

種々の負荷条件下における
TiNi合金の二方向形状記憶特性に関する実験的研究

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

安 岡 賢 二

修士論文

種々の負荷条件下における
TiNi合金の二方向形状記憶特性に関する実験的研究



平成18年度

三重大学大学院 工学研究科 博士前期課程

機械工学専攻

生体システム工学研究室

安岡 賢二

目次

1 緒言	1
2 理論	3
2.1 マルテンサイト変態	3
2.1.1 格子変形	3
2.1.2 無拡散	5
2.1.3 晶癖面とバリエント	5
2.2 形状記憶効果と擬弾性	8
2.2.1 メカニズム	8
2.2.2 変形挙動	10
2.3 二方向形状記憶効果	12
2.4 二方向形状記憶効果の複合材料モデル	16
3 試験片, 実験装置および実験方法	20
3.1 試験片	20
3.2 燃焼合成法	21
3.2.1 燃焼合成法の原理	21
3.2.2 TiNi 金属間化合物の製造技術	21
3.3 グリップ治具	23
3.4 形状記憶処理	25
3.5 実験方法・実験装置	26
3.5.1 ひずみの測定方法	26
3.5.2 二方向形状記憶挙動観察	30
3.5.3 ひずみゲージの温度変化による”みかけひずみ”の校正	33
3.5.4 力学的負荷トレーニング	35
3.5.5 応力の算出	37
3.5.6 相当応力・相当ひずみ	37
4 実験結果および考察	39
4.1 トレーニングを受ける前の二方向形状記憶効果	39
4.2 トレーニング 1 “バージンの試験片への単純負荷トレーニング”	46
4.2.1 トレーニング 1 “単純引張トレーニング”	46
4.2.2 トレーニング 1 “単純ねじりトレーニング”	52
4.3 トレーニング 2 “バージンでない試験片への単純負荷トレーニング”	60
4.3.1 トレーニング 2 “組み合わせ負荷；引張－ねじり”	61
4.3.2 トレーニング 2 “組み合わせ負荷；ねじり－引張”	66
5 結言	75
謝辞	76
参考文献	77

1. 緒言

今日、形状記憶合金は、知的材料システムあるいはスマート構造物の基盤要素として最も期待されている材料の一つである⁽¹⁻³⁾その理由として形状記憶合金は、形状記憶ポリマー・圧電材料およびセラミックス等の他のスマートマテリアルと比較して材料の強度が高く、材料自身から得られる駆動・回復応力は数百 MPa と大きい、また周辺環境からの応力や温度変化を感知するセンサ機能を有していることがいえる。その形状記憶合金の応用例として、締結要素、ばね、ロボットアーム、エアコンの風向調整フラップ、炊飯器の圧力調整装置などが挙げられ、さらには整形外科や歯科の医療器具など多岐にわたって応用されている。

形状記憶合金の種類としては、これまでに多くの合金系に形状記憶特性が見いだされてきたが、今日実用化されている形状記憶合金は TiNi 系合金の一種類しかない⁽⁴⁻⁶⁾。その理由として、他種の形状記憶合金は実用化において、それぞれ問題となる欠点を有しているのに対し、TiNi 系合金は優れた形状記憶特性を有するのみならず、延性、靱性、耐疲労性、耐食性、耐磨耗性、生体適合性などの特性も実用に耐えうることが挙げられている。また、形状記憶合金の単位体積当たりの仕事は、 piezo 素子や電磁気力などの他のアクチュエータ素子と比較すると 100 倍程度と大きいため、TiNi 系合金はマイクロマシンのマイクロアクチュエータに適しており、開発が進められている。これらのことから、TiNi 系合金の工業的応用はこれからもますます多くなると考えられる。

ここで、形状記憶合金の特性の一つに、本研究で取り上げた二方向形状記憶効果⁽¹⁰⁾がある。これは、一般的な形状記憶効果（一方向形状記憶効果）が、高温のオーステナイト相の形状のみ記憶していることに対し、二方向形状記憶効果は高温のオーステナイト相と低温のマルテンサイト相の二つの形状をそれぞれ記憶し、低温相と高温相のそれぞれの形状に可逆的に変化する現象である。これまでアクチュエータを設計する際には、低温での形状制御に外力が必要不可欠であったが、二方向形状記憶効果は材料自身が温度変化に応じて形状を変化させるので、外力を与える必要がなくなる。このことより、より複雑で小型のセンサやアクチュエータを可能にすることができると考えられる。このような二方向形状記憶効果は形状記憶合金にトレーニングと呼ばれる熱・力学的負荷を与えることによって発現することが確認されており、現在様々なトレーニング方法が提案されている。このトレーニングによって、形状記憶合金内部に内部応力場を形成することにより、低温におけるマルテンサイト相での形状の制御を材料自身が行い、二方向形状記憶効果が発現すると考えられている。しかしながら、二方向形状記憶効果の研究についての報告は現段階では少なく、二方向形状記憶効果のメカニズムは解明されているとは言えない。二方向形状記憶効果を利用したセンサ、アクチュエータの実用化に向けて、このメカニズムを把握することは極めて重要であると考えられる。

以上のような背景から、本研究では、二方向形状記憶効果による三次元運動を行うアク

チューエータを最終的な目標と定め、これまで報告されてきた二方向効果の多くが一自由度であるのに対して、ここでは二自由度を持った二方向効果を提案し、さらなる知的材料としての可能性を探った。現在、唯一実用化の進んでいる TiNi 形状記憶合金に着目し、実験には、燃焼合成法によって作製された薄肉円管試験片を用いた。この試験片に種々の単純負荷トレーニングを与え、負荷前後での二方向挙動を観察することにより、それが二方向挙動に与える影響について、さらには組み合わせトレーニングを与えることでトレーニングの履歴が二方向挙動に与える影響についても実験的に検証した。

2. 理論

2.1 マルテンサイト変態 ^(11,20)

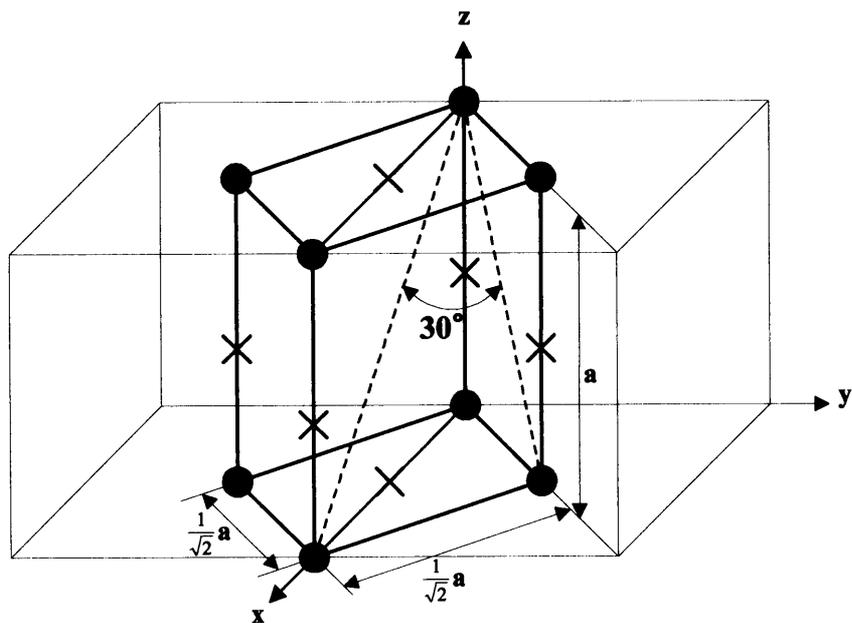
形状記憶合金において、応力による見かけの塑性変形が変形前の形状に戻る現象を形状記憶効果と呼び、そのメカニズムは、マルテンサイト変態およびその逆変態と呼ばれる原子無拡散格子変形である。この原子無拡散格子変形は、母相内にある原子が集団的に連携を保ちながらマルテンサイト相に格子変態する変形である。このようなマルテンサイト格子変形では、母相内とマルテンサイト相内の格子点との間に 1 対 1 の対応関係がある。これを格子対応といい、母相が規格格子対応を形成しているときはその対応格子から得られるマルテンサイト相も特定の規格格子を形成する。さらに形状記憶効果を示すには、マルテンサイト変態が起こるときに母相とマルテンサイト相の界面を無理なひずみを作らずに結合させる必要があるが、鉄などの場合には多量の転移が導入され塑性変形の原因になる。形状記憶合金では一般的に転移の代わりに双晶が導入される。双晶はマルテンサイト逆変態において完全に消滅するので形状は完全に回復する。すなわち形状記憶合金の必要条件は、原子無拡散相変態と双晶による母相との整合である。以下にマルテンサイト変態の諸性質と形状回復について述べる。

2.1.1 格子変形

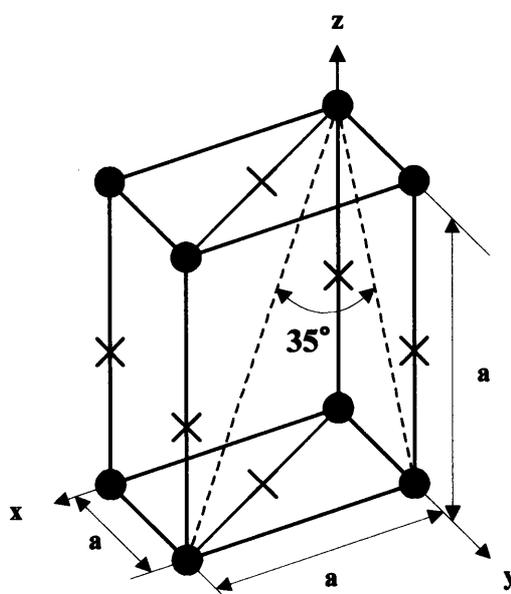
マルテンサイト変態が起こると、結晶構造が変わるため格子が変形する。図 2.1 の (a) と (b) にはそれぞれ γ 相 (母相) と α' 相 (マルテンサイト相) の結晶構造を示す。(a) には母相の面心立方格子 (f.c.c 格子) の単位胞を 2 つ描いてあり、この 2 つの単位胞にまたがるように Z 軸周りに 45 度回転した体心立方格子を太い実線で示す。このとき正方晶の軸比 c/a は $\sqrt{2}$ である。マルテンサイト変態が起こると、これに対応する格子が変形して (b) のように軸比 c/a が $\sqrt{2}$ より小さい体心立方格子 (b.c.t 格子) を単位胞とするマルテンサイト相になる。このように見ると母相の格子とマルテンサイト相の格子は 1 対 1 に対応している。この場合の格子対応は、以下のようになっている。

$$\begin{aligned} [100]_{\alpha'} &= [\bar{1}\bar{1}0]_{\gamma} \\ [010]_{\alpha'} &= [110]_{\gamma} \\ [001]_{\alpha'} &= [001]_{\gamma} \end{aligned}$$

結晶の対称性を考慮すると、多くの場合上記のような格子対応の取り方は 6 通りか 12 通りある。



(a) 母相



(b) マルテンサイト相

図 2.1 母相からマルテンサイト相への格子対応

2.1.2 無拡散

母相とマルテンサイト相は前述のように格子が対応しているのであるが、変態後も対応する各原子は同一の原子である。これはマルテンサイト変態が無拡散で起こるためであり、お互いの隣接する原子同士は変態後も隣接関係を保つことを意味している。形状記憶合金の格子は一般的に規則構造をしているが、そのような例として図 2.2 には変態前後の 2 次元の模式図を示す。母相格子の規則性がマルテンサイト相にも引き継がれていることが分かる。

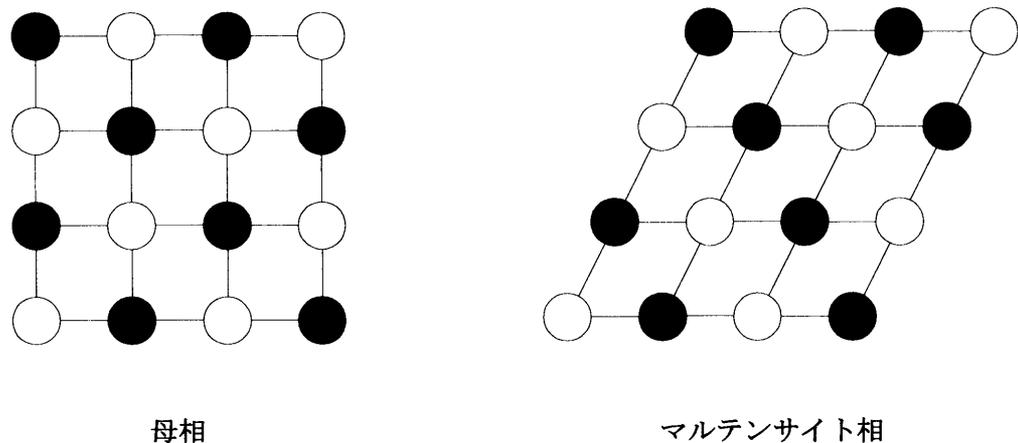


図 2.2 規格格子が無拡散相変態した時の変態前後の原子配列

2.1.3 晶癖面とバリエント

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。この界面は常に各合金に特有の結晶学的に等価な面からなっており、晶癖面と呼ばれている。この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界面の導入による双晶変形がある。図 2.3 にはマルテンサイト変態した領域の形状変化と周囲の未変態領域との境界の様子を模式的に示している。(a)は全領域が未変態の母相を示している。中央部が変態すると(b1)のように1つの格子対応を持つマルテンサイト相が形成され、格子変形に伴う形状変化が起こる。しかし、このような形状変化が母相中に起こると、(c1)のように周囲の母相との界面で、重なり部や開き部ができることになり晶癖面が存在しない。

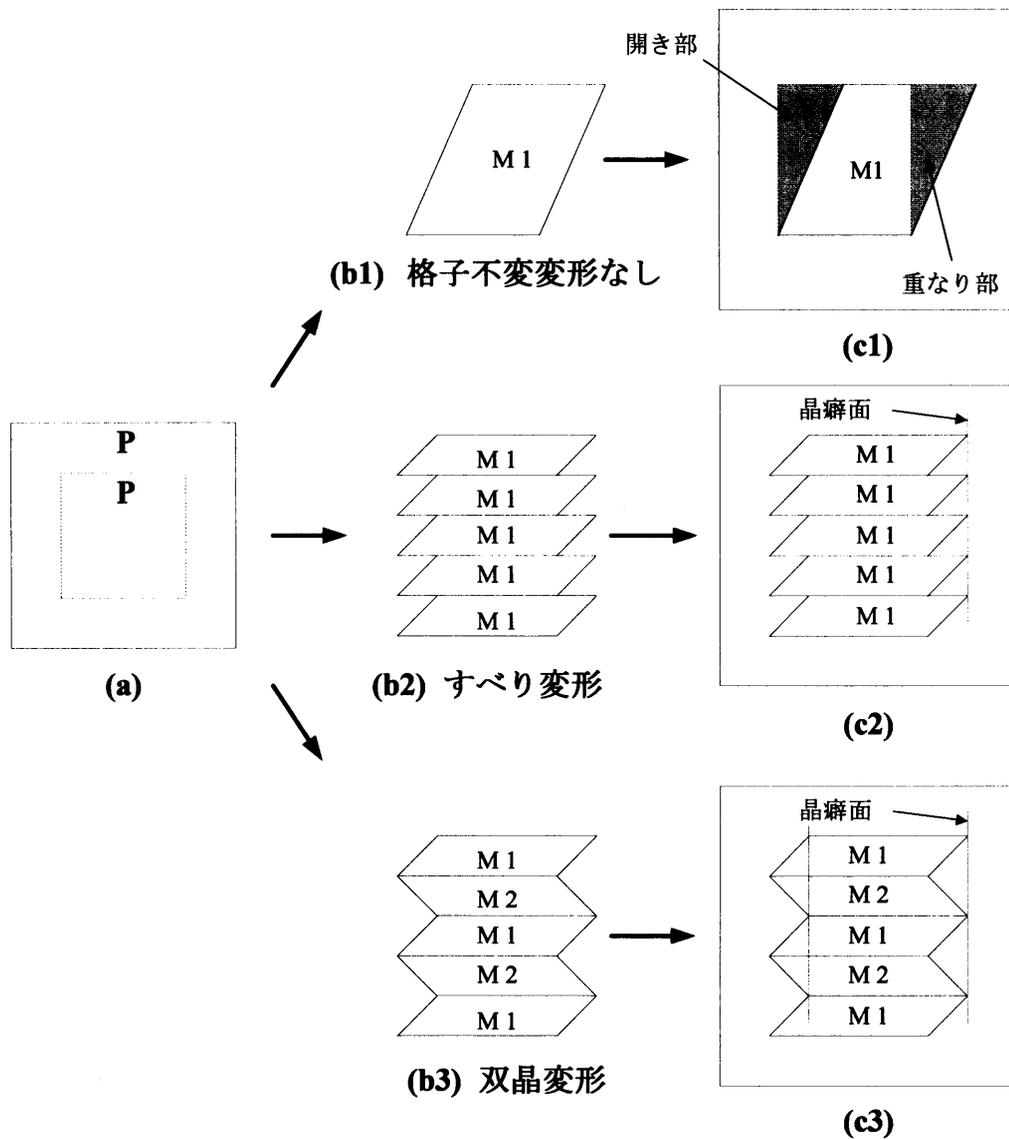
晶癖面を作るための格子変形としてすべりを導入すると、(b2)のようにマルテンサイト相がすべ

り変形をする。その結果、変態領域の形状はすべりの間隔が十分に小さければマクロ的には(c2)に示すように周囲の母相とうまく整合し、無ひずみの晶癖面が形成される。

別タイプの格子不変変形として双晶変形が導入されると、(b3)のように M1 のマルテンサイト相と双晶関係を持つマルテンサイト相(M2)が形成される。M2 は母相に対して M1 とは異なる格子変形を持つため異なる形状変化を示すが、結晶構造は M1 と変わらず同じである。双晶界面間の間隔が十分小さければ(c3)に示すように周囲の母相と整合し、無ひずみの面(晶癖面)で接合できる。

鋼など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て加工硬化する。このことがマルテンサイト変態によって材料が硬くなる1つの理由である。しかしこのことは、鉄鋼材料において形状記憶効果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って行われるので、逆変態とともに双晶も消え去り形状記憶効果が出現することになる。

以上のようにマルテンサイト変態が起こるためには晶癖面の形成が必要であり、その結果マルテンサイト晶内部には転位や双晶が内部組織として存在する。そのような状態でマルテンサイト晶は1つの単位として扱われる。形状記憶合金の場合にはこの1つの単位は、図 2.3(b3)の形態のように異なる格子対応を持つ2種類のマルテンサイト晶を組み合わせで作られ、兄弟晶(バリエーション)と呼ばれる。一般的にはこのような兄弟晶は24通りあり、それぞれに対応した結晶学的に等価な24通りの晶癖面がある。



P ; 母相
M1, M2 ; それぞれ母相に対して異なる格子対応を持つマルテンサイト相

図 2.3 変態に伴う形状変化と格子不変形

2.2 形状記憶効果と擬弾性 ^(12, 21-23)

2.2.1 メカニズム

形状記憶効果と擬弾性のメカニズムを図 2.4 に示し、二次元の結晶モデルによって説明する。(a)は形状記憶合金の母相を表している。また記号 M_f はマルテンサイト終了温度、 A_f はオーステナイト終了温度を示す。形状記憶合金を M_f 点以下の温度に冷却すると、母相は (b) のようにマルテンサイト相の結晶構造に変わる。実際には、24 種類の方位のマルテンサイト兄弟晶が形成される。兄弟晶とは結晶構造は同じで、結晶方向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生成されている。マルテンサイト晶の生成に伴って外形変化を生じるが、一般的にそれら個々のマルテンサイト晶は小さいので、24 種類の方位のマルテンサイト晶の生成に伴う外形変化が平均化されて、巨視的には母相の形状とほとんど同じである。ここで外力を加えると、A と B の境界は低応力で簡単に移動するために (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。さらに A_f 点以上の温度まで加熱すると、母相への逆変態が起きて (a) のように母相もとの形状に戻る。これが形状記憶効果である。

マルテンサイト変態は、一般に変態温度以下に冷却して生じるものであるが、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。それはマルテンサイト変態がせん断力によっても引き起こされるために外力が変態を助けるからである。そこで A_f 点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巨視的にせん断ひずみを生じる。逆変態以上の温度ではマルテンサイト相はエネルギー的に不安定なため、外力を除くだけでも (c) から (a) の母相へ逆変態し形状は元に戻る。これが擬弾性(超弾性)である。

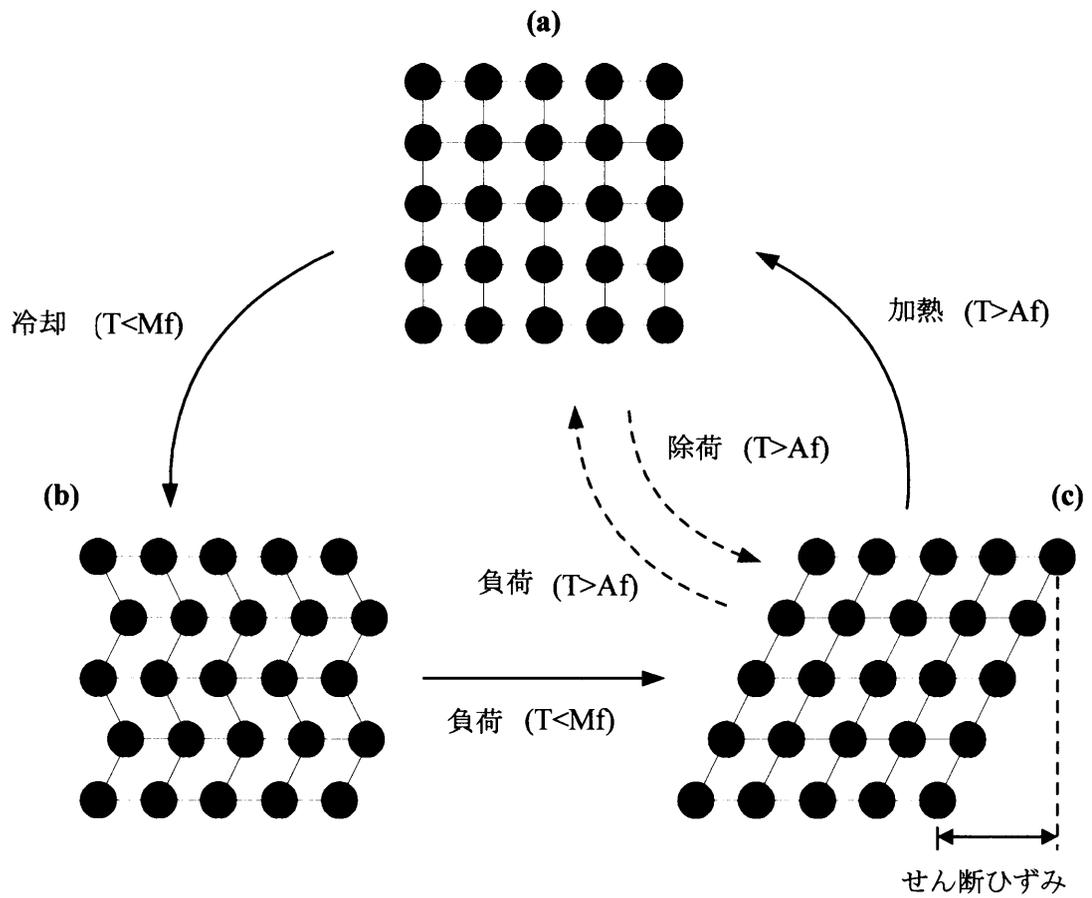


図 2.4 形状記憶効果と擬弾性を示すときの原子の移動と形状変化

2.2.2 変形挙動

マルテンサイト変態が変形様式となる場合の変形挙動について説明する。図 2.5 に各温度で変形したときに得られる応力-ひずみ曲線を示す。実験温度を T で表し、 M_s , M_f , A_s , A_f はそれぞれ、マルテンサイト変態開始温度、マルテンサイト変態終了温度、オーステナイト変態開始温度、オーステナイト変態終了温度を表す。 $T < M_s$ の範囲では、主として熱的に形成された多くのマルテンサイト兄弟晶が外力に対して優先方位となる兄弟晶へと再配列することにより変形が進行する。この場合は(a)のように外力を除いても形状は元に戻らず、 A_f 点以上の温度に加熱して初めて破線で示すように形状回復を行う。 $M_s < T < A_s$ の温度範囲では外力によりマルテンサイト晶が誘起されるが、この場合も除荷だけでは逆変態しないため(b)のように(a)と同じ形になる。 $A_s < T < A_f$ の温度範囲では応力誘起したマルテンサイト相の一部は除荷により逆変態し残りは残留するために、(c)のように擬弾性と形状記憶効果が共存する。 $A_f < T$ の温度範囲では(d)のような完全な擬弾性が現れる。 T が M_s 点以上の温度ではマルテンサイト相が応力誘起するが、マルテンサイト誘起応力 σ_M は T があがると直線的に増加する。このため T が上昇すると ($T_s < T$)、 σ_M がすべり臨界応力 σ_s より高くなることがある。この場合には(e)のように永久変形を示し、加熱しても形状記憶合金回復が起こらなくなる。これらのことを図 2.6 に応力-温度関係図で表す。図中の記号 a~e は図 2.5 の (a)~(e) と対応している。すなわち、図は形状記憶効果、変態擬弾性および結晶のすべり変形のための相互関係を示しており、すべりの臨界応力 σ_s が仮に σ_s' のように低ければ形状記憶効果や擬弾性は起こり得ないことが分かる。

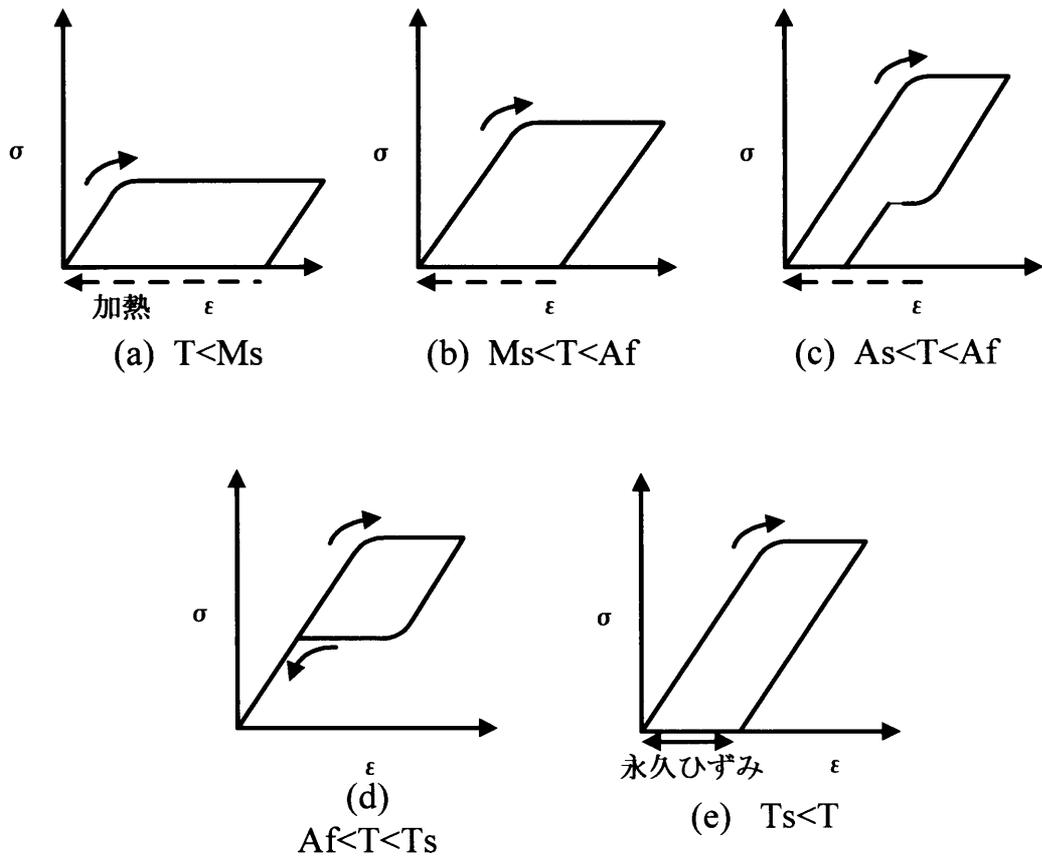


図 2.5 各変態温度での応力ひずみ曲線

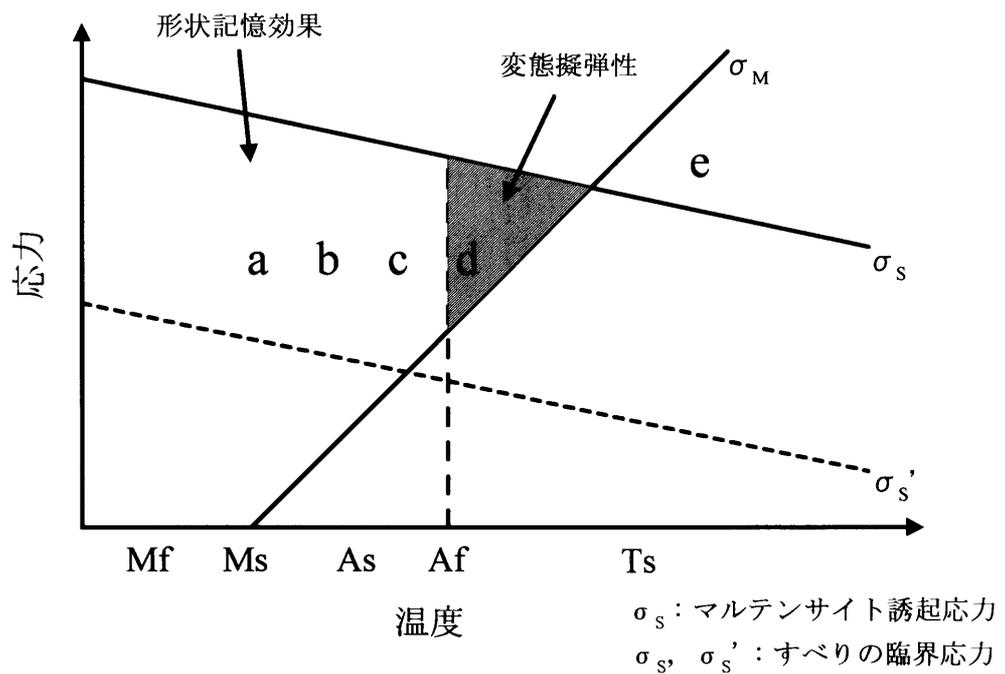


図 2.6 応力-温度関係図

2.3 二方向形状記憶効果 (23-33)

一般的な形状記憶効果は、前節において述べたとおり、低温のマルテンサイトの状態で与えたみかけの永久変形が、加熱による逆変態で高温のオーステナイトの状態記憶された形状に戻るものであった。これは、加熱による逆変態後、再び冷却し、マルテンサイトの状態にしても形状変化を伴わない 1 方向形状記憶効果である(図 2.7, 形状 M(マルテンサイト)⇒変形⇒形状 M' (変形を受けたマルテンサイト)⇒加熱⇒形状 A(オーステナイト;記憶された形状)⇒冷却⇒形状 M)。これに対し、二方向形状記憶効果は、加熱後の再冷却に際しても形状変化を伴い、高温のオーステナイトでの形状と低温のマルテンサイトでの形状の間を記憶している(図 2.7, 形状 M' (低温形状)⇔形状 A(高温形状))。二方向形状記憶効果は、可逆形状記憶効果や、変形量の特に多いものを全方向形状記憶効果と呼ばれることもある。図 2.8 に現在提唱されている主な二方向形状記憶効果の応用例を示す。

ところで、現在、形状記憶合金を利用したアクチュエータは、外力を用いるのが一般的である⁽³⁴⁻³⁵⁾。図 2.9 は最も一般的な形状記憶合金を用いたアクチュエータの例である。これは、長さ l_0 に記憶された(長さ l_0 の高温形状)形状記憶合金バネを、バイアスバネによって圧縮した状態で系に組み込まれた形である。これを加熱すると、形状記憶合金バネは、 A_s 温度から A_f 温度までの形状回復機能(一方向形状記憶効果)によって、ピストンを介してバイアスバネを右へ動かす。そして冷却過程では、マルテンサイト変態に伴って、変形されやすい状態になり、バイアスバネによって形状記憶合金バネは圧縮され、結果としてピストンは左へ動く。この様に、加熱・冷却を繰り返すことで、系はアクチュエータとして作用するが、冷却時の形状制御を外力に頼ることがこのアクチュエータの特徴である。しかし、外力に頼ることは、その構造上の問題から、単純な伸び縮み、ねじれ運動、たわみなどの 1 自由度の動作しか取り出すことができない原因となる。これに対し、図 2.8 (b) (C)にあるように、二方向形状記憶効果を利用するアクチュエータは、外力は不必要となる。そればかりではなく、自発的な二方向動作を利用して、複雑な多自由度の動作を取り出すことも可能である。

ところで、形状記憶合金に二方向形状記憶特性を与えるにあたっては、以下のような方法が考案されている。

- (1) マルテンサイト相に限界以上の変形を与える。
- (2) 応力誘起マルテンサイト変態で変形しえる以上の変形をオーステナイト相に与える。
- (3) オーステナイト相で変形してこれを拘束下で M_f 温度以下に冷却し、応力下で長時間保持する。
- (4) マルテンサイト相で変形しこれを拘束下で加熱し、逆変態させる。
- (5) 母相に微細な析出物を生じさせた後変形する。

これらの方法を総称して、トレーニングと呼ばれる。いずれのトレーニングも本来均一であるはずのオーステナイト相に、内部応力場を何らかの方法で導入し、冷却によって誘起されるマルテンサイト変態を制御するものである。すなわち、図 2.9 で示したバイアスバネ(外力)を材料内部に組

み込んでしまうものである。ここで、(1)から(3)の方法による内部応力場発生の原因は、変形の原因となる転位などの不可逆欠陥であり、(4)、(5)では、加熱によっても逆変態しない残留マルテンサイトや析出物であると考えられる。また、図 2.10 示すように、トレーニングには、上述(1)～(5)以外にも、熱・力学的サイクルを考慮した様々なものが考えられる。たとえば、応力一定での温度サイクル(C⇔D)などであり、目的に応じた、最も効果的なトレーニング法を用いる必要がある。

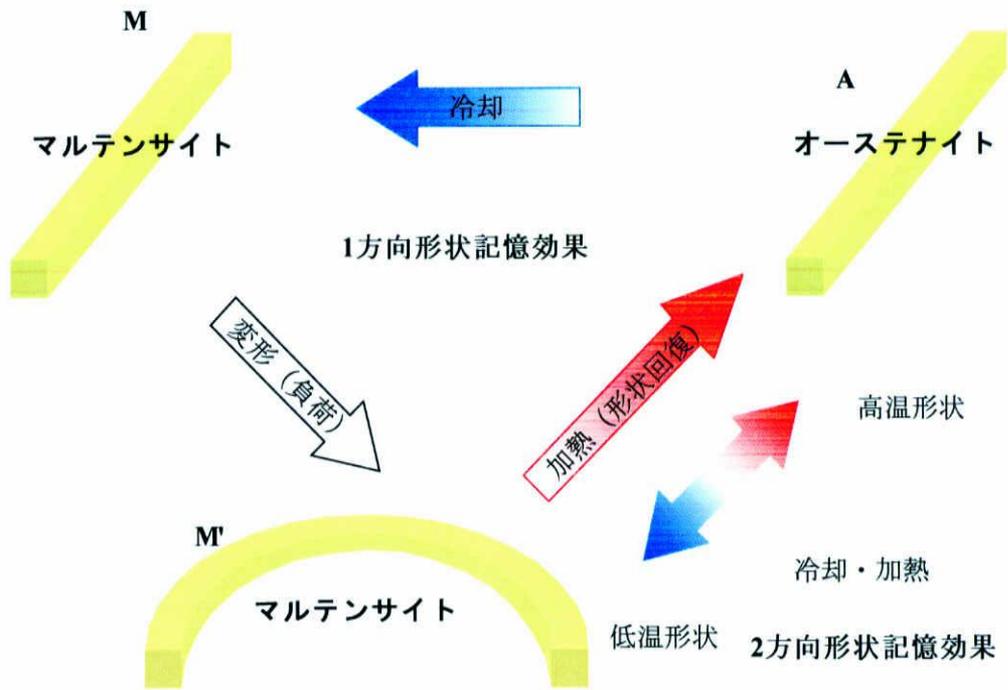


図2.7 1方向および2方向形状記憶効果の模式図

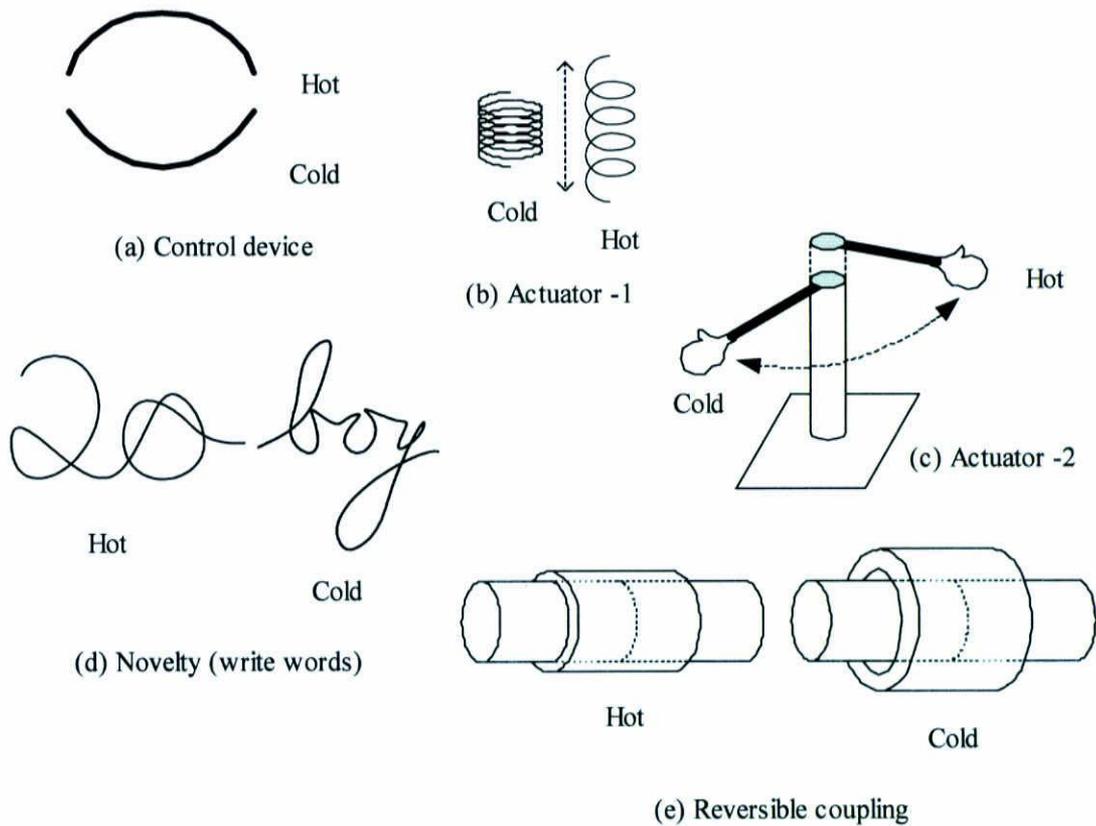


図2.8 2方向形状記憶効果の応用例

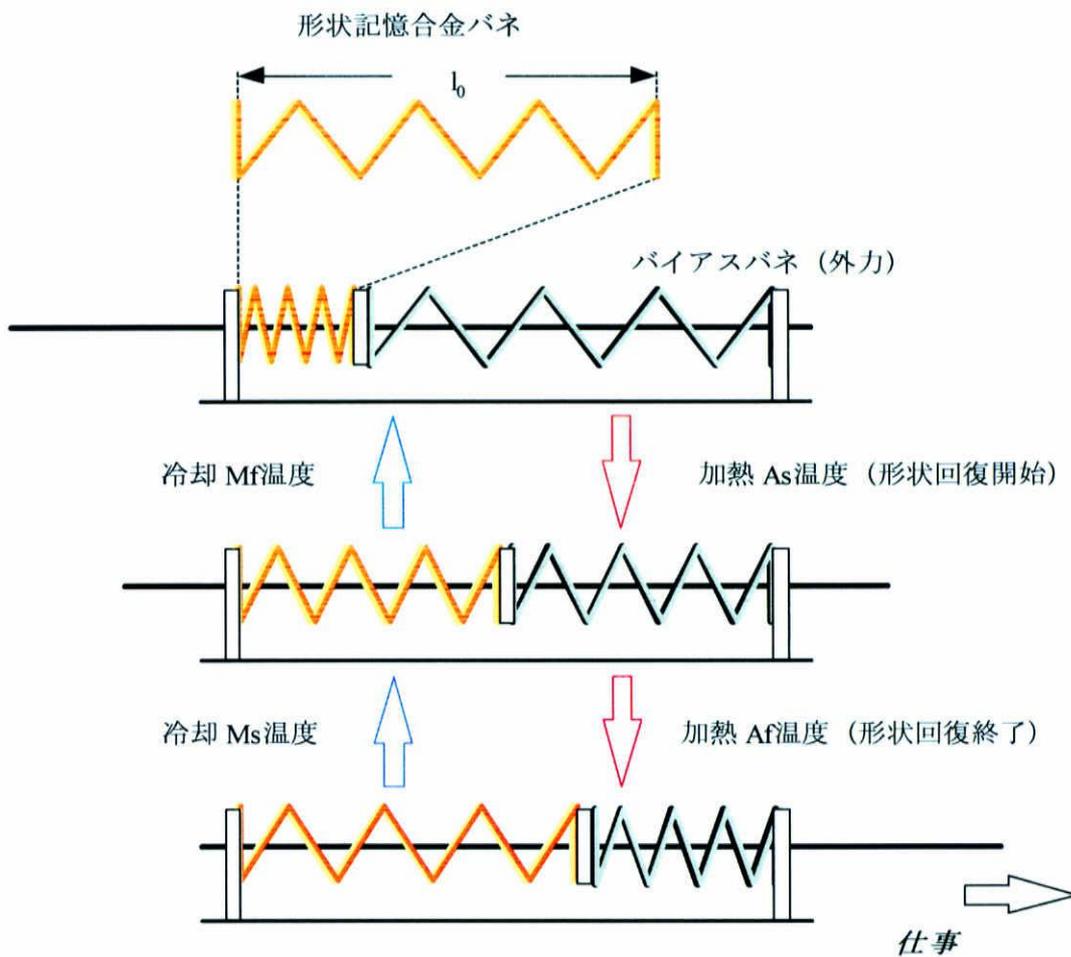


図2.9 外力を利用した形状記憶合金アクチュエータの例

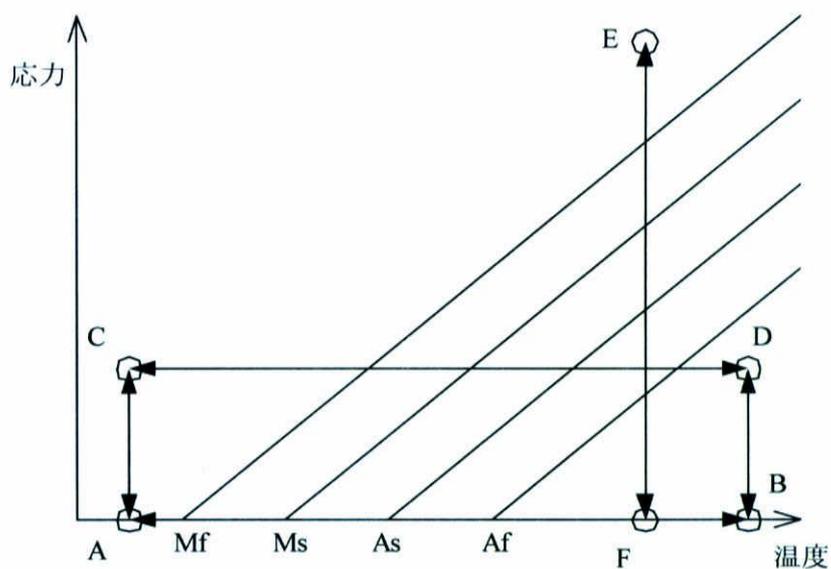


図2.10 変態応力-温度線図とトレーニング法

2.4 二方向形状記憶効果の複合材料モデル

二方向形状記憶効果を発現させる主な原因が材料内部の内部応力場であることを前節にて説明した。ここでは、本研究で用いた Af 温度以上での繰り返し力学的負荷が、形状記憶合金に内部応力場を与え、二方向形状記憶効果のためのトレーニングとなることを、弾塑性 - 擬弾性の複合材料モデルを使って説明する。

本研究で用いた形状記憶合金は、多結晶体であり、本来不均質な材料である。そこで、材料の不均一を、図 2.11 (a) のようにモデル化する。さらに、A-B 断面を局部的にみれば、図 2.11 (b) のようにモデル化することができる。図 2.12 (a) は、図 2.11 (b) をもとに、降伏応力 Y_1 から Y_6 の弾塑性材料①から⑥によって構成された材料であり、体積分率はそれぞれ 1:1 である。このモデルをひずみ一定で軸方向に引張った時の応力 - ひずみ関係が、図 2.12 (b) である。ひずみが ϵ_1 までは、どの材料も弾性を示すが、 ϵ_1 を超えると、材料①は降伏応力 Y_1 に達し、塑性変形を始める。さらに、ひずみが ϵ_2 に達すると材料②が塑性変形を開始し、以降材料③から⑥が順に塑性変形する。したがって、全体の応力 - ひずみ関係は太線で示す関係をたどる。このモデルは、金属における加工硬化のメカニズムをよく表している。

このモデルを形状記憶合金に適用したものが、図 2.13 である。これは、(a) のように、弾塑性材料と擬弾性材料を 1:1 の割合でモデル化したもので、それぞれの応力 - ひずみ関係は、(b) の破線黒と破線赤で示すように仮定した。同様に、ひずみ一定で変形を与えると、マルテンサイト変態開始応力 σ_M に達すると擬弾性材料はマルテンサイト変態を開始する。一方、弾塑性材料は σ_Y に達すると降伏し、塑性変形を開始する。したがって、変形時の全体の変形挙動は、図 2.12 (b) の弾塑性モデルと同じ挙動である (太線 a-b-c-d)。除荷時には、擬弾性材料は σ_A で逆変態を開始し、弾塑性材料は、弾性を示すので、全体の挙動は太線 d-e-f となる。その後の再負荷では、f-g-d をたどる。このことから、このモデルでは、1 回目の負荷 - 除荷で大きな塑性ひずみを生じ、その後の再負荷では安定した応力 - ひずみ関係を示すことが分かる。これは、本研究で用いた形状記憶合金のトレーニング時の特性に良く一致している。

ところで、除荷後の全体として応力 0 状態では、擬弾性材料には引張りの応力が加わっていること分かる。そのとき、弾塑性材料には同じだけの圧縮応力が働いており、全体として、打ち消しあっている。このように、このモデルを用いることで、力学トレーニングによって内部応力が発生し、引張ること、擬弾性材料には引張りの残留応力が生じたことになる。図 2.14 は、このようなモデルを用いて、与えるひずみを ϵ_1 から ϵ_4 まで変えた場合の残留応力の大きさを表したものである。それぞれの負荷に対して、 ϵ_1' から ϵ_4' までの残留ひずみが生じたことが分かる。この図から、生じた残留ひずみの大きさと内部応力の大きさには、 ϵ_3' にまで比例関係があり、それ以上の内部応力に対しては、一定の残留

応力 (PS_{PE3} , $PS_{PE4} = \sigma_A$) が働くことが分かる. このように, 複合材料における変態可能領域には引張りの残留応力場が形成され, 二方向形状記憶効果の発現メカニズムをこのモデルによって説明することができる.

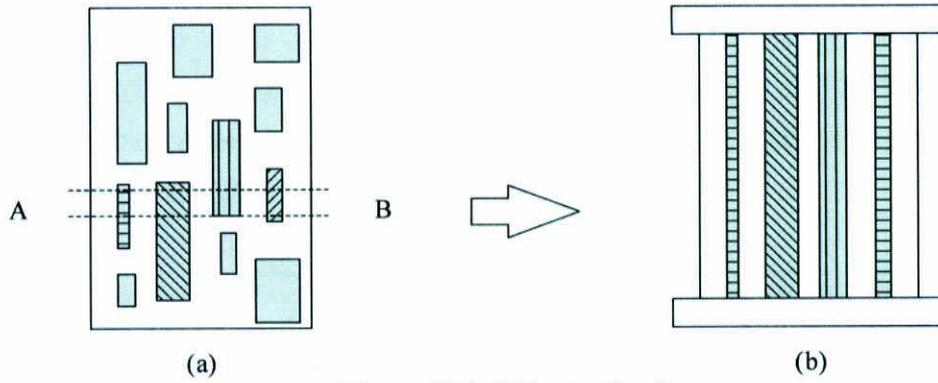


図2.11 複合材料のモデル化

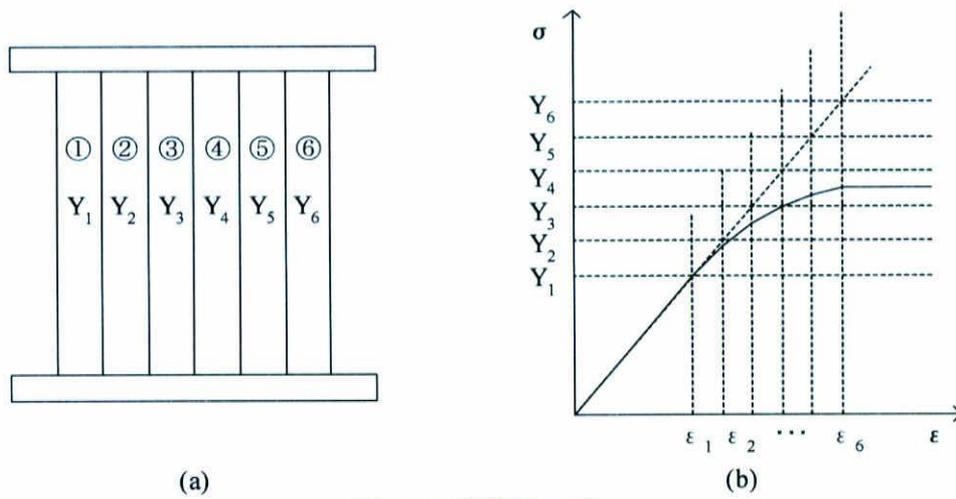


図2.12 弾塑性モデル

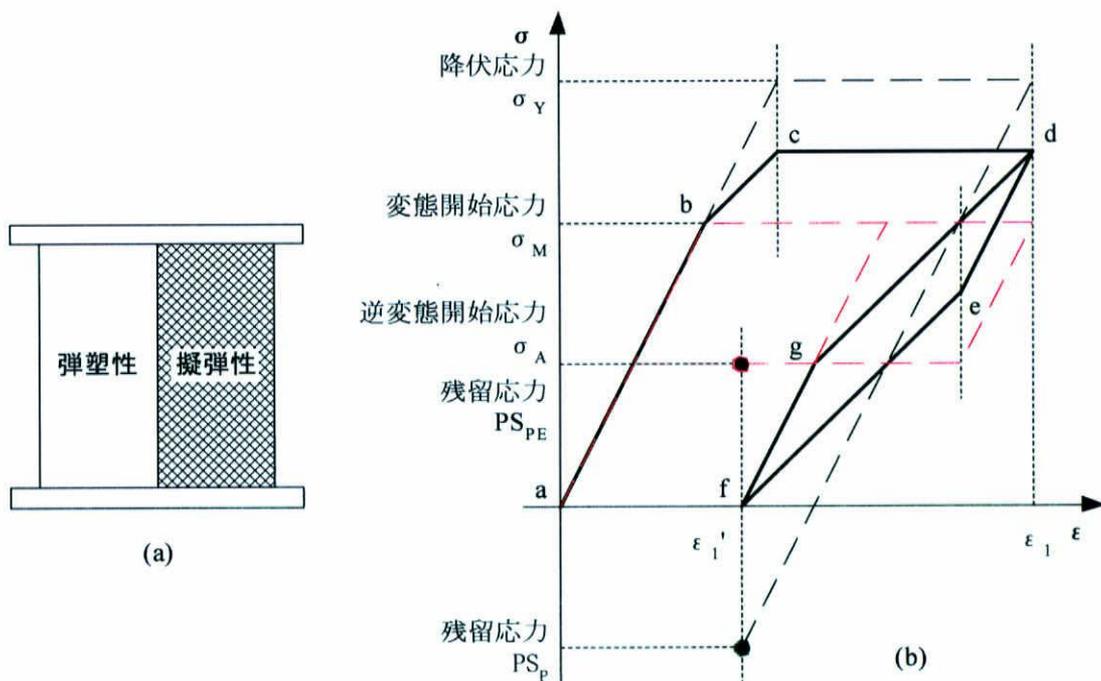


図2.13 形状記憶合金の擬弾性-弾塑性モデル

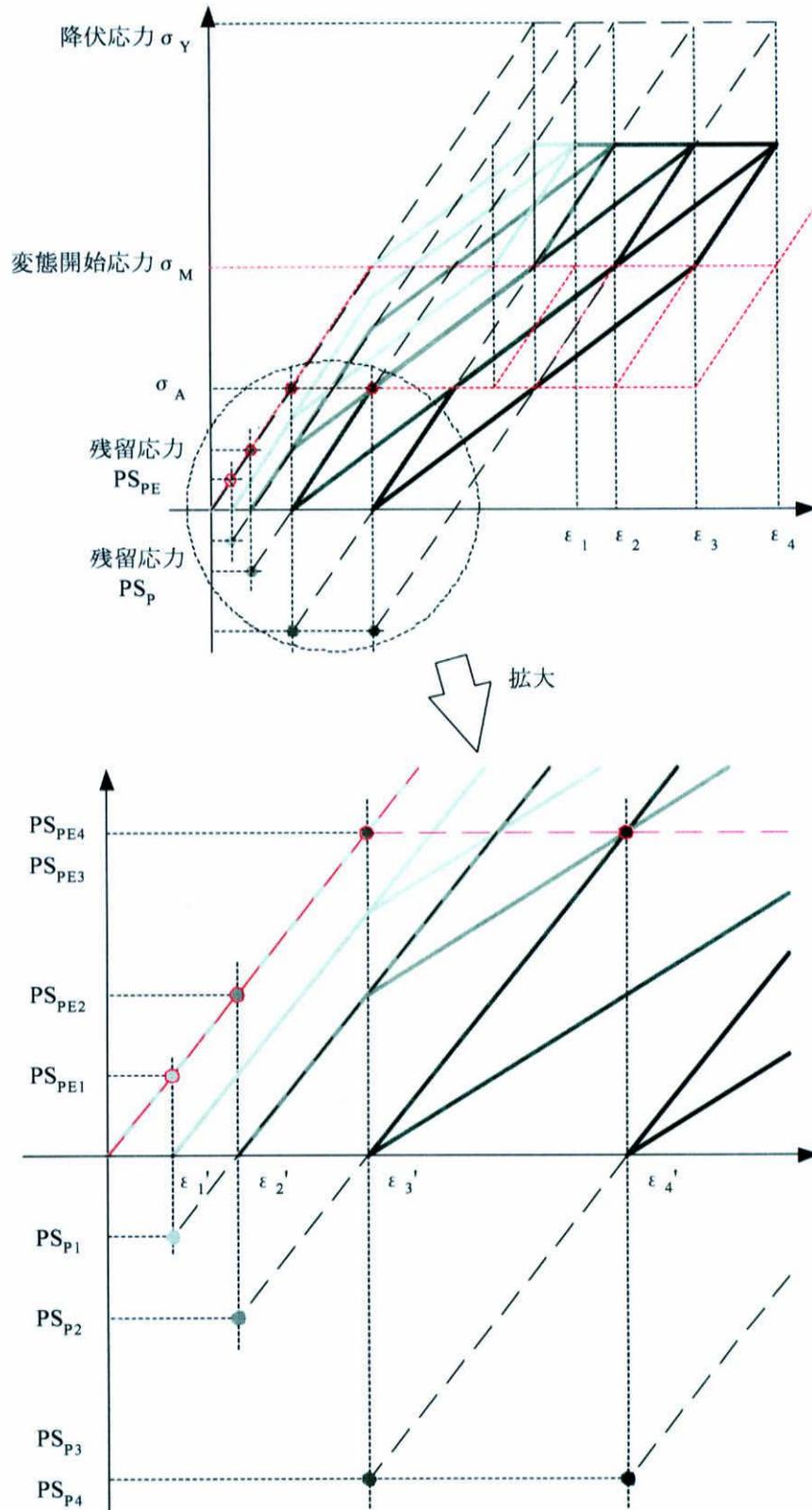


図2.14 形状記憶合金複合材料モデルと残留応力

3. 試験片，実験装置および実験方法

3.1 試験片

試料には，大同特殊鋼製の TiNi 形状記憶合金を用いた．大同特殊鋼が公表する組成および材料物性値を表 3.1 に示す．

表 3.1 材料物性表

組成	Ti-56.0wt %Ni	ヤング率	高温相 ; 63GPa
引張強度	1.0 GPa		低温相 ; 25GPa
伸び	20%	剛性率	高温相 ; 23GPa
線膨張率	10×10^{-6} 1/K		低温相 ; 9GPa

本研究で用いた試験片の形状を図 3.1 に示す．試験片形状は，外径 7mm 内径 5mm 壁厚 1mm 長さ 70mm の薄肉円筒状である．また，試験片は燃焼合成法によって作製された．

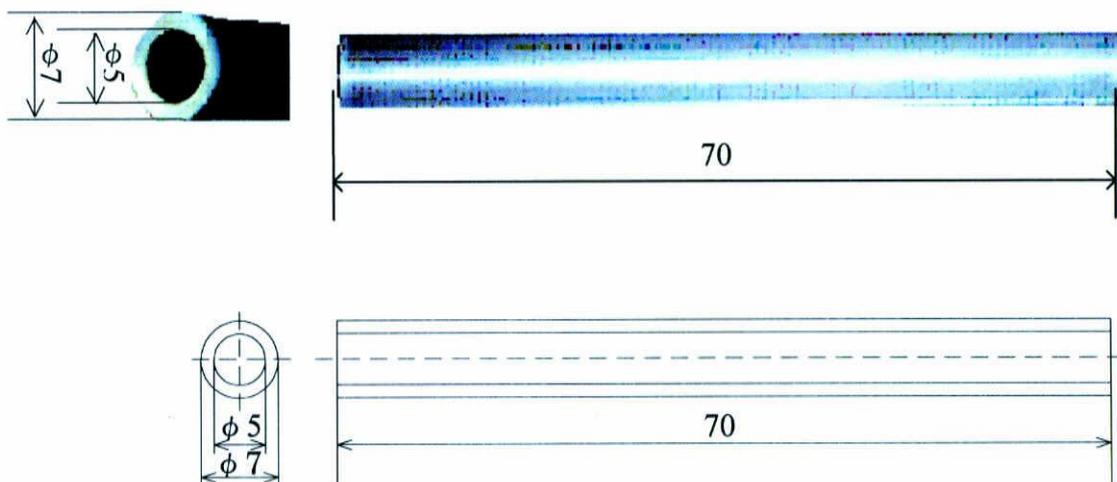


図 3.1 試験片形状 (mm)

3.2 燃焼合成法⁽¹⁴⁻¹⁵⁾

3.2.1 燃焼合成法の原理

燃焼合成法とは、2種類以上の物質の生成熱を利用して化合物を合成するものである。まず、元素の混合粉末の一端を強熱して点火する。点火点では化学反応が始まり生成熱を生じる。この生成熱は点火点の周囲を加熱し、その混合粉末の温度を着火点温度 T に到達させて化学反応を起こさせ、さらに生成熱を生じさせる。この生成熱がまたその周りの混合粉末を加熱する、という過程の連鎖反応によって、混合粉末全体に化学反応が伝播して、最終的に全体が化合物となる。

3.2.2 TiNi 金属間化合物の製造技術

TiNi の生成熱は、 67.78kJ/mol である。この値は大規模な生産プロセスでも、点火と発熱伝播の持続には十分であった。TiNi の形状記憶温度は Ni の含有量が 0.1% 変化しただけでも $10\sim 20^\circ\text{C}$ も変化する。従って、この材料を溶解鑄造等の従来の製造法によって作製する場合には、組成の制御と均質化が重要な因子となっている。しかしながら、Ti と Ni では、融点の差が大きいことや比重の差が大きいこと、重力偏析が起きやすく、正確な形状記憶温度を持つ均質な材料を得るのは困難である。

これらを解決するために開発させた燃焼合成法による TiNi 形状記憶金属間化合物の製造プロセスを図 3.2 に示す。まず、化学量論組成比付近の目的組成比になるように、Ti と Ni の原料粉末を乾燥状態で精密に混合する。燃焼合成反応装置を用いて、 10^{-4}Pa の真空中で燃焼合成によって原料混合粉末から化合物を合成する。

合成した Ti-Ni をステンレス鋼の容器に真空封じした後、HIP によって固化・焼結して、インゴットを製造する。HIP 処理前は相対密度が $50\%\sim 60\%$ で多孔質であるが、HIP 処理(温度 1000°C ，圧力 100MPa)することにより、相対密度を 100% にまで上げることが可能である。このインゴットとなった TiNi 金属間化合物を 1000°C で鍛造，押し出し，圧延などの熱間処理塑性加工をした後，直径が $8.0\text{mm}\sim 3\mu\text{m}$ 以下の各種直径線材や薄板に加工する。最終的に十数%の冷間加工を行った後，形状記憶性能を出すための形状記憶熱処理が行われる。

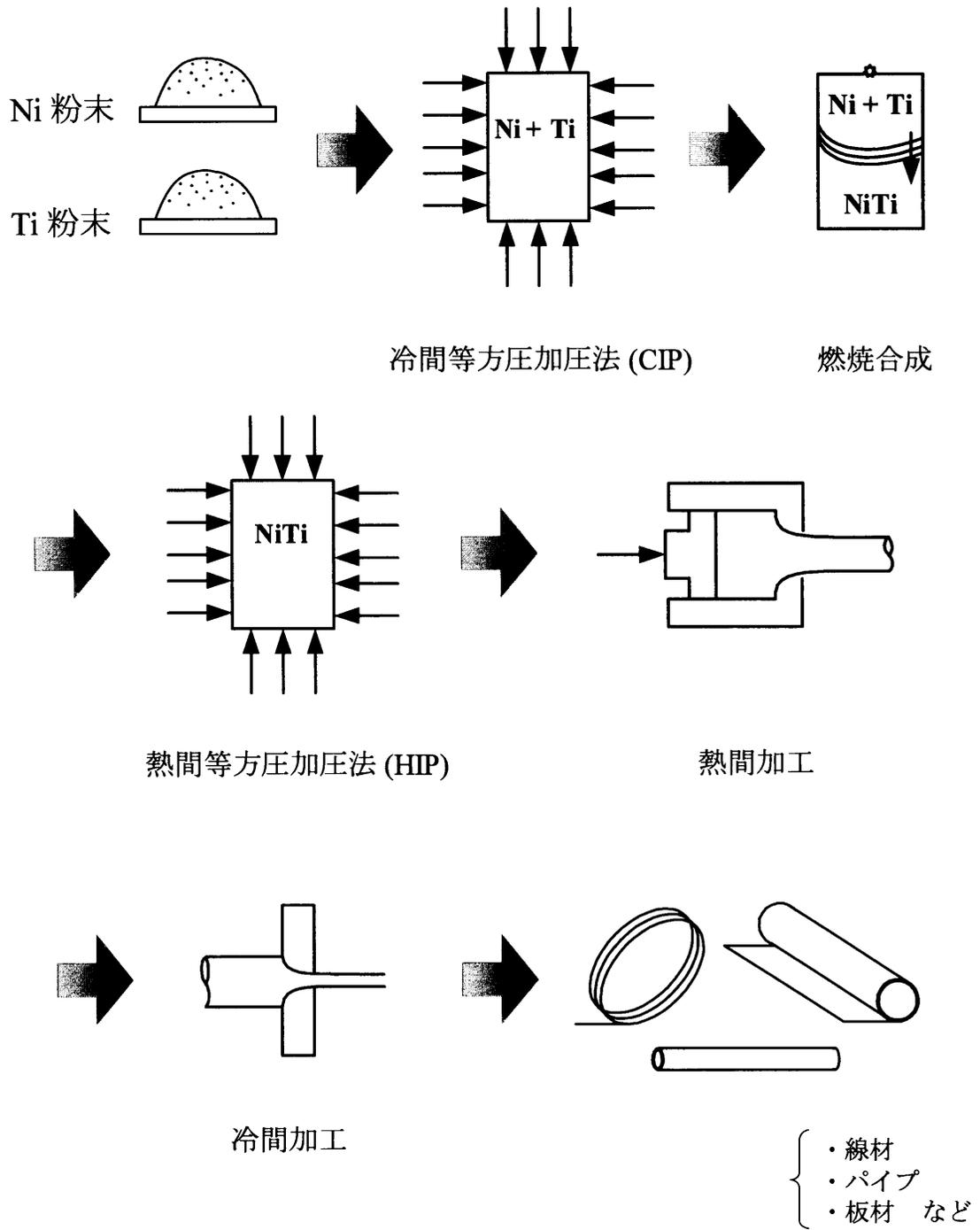


図 3.2 TiNi 金属間化合物の工業生産プロセス

3.3 グリップ冶具

TiNi 形状記憶合金は難加工性材であり, 試験機に取り付けるためのねじ切り加工が困難であるため, グリップ冶具を作製した. その模式図を図 3.3 に示す. 両つかみ部には, つかみによる潰れを防ぐため, 外径 $\phi 5$, 長さ 25mm の中実丸棒(SUS304)を試験片に挿入した. なお, つかみ部 25mm, 標点間距離を 30mm と定めた.

3. 試験片, 実験装置および実験方法

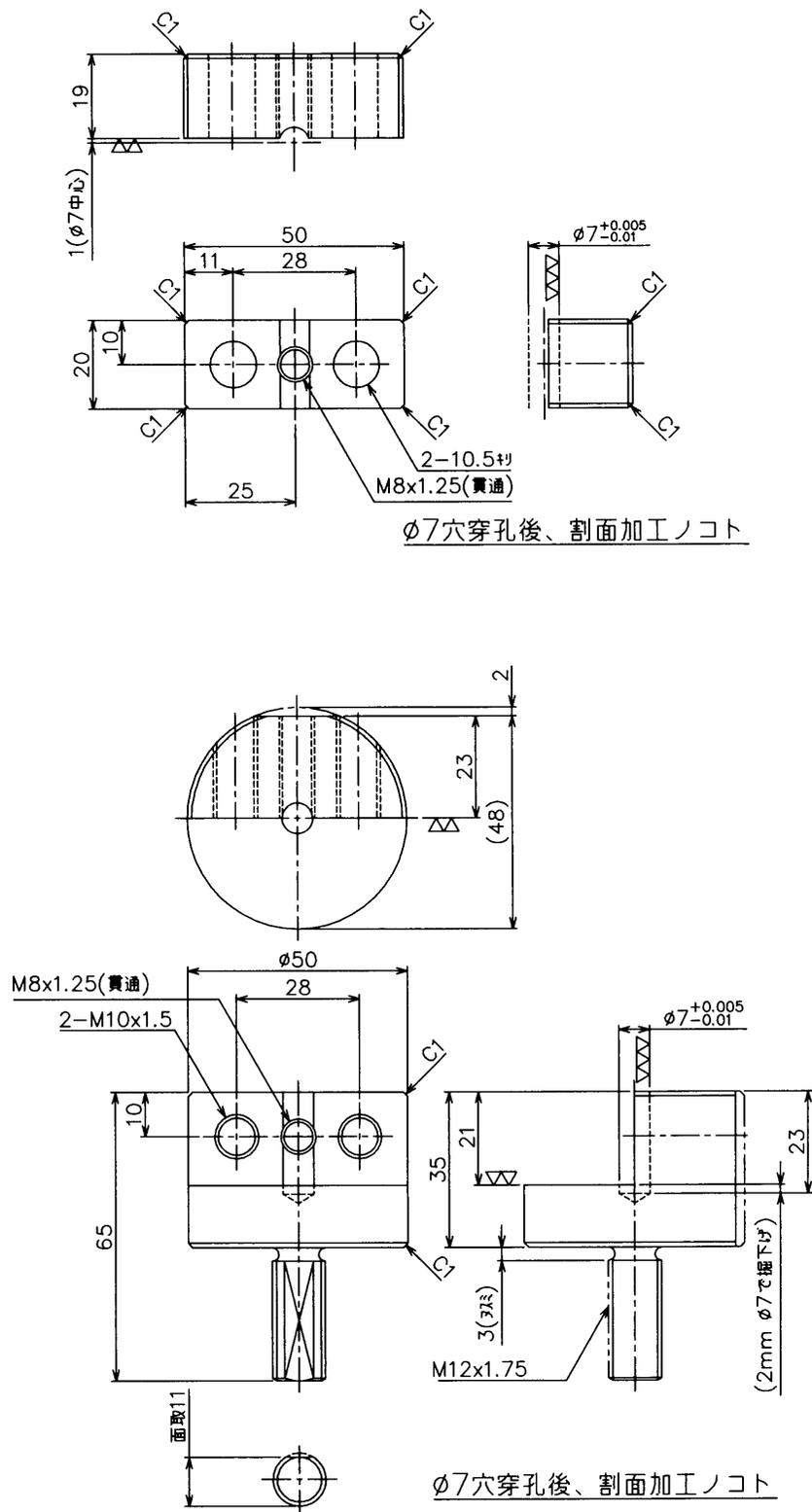


図 3.3 グリッパ治具詳細

3.4 形状記憶処理

本研究で用いた試験片に施された形状記憶処理は，アルゴンガス中に，540℃で10分間保持し，後に水中急冷されてある。

熱処理後の試験片の変態温度は，示差走査熱量計(DSC)を用いて測定した．図 3.4 に DSC 曲線を示す．図に示すように，変態点は DSC 曲線の各ベースラインの延長線と各ピークの最大傾斜線の交点として求めた．得られた無負荷状態での各変態温度は次のとおりである．

$$\begin{aligned} Ms' &= 34^\circ\text{C} & Mf' &= 25^\circ\text{C}, & Ms &= -2^\circ\text{C} & Mf &= -17^\circ\text{C} \\ As &= 41^\circ\text{C} & Af &= 53^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ここで，M'はR相変態，Mはマルテンサイト変態，Aは逆変態(オーステナイト変態)，添え字のsは開始，fは終了を示す．したがって，本研究で用いた形状記憶合金は，室温(20℃)において形状記憶挙動を示す．

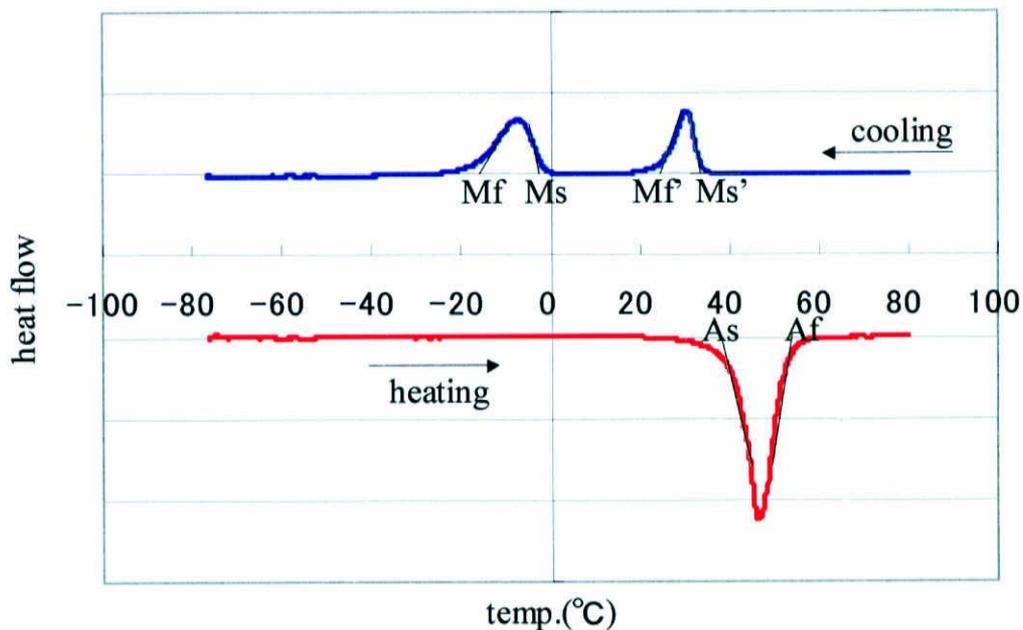


図 3.4 DSC 測定結果

3.5 実験方法・実験装置

3.5.1 ひずみの測定方法

ひずみの測定には，ひずみゲージを用いて行った．測定に用いた機器の一覧を表 3.2 に示す．

表 3.2 ひずみ測定機器一覧

※ひずみゲージ	(株) 共和電業製 三軸 KFEL-2-120-D34N30C2 (株) 共和電業製 三軸 KFG-5-120-D17-11L1M2S
接着剤	(株) 共和電業製 CC-33A
リード線	(株) 共和電業製 L-3 3線式高低温用テフロン線
ブリッジボックス	(株) 共和電業製 DB-120P
ひずみ計測装置	(株) 共和電業製 動ひずみ測定器 CDV-700A 及び DPM711B
センサインタフェース	(株) 共和電業製 PCD-320A

※トレーニングにおけるひずみの測定には (株) 共和電業製 三軸 KFEL-2-120-D34N30C2 を使用し，二方向ひずみの測定には (株) 共和電業製 三軸 KFG-5-120-D17-11L1M2S を使用した．

図 3.8 にひずみ測定システム概略図を示す．ひずみゲージは試験片評点間中央に図 3.10 に示すような向きに接着して使用した．ゲージ 1, 2, 3 から計測されるひずみを ε_1 , ε_2 , ε_3 とすれば，軸ひずみ ε ，せん断ひずみ γ は，式 3.1, 3.2 より求められる．

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos(2 \times 90^\circ) + \frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin(2 \times 90^\circ) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos(2 \times 45^\circ) + \frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin(2 \times 45^\circ) \quad \dots \dots (3.1) \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{2}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\cos(2 \times (-45^\circ)) + \frac{1}{2}\gamma_{xy}\sin(2 \times (-45^\circ))\end{aligned}$$

ここで， ε_x ， ε_y ， γ_{xy} はそれぞれ，x 軸方向のひずみ，y 軸方向のひずみ，せん断ひずみである．これを解いて，

3. 試験片，実験装置および実験方法

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_y = \varepsilon_1 \\ \gamma &= \gamma_{xy} = \varepsilon_2 - \varepsilon_3\end{aligned}\quad \dots\dots (3.2)$$

軸ひずみ ε の測定は，低温試験の際のリード線への温度影響除去を目的として，リード線に低温用リード線を使用したうえで，1 アクティブゲージ法 3 線式を用いてブリッジボックスに結線される (図 3.10 (b))。また，せん断ひずみ γ の測定は，2 アクティブゲージ法を用いて測定することで，式 3.2 を満足し，出力されるデータは直接せん断ひずみである。なお，ねじりひずみ γ は，図 3.9 に示すせん断方向を正としている。この結線法場合，温度補償され，リード線の温度影響も除去される。

ひずみゲージから測定される，軸ひずみ ε ，せん断ひずみ γ は，それぞれ図 3.7 のブリッジボックス 1，2 に前述のように結線される。さらに動ひずみ計測装置で電圧データに変換し，センサインタフェースを通してパーソナルコンピュータに記録した。

3. 試験片，実験装置および実験方法

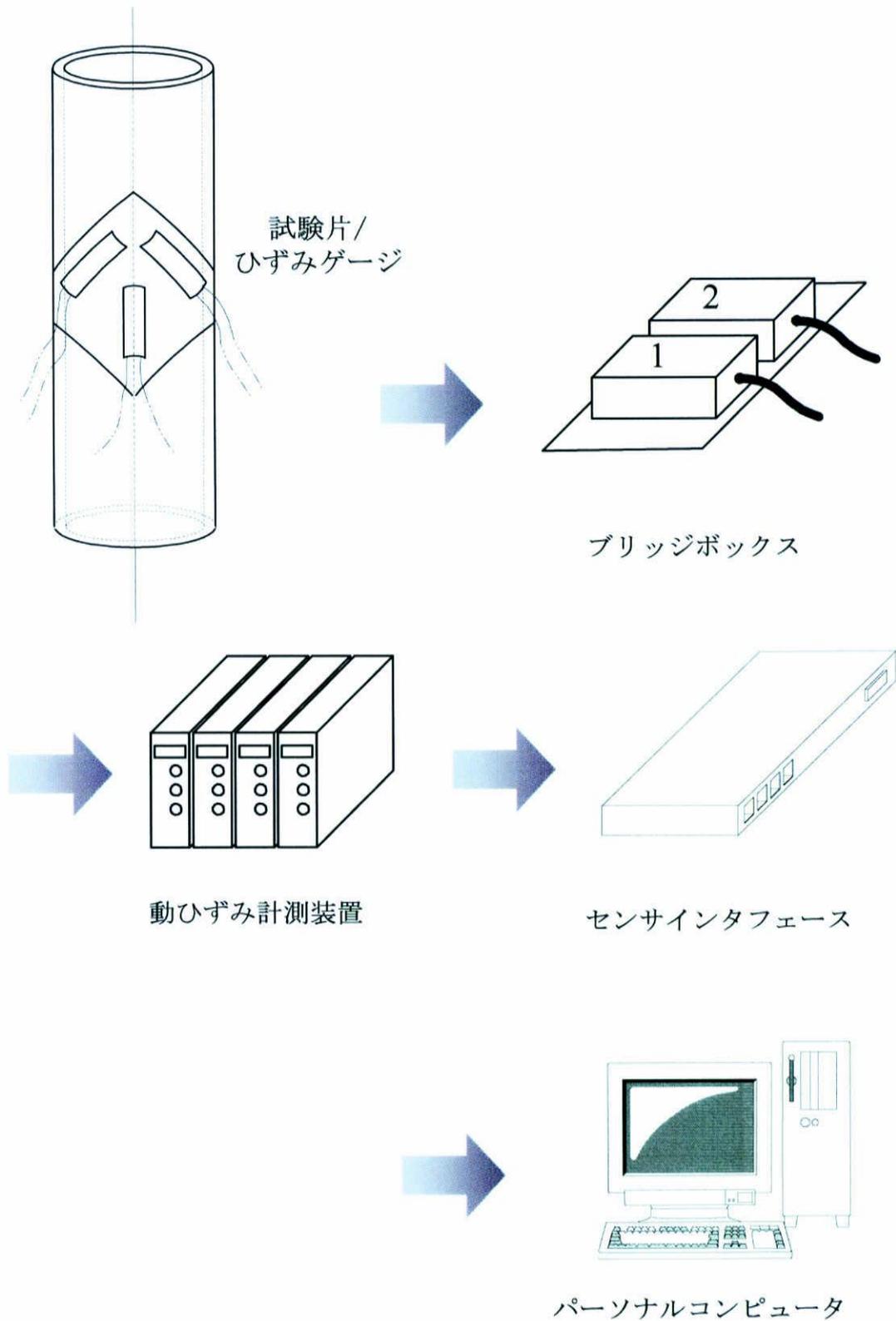


図 3.5 ひずみ測定システムの概略図

3. 試験片，実験装置および実験方法

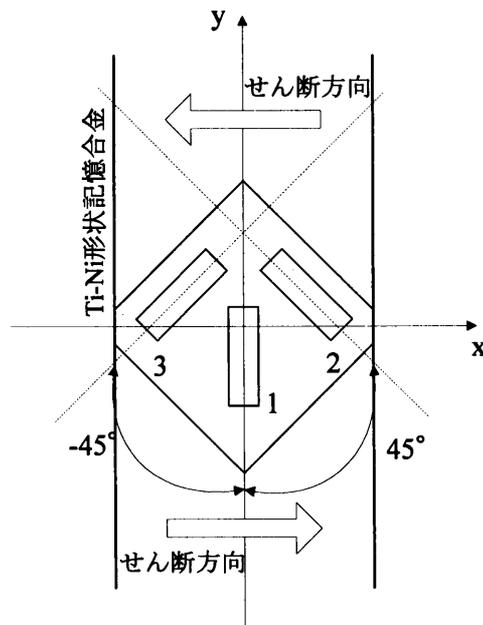
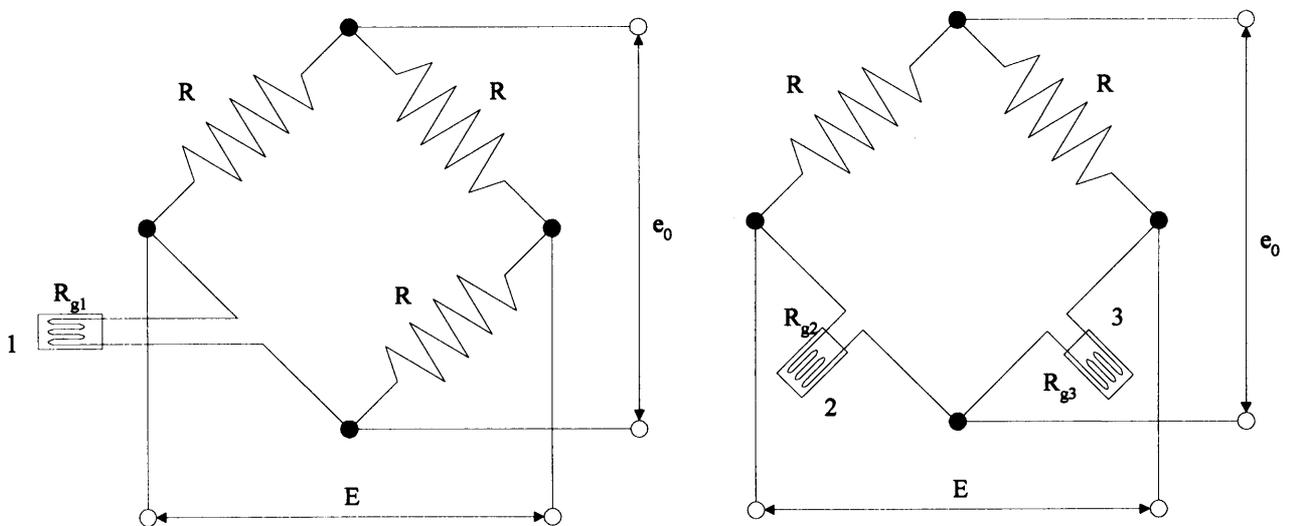


図 3.6 ひずみゲージの添付図



e_0 : 出力電圧
 E : ブリッジ電圧
 R : 固定抵抗
 R_g : ゲージ抵抗

(a) 軸ひずみ測定回路

(b) せん断ひずみ測定回路

図 3.7 ホイートストンブリッジ回路構成図

3.5.2 二方向形状記憶挙動観察

本研究で用いた試験片の Mf 温度が -17°C ， Af 温度が 53°C であるため，二方向形状記憶挙動の観察には，試験片を加熱して Af 温度以上まで上げ，そこから Mf 温度以下まで冷却し，再度 Af 温度以上まで加熱するための試験片温度制御装置が必要である．そこで，図 3.5 に示すような温度制御装置を製作した．この制御装置は，オーム電気株式会社製温度コントロールシステム OCE-TCR123000，液体窒素を冷媒とする熱交換器，試験片周辺を囲む断熱容器で構成される．温度コントロールシステム OCE-TCR123000 は $-100^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ の範囲において冷却あるいは加熱を自由にコントロールできるが，周辺温度との兼ね合いにより，自由にコントロールできる温度範囲は $-20^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ である．しかし，液体窒素を冷媒とする熱交換器を用いて，密閉された容器内の雰囲気冷却することで，約 -40°C までの冷却を可能とした．試験片の温度は，ひずみゲージに接触しない距離を保って表面の温度を測定し，その温度を試験片の代表温度とした．

二方向形状記憶効果の観察は，上記の試験片温度制御装置内に試験片をセットし，室温から 80°C まで加熱し，そこから約 $-5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で -40°C まで冷却する．その後， 80°C まで約 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で加熱した．この間，試験片は外部からの力を重力以外に受けていない．実際にアクチュエータとして二方向形状記憶効果を利用する場合は，いくらか応力を受けることになるが，本研究では，トレーニングによる二方向挙動や二方向動作の大きさの変化を見ることが目的であるため，すべての観察を無負荷の状態で行った．

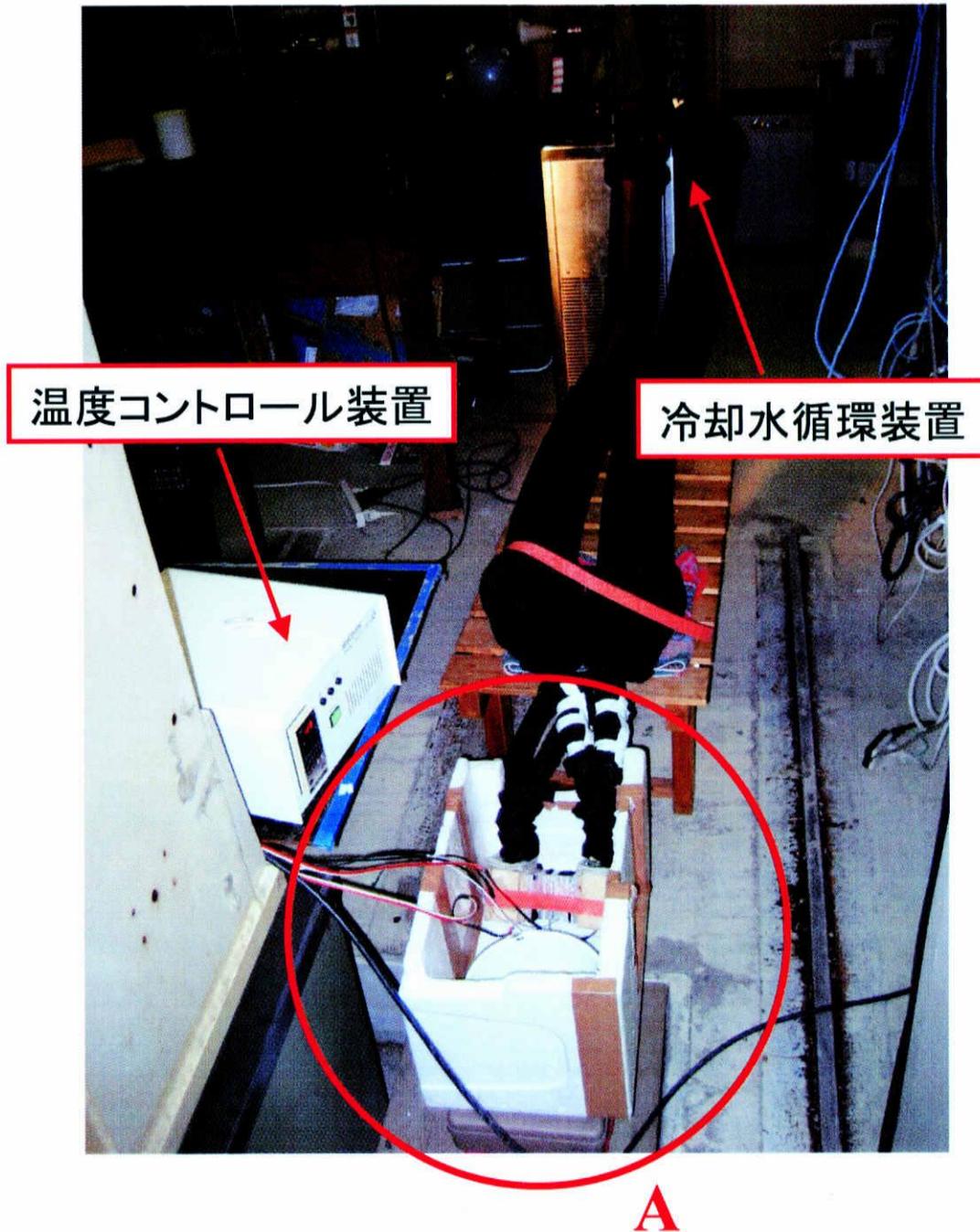


図 3.8 温度制御装置

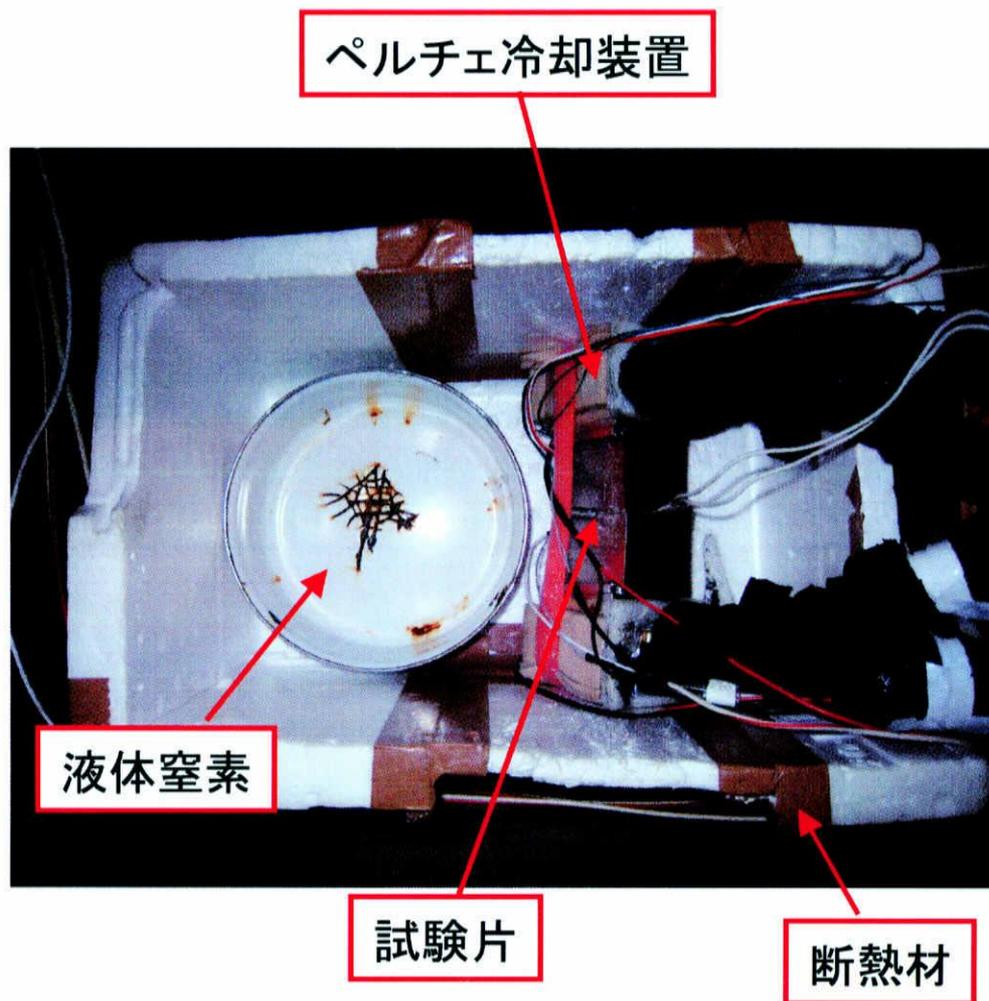


図 3.9 温度制御装置 (A 部拡大図)

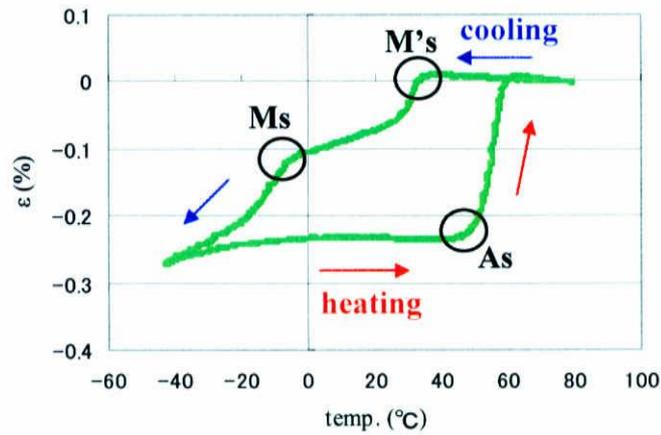
3.5.3 ひずみゲージの温度変化による“みかけひずみ”の校正

本研究において, 二方向形状記憶挙動を観察する場合, 試験片は 80°C から約 -40°C まで冷却される. その際, せん断ひずみは, 前述のひずみゲージ結線方法 (1 アクティブゲージ法) により温度補償されるものの, 軸ひずみは温度補償されないため, みかけひずみを生じる. 今回使用したひずみゲージは, SUS304 (線膨張係数約 $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に接着した場合に, 室温付近において温度変化により生じるみかけひずみを消去できるように調整された自己温度補償型セルコンゲージであるが, 室温から大きく逸脱した温度域での温度補償はされない.

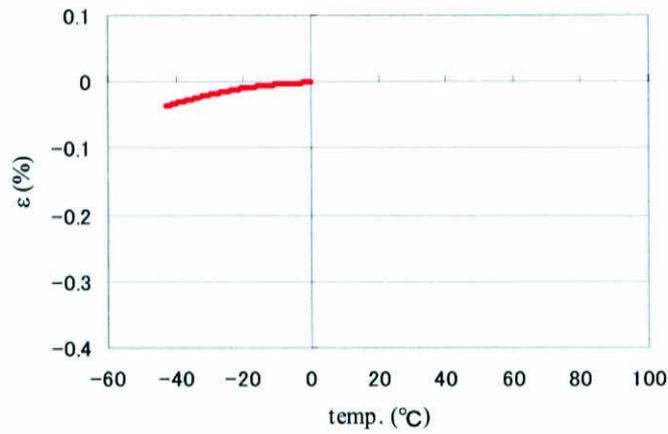
図 3.10 (a) にトレーニングを受けていない試験片の軸ひずみ - 温度曲線を示す. 80°C から冷却された試験片は, まず Ms' 温度 (34°C) 付近で R 相変態による二方向ひずみが発生し, さらに冷却が進むと, Ms 温度 (-2°C) 付近からマルテンサイト変態による二方向ひずみの増加が確認される. ここで, -40°C 付近ではマルテンサイト変態は終了していると考えられるが, 二方向ひずみの増加は -40°C 付近を過ぎても続いている. その後の加熱過程においては, 0°C 付近まで二方向ひずみは減少していき, それ以降は As 温度 (41°C) まで二方向ひずみが一定に保たれた. そして, As 温度に到達すると逆変態が起こり完全に元の状態に戻っている. これまでの研究報告から冷却後の加熱過程においては As 温度に到達するまで二方向ひずみはほぼ一定に保たれることがわかっている. しかし, 今回, -40°C から 0°C までの加熱過程において二方向ひずみが減少していることから, 0°C 以下の温度領域においては自己温度補償がなされていないと考えられる.

そこで, トレーニング前の試験片より得られる軸ひずみのデータから, みかけひずみを 4 次関数で近似し取り出した (図 3.10 (b)). 図 3.10 (c) は (a) で示された軸ひずみ - 温度曲線からみかけのひずみを差し引いた結果である. なお, 本研究で示したすべての二方向ひずみ - 温度曲線には, このような校正方法を適用している.

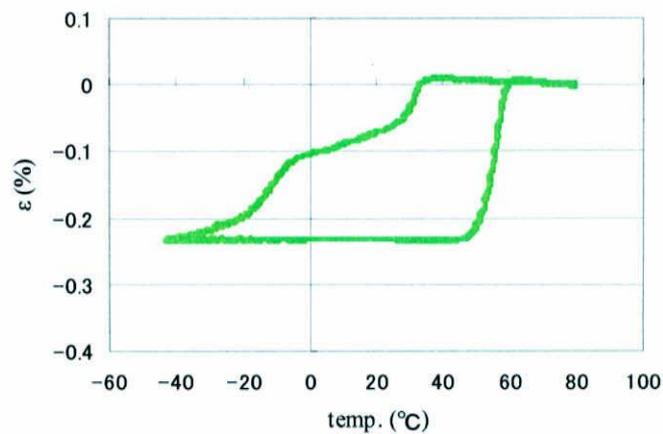
3. 試験片, 実験装置および実験方法



(a) トレーニングを受けていない試験片の軸ひずみ-温度曲線



(b) みかけひずみ-温度曲線



(c) 校正後の軸ひずみ-温度曲線

図 3.10 みかけひずみの校正

3.5.4 力学的負荷トレーニング

力学的負荷トレーニングには島津製作所製オートグラフ AG-10TC 環境制御型複合負荷試験機を用い, 単純負荷試験においてマニュアルで行った. 図 3.11 に複合負荷試験機を示す. この試験機の容量は, 引張及び圧縮負荷 $\pm 10 \text{ tonf}$ ($\pm 98.1 \text{ kN}$)であり, ねじり負荷が $\pm 20 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ ($\pm 196.2 \text{ Nm}$)である. ここで, 著者らの研究によって, トレーニングの際, 負荷を繰り返し与えた場合と, 負荷を1サイクルのみ与えた場合の二方向挙動を比較すると, ほとんど差がみられないことがわかっている⁽³⁶⁾. このことから, 本研究では, 形状記憶挙動を示す温度雰囲気 (20°C) において, 所定の応力まで負荷を与え, その後ただちに除荷するといったトレーニング方法を導入し, 繰り返し負荷は与えず, 負荷・除荷を1サイクルのみとした. また, トレーニングはすべて応力制御で行い, 相当応力速度 $\dot{\sigma}_{\text{eq}}=1.0 \text{ MPa/s}$ である.



図 3.11 複合負荷試験機

3.5.5 応力の算出法

応力の算出方法は，以下のとおりである．

$$\text{軸応力} \quad \sigma = \frac{W}{\pi(d_{ext}^2 - d_{int}^2)}$$

$$\text{ねじり応力} \quad \tau = \frac{16Td_{ext}}{\pi(d_{ext}^4 - d_{int}^4)}$$

W ; 軸荷重
 d_{int} ; 試験片内径 (5mm)
 d_{ext} ; 試験片外形 (7mm)
 T ; トルク

3.5.6 相当応力，相当ひずみ

本研究において，軸応力とねじり応力を等価に扱うため，引張試験の応力 - ひずみの関係とねじり試験のそれが等しくなるように以下のように不変量を定めた．

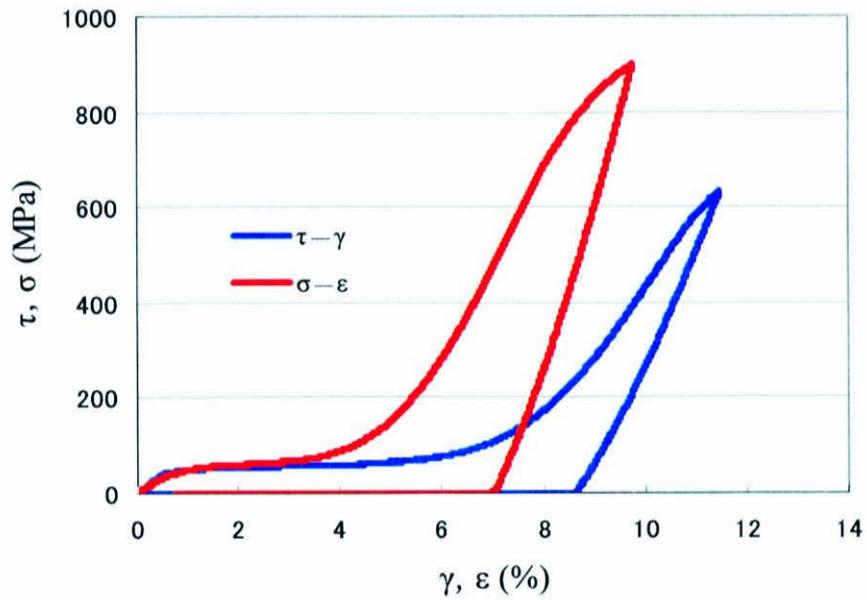
$$C_1 = \frac{\sigma_0}{\tau_0} \quad C_2 = \frac{\varepsilon_0}{\gamma_0}$$

ここで， σ_0 ， τ_0 はそれぞれ個別に行った引張試験，ねじり試験でのマルテンサイト変態開始時の応力値を示し， ε_0 ， γ_0 はそれらに対応するひずみ量である．

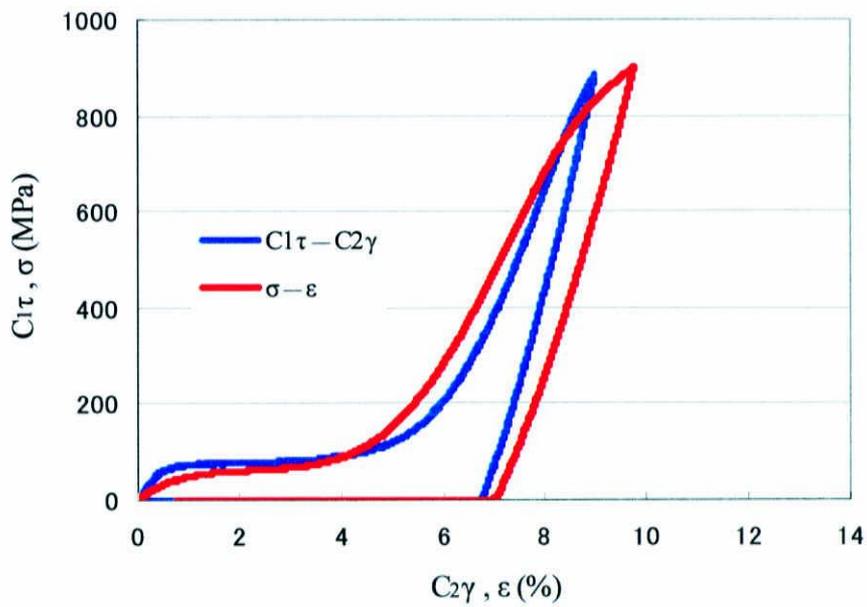
上記の C_1 ， C_2 を用いて，相当応力，相当ひずみを次のように定義した．

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + (C_1\tau)^2} \quad \varepsilon_{eq} = \sqrt{\varepsilon^2 + (C_2\gamma)^2}$$

実験結果から， C_1 ， C_2 はそれぞれ，1.3905，0.7823 であった．図 3.12 (a) に個別に行った引張試験，およびねじり試験の応力ひずみ曲線を示す．図 3.12 (b) はここで選定した C_1 ， C_2 の値を適用した際の応力ひずみ曲線となっている．図 3.12 (b) より引張とねじりのそれぞれの応力ひずみ曲線が良く一致していることがわかる．



(a) 応力-ひずみ曲線 ($\tau-\gamma, \epsilon-\sigma$)



(b) 応力-ひずみ曲線 ($C1\tau-C2\gamma, \epsilon-\sigma$)

図 3.12 単軸引張および単純ねじり試験の応力-ひずみ曲線

4. 実験結果および考察

本研究の目的は、二自由度を持った二方向形状記憶効果を提案し、TiNi 形状記憶合金の工業的応用の可能性を拡大することである。そのためには、まず基本となる一自由度をもつ二方向効果に関して知見を得ることが重要であると言える。そこで本研究では、試験片に与える負荷トレーニングを単純引張負荷、単純ねじり負荷に限定し、大きく分けて二つの実験を行った。

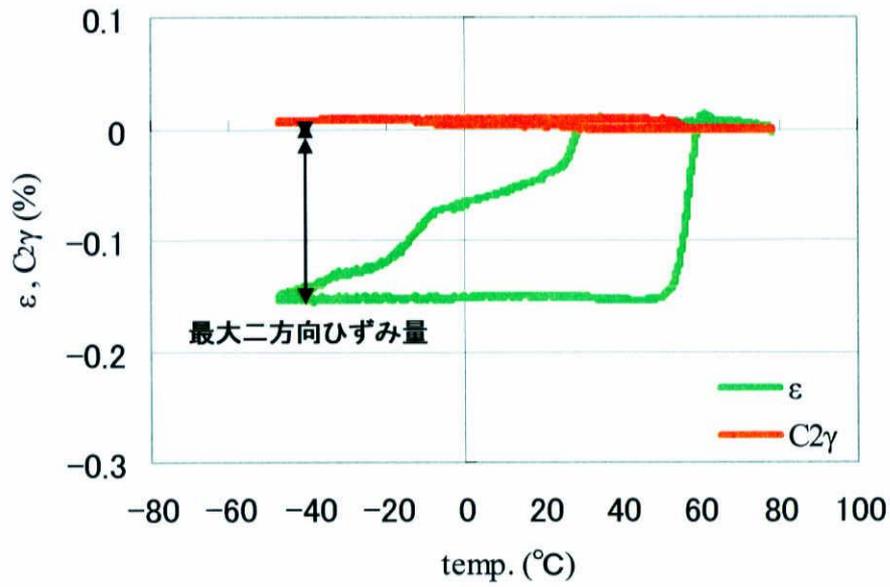
実験1では、まずトレーニングを受ける前のそれぞれの試験片について二方向挙動を観察し、試験片による個体差について調べた。その後、それぞれの試験片に種々の条件で単純引張トレーニング、もしくは単純ねじりトレーニングを1サイクル与え、それらのトレーニングが二方向挙動に与える影響について調査した。続いて実験2では、実験1でトレーニングを与えた試験片に異なる種類のトレーニングを与え、二自由度の二方向挙動について、またトレーニングの履歴が二方向挙動に与える影響について調査した。

4.1 トレーニングを受ける前の二方向形状記憶効果

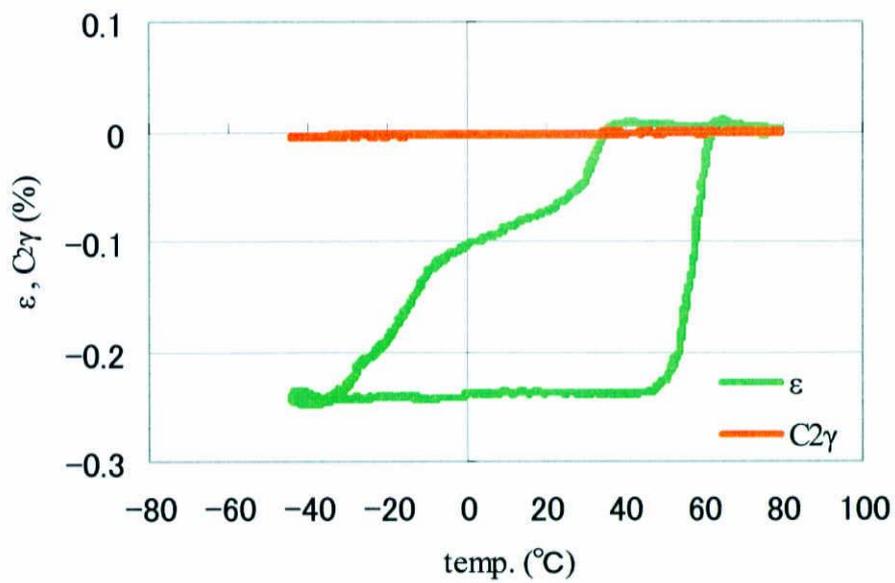
2.4 で述べたように、二方向形状記憶効果の駆動力は、材料内部の内部応力場である。二方向形状記憶効果を得るためには、トレーニングによる積極的な内部応力場の形成および不均一な応力場を形成することが必要である。ところで、本研究で用いた試験片は、燃焼合成法により作製されたとはいえ、多結晶材料であり本来不均一な材料である。また、材料製造過程における加工や熱処理などによって、すでに不均一応力場が存在していることが推測される。以上の理由より、負荷による二方向挙動への影響や、試験片の個体差などを正當に評価するためにもバージン状態（トレーニングを与える前）の二方向挙動を確認する必要がある。

そこで、本節では本研究で用いた 6 本の試験片 A, B, C, D, E, F について、バージン状態での二方向挙動について調べた。図 4.1 (a) ~ (f) に、それぞれのバージン状態での二方向挙動を示す。縦軸は二方向ひずみ ϵ , $C_{2\gamma}$ (%), 横軸は温度 ($^{\circ}\text{C}$) であり、温度制御装置を用い約 80°C に加熱した後、そこから M_f 温度以下である約 -40°C まで冷却し、その後、約 80°C まで加熱した際における二方向ひずみの変化を示している。この間、試験片は無負荷の状態である。

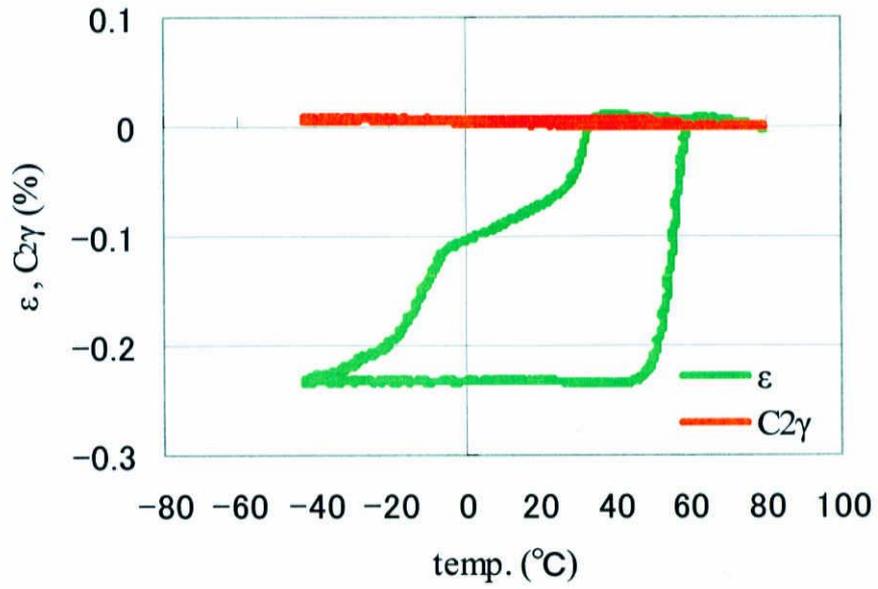
さらに、本研究では、図 4.1 (a) に示すように、冷却後の加熱過程において、二方向ひずみがほぼ一定に保たれた約 -40°C でのひずみを最大二方向ひずみとし、その絶対値を「最大二方向ひずみ量」と定義する。



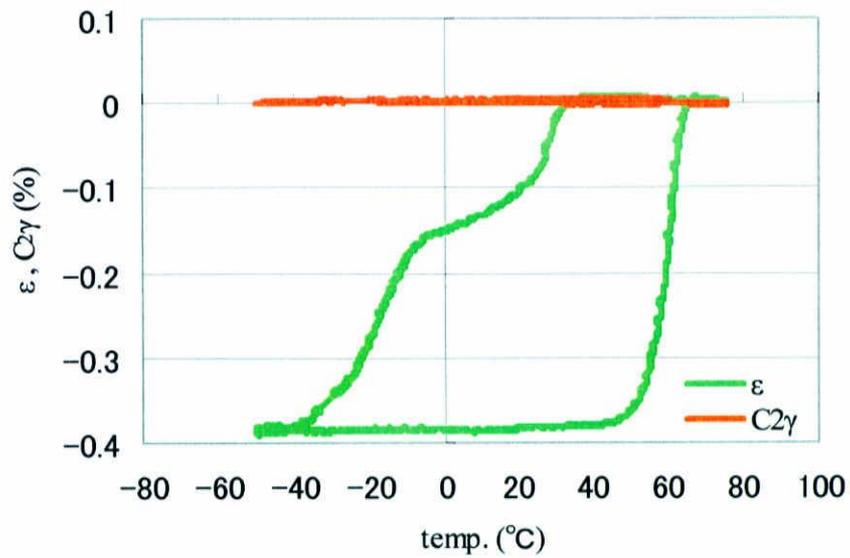
(a) 試験片 A におけるバージン状態での二方向挙動



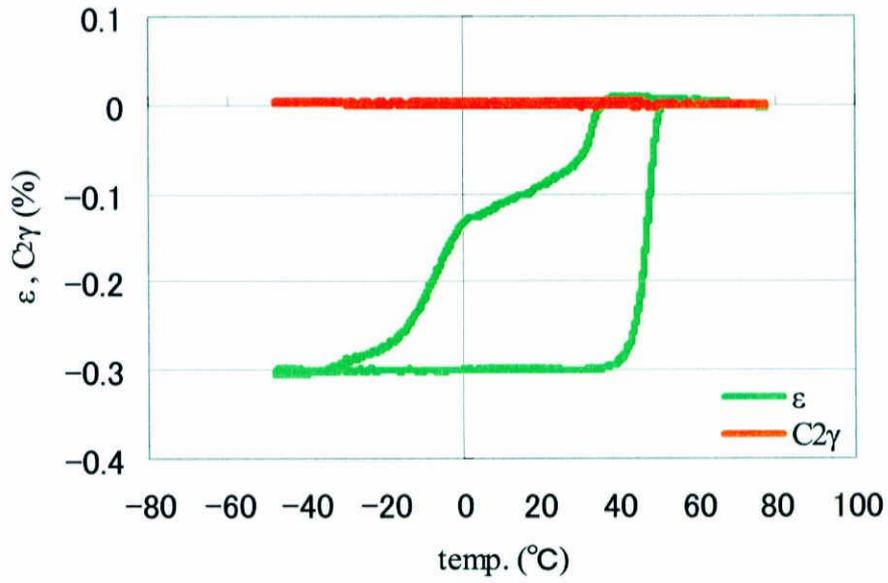
(b) 試験片 B におけるバージン状態での二方向挙動



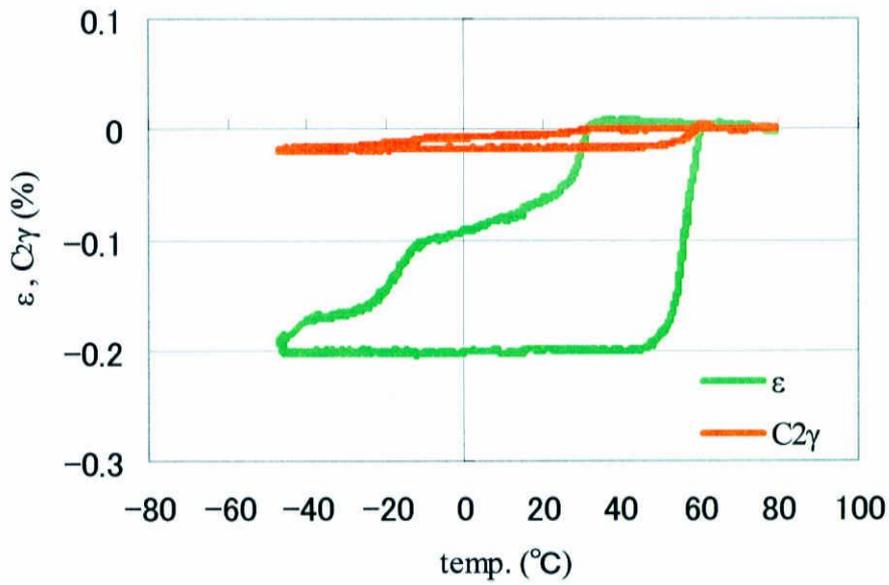
(c) 試験片 C におけるバージン状態での二方向挙動



(d) 試験片 D におけるバージン状態での二方向挙動



(e) 試験片 E におけるバージン状態での二方向挙動



(f) 試験片 F におけるバージン状態での二方向挙動

図 4.1 各試験片におけるバージン状態での二方向挙動

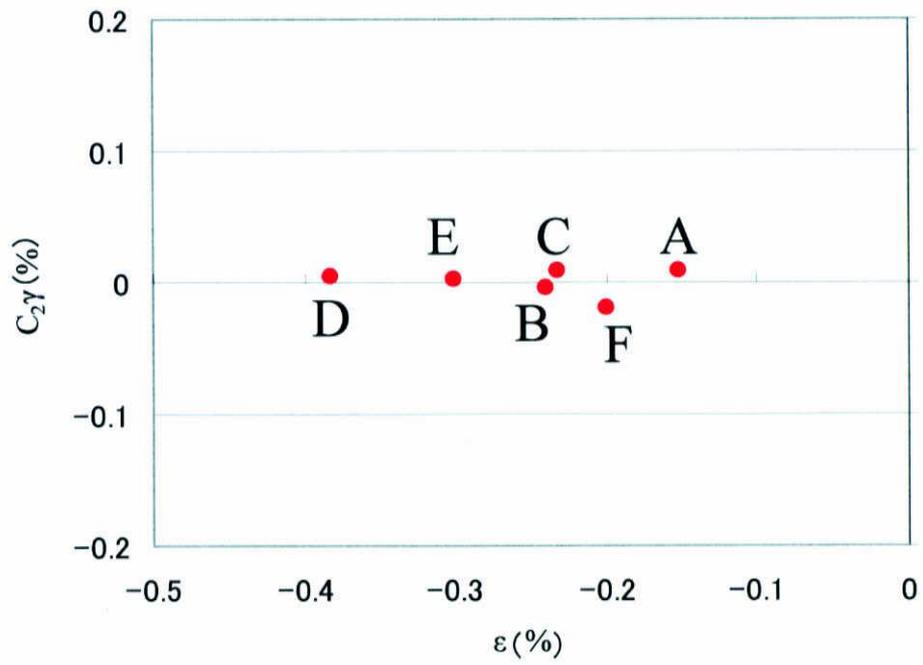


図 4.2 各試験片におけるバージン状態での最大二方向ひずみ

図 4.1 (a) ~ (f) からわかるように、ねじり方向の二方向ひずみはほとんど発生していないが、軸方向に関しては各々の試験片がバージンにも関わらず大きな二方向ひずみが発生している。その理由として、本試験片は製造過程において、さまざまな機械加工が施されているため、その際に軸方向の二方向ひずみを発生させるような内部応力場が付与されたと考えられる。どの試験片においても、冷却過程において、 M_s' 温度 (34°C) 付近で R 相変態による二方向ひずみの増加が見られ、さらに冷却が進むと M_s 温度 (-2°C) 付近でマルテンサイト変態による二方向ひずみの増加が確認される。その後、二方向ひずみの増加率は減少していき、 -40°C 付近でひずみは一定に収束している。加熱過程においては、 A_s 温度 (41°C) 付近まで二方向ひずみは一定に保たれ、 A_s 温度を過ぎたあたりから二方向ひずみが減少していき形状が完全に元に戻るといった二方向挙動を示している。これらの結果から、DSC 測定によって得られた各変態温度と、 M_f 温度を除く二方向挙動から得られた各変態温度は若干のばらつきが見られたが、ほぼ一致していることがわかる。

さらに、各々の試験片における最大二方向ひずみに着目し、図 4.2 にそれらの結果を示す。ねじり方向に関しては、ほぼ二方向ひずみは発生していないが、軸方向に関しては最大値で -0.15% 、最小値で -0.38% と大きな差が見られた。前述のように、本研究で用いた試験片は重力偏析の問題が解消される燃焼合成法で作製されたものであるが、TiNi 合金は多結晶材料であり、本来不均一な材料である。ゆえに二方向ひずみ量と各変態温度にばらつきが見られたと考えられる。

4.2 トレーニング 1 “バージンの試験片への単純負荷トレーニング”

バージンの試験片に対して、最も基本的な単純引張トレーニング、もしくは単純ねじりトレーニングを与え、その前後での二方向挙動を比較することにより、種々の負荷トレーニングが二方向挙動に与える影響について調査した。

4.2.1 実験結果—トレーニング 1 “単純引張トレーニング”

まず、形状記憶挙動を示す雰囲気温度 20°Cにおいて、バージンの試験片 A, B, C に対し種々の負荷条件で単純引張トレーニングを与えた。負荷条件は、最大負荷応力を図 4.3 に示すようにマルテンサイト相の弾性変形領域となる低応力 $\sigma=560\text{MPa}$ 、中応力 $\sigma=700\text{MPa}$ 、さらにマルテンサイト相の塑性変形領域となる高応力 $\sigma=900\text{MPa}$ の三種類とした。試験片 A に低応力トレーニング、試験片 B に中応力トレーニング、試験片 C に高応力トレーニングを与えた。その後、二方向挙動を観察し、単純引張トレーニングが二方向挙動に与える影響について調査した。図 4.4 は低応力トレーニング ($\sigma=560\text{MPa}$)、図 4.5 は中応力トレーニング ($\sigma=700\text{MPa}$)、図 4.6 は高応力トレーニング ($\sigma=900\text{MPa}$) の実験結果である。図 4.4~図 4.6 における (a), (b), (c) はそれぞれトレーニング前の二方向挙動、トレーニングの応力-ひずみ曲線、トレーニング後の二方向挙動を示す。

図 4.7 に単純引張トレーニングによる最大二方向ひずみの変化を示した。ここで ε_v , $C_{2\gamma_v}$ はバージンにおける最大二方向ひずみ、 ε_1 , $C_{2\gamma_1}$ はトレーニング 1 後における最大二方向ひずみである。負荷応力の増加に伴い、軸方向の二方向ひずみが増加している。試験片 A と試験片 B の最大二方向ひずみを比較すると試験片 A の方が試験片 B に比べ、最大二方向ひずみが大きい。バージンにおける最大二方向ひずみからの変化量では試験片 B の方が大きいといえる。増加傾向として、低応力トレーニング後と中応力トレーニング後の最大二方向ひずみに大きな差は見られなかったが、高応力トレーニング後においては急激な二方向ひずみの増加が確認された。その最大二方向ひずみ量は、これまでの二方向特性に関する研究で報告されてきたものと比較すると、約 3 倍に及ぶ値となっている。また、冷却後、加熱過程において、試験片 A, B に関しては、二方向ひずみが A_f 温度まで一定に保たれているが、試験片 C に関しては、加熱されるに伴い二方向ひずみが減少している。ねじり方向に関しては、若干の二方向ひずみが発現したが、トレーニング前後で二方向挙動に大きな変化は見られなかった。次に、試験片 A, B の二方向挙動に関しては冷却過程において、R 相変態と M (マルテンサイト) 相変態によるきれいな二段階変態が確認されたが、試験片 C においては R 相変態が確認できず、M 相変態のみとなっている。

これらの結果から、バージンの試験片に対して種々の条件で単純引張トレーニングを与えることで、それぞれ異なる一自由度(引張方向)の二方向挙動が得られたといえる。

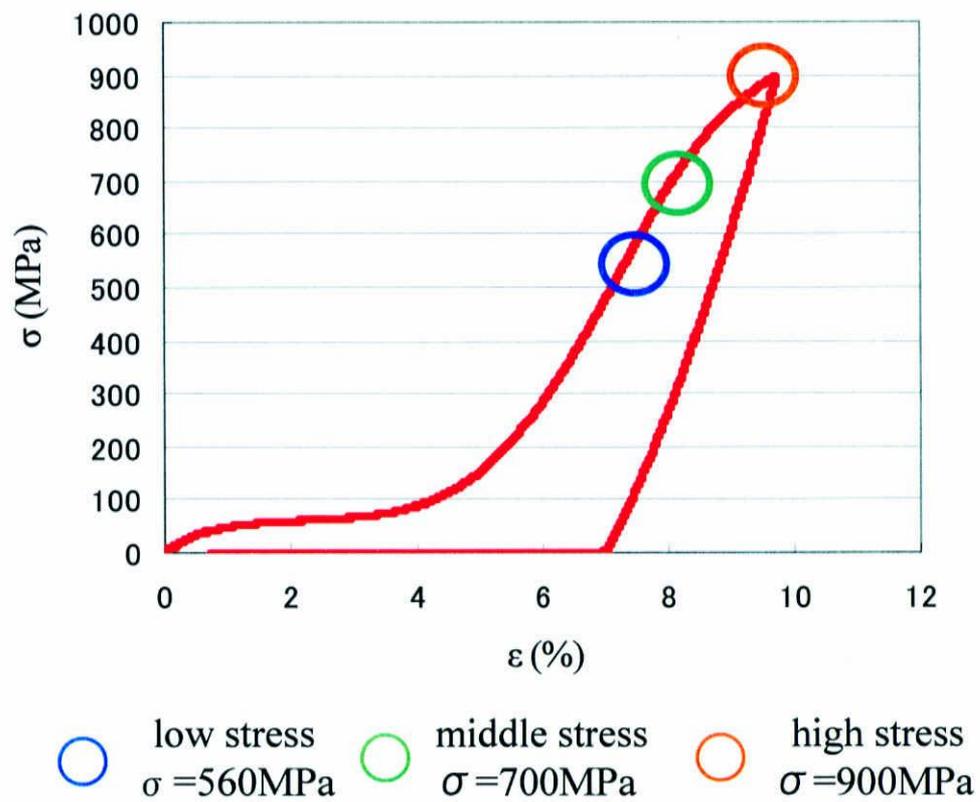
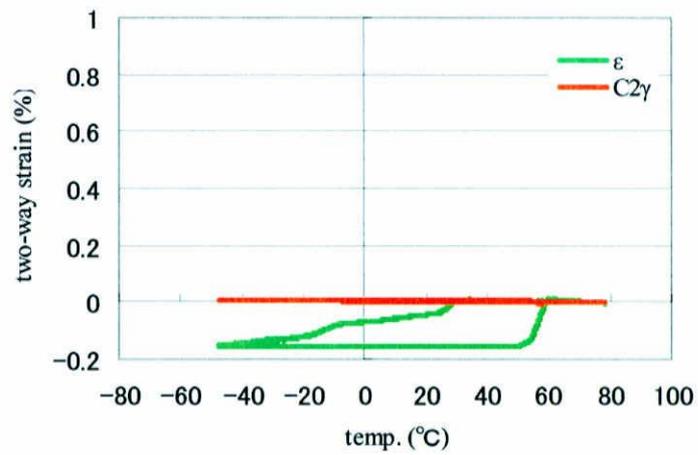
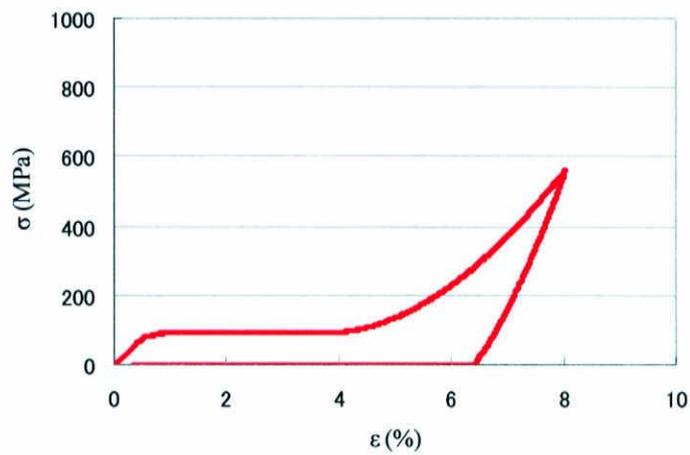


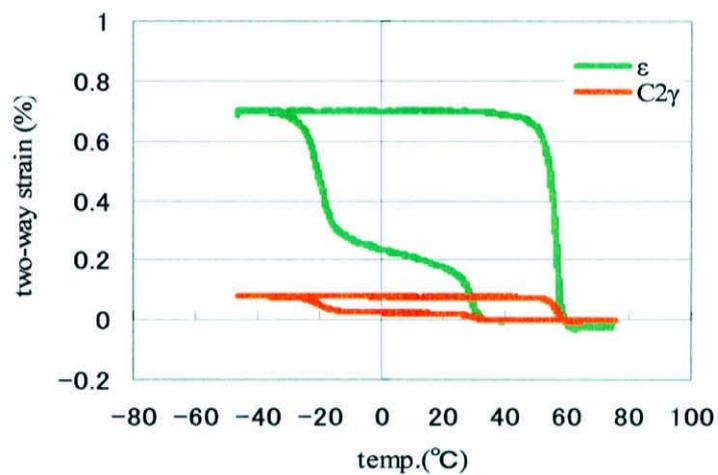
図 4.3 単純引張試験における応力-ひずみ曲線



(a) トレーニング前の二方向挙動

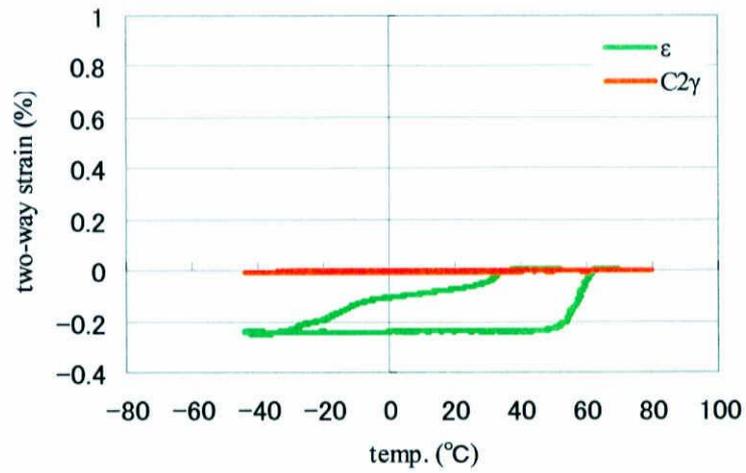


(b) トレーニングの s-s 曲線

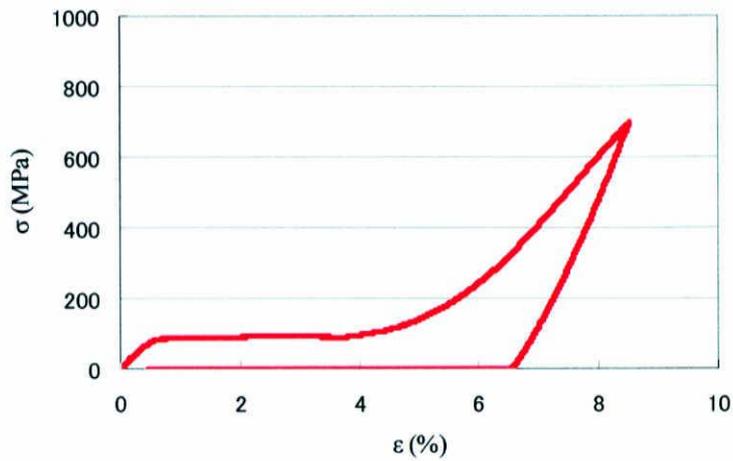


(c) トレーニング後の二方向挙動

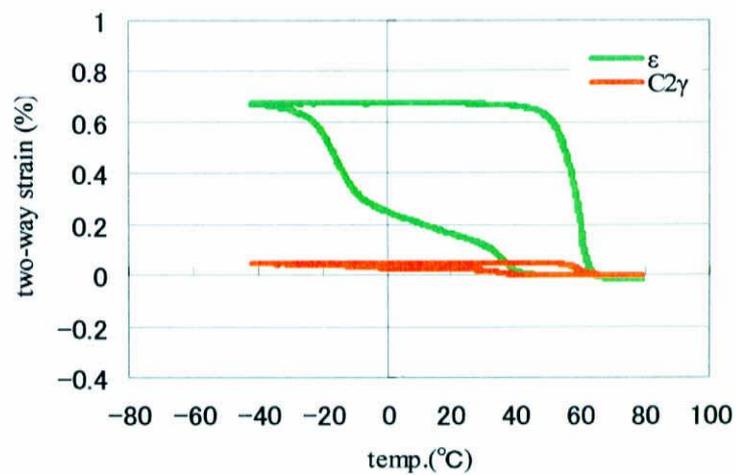
図 4.4 試験片 A—単純引張トレーニング ($\sigma=560\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング前の二方向挙動

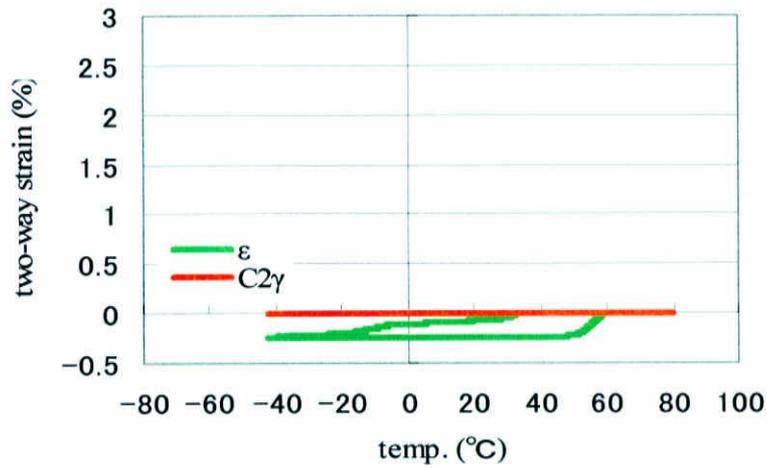


(b) トレーニングの σ - ϵ 曲線

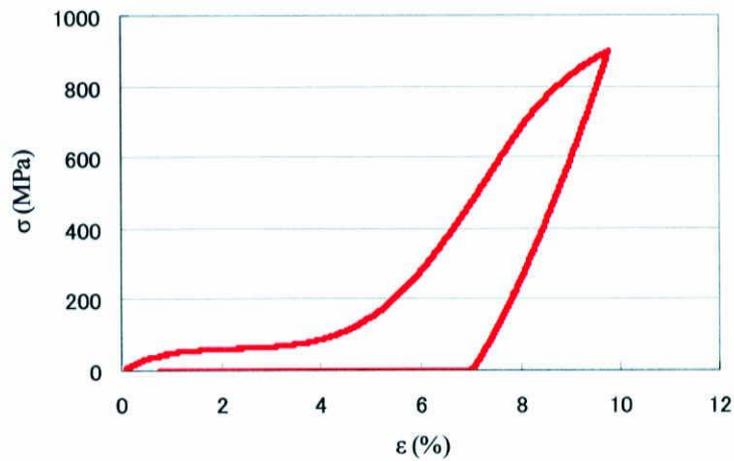


(c) トレーニング後の二方向挙動

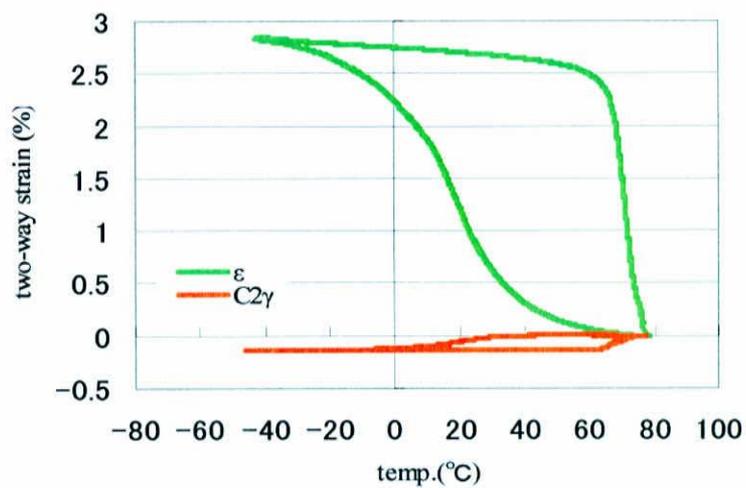
図 4.5 試験片 B—単純引張トレーニング ($\sigma=700\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング前の二方向挙動



(b) トレーニングの σ - ϵ 曲線



(c) トレーニング後の二方向挙動

図 4.6 試験片 C-単純引張トレーニング ($\sigma=900\text{MPa}$) による二方向挙動の変化

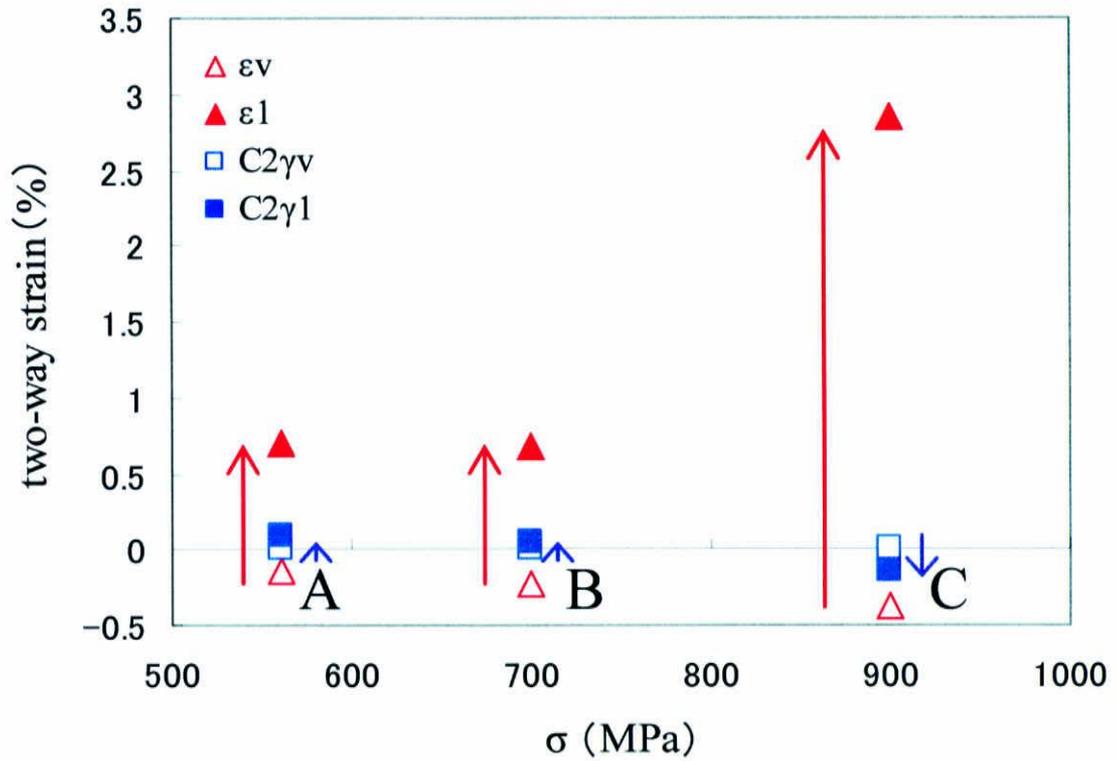


図 4.7 単純引張トレーニングによる最大二方向ひずみの変化

4.2.2 実験結果—トレーニング 1 “単純ねじりトレーニング”

まず、形状記憶挙動を示す雰囲気温度 20°C において、バージンの試験片 D, E, F に対し種々の負荷条件で単純ねじりトレーニングを与えた。負荷条件は、図 4.7 に示すようにマルテンサイト相の弾性変形領域となる低応力 $C_{1\tau}=560\text{MPa}$, 中応力 $C_{1\tau}=700\text{MPa}$, さらにマルテンサイト相の塑性変形領域となる高応力 $C_{1\tau}=900\text{MPa}$ の三種類とした。試験片 D に低応力トレーニング, 試験片 E に中応力トレーニング, 試験片 F に高応力トレーニングを与えた。そしてトレーニング後の二方向挙動を観察し、単純ねじりトレーニングが二方向挙動に与える影響について調査した。本実験は 4.2.1 の単純引張トレーニングの実験と対応している。

図 4.9 は低応力トレーニング ($C_{1\tau}=560\text{MPa}$), 図 4.10 は中応力トレーニング ($C_{1\tau}=700\text{MPa}$), 図 4.11 は高応力トレーニング ($C_{1\tau}=900\text{MPa}$) の実験結果である。図 4.9~図 4.11 における (a), (b), (c) はそれぞれトレーニング前の二方向挙動, トレーニングの応力-ひずみ曲線, トレーニング後の二方向挙動を示している。

図 4.12 に単純ねじりトレーニングによる最大二方向ひずみの変化を示す。ここで ε_v , $C_{2\gamma_v}$, ε_1 , $C_{2\gamma_1}$ は図 4.7 のそれと同じである。単純引張トレーニングの実験結果と同様に、最大負荷応力の増加に伴い、ねじり方向の二方向ひずみが増加した。低応力トレーニング後と中応力トレーニング後の最大二方向ひずみにあまり差は見られなかったが、高応力トレーニング後に急激な二方向ひずみの増加が確認された。軸方向に関しては、どの試験片もバージンにおいて圧縮方向に二方向ひずみが発現していたが、トレーニング後は引張方向に二方向ひずみが発現した。変化の傾向として、ねじり方向のそれとは逆で、最大負荷応力の増加に伴い最大二方向ひずみが減少している。さらに、バージンからの最大二方向ひずみの変化量は高応力トレーニング後が最も小さい。

次に、試験片 D, E の二方向挙動に関して、冷却過程において、R 相変態と M (マルテンサイト) 相変態によるきれいな二段階変態が確認されたが、試験片 F に関しては R 相変態の終了と M 相変態の開始が重なったような変態が確認された。また、冷却後、加熱過程において、試験片 A, B, C とともに A_f 温度までほぼ一定に保たれ、単純引張トレーニング後の二方向挙動とは異なる結果となった。

これらの結果より、バージンの試験片に対して種々の条件で単純ねじりトレーニングを与えることで、軸方向において若干の二方向挙動はみられたが、ほぼ一自由度 (ねじり方向) の二方向挙動が得られたといえる。

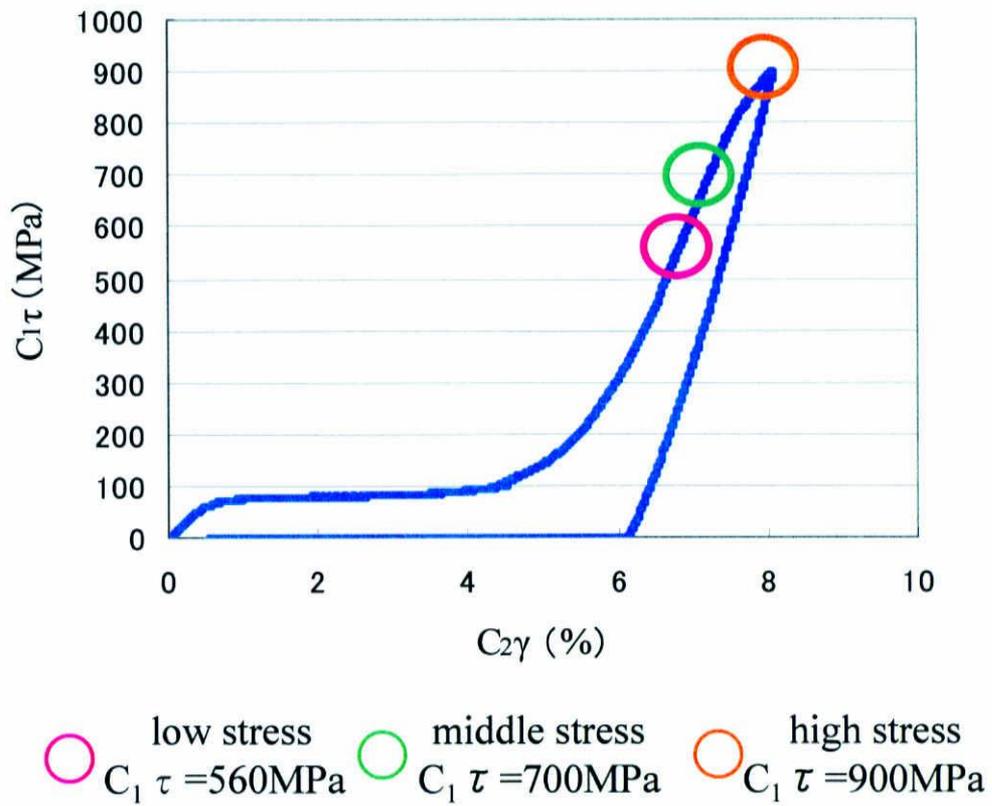
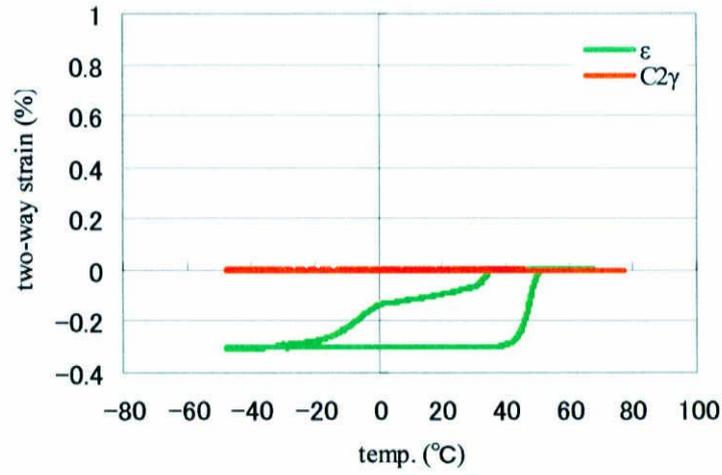
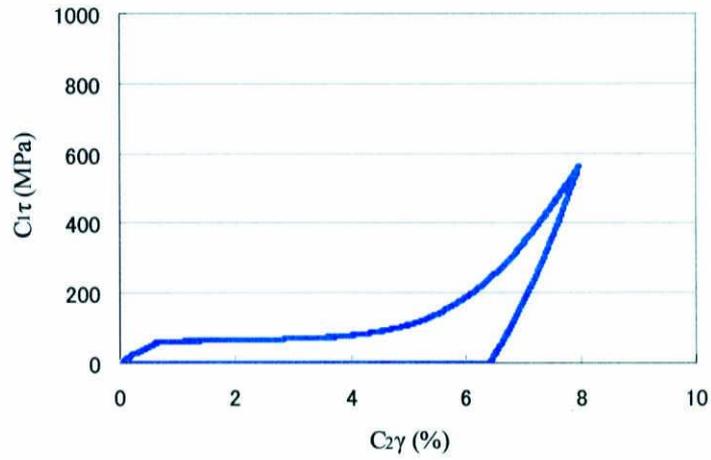


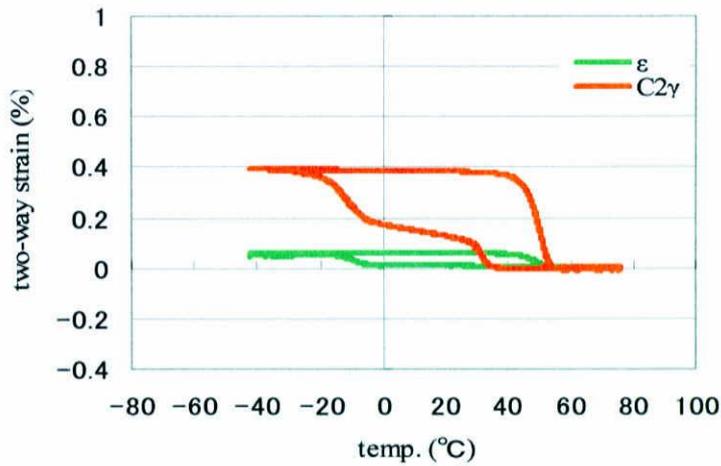
図 4.8 単純ねじり試験における応力—ひずみ曲線



(a) トレーニング前の二方向挙動



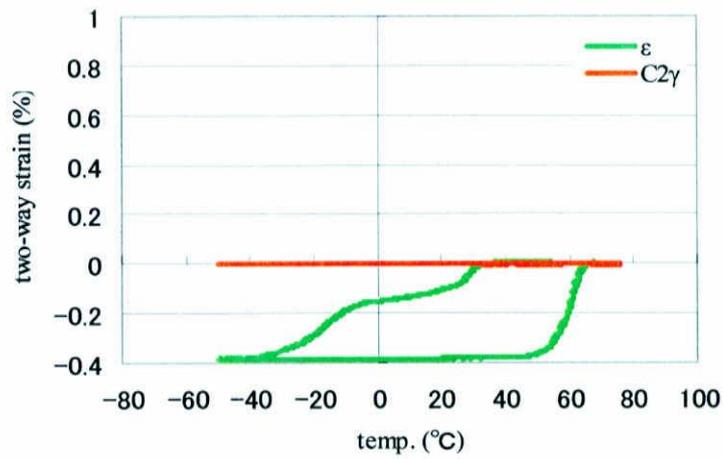
(b) トレーニングの s-s 曲線



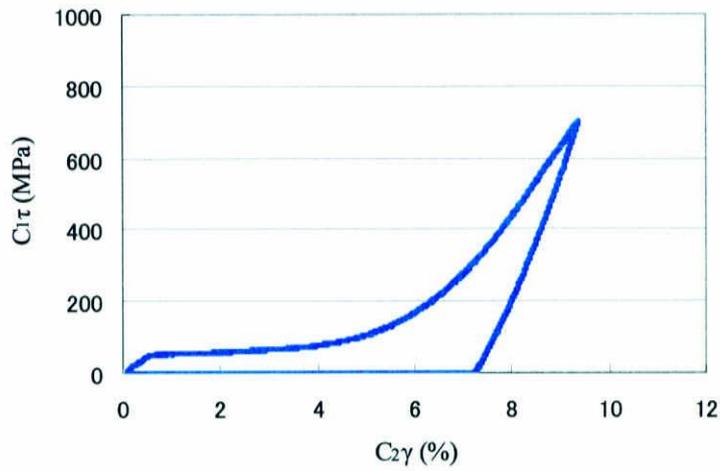
(c) トレーニング後の二方向挙動

図 4.9 試験片 D-単純ねじりトレーニング ($C_1\tau=560\text{MPa}$) による二方向挙動の変化

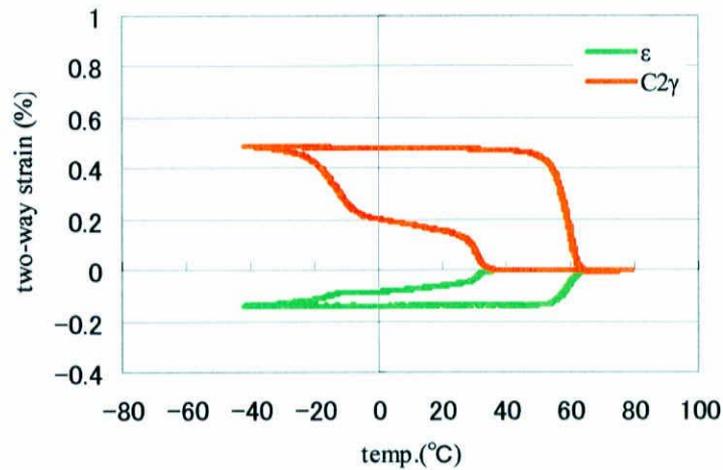
4. 実験結果および考察



(a) トレーニング前の二方向挙動

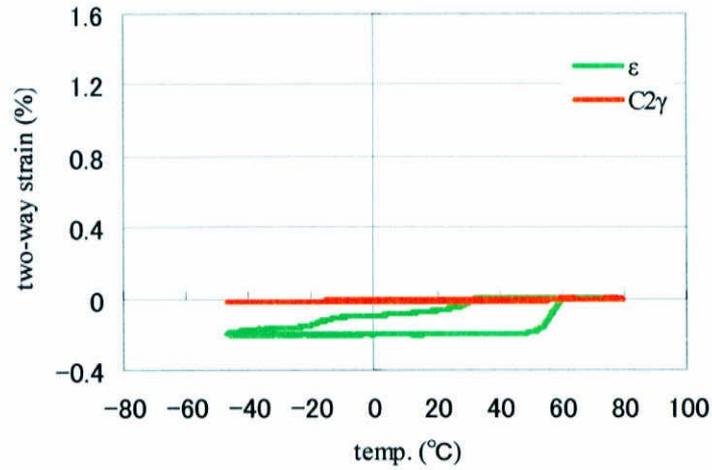


(b) トレーニングの s-s 曲線

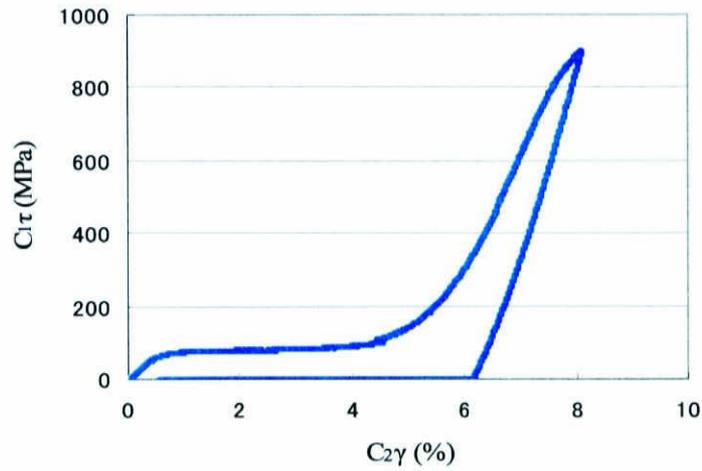


(c) トレーニング後の二方向挙動

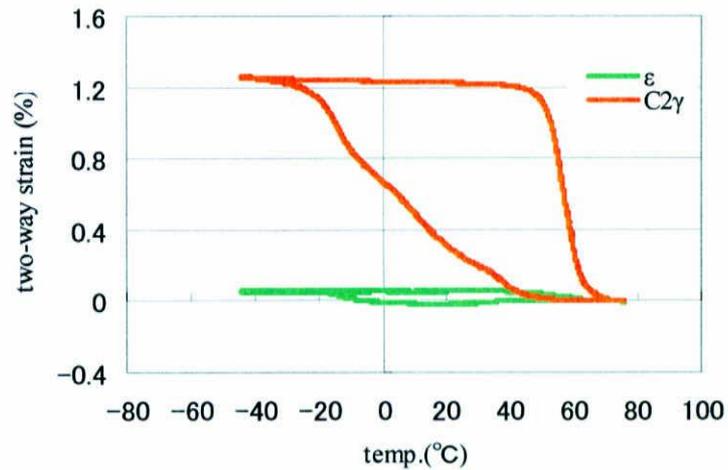
図 4.10 試験片 E-単純ねじりトレーニング ($C_{1\tau}=700\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング前の二方向挙動



(b) トレーニングの s-s 曲線



(c) トレーニング後の二方向挙動

図 4.11 試験片 F-単純ねじりトレーニング ($C_{1\tau}=900\text{MPa}$) による二方向挙動の変化

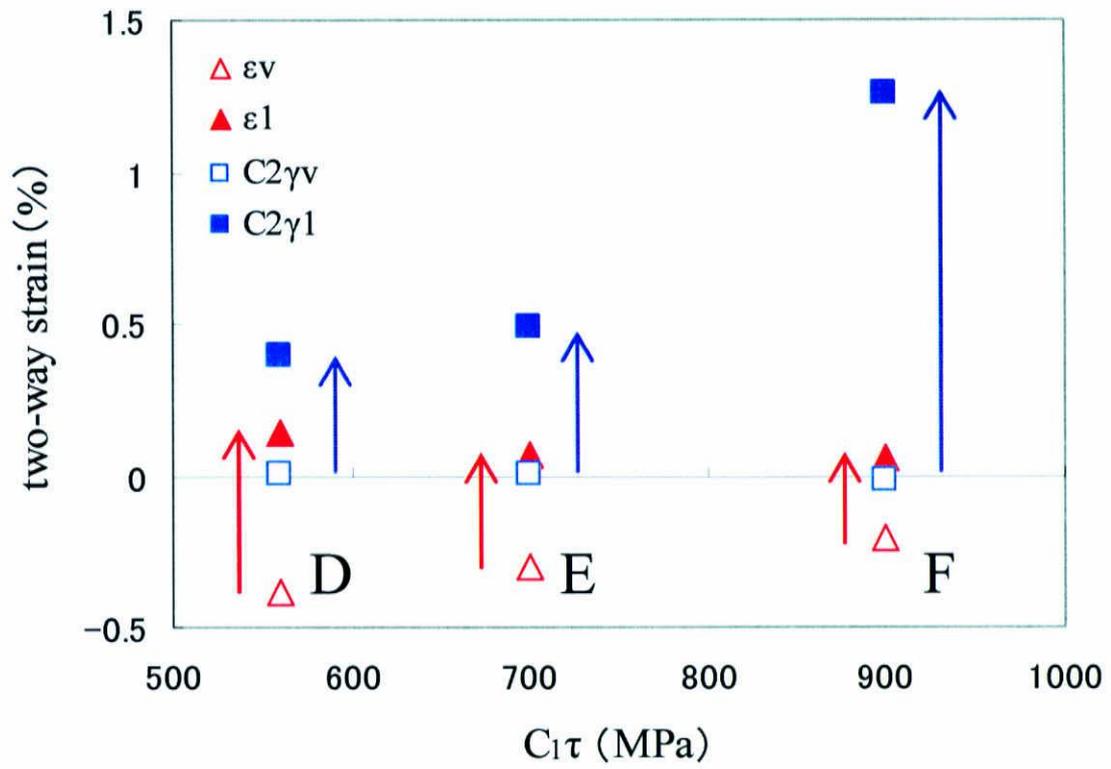


図 4.12 単純ねじりトレーニングによる最大二方向ひずみの変化

4.2.3 考察—トレーニング1 “バージンの試験片への単純負荷トレーニング”

まず、トレーニング1における最大負荷応力と最大二方向ひずみの関係について考察する。単純引張トレーニング、単純ねじりトレーニングともに、最大負荷応力の増加に伴い、負荷方向に最大二方向ひずみは増加した。しかし、低応力の単純負荷トレーニングを与えた試験片と、中応力の単純負荷トレーニングを与えた試験片では、二方向ひずみの増加量にあまり違いは見られなかった。また、試験片AとD、BとE、CとFは同じ応力レベルの負荷を与えたにも関わらず、引張トレーニングを与えた試験片の方がねじりトレーニングを与えた試験片より、負荷方向に発現する最大二方向ひずみが大きかった。ここで、形状記憶合金に二方向特性を付与するトレーニングとは、内部応力場を何らかの方法で導入し、冷却によって誘起されるマルテンサイト変態を制御するものである。その内部応力場の発生の原因は、変形の原因となる転位などの不可逆欠陥であり、また加熱によっても逆変態しない残留マルテンサイトや析出物であると考えられる。このことから残留ひずみを付与することと、内部応力を付与することは密接な関係があると考えられる。現に、これまでの著者らの研究によって残留ひずみと二方向ひずみの関係性が示唆されている⁽³⁷⁾。そこで、本実験においても、トレーニング1で発現した残留ひずみと二方向ひずみの関係性に着目した。図4.13にその結果を示す。(試験CとFに関しては、実験装置の都合上、トレーニングを3サイクル与えているため、バージンの状態から累積した残留ひずみの値をとった。) グラフの横軸はトレーニングによって発現した残留ひずみ、縦軸はトレーニング後におけるバージンからの負荷方向における最大二方向ひずみの増加量である。グラフから、残留ひずみと二方向ひずみの関係性がうかがえる。この試験片AとB、DとEの残留ひずみの値が近いことが、それぞれの二方向挙動にあまり違いが見られなかった理由であると考えられる。また引張トレーニングの方がねじりトレーニングより、より大きな二方向挙動を与えた結果も、この図4.13で説明できる。同じ応力レベルの引張トレーニングとねじりトレーニングをそれぞれの試験片に与えたにも関わらず、引張トレーニングの方がねじりトレーニングより、より大きな残留ひずみが発現している。このことが、その原因であると考えられる。

次に、変態温度の変化について考察する。試験片Cの負荷方向における二方向挙動では、R相変態がなく、M相変態しかみられない。また試験片Fの二方向挙動では、R相変態の終了とM相変態の開始が重なっている。これは、最大負荷応力を大きくすることで、 M_s 温度が高温側へ移動し、R相変態を取り込んだと考えられる。つまり、内部応力場を付与することで、その周辺組織の変態温度が上昇すると考えられた。これは図2.10の変態応力と温度の関係図で説明できる。マルテンサイト変態はある応力に達したときに誘起し、その誘起応力は、一般的に温度に比例して大きくなるといわれている。今回の実験結果は、図2.10の温度軸が付与された内部応力分だけ上にずれたと考えれば、トレーニング後に変態温度が上昇したと考察できる。

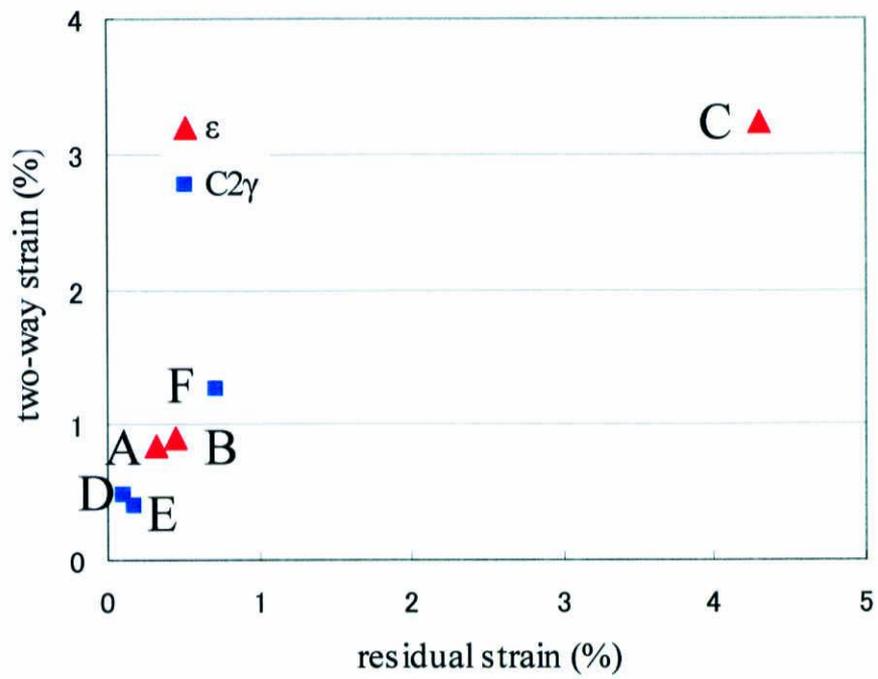


図 4.13 残留ひずみと二方向ひずみの関係

4.3 トレーニング 2 “バージンでない試験片への単純負荷トレーニング”

4.2 の実験では，バージンの試験片に対して種々の負荷条件下で単純負荷トレーニングを与え，それが二方向挙動に与える影響について調査した．

ここで，あらかじめ引張トレーニングを受けた試験片に対して，ねじりトレーニングを与えた場合，または，ねじりトレーニングを受けた試験片に対して，引張トレーニングを与えた場合，軸方向とねじり方向の二自由度を持つ二方向挙動が発現すると考えられる．それをもとに，4.3 では，4.2 の実験でトレーニングを受けた試験片に対して，異なる種類の単純負荷トレーニング（引張負荷→ねじり負荷，ねじり負荷→引張負荷）を与え，二自由度の二方向挙動について調査した．負荷条件を表 4.1 (a) に示す．

また，表 4.1 (b) に示すようにトレーニング後の試験片 A と E，B と D，C と F を比較することで，トレーニングの履歴が二方向挙動に与える影響について調査した．

表 4.1 各々の試験片に与えたトレーニングの最大負荷応力

(a)

specimen	training 1	training 2
A	$\sigma = 560\text{MPa}$	$C_1\tau = 700\text{MPa}$
B	$\sigma = 700\text{MPa}$	$C_1\tau = 560\text{MPa}$
C	$\sigma = 900\text{MPa}$	$C_1\tau = 900\text{MPa}$
D	$C_1\tau = 560\text{MPa}$	$\sigma = 700\text{MPa}$
E	$C_1\tau = 700\text{MPa}$	$\sigma = 560\text{MPa}$
F	$C_1\tau = 900\text{MPa}$	$\sigma = 900\text{MPa}$

(b)

specimen	training 1	training 2
A	$\sigma = 560\text{MPa}$	$C_1\tau = 700\text{MPa}$
E	$C_1\tau = 700\text{MPa}$	$\sigma = 560\text{MPa}$
B	$\sigma = 700\text{MPa}$	$C_1\tau = 560\text{MPa}$
D	$C_1\tau = 560\text{MPa}$	$\sigma = 700\text{MPa}$
C	$\sigma = 900\text{MPa}$	$C_1\tau = 900\text{MPa}$
F	$C_1\tau = 900\text{MPa}$	$\sigma = 900\text{MPa}$

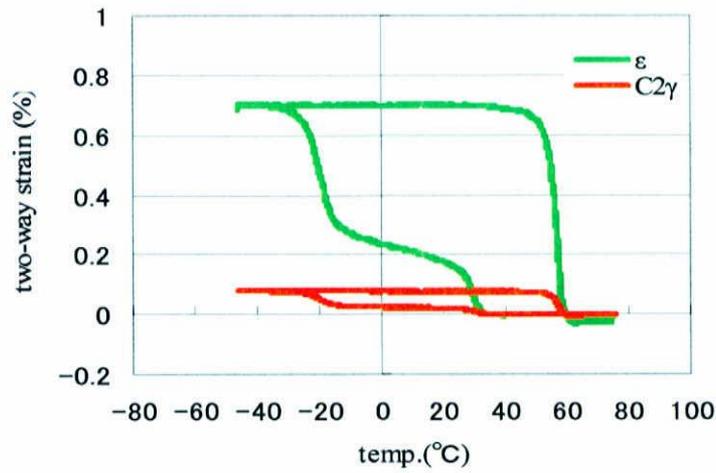
4.3.1 実験結果—トレーニング 2 “組み合わせ負荷；引張—ねじり”

ここでは、トレーニング 1 で単純引張トレーニングを受けた試験片 A, B, C に対して、種々の条件で単純ねじりトレーニングを与えた後、二方向挙動を観察した。トレーニング 1 と同様、形状記憶挙動を示す温度雰囲気 (20°C) において、表 4.1 (a) に示すように、トレーニング 1 で $\sigma=560\text{MPa}$ の引張トレーニングを受けた試験片 A には、 $C_1\tau=700\text{MPa}$ のねじりトレーニング、 $\sigma=700\text{MPa}$ の引張トレーニングを受けた試験片 B には、 $C_1\tau=560\text{MPa}$ のねじりトレーニング、 $\sigma=900\text{MPa}$ の引張トレーニングを受けた試験片 C には、 $C_1\tau=900\text{MPa}$ のねじりトレーニングを与えた。図 4.14~図 4.16 はそれらの試験結果である。(a), (b), (c) はそれぞれトレーニング 1 後の二方向挙動、トレーニングの応力—ひずみ曲線、トレーニング 2 後の二方向挙動を示している。

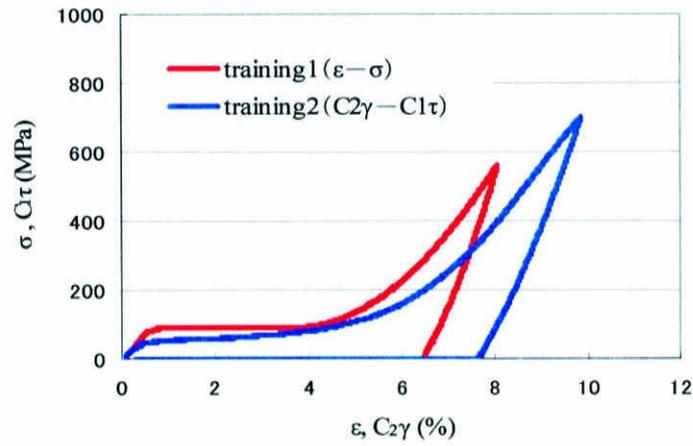
図 4.17 に単純引張トレーニングによる最大二方向ひずみの変化を示した。ここで ε_1 , $C_2\gamma_1$ はトレーニング 1 後における最大二方向ひずみ、 ε_2 , $C_2\gamma_2$ はトレーニング 2 後における最大二方向ひずみである。どの試験片においても、ねじりトレーニングを与えると、軸方向の二方向ひずみが減少し、ねじり方向の二方向ひずみが増加している。試験片 A は低応力の引張トレーニング後に中応力のねじりトレーニングを与えたため、後者の影響が大きく、それに対して試験片 B は中応力の引張トレーニング後に低応力のねじりトレーニングを与えたため、後者の影響が小さいと考えられる。試験片 C に関しては、軸方向、ねじり方向ともに、かなり大きな二方向ひずみが発現している。これほど大きな二方向ひずみが発現する二自由度の二方向挙動はこれまでに報告されていない。

次に、試験片 A, B の二方向挙動に関して、軸方向、ねじり方向ともに、冷却過程において、R 相変態と M (マルテンサイト) 相変態によるきれいな二段階変態が確認されたが、試験片 C に関しては M 相変態の一段階変態のみ確認された。

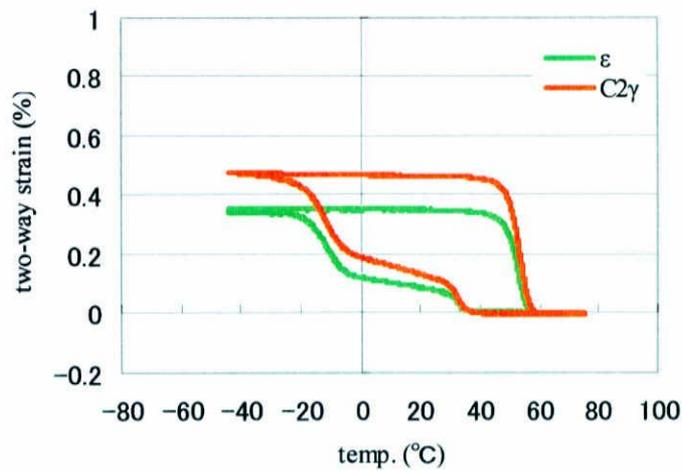
また、図 4.16 (b) から、試験片 C におけるトレーニング 1 とトレーニング 2 の応力—ひずみ曲線が大きくずれていることがわかる。



(a) トレーニング 1 後の二方向挙動

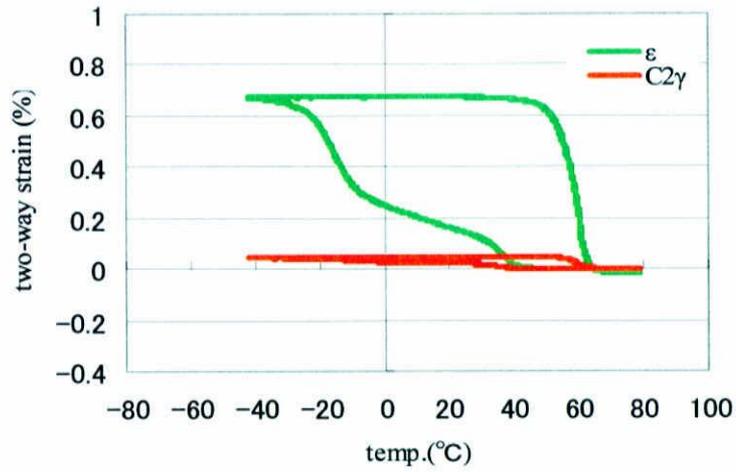


(b) トレーニングの σ - ϵ 曲線

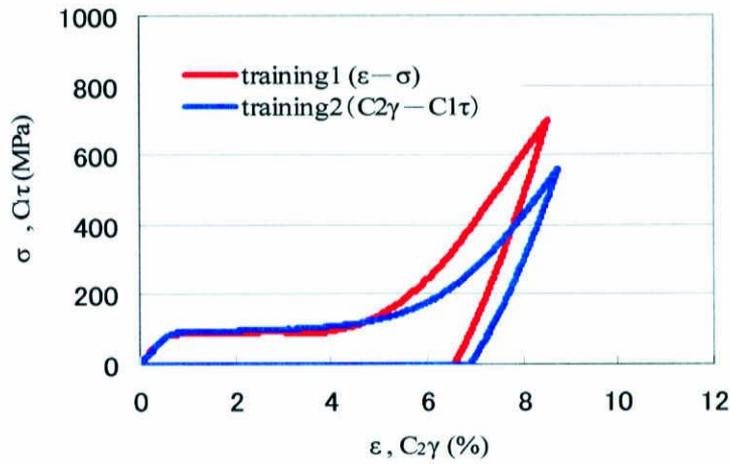


(c) トレーニング 2 後の二方向挙動

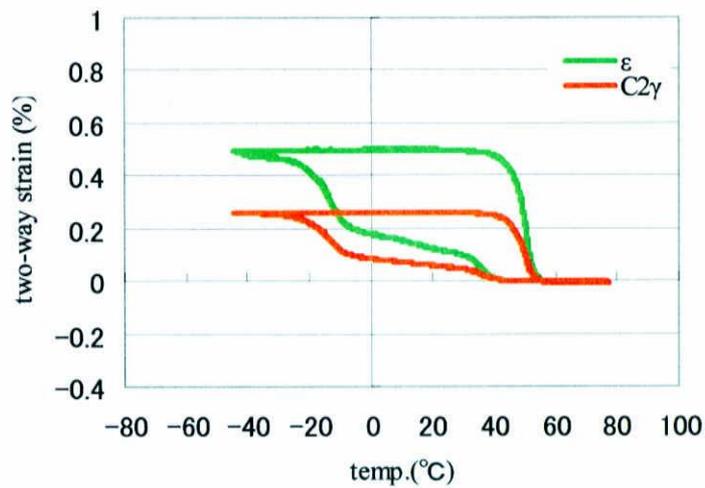
図 4.14 試験片 A—単純ねじりトレーニング ($C1\tau=700\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング 1 後の二方向挙動

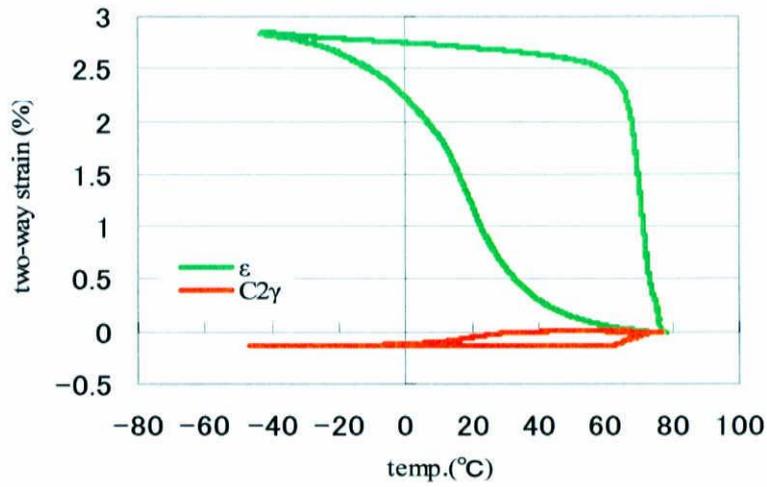


(b) トレーニングの $\sigma - \epsilon$ 曲線

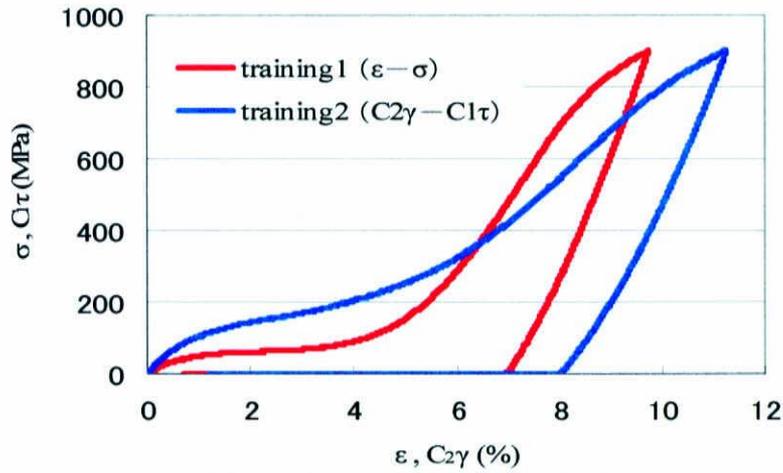


(c) トレーニング 2 後の二方向挙動

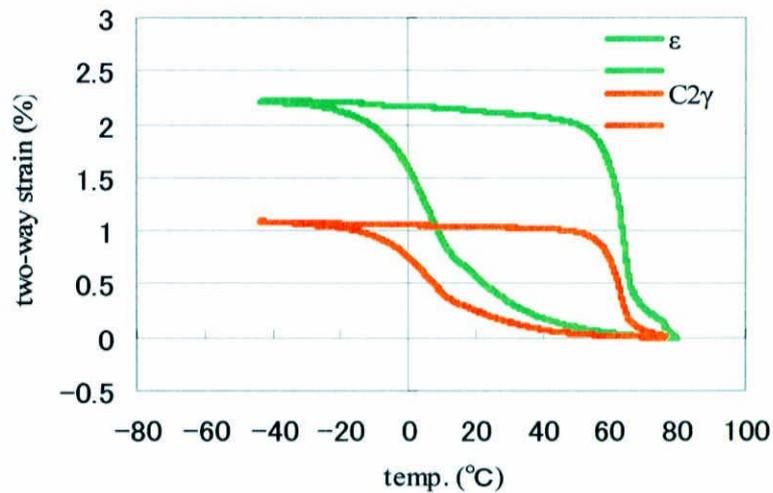
図 4.15 試験片 B—単純ねじりトレーニング ($C1\tau=560\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング 1 後の二方向挙動



(b) トレーニングの s-s 曲線



(c) トレーニング 2 後の二方向挙動

図 4.16 試験片 C-単純ねじりトレーニング ($C1\tau=900\text{MPa}$) による二方向挙動の変化

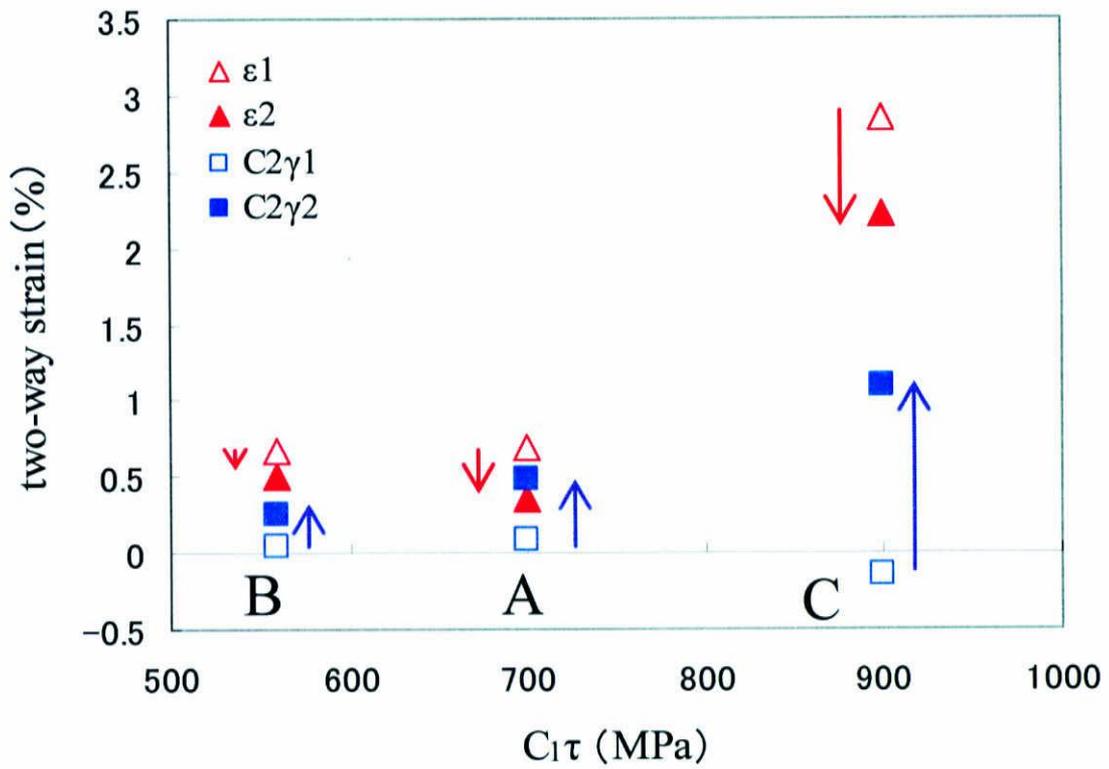


図 4.17 単純ねじりトレーニングによる最大二方向ひずみの変化

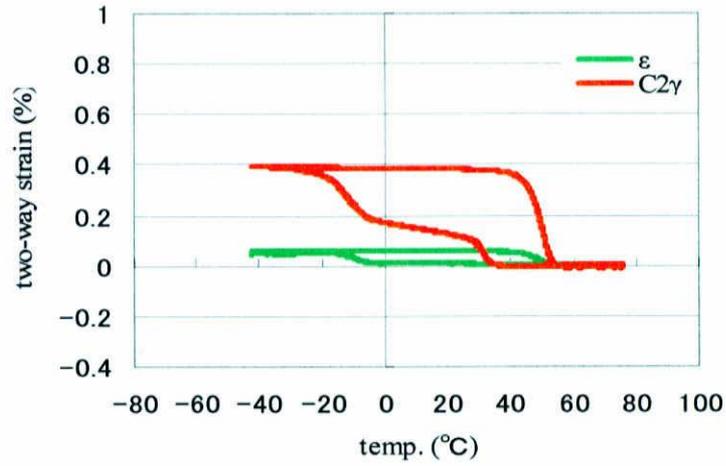
4.3.2 実験結果—トレーニング 2 “組み合わせ負荷；ねじり—引張”

次に、トレーニング 1 で単純ねじりトレーニングを受けた試験片 D, E, F に対して、種々の条件で単純引張トレーニングを与えた後、二方向挙動を観察した。形状記憶挙動を示す温度雰囲気 (20°C) において、表 4.1 (a) に示すように、トレーニング 1 で $C_{1\tau}=560\text{MPa}$ のねじりトレーニングを受けた試験片 D には、 $\sigma=700\text{MPa}$ の引張トレーニング、 $C_{1\tau}=700\text{MPa}$ のねじりトレーニングを受けた試験片 E には、 $\sigma=560\text{MPa}$ のねじりトレーニング、 $C_{1\tau}=900\text{MPa}$ のねじりトレーニングを受けた試験片 F には、 $\sigma=900\text{MPa}$ の引張トレーニングを与えた。図 4.18～図 4.20 はそれらの試験結果である。(a), (b), (c) はそれぞれトレーニング 1 後の二方向挙動、トレーニングの応力—ひずみ曲線、トレーニング 2 後の二方向挙動を示している。

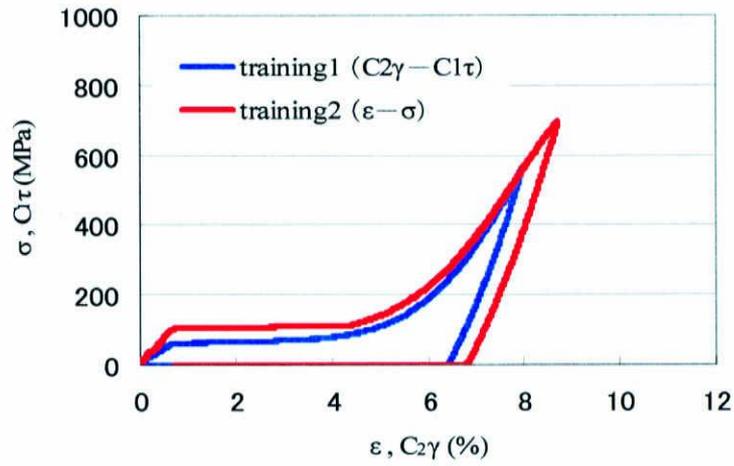
図 4.21 に単純引張トレーニングによる最大二方向ひずみの変化を示す。ここで $\varepsilon_1, C_2\gamma_1, \varepsilon_2, C_2\gamma_2$ は図 4.17 のそれと同じである。どの試験片においても、引張トレーニングを与えると、ねじり方向の二方向ひずみが減少し、軸方向の二方向ひずみが増加している。試験片 F に関してその傾向が最も大きいといえる。しかし、4.3.1 の結果とは異なり、試験片 D は低応力のねじりトレーニング後に中応力の引張トレーニングを与えたにも関わらず、中応力のねじりトレーニング後に低応力の引張トレーニングを与えた試験片 E の二方向挙動の変化と比べて大きな差は見られない。むしろ試験片 E に与えた低応力のねじりトレーニングの方が、試験片 D に与えた中応力のねじりトレーニングよりも与えた影響が大きいといえる。また、トレーニング 1 (ねじり負荷) によって与えられたねじり方向の二方向挙動が、トレーニング 2 (引張負荷) によってほぼ消滅している。

次に、試験片 D, E の二方向挙動に関しては、4.3.1 と同様で、軸方向、ねじり方向ともに、冷却過程において、R 相変態と M (マルテンサイト) 相変態によるきれいな二段階変態が確認されたが、試験片 F に関しては M 相変態の一段階変態のみ確認された。

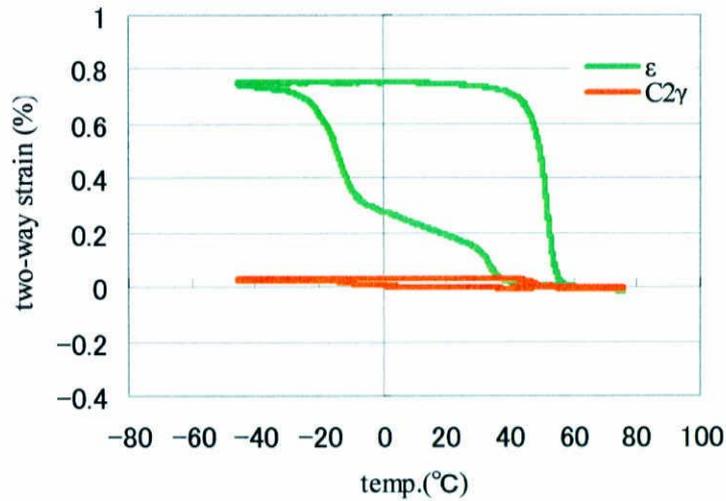
4.3.1 と 4.3.2 の実験結果より、トレーニングの履歴が二方向挙動に与える影響について確認できたが、それについては 4.3.3 で述べる。



(a) トレーニング 1 後の二方向挙動

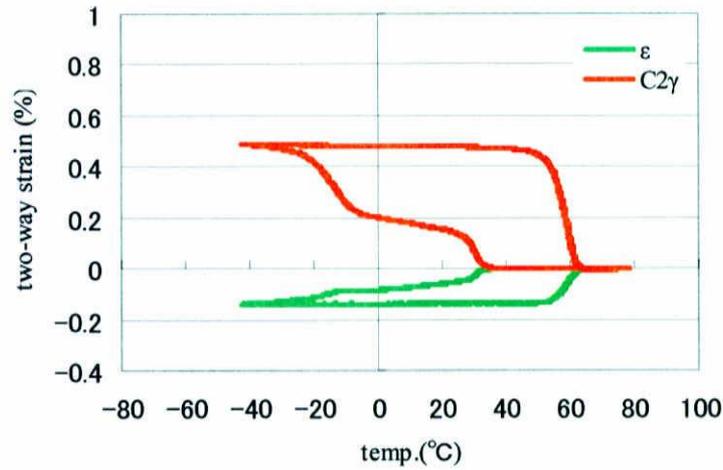


(b) トレーニングの s-s 曲線

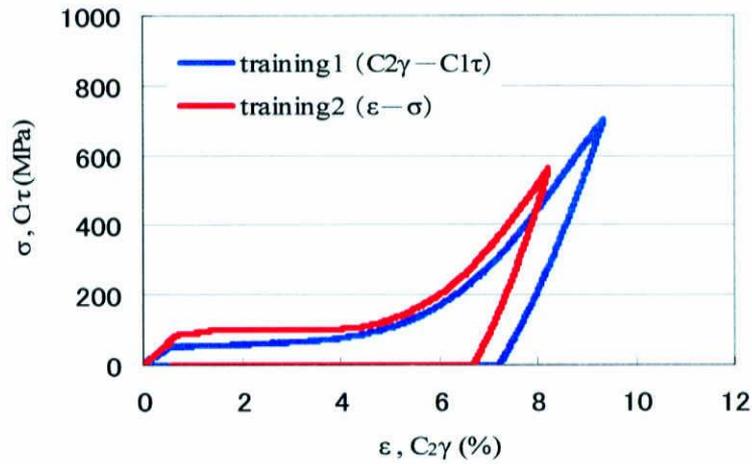


(c) トレーニング 2 後の二方向挙動

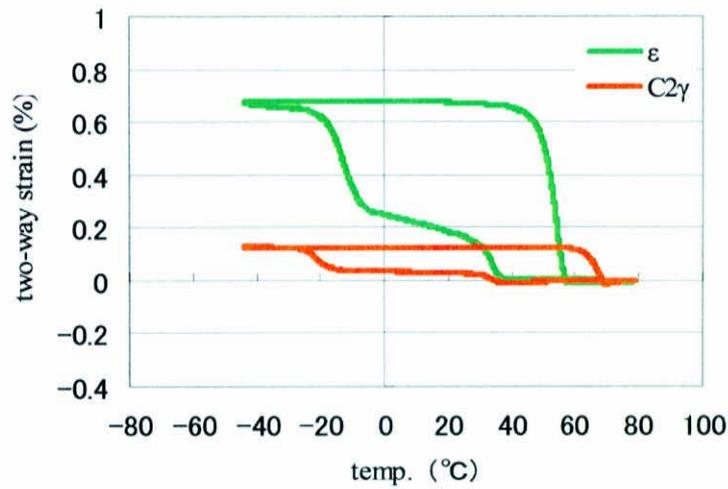
図 4.18 試験片 D-単純引張トレーニング ($\sigma=700\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング 1 後の二方向挙動

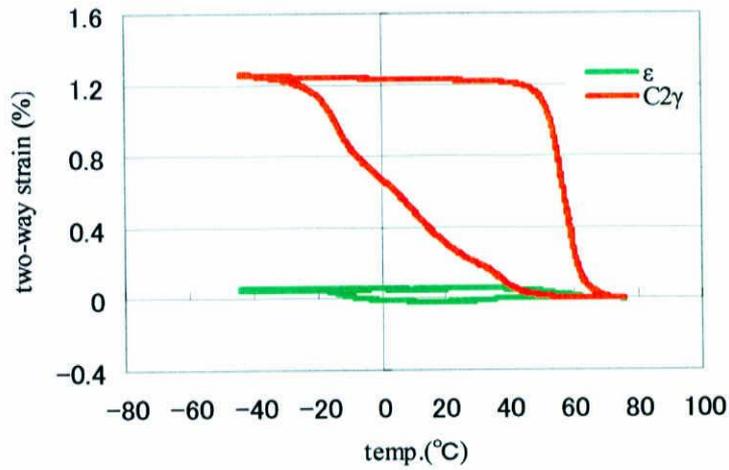


(b) トレーニングの σ - ϵ 曲線

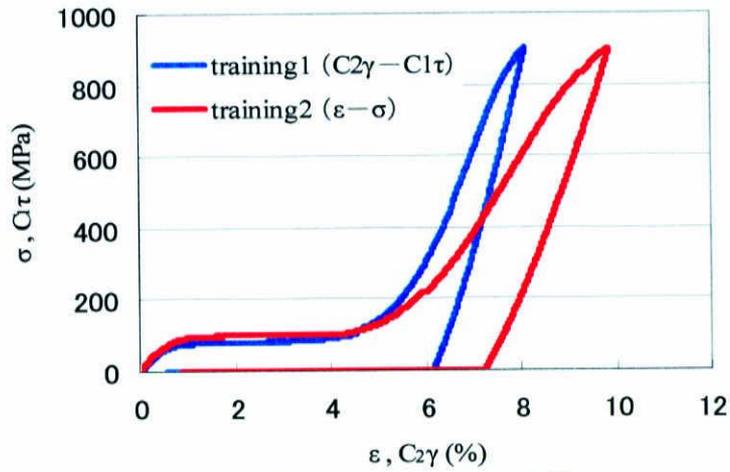


(c) トレーニング 2 後の二方向挙動

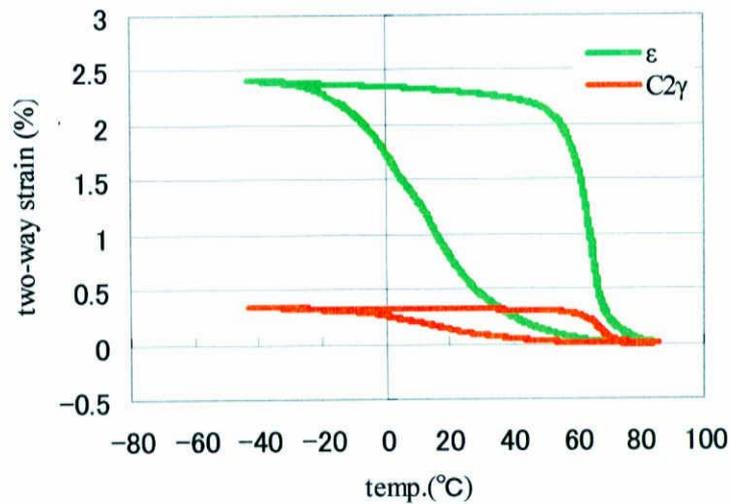
図 4.19 試験片 E-単純引張トレーニング ($\sigma=560\text{MPa}$) による二方向挙動の変化



(a) トレーニング 1 後の二方向挙動



(b) トレーニングの σ - ϵ 曲線



(c) トレーニング 2 後の二方向挙動

図 4.20 試験片 F-単純引張トレーニング ($\sigma=900\text{MPa}$) による二方向挙動の変化

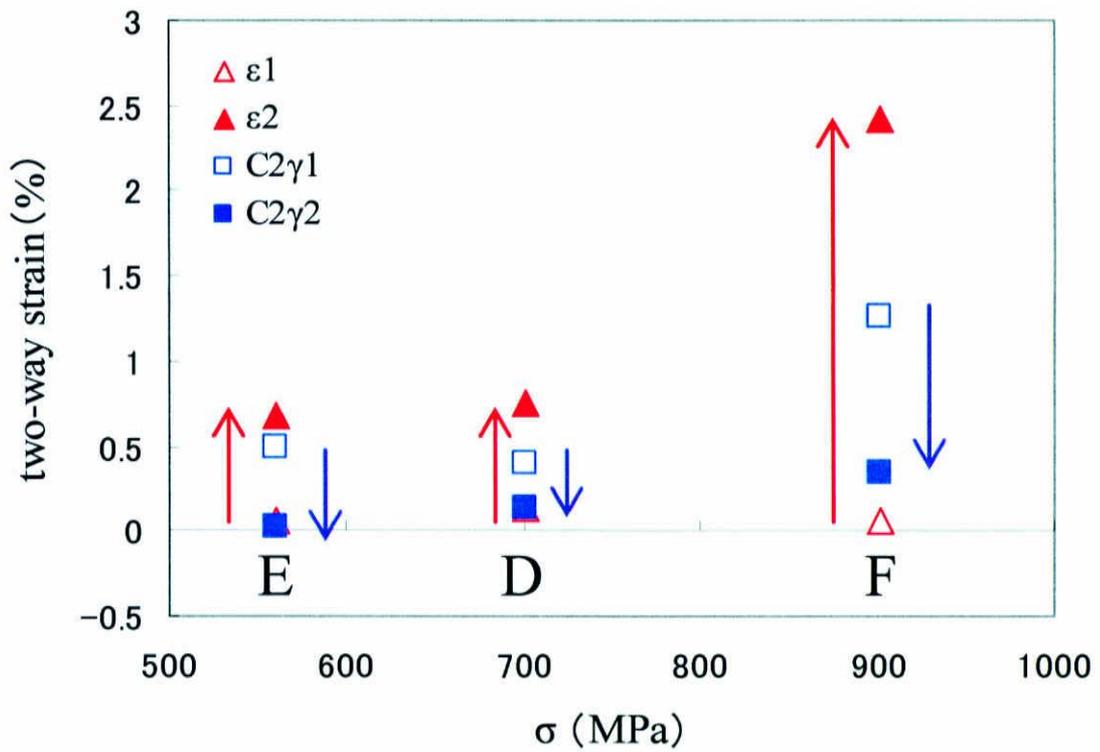


図 4.21 単純引張トレーニングによる最大二方向ひずみの変化

4.3.3 考察—トレーニング 2 “バージンでない試験片への単純負荷トレーニング”

まず、組み合わせ負荷トレーニングが二方向挙動に与える影響について考察する。図 4.17, 4.21 より、引張トレーニング後に、ねじりトレーニングを与えた試験片 A, B, C に関しては、最大負荷応力の増加に伴い、軸方向の二方向ひずみは減少し、ねじり方向の二方向ひずみは増加している。ねじりトレーニング後に引張トレーニングを与えた試験片 D, E, F に関しては、トレーニング後、ねじり方向の二方向ひずみは減少し、軸方向の二方向ひずみが増加した。しかし、試験片 E では低応力のねじりトレーニングを与え、試験片 F には中応力のねじりトレーニングを与えたにも関わらず、低応力トレーニングの方がトレーニング 1 で付与された二方向特性に大きな影響を与えている。この結果については 4.2.3 で考察したように、残留ひずみと二方向ひずみによって説明できる。図 4.22 に各々の試験片における種々のトレーニングによって発現した残留ひずみを示す。(a) は、試験片 A, B, C について、赤色のグラフがトレーニング 1 によって発現した軸方向の残留ひずみ、青色のグラフがトレーニング 2 によって発現したねじり方向の残留ひずみをあらわしており、(b) では試験片 D, E, F について、青色のグラフがトレーニング 1 で発現したねじり方向の残留ひずみ、赤色のグラフはトレーニング 2 によって発現した軸方向の残留ひずみをあらわしている。このように、試験片 E に与えた低応力トレーニングによって発現した軸方向の残留ひずみが 0.80%、試験片 D に与えた中応力トレーニングで発現した残留ひずみが 0.71%であった。つまり、低応力トレーニングの方が中応力トレーニングよりも、より大きな残留ひずみを発現させている。このことが、低応力トレーニングの方が中応力トレーニングより二方向挙動に大きな影響を与えた理由であると考えられる。次に、引張トレーニングを後に与えられた試験片 D, E, F では、トレーニング 1 で付与されたねじり方向の二方向挙動がほぼ消滅している。ここで、一般的に先に付与されたトレーニング効果は後から与えられたトレーニング効果によって弱められることが知られている。しかし、このように、同じ応力レベルの負荷にも関わらず、後からねじりトレーニングを与えるより、後から引張トレーニングを与えた方が、トレーニング効果が強いのは、図 4.22 (b) に示すように後から与えた引張トレーニングの方が先に与えたねじりトレーニングに比べ、かなり大きな残留ひずみを発現させたことが原因であると考えられる。

また、図 4.16 (b) より、試験片 C におけるトレーニング 1 とトレーニング 2 の応力—ひずみ曲線が大きくずれていることに関しては、トレーニング 1 の引張トレーニングによって発現した大きな残留ひずみに関係していると考えられる。残留ひずみの原因は転位などの不可逆欠陥や残留マルテンサイトであり、それらがマルテンサイト相の再配列を妨げたことにより、図 4.16 (b) に示すような応力—ひずみ関係になったと考察できる。

最後に、トレーニングの履歴が二方向挙動に与える影響について考察する。図 4.23

は各々の試験片におけるバージンでの二方向挙動と、トレーニング 2 後の最終的な二方向挙動を示している。試験片 A と E, B と D, C と F をそれぞれ比較することによりトレーニングの履歴が二方向挙動に与える影響について考察できる (表 4.1 (b) 参照)。まず試験片 A と E について、試験片 A は軸方向とねじり方向ともにバランスのとれた二自由度の二方向挙動が発現している。しかし、試験片 E は軸方向において試験片 A におけるそれよりも大きな二方向ひずみが発現しているが、ねじり方向に関してはほぼ二方向挙動がみられない。つまり、試験片 E はねじりのトレーニング効果が優先されると予測される低応力の引張トレーニング後に、中応力のねじりトレーニングを与えると組み合わせトレーニングを与えたにも関わらず、一自由度 (軸方向) の二方向挙動となった。次に、試験片 B と D についても同様で、試験片 B では二自由度の二方向挙動がみられるが、試験片 D では一自由度の二方向挙動となっている。試験片 C と F については、まず試験片 C はねじり方向の最大二方向ひずみが軸方向のその半分程度ではあるが、かなり大きな二自由度の二方向挙動がみられる。しかし、試験片 F では、ねじり方向に若干の二方向挙動がみられたが、これに関してもほぼ一自由度の二方向挙動であるといえる。この試験片 C と F に関しては、それぞれ同じ応力レベルの引張とねじりの組み合わせトレーニングを与えたが、トレーニング後のそれぞれの二方向挙動には大きな違いがみられた。また、引張トレーニングを後から与えた試験片 D, E, F については、引張とねじりの組み合わせトレーニングを与えたにも関わらず、ほぼ一自由度の二方向挙動となった。

以上の結果より、二自由度の二方向効果に関してトレーニングの履歴依存性が確認された。このことから、二自由度の二方向効果を利用したアクチュエータの設計の際には、トレーニングの順序が非常に重要であるといえる。

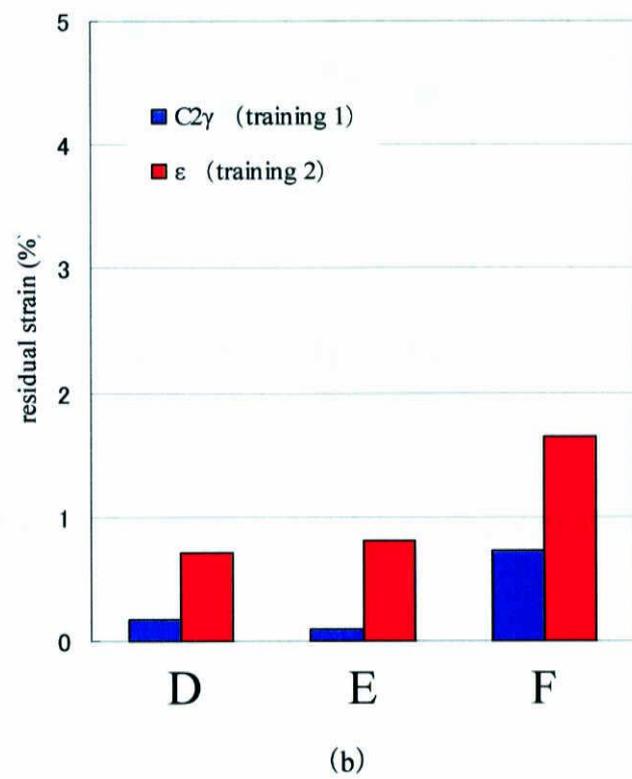
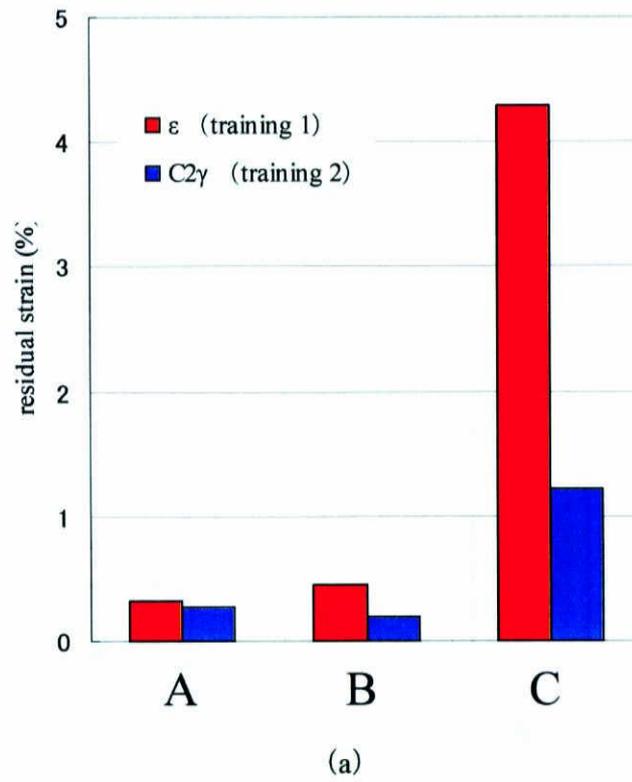


図 4.22 種々のトレーニングによって各々の試験片に発現した残留ひずみ

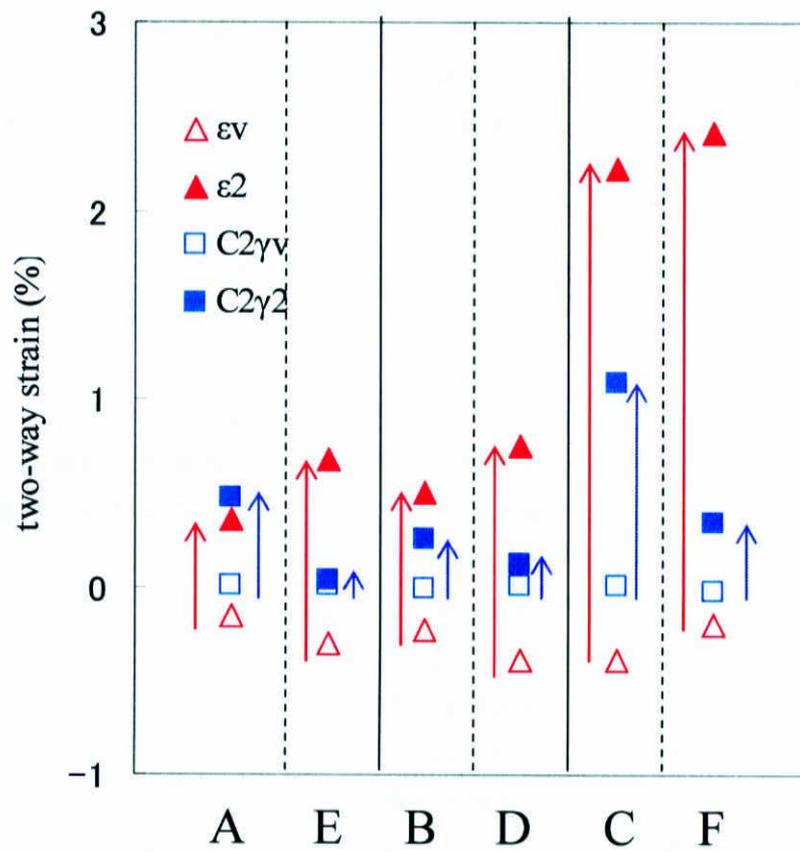


図 4.23 各々の試験片における最大二方向ひずみの変化

5.結言

本研究における種々の負荷条件による単純負荷トレーニングによって以下のことが確認された。

- バージンの試験片に対して，単純負荷トレーニングを与えることにより，負荷方向において一自由度の二方向効果を付与することができる。
- トレーニングによって残留ひずみを発現させることで，より大きな二方向効果を付与することができる。
- 同じ応力レベルの単純引張トレーニングと単純ねじりトレーニングでは単純引張トレーニングの方がより大きな二方向効果を与えるのに効果的である。
- 組み合わせトレーニングによって，二自由度の二方向効果を付与することができる。
- 先に付与されたトレーニング効果は後から与えられたトレーニング効果によって弱められる。
- 組み合わせトレーニングでは，トレーニングの履歴がトレーニング後の二方向挙動に大きな影響を与える。

本研究では，種々の負荷条件下におけるトレーニングを力学的負荷の基本となる単純引張負荷と単純ねじり負荷に的を絞った。この基本的なトレーニングによって得られる二方向挙動は，そのメカニズムを解明する上で非常に重要なものとなる。ここでは，適当な係数 C_1 , C_2 を用いて引張とねじりを等価に扱ったが，引張負荷とねじり負荷では，材料の受ける応力状態が本質的に異なるため，それぞれの二方向挙動には違いがみられた。TiNi 形状記憶合金は多結晶金属であり，二方向挙動のメカニズムは複雑であると考えられるが，引張負荷とねじり負荷の組み合わせ負荷ともなれば，さらに，その複雑さは増すと考えられる。本実験のデータだけでは，メカニズムを解明するまでに至らないため，引張負荷，ねじり負荷を基本とする種々の負荷条件下における二方向挙動について，さらなる系統的な実験を進める必要があるといえる。また，残留ひずみが二方向挙動における支配パラメータであるという可能性をより深める実験結果が得られたことから，これまでの研究では，力学的評価が主であったが，微視的観察などの金属学的評価も並進させていく必要があるといえる。この残留ひずみと二方向ひずみの関係性を解明することができれば，残留ひずみによって二方向ひずみを制御できるものと考えられる。

また，本研究から得られたトレーニングの履歴依存性と残留ひずみと二方向ひずみの関係は，二自由度の二方向効果を利用したアクチュエータの設計において，非常に重要なデータとなった。さらに，それらの知見により，二方向挙動のメカニズムの解明に向けて着実に前進したといえる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始直接御指導いただきました徳田正孝教授、稲葉忠司助教授に深く感謝いたします。また、側面から数多くの助言をいただきました、八木一夫教授、中村昇二技官に深く感謝いたします。

さらに、本論文を製作するにあたりご協力いただいた生体システム工学研究室の博士後期課程および前期課程、ならびに学部4年生の皆様に深く御礼申し上げます。特に、実験を遂行するにあたり協力していただいた博士後期課程3年の吉川高正さん、博士前期課程2年の上田典幸君、1年の浅井孝宜君、学部4年生の野口尚輝君、北本将史君に心から感謝いたします。

参考文献

- (1) 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, 養賢堂, 1993
- (2) 船久保熙康編, 形状記憶合金, 産業図書, 1984
- (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, CMC, 2001
- (4) P.Thamburaja, L.Anand, Superelastic behavior in tension-torsion of an initially-textured Ti-Ni shape-memory alloy, *International Journal of Plasticity* 18 (2002), pp.1607-1617
- (5) 林萍華, 戸伏壽昭, 田中喜久昭, 服部丈晴, 内野敬一, TiNi 形状記憶合金のマルテンサイト変態と R 相変態に伴う変形特性, 日本機械学会論文集(A 編), 60 巻 569 号, 1994
- (6) 戸伏壽昭, 山田真也, 蜂須賀孝, 田中喜久昭, TiNi 形状記憶合金の変態擬弾性特性に対するひずみ速度の影響, 日本機械学会論文集(A 編), 64 巻 621 号, 1998
- (7) R Tomlinson and W A Bullough, *Smart Materials and Structures*, Proceedings of the 4th European Conference on Smart Structures and Materials in conjunction with the 2nd International Conference on Micromechanics, Intelligent Materials and Robotics, Harrogate, UK, 6-8 July 1998
- (8) Craig A. Rogers, *Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues*, Technomic Publishing Company, Inc., 1989
- (9) (財)大阪科学技術センター, 形状記憶合金用途開発委員会編, 形状記憶合金とその使い方, 日刊工業新聞社, 1987
- (10) Jeff Perkins and Darel Hodgson, *The Two-Way Shape Memory Effect*, Engineering aspects of shape memory alloy, Butterworth-Heinemann, 1990
- (11) 文献 (3) の pp.7-29
- (12) 文献 (3) の pp.30-43
- (13) P.Sittner, M.Takakura, M.Tokuda, *Shape Memory Alloy under Combined Forces*, *Material Science and Engineering*, Vol.A234-236, pp.216-219, 1997
- (14) 徳田正孝, P.Sittner, 複合負荷条件下の形状記憶合金—新たな機能性を求めて (その 1), *機械の研究*, 第 49 巻 4 号, pp.216-219, 1997
- (15) 徳田正孝, P.Sittner, 複合負荷条件下の形状記憶合金—新たな機能性を求めて (その 2), *機械の研究*, 第 49 巻 5 号, pp.563-569, 1997
- (16) 徳田正孝, P.Sittner, 複合負荷条件下の形状記憶合金—新たな機能性を求めて (その 3), *機械の研究*, 第 49 巻 6 号, pp.660-666, 1997
- (17) 徳田正孝, P.Sittner, 複合負荷条件下の形状記憶合金—新たな機能性を求めて (その 4), *機械の研究*, 第 49 巻 7 号, pp.762-767, 1997
- (18) 徳田正孝, P.Sittner, 複合負荷条件下の形状記憶合金—新たな機能性を求めて

- (その5), 機械の研究, 第49巻8号, pp.856-862, 1997
- (19) 徳田正孝, P.Sittner, 複合負荷条件下の形状記憶合金—新たな機能性を求めて
(その6), 機械の研究, 第49巻9号, pp.941-946, 1997
- (20) 文献(5)の pp.1-24
- (21) 文献(4)の pp.1-7
- (22) 文献(5)の pp.24-52
- (23) 文献(4)の pp.7-10
- (24) 文献(5)の pp.83 - 94
- (25) F.C.Lovey and V.Torra, Shape memory in Cu-based alloys: phenomenological behavior at the mesoscale level and interaction of martensitic transformation with structural defects in Cu-Zn-Al, *Progress in Materials Science* 44, pp.227-289, 1999
- (26) H.Kato, R.Stalmans and J.Van Humbeeck, Two-Way Shape Memory Effect Induced by Tension Training in Cu-13.4Al-4.0Ni (mass%) Alloy Single Crystals, *materials Transactions, JIM*, Vol.39, No.3, pp.378-386, 1998
- (27) J.X.Zhang, Y.X.Liu, W.Cai, L.C.Zhao, The mechanisms of two way-shape memory alloy effect in a Cu-Zn-Al alloy, *Materials Letters* 33, pp.211-214, 1997
- (28) Chen-Ti Hu and Tser-Min Chen, TWO-WAY SHAPE MEMORY EFFECT ON A Cu-Zn-Al SMA WITH CONSTRAINT AGING TREATMENT, *Displacive Phase Transformations and Their Applications in Materials Engineering*, pp.407-412, 1996
- (29) E.Cingolani, A.Yawny and M.Ahlers, The Two Way Memory Effect in Stabilized and Pseudoelastically Trained Cu-Zu-Al Single Crystals, *Journal de Physique IV, Colloque C8-865*, 1995
- (30) A.Amengual, E.Cesari, and J.Pons, Characteristics of the Two-Way Memory Efect Induced by Thermomechanical Cycling in Cu-Zn-Al Single Crystals, *Journal de Physique IV, Colloque C8-871*, 1995
- (31) Q.A.Zhang, F.X.Yin, R.X.Waug, J.X.Zhang and N.J.Gu, Effects of Training Temperature on the Two Way Memory Effect in Cu-Zn-Al alloy, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol.31, No.5, pp.511-514, 1994
- (32) R.Stalmans, J.Van Humbeeck and L.Delaey, Thermomechanical cycling, Two Way Memory and Concomitant Effects in Cu-Zn-Al Alloys, *Acta metal. mater.* Vol.40, No.3, pp.501-511, 1992
- (33) R.Stalmans, J.Van Humbeeck and L.Delaey, TRAINING AND THE TWO WAY MEMORY EFFECT IN CUPPER BASED SHAPE MEMORY ALLOYS, *Journal de Physique IV, Colloque C4-403*, 1991
- (34) 加藤智広, 三重大学平成16年度修士論文(2005) 53-56
- (35) 加藤智広, 三重大学平成16年度修士論文(2005) 41-47