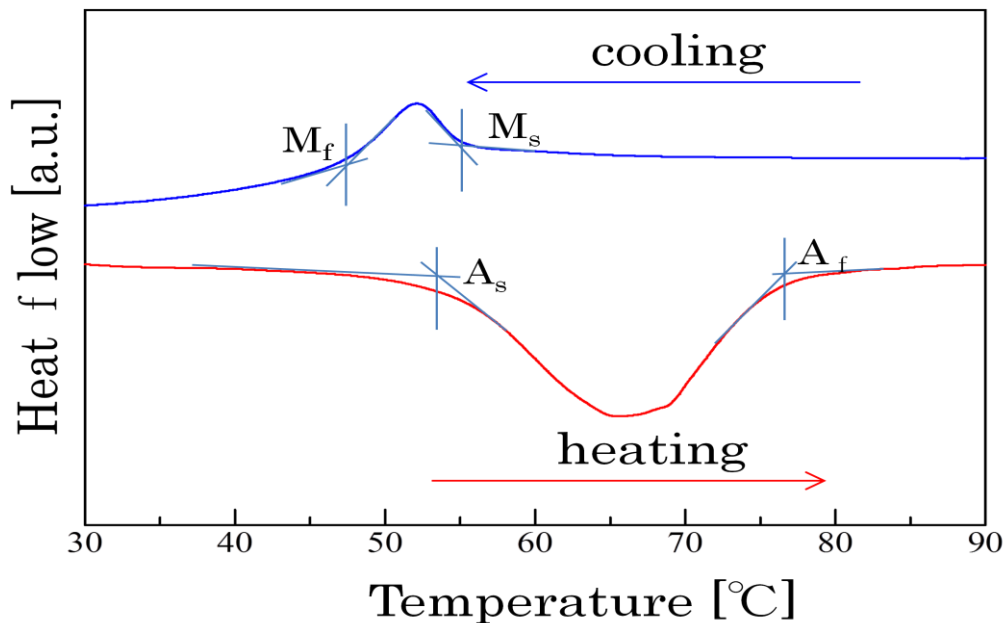


図 3-1 SMA の DSC 結果

### 3.1.3 Ti-Ni 形状記憶合金の機械的性質

引張試験にはオートグラフ (Shimadzu, EZ-test) を使用した。試験片の平行部長さが 1 mm となるように治具で固定し、変位制御引張試験を行った。変位速度は  $1 \times 10^{-4} \text{mm/sec}$  (ひずみ速度  $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ) で、試験片伸びは試験機に付属する差動トランスを用いて測定した。さらに材料の形状回復挙動について調べた。まず、材料を加熱する方法としては通電法を採用した。Ti合金は、比較的比抵抗が高い金属材料であるため通電により簡単に加熱することができる。図3-2はTi-Ni SMA線材 (直径0.3mm) に通電を施した場合の、線材表面の温度と電流の関係を示している。温度測定には熱電対 (KFG-25-200-100) を使用した。図3-2に示すように0.5から2Aの電流に対して、SMAの温度はほぼ直線的に上昇しており、150°C程度の高温を容易に得られることが分かる。3.1.2で述べたように、この材料のマルテンサイト逆変態温度は70°C程度であるため、通電法により十分に材料の加熱を行うことができることを確認した。

図3-3はTi-Ni SMA線材に対してオートグラフを使用して引張負荷を加え (ひずみ速度  $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ )、負荷応力が  $\sigma_M$  に達したと見られた後に負荷応力を0まで除荷し、さらに通電により加熱を施した場合の  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線である。図3-3に示すように、ひずみが10%程度に達した後に除荷を施すと、直線的にひずみが回復するものの、荷重0の状態では7%程度のひずみが残存している。さらにこの状態から通電加熱を施すと、ひずみが0まで形状回復することを確認した。

次に、同様の試験片を用いて加熱に伴う形状回復によって発生する力の大きさ、および

発生力と温度の関係を調べた。図3-4は常温下でTi-Ni SMA線材に対して4%の引張ひずみを加えた後、試験片つかみ具の位置を固定し通電加熱した場合の加熱温度と発生力の関係を示している。図3-4に示すように常温、すなわちマルテンサイト相での発生力が90 MPa程度であるのに対して、温度の上昇に伴って発生力が上昇し、最大で190 MPa程度に達することが分かる。

以上より、Ti-Ni SMA 線材（線径 0.3mm）においては、10%程度の引張ひずみを与えても加熱により形状回復が生じること、マルテンサイト逆変態が生じるとマルテンサイト相の状態での発生力の2倍程度の力が発生することを確認した。また、通電加熱により容易にTi-Ni SMA 線材の温度を制御できることを確認した。

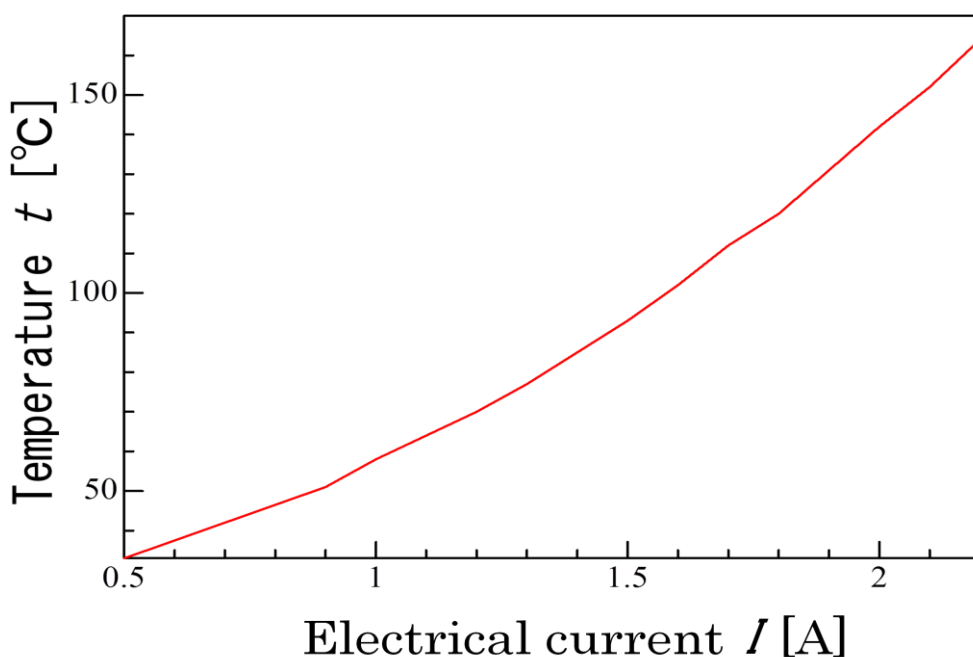


図 3-2 通電加熱による SMA の温度変化の測定結果

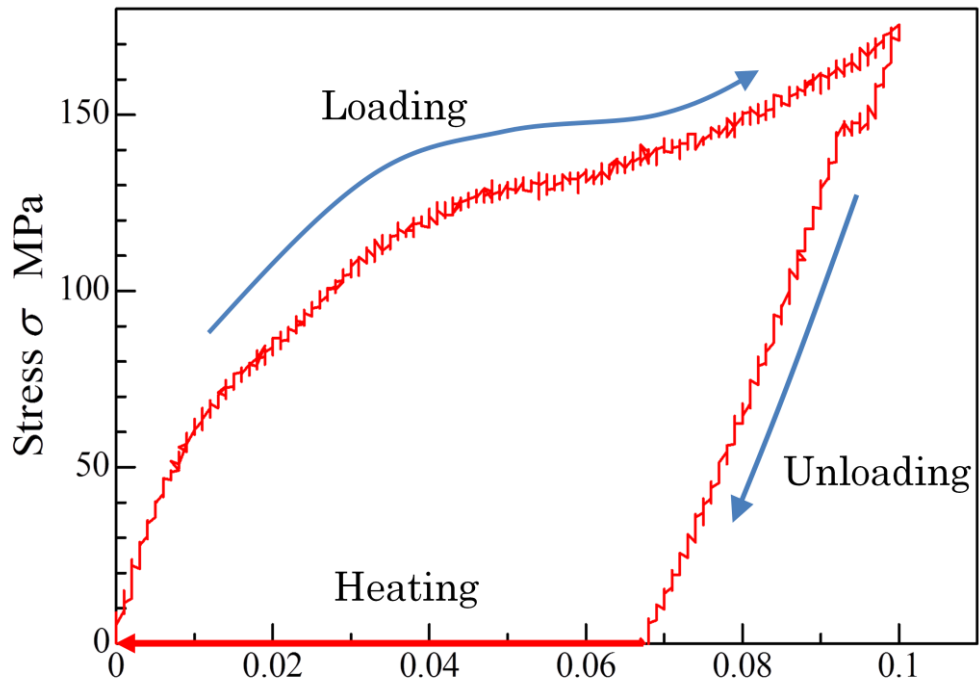


図 3-3 SMA の引張試験結果

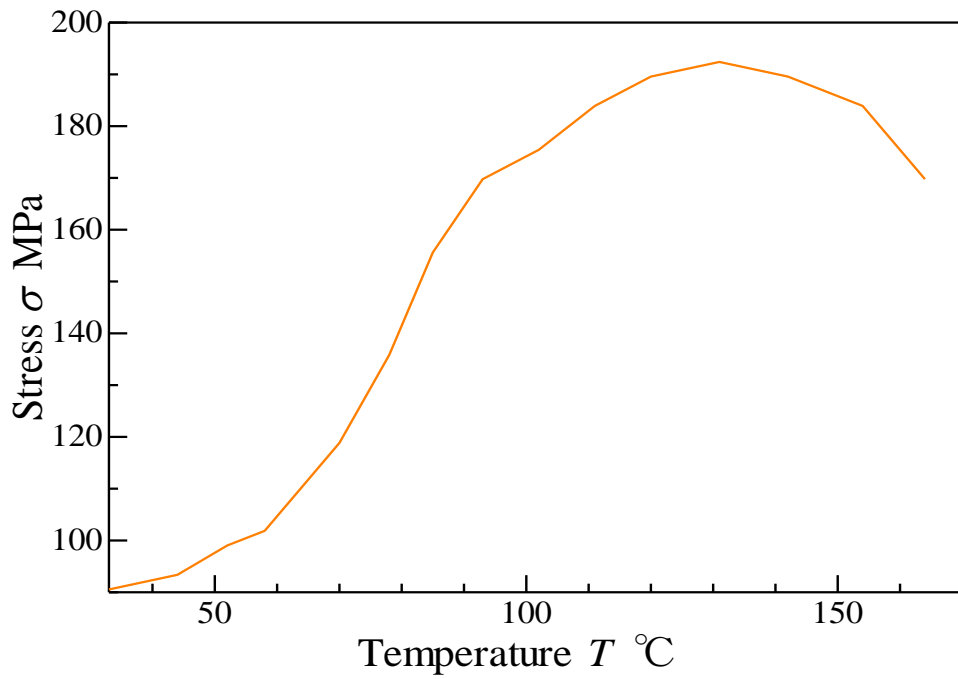


図 3-4 温度による変形回復応力

## 3.2 形状記憶合金コイルばねの機械的性質

### 3.2.1 形状記憶熱処理

SMAは、所望する形状に材料を成形・固定した後に適当な熱処理（形状記憶熱処理）を施すことにより形状記憶処理を行うことができる。Ti-Ni SMAの場合は、（1）中温処理、（2）低温処理、（3）時効処理の3通りが一般的である。

（1）の中温処理では、冷間加工などで十分に加工硬化した材料を所望する形状に成形・固定して、400～500℃の温度で数分から1時間保持する方法である。一般に中温処理では、処理温度が高いほど回復可能なひずみ量が大きくなり、処理温度が低いほど繰返し寿命が長くなる。また、単純に形状回復時の発生力を大きくしたいときには400℃付近の温度で処理し、高温時と低温時の力の差を利用する用途には500℃付近の温度で処理をする。（2）の低温処理は、はじめに合金を800℃以上の高温に加熱して合金内の組織を正準化し、これを成形加工した後、200℃～300℃で記憶処理する方法である。合金を完全になましてから成形するので成形加工が容易で複雑な形状を記憶させるときに便利であるが、形状回復特性は中温処理した合金と比較して若干劣る。（3）の時効処理は、Ni濃度が50.5at.%以上の高Ni合金だけで使える方法である。まず合金を800～1000℃で加熱した後水中に焼入れ、いわゆる溶体化処理をする。その後、400℃前後の温度で数時間、時効処理すると次第に硬くなって、この処理特有の引張特性を示すようになる。

### 3.2.2 Ti-Ni形状記憶合金コイルばねの作製

本実験においては、上記3種類の形状記憶熱処理のうち最も一般的な手法である中温処理を採用した。具体的な手順を以下に示す。まず、直径3mmの銅製丸棒にTi-Ni SMA線材（直径0.3mm）を巻き付け、端部を固定してコイルばね形状に成形する。次に、これを500℃に加熱した電気炉に入れ30min保持した後、炉から取り出し水を用いて焼入れを行った。

### 3.2.3 Ti-Ni形状記憶合金コイルばねの機械的性質

作製したTi-Ni SMAコイルばねの機械的性質と温度の関係を調べた。作製したばねの諸元は、ばね長 $L=27$  mm、直径 $D=3.6$  mm、線径 $d=0.3$  mm、巻き数 $n=21$ である。

図3-5はTi-Ni SMAコイルばね試験片に対して、定ひずみ速度引張試験を行い伸び $\Delta l$ と負荷荷重 $P$ の関係を調べた結果である。また、P相（高温）とマルテンサイト相（常温）での機械的性質の変化を調べるため、通電加熱により試験片を加熱し、常温（20℃）、高温（70℃、90℃）での引張試験を行った。図3-5に示すように、P相、マルテンサイト相いずれのコイルばね試験片においても $\Delta l$ と $P$ の関係はほぼ直線的であり、コイルばねが線形挙動を示すことが分かる。また、本実験の結果においては、70℃と90℃の試験結果に差はなく、加熱温度はコイルばねの機械的性質に影響を及ぼさないことが分かった。



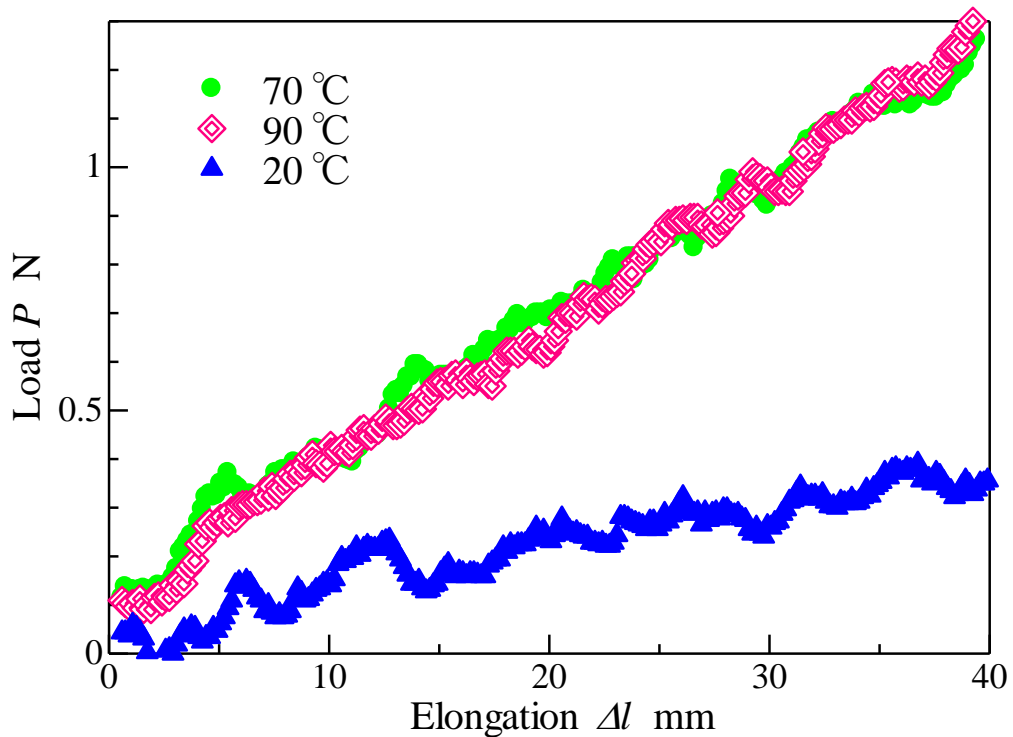


図 3-5 SMA コイルバネの機械的性質

#### 4. レシプロタイプ形状記憶合金熱エンジンの作製

##### 4.1 作動原理

SMA 熱エンジンの作動原理を図 4-1 に示す。図 4-1(a), (b)に示すように Ti-Ni SMA コイルバネは常温においては軟質のマルテンサイト相であり、外部負荷によって引き延ばされる。Ti-Ni SMA コイルバネを高温(60°C)にすると、P 相に相変態する。P 相は外部負荷に対する抵抗力が高く、図 4-1(c)に示すようにバネ長は $\Delta L$ だけ収縮する。したがって、この間に $\Delta L \cdot W$ の有効な仕事を取り出すことができる。さらに、このマルテンサイト相と P 相の変態は可逆的に生じ、加熱と冷却により何度でも繰り返し仕事をする事ができる。

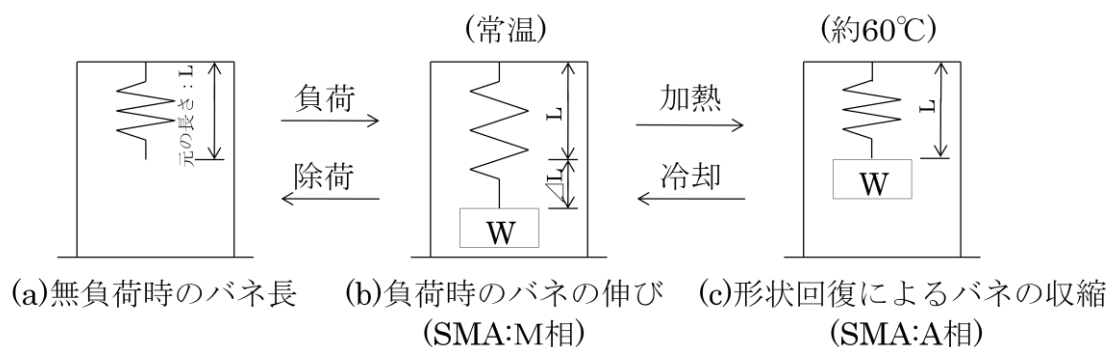


図 4-1 熱エンジンの作動原理

## 4.2 仕様

本実験に作製した熱エンジンは、軸径 0.3mm の Ti-Ni SMA 線材を 500°C で形状記憶熱処理をし、バネ長 27mm、直径 3.6mm、巻き数 24 の SMA コイルバネを使用した。図 4-2 は作製した SMA 熱エンジンの駆動部であり、SMA コイルバネ 4 本を並列に配置している。それぞれの SMA コイルバネは加熱装置に接続されており、独立した温度制御を行うことができる。さらに、クランク機構を介すことによって、SMA コイルバネの往復運動から回転運動を取り出すことができる。

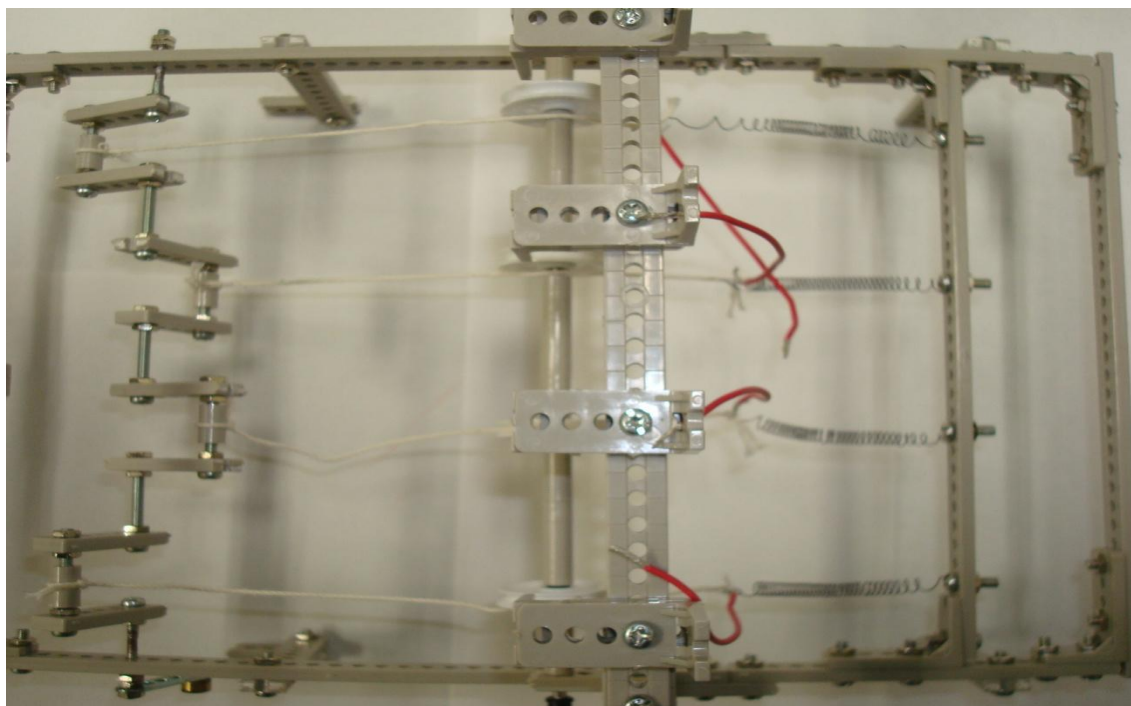


図 4-2 熱エンジンの駆動部

## 5. 通電法によるSMAコイルばね加熱システム

### 5.1 仕様機器

PICマイコン PIC16F873A-I/SP

AKI-PIC2 プログラマボード

CCS Cコンパイラ IDE PCWH 16BIT

ゼロプレッシャーICソケット

セラミック発振子 10MHz

FET 2SK2232



図 5-1 PIC マイコン

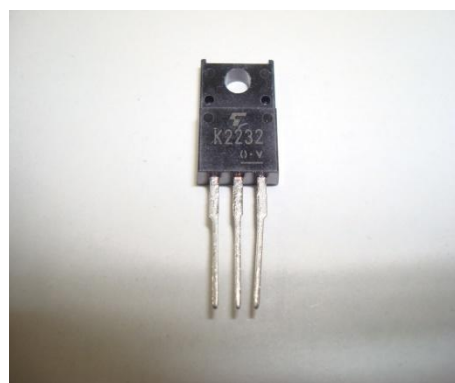


図 5-2 FET



図 5-3 FET

### 5.1.1 PICマイコン

PICマイコンとは超小型のマイクロコントローラのことである。

PIC(Peripheral Interface Controller)にはCPU、メモリ(RAM、ROM)、I/Oなどが1チップに収められているワンチップマイコンで、ROMに書き込まれたプログラムで機能する。

PICマイコンに書き込まれたプログラムにより、プログラムの対象となっている電流や電圧などを制御することができる。本実験では、PICマイコンによって各SMAコイルバネに発生する電流を制御する。具体的には図5-4に示すように、それぞれのバネに一定電流 $I_1$ (A)が一定時間 $T_1$ (sec)ずつ生じるプログラムを作製する。電流が生じている間、SMAコイルバネは加熱され、収縮する。電流を切った状態では自然冷却によりマルテンサイト相に変態し、別のバネの収縮によって引きのばされる。

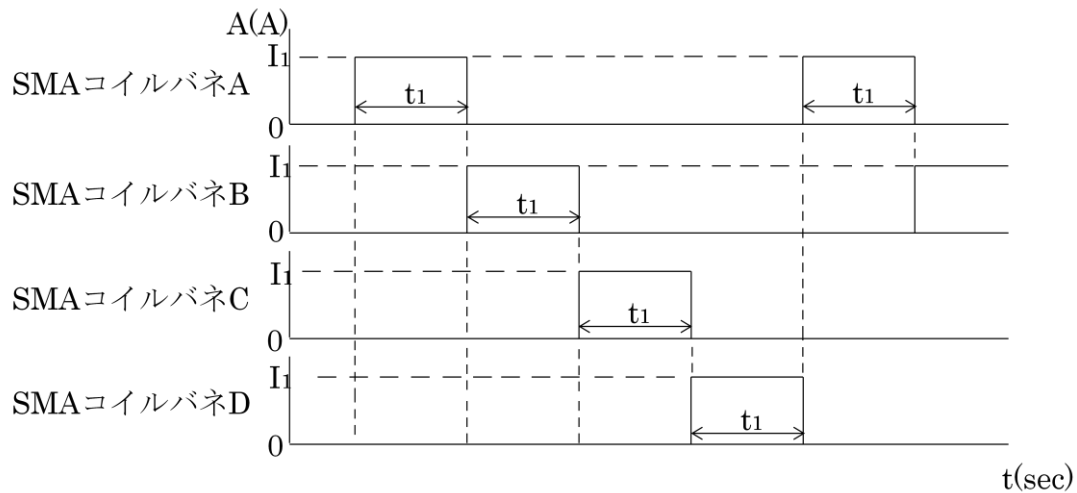


図 5-4 PIC マイコンによって制御された電流の発生

### 5.1.2 FET

FET(Field effect transistor)とは電界効果トランジスタのことである。

FETは「ソース」「ゲート」「ドレイン」の3つの端子を持ち、ゲート端子に電圧をかけることによってソース・ドレイン間を流れる電子または正孔(ホール)の流れを制御する。ソース・ドレイン間に電流が発生するとき、バイアス電圧と信号電圧と呼ばれる電圧が発生し、この二つの電圧により出力電圧が増幅される。これによって、低い電圧でも大きな電流を制御することが可能となる。トランジスタが入力電流により出力電流を制御するのに対して、FETは入力の電圧で出力電流を制御する。

本実験では、PIC マイコンによって電流の発生を制御することは可能となったが、SMA コイルバネを通電加熱で変形させるほどの温度を得ることができなかった。そこで FET を用いることで電流を制御し、大きな出力電流にする。これによって、通電加熱の温度を高めることができる。

### 5.2 通電加熱システム

先に述べた PIC マイコンによって SMA に生じる電流を制御することは可能になったが、次は電流の大きさが問題となった。通電加熱システムによる加熱温度は電流の大きさに比例するが、この回路は並列回路なので電流が低くなる。SMA コイルバネに発生する電流を測定したところ、0.02A であった。本実験で用いた SMA コイルバネを変形回復させるには、電流が 1A 程度必要である。SMA コイルバネに発生する電流を上げるには定電圧である直流電源の電圧を上げればよいが、直流電源には上限電圧があるため、FET を使用する。FET を使用することにより、大きな電流を制御することができ、加熱温度を上げることができる。このことから低電圧で大きな電流を得ることができ、短時間で加熱することが可能となった。PIC マイコンを用いた電気回路図を図 5-5、PIC マイコンと FET を用いた図を図 5-6 に

示す.

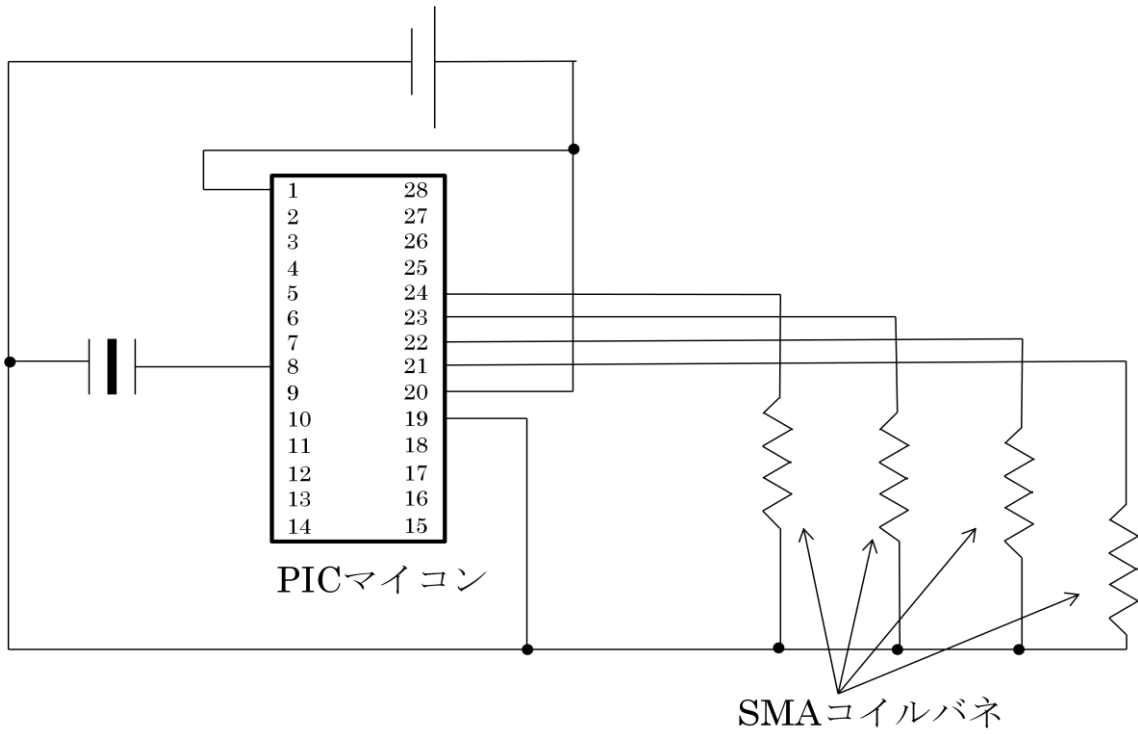


図 5-5 PIC マイコンを用いた電気回路図

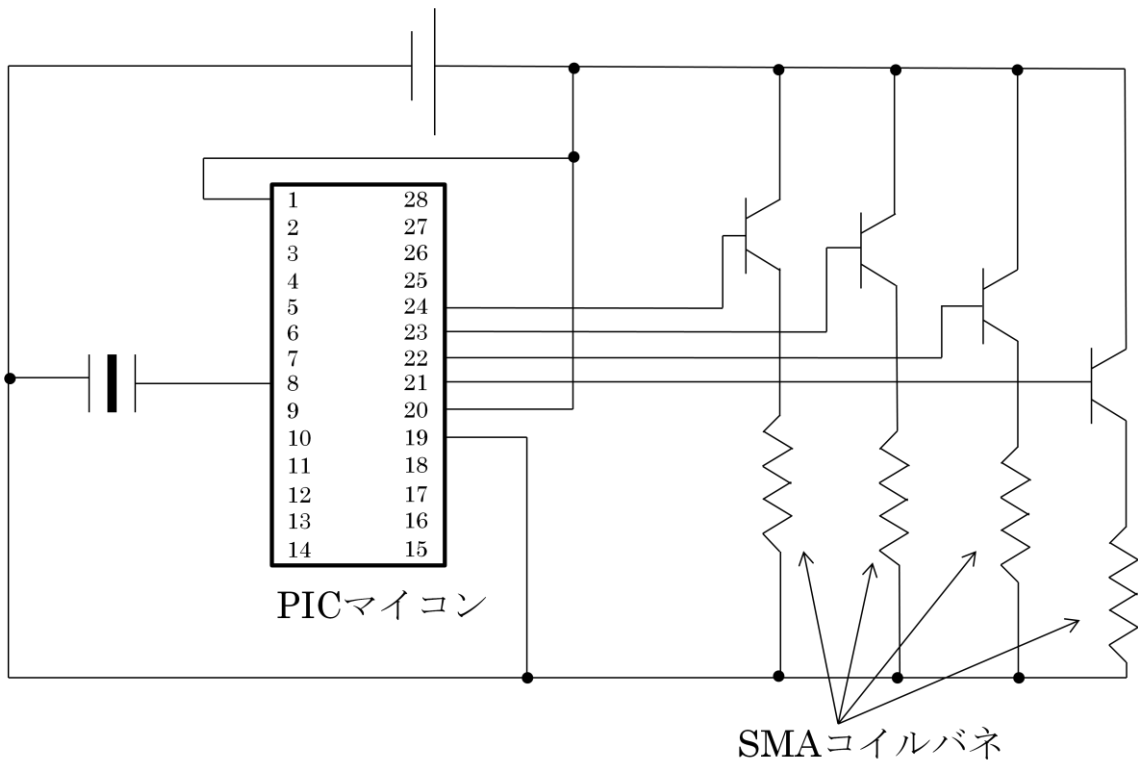


図 5-6 PIC マイコンと FET を用いた電気回路図

## 6. 実験結果および考察

図4-2に示したレシプロタイプ熱エンジンと図5-6に示した通電加熱システムを用いて、試作した熱エンジンの作動実験を行った。それぞれのコイルバネに与える電流の条件として、電流値 $I_1=1.0A$ 、電流保持時間=5secとした。

この条件で通電加熱を行った結果、意図したようにSMAコイルバネの収縮動作を発生させて、クランク機構を介した回転運動を実現できることを確信した。

通電加熱システムによってSMAコイルバネを加熱したところ、直流電源の上限電流を超えてしまって電流が発生させられなくなった。これは直流電源自体の上限電圧を上げてやればいいことだが、それとは別に、もう一度どの程度の電流で温度がこれ以上上がることができないのかを調べて、電流の大きさを調整していく必要がある。

レシプロタイプ熱エンジンは、SMAコイルバネの変形回復によって発生する応力が十分でなく、駆動部において往復運動から回転運動をうまく取り出せていなかったように思える。駆動部に関しては、クランク機構とSMAコイルバネを配置しなおして往復運動から回転運動を取り出せるようにする必要がある。SMAコイルバネは、もう一度形状記憶熱処理しなおした新しいものに変えて動かしてみたり、軸径や巻き数によっても変形回復応力は変わるので、SMAコイルバネ自体の寸法を変えて実験する。

今回の実験では、加熱システムを構築することができたが、冷却システムを構築することができなかった。なので、冷却システムに関しても考慮していく必要がある。

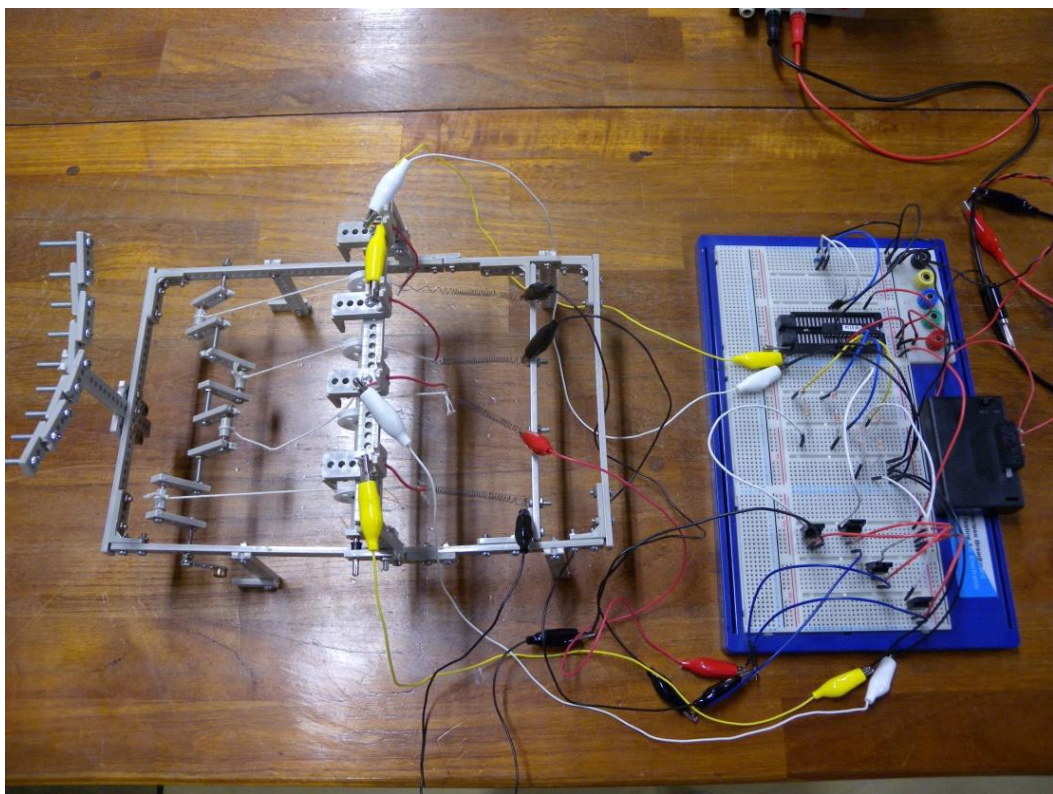


図 6-1 熱エンジン完成図

## 8. 結言

今回の熱エンジン作製において、通電加熱システムは加熱方法としては非常に使いやすく、制御しやすい方法だと言える。しかし、冷却に関しては今のところ自然冷却を用いたが、加熱時間を短くすると自然冷却では冷却速度が追いつかないので、エアースプレーなどを用いて冷却速度を速くする必要がある。SMA コイルバネについては、変形回復応力の大きさは今の熱エンジンを動かすには問題ないといえる。しかし、今以上に大きな回転運動を取り出そうとすれば、0.3mm の SMA コイルバネでは変形回復応力の大きさが足らず、うまく回転させることは難しいと思われる。

## 9. 謝辞

株式会社八光電機の皆様には、熱実験コンテストに参加させていただいたことを心から御礼申し上げます。このコンテストで得た実験結果、または課題の研究をさらに深めていこうと思います。貴社のますますのご発展をお祈り申し上げます。