

Fe-Mn-Si 系形状記憶合金の特性と応用

淡路マテリア株式会社 開発グループ

(1) はじめに

Fe-Mn-Si 系形状記憶合金は、鉄をベースとする形状記憶合金 (SMA) の中で、実用段階にある唯一の素材として知られている。基本成分はベースとなる Fe と 32% の Mn、6% の Si からなるが、耐食性の面から Cr や Ni を加えた系も開発されている (表 1)。この内実用化の検討のほとんどは、Fe-28%Mn-6%Si-5%Cr 系を用いて進められている。

表 1. Fe-Mn-Si 系 SMA の代表的組成 (mass%)

Fe-32Mn-6Si
Fe-28Mn-6Si-5Cr
Fe-20Mn-5Si-8Cr-5Ni
Fe-16Mn-5Si-12Cr-5Ni

この合金は、素材の開発¹⁾ から応用までが主として日本で行われてきたのが大きな特徴である。組成的に高価な元素を含まない上、鉄鋼やステンレス鋼の大量生産設備を使って生産できる部分も多いので、SMA としては安価で量産向きの素材といえることができる。ただしこれらの大量生産設備は、それに見合う生産規模が確保された場合に活用が可能となるのであって、用途が限定されて少量生産となる初期段階の素材コストが、通常の鉄鋼やステンレス鋼並になるというわけではない。

形状回復ひずみは Ti-Ni 合金には及ばないものの、最大で約 4% を得ることができる。また形状回復の前後で素材の強度にほとんど差がないために、バイアスパネを利用した二方向動作は期待できない。さらに形状回復させるための温度も Ti-Ni 合金より高温が必要で、しかも形状回復は約 90°C から 350°C までの広い温度範囲に渡ってじわじわと進行する。以上のような特徴を活かせる分野として、比較的大型の接続部材への応用が重点的に検討されている。

(2) 形状記憶のメカニズム

Fe-Mn-Si 系 SMA の降伏応力 (0.2% 耐力) の温度依存性は図 1²⁾ のような特徴的な形を示す。室温から温度を上げて行くと、一定の温度までの範囲では、温度が上がるほど降伏応力が高くなる領域がある。そこを越えて始めて通常の金属と同様に、温度が上がると降伏応力が低下するようになる。すべり変形で決まる本来の降伏応力は、図 1 の高温側からの延長で示される点線のように変化しているのだが、低温側

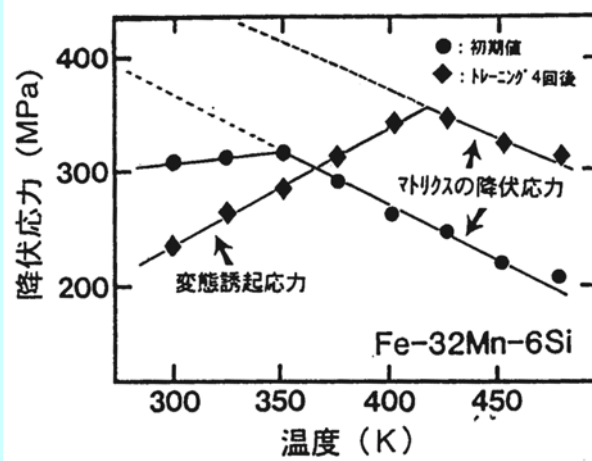


図 1. 降伏応力の温度依存性²⁾

では応力誘起マルテンサイト変態が起こるため、本来の値よりは低い応力で変形が始まる

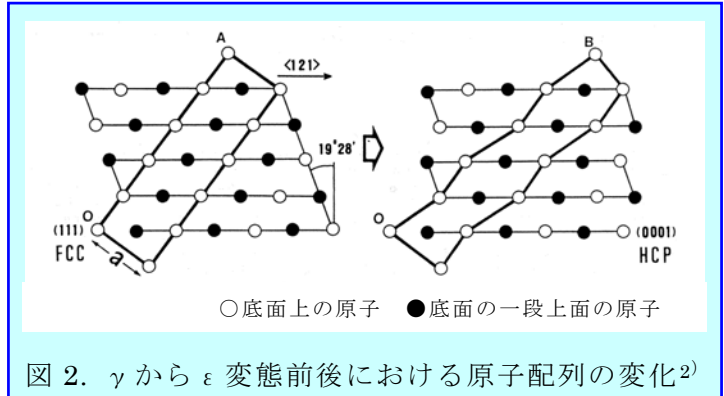
ことを意味している。

母相はオーステナイト (γ) であるが、上述の応力誘起変態では稠密六方晶のマルテンサイト (ϵ) が生成する。もちろん通常の金属と同様にすべり変形も起こるのだが、変形の初期段階では応力誘起マルテンサイト変態がすべりより優先する。面心立方晶の γ から稠密六方晶の ϵ への変態は体積変化をほとんど伴わず、**図 2** に示すように結晶の特定の方向に対して最大で約 20% のひずみを生じる（応力誘起変態後の ϵ の OB の長さが、対応する変態前の γ の OA に対して約 20% 伸びている²⁾）。

したがって変形を適当な範囲に留めれば、すべりは起こさせずに応力誘起マルテンサイト変態のみで素材の形状に変化を与えることができる。変形をこのような範囲に留めた上で、次に ϵ 相が不安定になる温度に加熱すると、 ϵ の生成時に発生したひずみを取り返しながらか γ への逆変態が進む。この逆変態によって変形前の形状に復元するのが、Fe-Mn-Si 系 SMA の形状記憶効果²⁾ である。

前記の工程で最初に付与する変形の量を増していくと、応力誘起変態とすべりが同時に起こるようになる。すべりの比率が少ない範囲では、応力誘起変態量が増えた分だけ形状回復ひずみが増加するが、形状回復率（事前に付加したひずみに対する形状回復ひずみの比率）は小さくなる。

一般的には、多少のすべり変形も起こる範囲の 4~8% 程度のひずみを与え、付与したひずみの半分程度を形状回復ひずみとして取り出す形で使用されている。



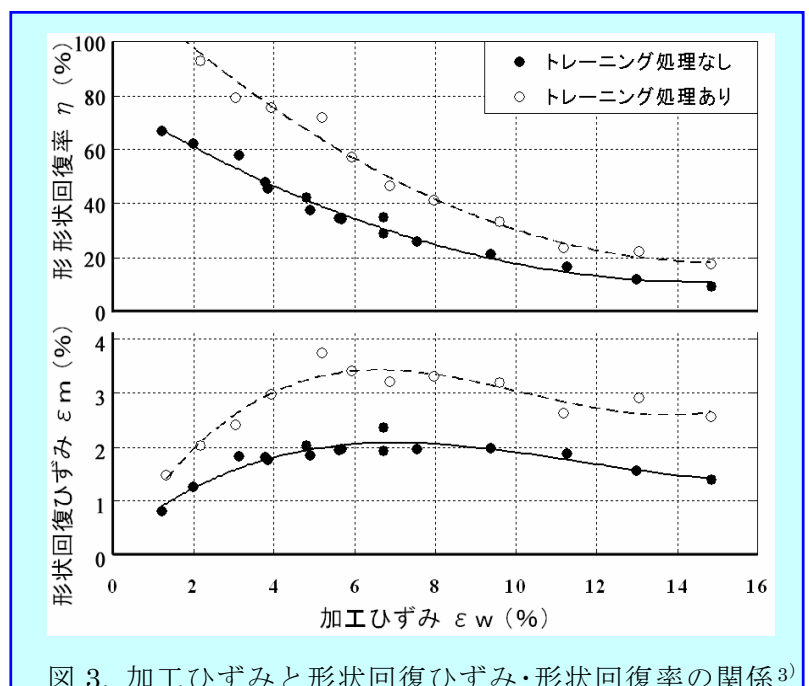
(3) 形状記憶特性

①形状回復ひずみ

SMA を活用する上では、形状回復ひずみと形状回復応力が問題になる。そこで Fe-Mn-Si 系 SMA の形状記憶効果を、ひずみと応力に分けて説明する。

まず形状回復ひずみは、付与するひずみの量とトレーニング処理の有無によって変化する。

図 3 はこれらの関係を引張変形で調べた結果³⁾ である。ここでトレーニングというのは一定量



のひずみの付加と適当な温度への加熱を単位として1回以上繰り返す処理²⁾である。図3でトレーニング有りとしたのはこのトレーニング処理を一度だけ施したものである。一度だけのトレーニングでもかなり大きな効果が得られるが、この効果は次第に飽和するので、あまり多くの回数を繰り返して行うことは奨められない。

ひずみを付与した後の加熱によって得られる形状回復ひずみは、事前に付与したひずみ(図では加工ひずみ)が5から8%付近で最大になり、それ以上の大きなひずみを付与しても逆に小さくなる。一方形状回復率の数字から、変形前の状態に完全に復元させるにはトレーニング処理が不可欠で、かつ加工ひずみの極く小さい領域(2%以下)だけに限定されることがわかる。

②形状回復応力

Fe-Mn-Si系SMAは、一般的には接続用部材として利用されるのが普通である。接続用部材では形状記憶効果をひずみではなく、主として応力の形で利用する。例えば素材にまず引張変形を付与し、熱を加えると長さが収縮するように形状記憶処理(後述)をする。次に素材が収縮できないように両端を拘束してから熱を加えると、ひずみが生じない代わりに両端の固定部には応力が発生する。形状回復過程で発生するこの応力を測定した結果が図4である。

実線は一度だけトレーニングした後⁴⁾、また点線はトレーニング無しの場合である。どちらも類似の挙動を示すので、ここではトレーニング材を例として説明する。

まず室温(a点)から加熱を始めると、50℃付

近(トレーニング無しでは約100℃)から引張応力が発生し300℃を越えるまでの間で徐々に増加する。この昇温過程では熱膨張分は両端の固定部を押し広げる方向に働くから、ここに表示されている引張応力は純粋な形状回復応力ではなく、形状回復による収縮力が熱膨張に打ち勝った結果と考えることができる。

約330℃(b₂点)まで加熱して応力が飽和したところから冷却すると、応力は更に上昇する。この応力上昇は、冷却過程では熱膨張が収縮に転じ、両固定端を引き寄せようとする力によって発生したものである。しかし応力はC₂点で最大値を示した後は低下して、室温まで冷えた状態では、d₂点の応力が残留する。これが室温で接続部材として利用する際

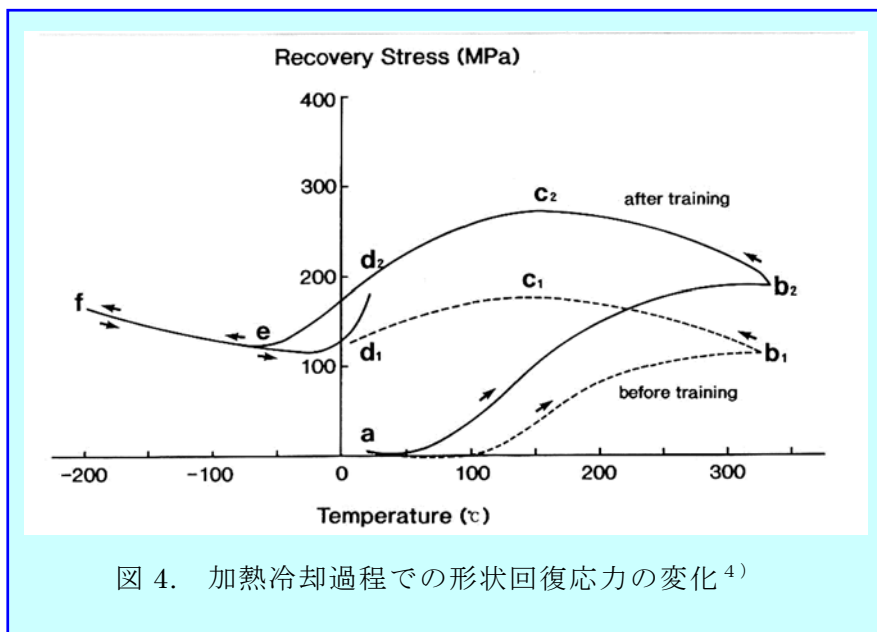


図4. 加熱冷却過程での形状回復応力の変化⁴⁾

に期待できるFe-Mn-Si系SMAの形状回復応力に相当する。

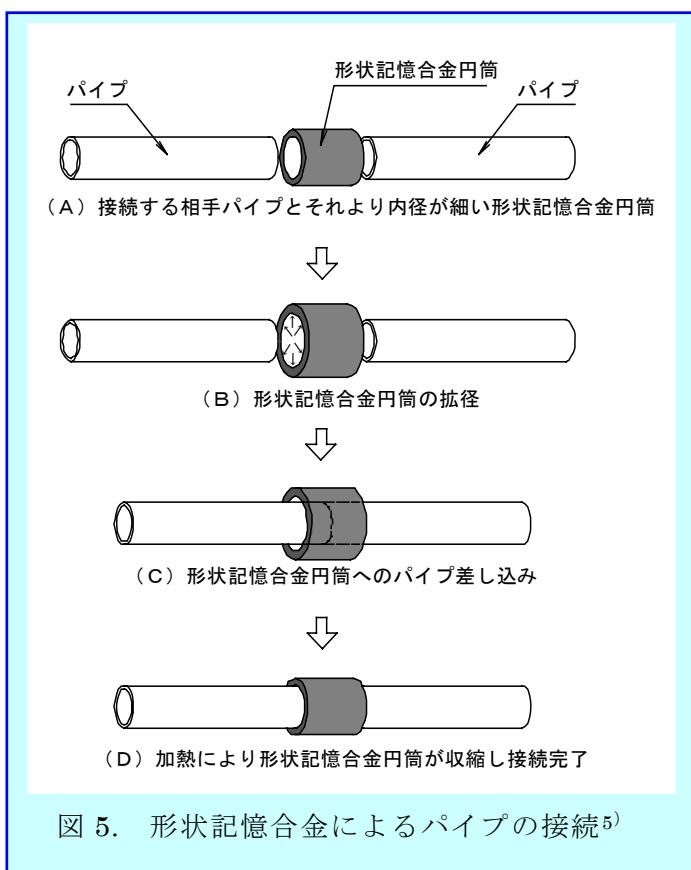
ところで冷却過程での熱収縮は連続的に起こるにも係わらず、 C_2 点で最大値を示した後に応力が減少するのは次の理由による。 C_2 点の温度は、**図 1**で応力誘起マルテンサイト変態が起こるとした温度範囲の上限に対応している。したがってこの温度以下では、一定以上の応力が加われば再び応力誘起マルテンサイト変態が起こり得る状態にある。すなわち冷却が進んで C_2 点以下の温度に達すると、その時まで素材に蓄積された応力が応力誘起マルテンサイト変態を促し、この変態が内部の応力を緩和させたものと考えられる。

図 4 から室温付近で利用できる形状回復応力は、トレーニング材では約 200 MPa、トレーニング無しでは 130 MPa 程度であることがわかる。但しこの数字は形状回復過程でのひずみの発生をまったく許さずに、最も効率良く形状回復応力だけを取り出した場合に相当する。

実際には、応力を取り出す前の段階でひずみの発生を完全に防止することは困難である。一般の接続の工程ではある程度のひずみが必ず伴うから、接続のために使える応力は前記の値より低めになる。パイプ用継手での応用 (**図 5⁵⁾**) であれば次のようになる。すなわちSMAのパイプ用継手は、接続しようとするパイプの外径よりもやや小さな内径をもったリング状に加工したものが使われる (**図 5A**)。このリングの内径を、パイプが差し込める大きさまで室温で押し広げたものがSMAパイプ用継手である (**図 5B**)。この両端にパイプを挿入 (**図 5C**) してからSMAパイプ用継手部分を熱すると、形状回復によって内径が元の細い状態に向かって収縮し、挿入されているパイプが接続される (**図 5D**)。

この時、**図 5B**の段階でパイプの外径とSMA継手内径との間に一定の隙間が確保されていないと、継手の中にパイプを差し込むことができない。逆に隙間を広く取りすぎれば加熱で継手が収縮しても十分なグリップ力を示せなくなるから、隙間の大きさを適正に設定することは極めて重要である。

この隙間は、SMA製の継手が形状回復で収縮してパイプの外面に接触するまでの間に、自由に収縮する距離に相当する。接続部に十分なグリップ力を持たせるためにはなるべく隙間を狭くして、少しだけ継手の内径が収縮したらすぐにパイプ外径に接触して形状回復



応力が立ち上がる条件を満足させることが必要である。

以上述べた形状記憶効果を、応力ひずみ線図上に示したのが図 6 である。

SMA として利用するには、先ず図の「O→a→b」の経路で一定の加工ひずみを付加する。その後を除荷して b の状態にある素材にそのまま熱を加えれば、「b→e」の大きさの形状回復ひずみ (2.5~4%) が得られる。一方、b の状態で形状回復の起ころうとする方向に障害物を置き、「b→e」へのひずみが発生しないようにして熱を加えると、「b→b'」の大きさの形状回復応力 (130~200 MPa) が得られる。障害物を b でなく c もしくは d のように b から離していくと、形状回復は「b→c→c'」あるいは「b→d→d'」のように、ひずみと応力を組み合わせたそれぞれの経路を経ることになる。ひずみを多く消費すればそれだけ取り出し得る応力は小さくなる。

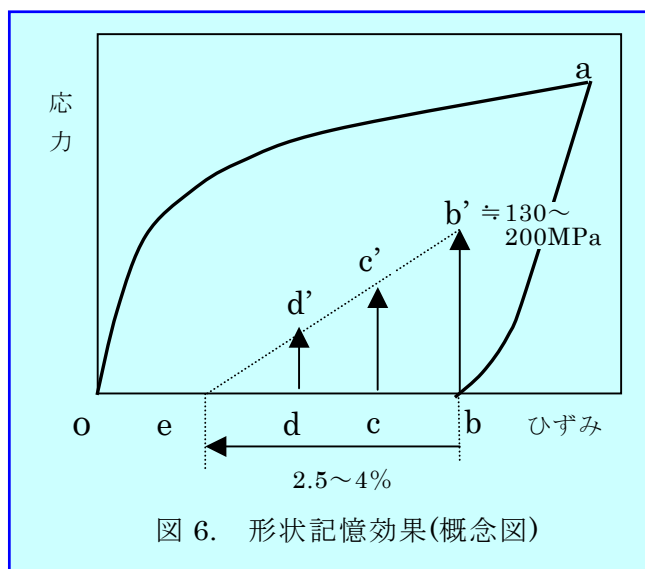


図 6. 形状記憶効果(概念図)

「b→e」へのひずみが発生しないようにして熱を加えると、「b→b'」の大きさの形状回復応力 (130~200 MPa) が得られる。障害物を b でなく c もしくは d のように b から離していくと、形状回復は「b→c→c'」あるいは「b→d→d'」のように、ひずみと応力を組み合わせたそれぞれの経路を経ることになる。ひずみを多く消費すればそれだけ取り出し得る応力は小さくなる。

(4) その他の基本特性

Fe-Mn-Si系SMAは大型構造部材の一部として利用されることが多いので、形状記憶特性以外に一般鋼材に要求される基本的な特性も重要である。熱間加工後に溶体化熱処理したままの状態の物理的特性を表 2⁶⁾ に示す。耐力や引張強さの値、並びに応力ひずみ曲線の形状などの多くの特性は、SUS304 ステンレスに類似している。

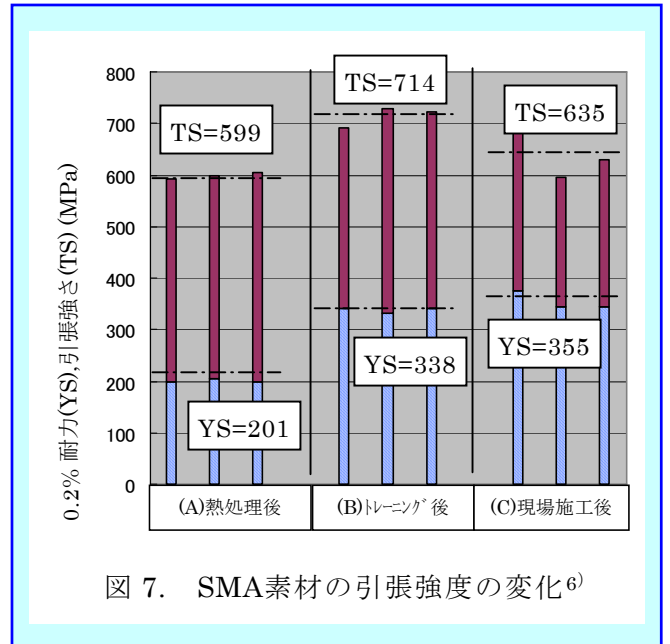
但しSMAを使用する場合には、ひずみを付与するための変形が必ず行われる。特にトレーニング処理を実施すると、ひずみ付与の変形は2度以上繰り返して行われる。これらの処理は当然ながら素材の基本特性に影響

表 2. Fe-Mn-Si系SMAの基本特性⁶⁾

項目	単位	測定値
耐力	MPa	200~300
引張強さ	MPa	680~1,000
伸び	%	16~30
硬さ (Hv)		190~220
密度 (25℃)	g/cm ³	7.2~7.5(7.454)
融点	℃	1,320~1,350
熱膨張率(0~500℃)	℃ ⁻¹	16.5×10 ⁻⁶
熱伝導率	cal/cm·deg·sec	0.02
比熱	cal/g·deg	0.13
比抵抗	Ω·cm	100~130×10 ⁻⁶
縦弾性係数	GPa	170.0
横弾性係数	GPa	65.0
ポアソン比		0.359
Ms 変態点	℃	-20~25
Af 変態点	℃	130~185
形状回復ひずみ	%	2.5~4.5
発生応力	MPa	150~200
磁氣的性質		常磁性

響を与える。一例として、トレーニング過程での強度の変化を図 7⁶⁾ に示す。熱処理ままの素材に比べてトレーニング後の 0.2%耐力は、50%以上も高くなっていることは留意すべき点である。

なおこの素材はTIGやプラズマ溶接が可能であり、溶接後に熱処理すれば溶接部にも母材並の形状記憶特性を持たせることができる。板材を曲げ成形し溶接してパイプを作る工程についても多くの実績がある⁷⁾。また近年、Nb⁸⁾ やV⁹⁾などを微量添加して特性を改善する試みも行われている。



(5) Fe-Mn-Si 系 SMA の利用方法

Fe-Mn-Si 系 SMA は、真空または大気溶解した鋼塊に、鍛造、熱間圧延、冷間圧延、冷間伸線などの方法を組み合わせて、必要な形状の素材に加工される。この素材を SMA として利用するために必要な基本的な工程を、表 3 に示す。

表 3 Fe-Mn-Si 系 SMA を利用する場合の処理工程

工 程	概 要	実 際 の 処 理
<u>形状記憶処理</u>	最終的に熱を加えた時に実現させたい形状を記憶させる。	室温で任意の形状に加工してから、その形状が変化しないように拘束して 950℃以上の温度に加熱する。 ※拘束して加熱する代わりに、室温でなく 950℃以上の高温で加工しても良い。
<u>トレーニング処理</u>	形状回復ひずみや形状回復応力を高めるために、前項の形状記憶処理の後で行う。	5~10%程度のひずみを付加した後に約 600℃に加熱する。2度以上繰り返しても良いが、効果は次第に飽和するので、あまり多数回行う必要はない。
<u>加工ひずみの付与</u>	形状記憶処理した後の形状に変形を加える。	室温付近で行う。引張、圧縮、捻り、曲げ、などの加工方法を単独または組み合わせて行う。 (切削加工した分は戻らない)
<u>形状回復処理</u>	記憶させた形状に向かう形状回復を起こさせる。或いは形状回復応力を引き出す。	(好ましくは) 350℃まで加熱する。素材内になるべく温度差をつけないように均一に加熱するのが望ましい。

上記の工程が Fe-Mn-Si 系 SMA を活用する標準的な工程である。この内の形状記憶処理の中で行う加熱工程は、形状回復が起きないように拘束して行うのが基本である。しかし記憶させる形状を切削加工だけで作るようなケースでは、拘束せずに加熱するだけで済ませられる場合もある（棒材からの切削加工で鋼管継手用のリングを製作する場合など）。

(6) 応 用 例

① 鋼管用継手

鋼管用継手は、Fe-Mn-Si 系 SMA の開発当初から最も重要な応用分野と考えられていた。Ti-Ni 系の形状記憶合金がアメリカでは軍事関連分野でパイプ用継手として実績をあげていたことから、安価な形状記憶合金が出来れば民生用鋼管継手の実用化が有望と考えられたのは当然であった。

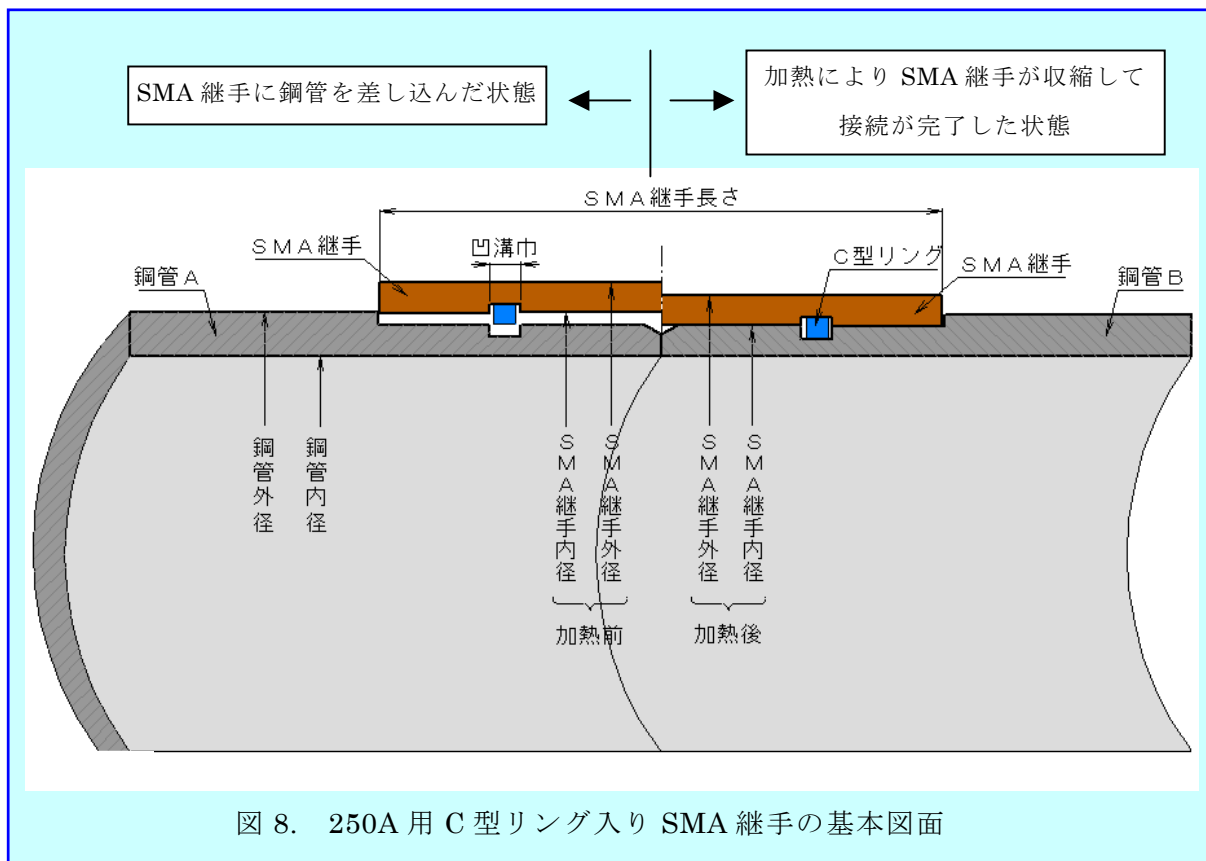
しかし実際には接続する相手側の鋼管の外径には、公的規格で許容されている一定範囲のバラツキがある。Fe-Mn-Si 系 SMA の形状回復ひずみの大きさに比べると、このパイプ外径のバラツキ幅は軽視できない。さらに鋼管の接続では、引張強度やシール性なども要求されるのが普通である。Fe-Mn-Si 系合金の素材自体は安価でも、これらの要求を、外径にバラツキのある鋼管に対して安定して保証するためには、相当のコストをかけざるを得ない。その結果総合的にみて、既存の継手に取って変わるところまでは至らないケースがほとんどであった。

但し問題を解決する技術的手段は、これらの検討過程で明らかにされた。例えばシール性に対しては継手内面に適当な樹脂などをコーティングすることが有効であり、このコーティングは継手強度の向上にも寄与する¹⁰⁾。継手強度をさらに強化する方法としては、継手とパイプの接続部にねじを使用⁴⁾したり、或いはC型リングをはめ込む方式¹¹⁾なども開発された。このような過程を経て鋼管用継手として実用された例を以下に紹介する。

トンネル工事用に新しく開発された工法に、地中の作業基地から周囲に向かってボーリングし、その後に曲線状の鋼管を敷設する方法がある。このようにして地中に一旦ひさし状の鋼管構造物を構成した後に、そのひさしの下部を掘ってトンネルにするのが「曲線ボーリング工法」¹²⁾である。この工法では地中の狭い作業空間内で作業が行われるので、曲線状の鋼管も長いまま持ち込むことはできない。このため短かく切断された曲線鋼管が地中の作業空間内に持ち込まれ、曲線鋼管 1 本分の長さのボーリングがすむと、そこに 1 本の曲線鋼管が挿入される。次にまた鋼管 1 本分のボーリングがすむと、次の曲線鋼管の先端と先行する曲線鋼管の後端を接続した上で挿入し、以下このような作業が繰り返して行なわれる。外径が 200 mm から 1000 mm で曲げ半径が数 m から 20 m 程度の曲線鋼管を使用するこの工法は、軟弱地盤へのトンネル施工や大深度地下空間開発のための要素技術の一つとして注目されている。

このような曲線ボーリング工法では地中の狭い作業スペースの中で、曲線鋼管を安全に能率良く接続することが求められる。そのため比較的早い段階から Fe-Mn-Si 系 SMA 製の鋼管用継手の活用に目が向けられてきた。但しこの場合の継手部には、溶接接続並の高い

引き抜き強度と曲げ強度が求められる。そのためSMA継手と曲線鋼管の端部に凹溝を形成し、この溝にC型リングをはめ込む方式が開発された¹¹⁾。図8はその概要である。



この図はC型リングを継手の片側当たり1本ずつ装着しているが、この種の継手で鋼管を接続した場合の接続部の強度は、C型リングの本数によって大幅に変化する。100Aサイズの鋼管をFe-Mn-Si系SMA継手で接続して調べた結果を表4に示すが、溶接並の接続強度を実現するためには、片側当たり3本ずつ、つまり1個の継手に計6本のC型リングを装着することが必要であった¹³⁾。

表4. C型リングの本数と引張強度との関係 (100A鋼管の例) ¹³⁾

	[荷重 (kN)]		[対鋼管比率 (%)]	
	2%歪点	最大値	2%歪点	最大値
STPG370 鋼管 (114.3φ × 6.0t)	580 (439)	789 (755)	100 (100)	100 (100)
C型リング無し	110	110	19 (25)	14 (15)
C型リングを使用 (1本/片側)	430	500	74 (98)	63 (66)
C型リングを使用 (2本/片側)	520	580	90 (118)	74 (77)
C型リングを使用 (3本/片側)	550	610	95 (125)	77 (81)

() 内は規格下限の降伏強度と引張強さに対応する荷重

また曲線ボーリング工法で土中に構成された曲線鋼管のひさしは、高い土圧を受ける。この土圧による曲げ荷重に耐えることが求められるので、Fe-Mn-Si系SMA継手による接続部の曲げ強度が重要になる。

図9は100Aサイズの鋼管を、C型リングを継手の片側当たり1本だけ（1個の継手に2本）装着して接続し、四点曲げ試験を行った場合の荷重／変位曲線である。接続部のない鋼管単体の特性に比べて、最大荷重値レベルでは遜色のない特性が得られている¹³⁾。

以上のような基本検討を経て、2003年には実際のトンネル施工工事での試験採用が実現した⁵⁾。

この工事では250A（外径267.3mmφ）で曲げ半径6000mmの曲線鋼管を接続する用途に、Fe-Mn-Si系SMA継手が使用された（写真1）。継手は遠心鑄造法¹⁴⁾で製造されたFe-28%Mn-6%Si-5%Cr合金で製作され、施工現場での継手の加熱には高周波誘導加熱法が採用された。溶接法に比べて少ない作業員で時間も短縮できることが確認されている。

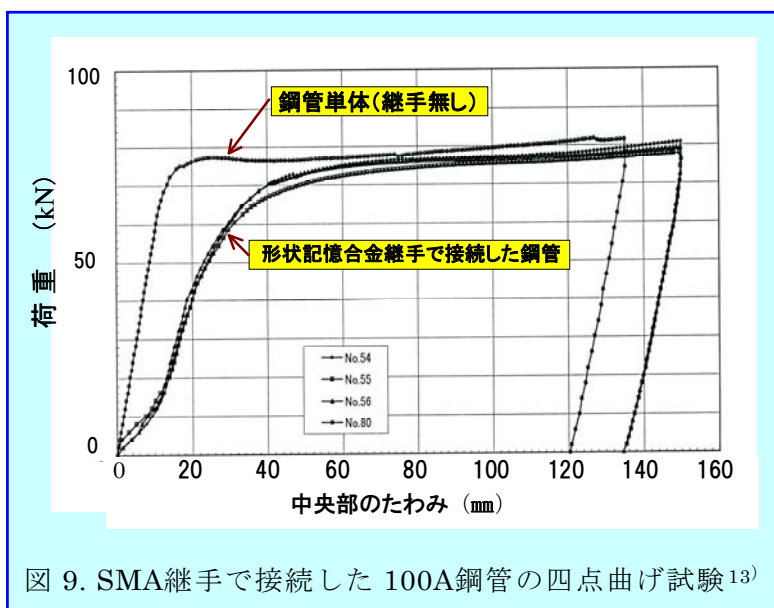


図9. SMA継手で接続した100A鋼管の四点曲げ試験¹³⁾



写真1. SMA継手による曲線鋼管の接続⁵⁾

② クレーンレール用継目板

工場の大型クレーンでは、レールの継目部に隙間ができると、レール端部が局部摩耗して凹んだり欠けが発生する原因となる。一旦凹みや欠けが起こると次第にこれが拡大し、やがてはクレーンの走行に障害を与えるようになる。

レールは両側面に継目板を当て、ボルトで締め付けることによって接続されている。ボルト穴とボルトの径との間に一定の遊びがあるから、接続時に両側のレールを引き寄せて隙間が無い状態でボルト固定したつもりでも、クレーンの走行による振動である程度隙

間が生じるのを避けるのは困難である。

そこで継目板をFe-Mn-Si系SMAで製作し、これに長さ方向への引張変形を付与した状態でボルトによってレールを接続する。次に継目板部分を加熱して、形状記憶効果によって継目板を収縮させると、ボルト穴のクリアランスが吸収されて隙間のない接続が実現できる¹⁵⁾ (図 10)。

2004年の秋から実際のクレーンレールで、写真 2 に示す SMA 製の継目板が試験的に使用されている。写真 2 の継目板の場合、1枚当たりの製品重量は約 10 kg で、この継目板に形状回復を起こさせるための現場での加熱は、ガスバーナーの火炎を継目板に直接当てる方法が採用された。一個所の接続時間は 10 分程度である。レール継目部の隙間はほぼ完全に無くなり、その状態は長期間に渡って維持されるので、クレーンの走行は極めてスムーズになる。

現在は定常的に使用されているクレーンに採用して経時変化を調査中であるが、実用開始から約 4 年が経過した現時点までは何らの問題も発生していない。

③ その他の用途

Fe-Mn-Si系SMAが最初に実用化さ

れたのは、自転車のフレームパイプを接続する用途だった¹⁶⁾。車体を構成するパイプの接続部に差し込み部を作り、外側になる方のパイプの端部には内径側、内側に入る方のパイプ端部には外径側にそれぞれ凹溝を形成する。内側のパイプの凹溝にFe-Mn-Si系SMA製のC型リングを縮めた状態で装着してから外側のパイプの中に差し込み、加熱してC型リングを広げることによって外側パイプの凹溝にリングの肉厚の半分だけが入って接続する方法だった。凹溝の隙間には接着剤を注入してC型リングの動きを固定するので、振動にも十分に耐える接続を実現することができた。この方法は高級なスポーツ用自転車に2年間

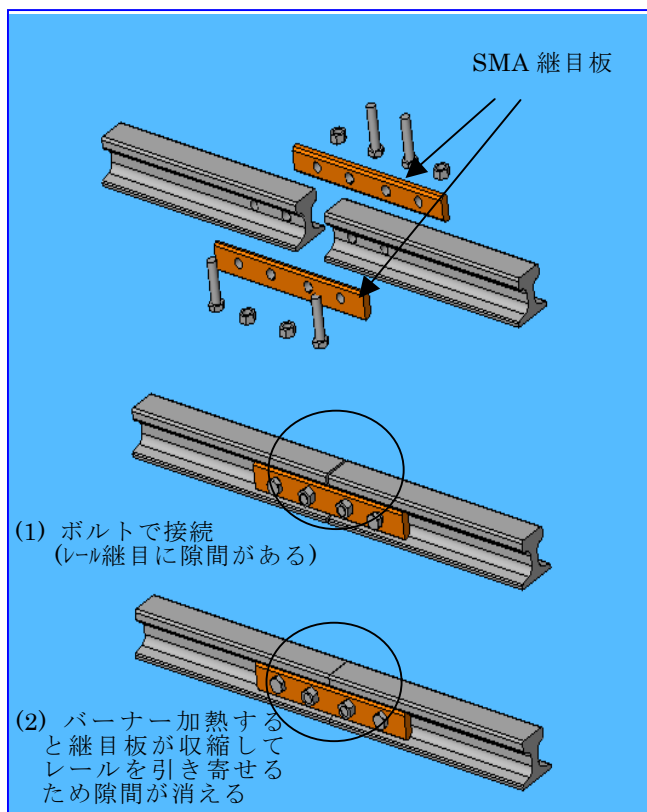


図 10. SMA 継目板によるレールの接続



写真 2. クレーンレール用の SMA 製継目板

ほど採用されたが、その後接着剤の進化などによってSMAのリングを不要とする方法に変更された。

また長いものを作ることが困難な細径のセラミック管を、長く接続して使用する用途にも採用されている¹⁷⁾。Fe-Mn-Si系SMAで長いパイプを製作し、この中にセラミックス短管を並べて挿入し、熱を加えて形状回復させることによって一体化されている。SMAパイプの内表面全体がセラミックス面となるため、内面からの腐食や摩耗が問題となる用途に活用されている。

一方、Fe-Mn-Si系SMAとプラスタとの複合材料の開発も行われている。水で解いたプラスタの中に長さ方向に引張変形を付与したFe-Mn-Si合金の細線を埋め込み、プラスタを乾燥させた後、250℃に加熱してプラスタに圧縮応力を加えた。これによってプラスタの曲げ強度が約50%高くなることが確認されている¹⁸⁾。現在はこの効果を低コストで実現するために、SMAの細線でなく切削加工時に発生するキリコで持たせる検討も進められている¹⁹⁾。

(7) 今後の展開とまとめ

新素材の一つとして登場したFe-Mn-Si系SMAも、素材の開発から既に20年以上が経過した。しかし本格的な実用は、ここ数年の間によりやく進み始めたというのが実状である。本稿の最後に、実用化までにそのように長い期間を要した背景について考えてみたい。

この素材が開発当初に目標としたのはTi-Ni系SMAの低コスト型という位置づけで、Ti-Ni系で成功した応用分野をトレースすることだった。SMAといえばTi-Ni系という認識の中では、Fe-Mn-Si系SMAに対する周辺からの期待がその方向に向ったのは当然のことである。

しかし高価なTi-Ni系SMAが実用された対象は当然小物部材が多くなる。それと同じような小物部材にFe-Mn-Si系SMAを活用しようとする、形状回復ひずみが小さくて二方向動作もできないということは大きな制約になる。単に低コストというだけでは、Ti-Ni系と類似の対象を目指すのは無理であることがやがて明確になってきた。新素材開発に熱の入った時代背景もあり、Fe-Mn-Si系の改良型ともいえる鉄をベースにした別の合金系も何種類か登場したが、それらがいずれも、Ti-Ni系の代替にはならないことが明らかになる時点で力つき、表舞台から消えて行った。

唯一Fe-Mn-Si系SMAだけは、その時点からこの素材に適した独自の新しい応用分野の開拓に活路を見いだす努力が、継続して行われた。目指す方向は、「形状記憶効果という機能を持った構造材」として、Ti-Ni系では困難な大型の構造部材としての実用化であった。しかし小型部材ならば実験室の試験溶解材からでも容易に試作ができるのに対して、大型部材は、溶解から鍛造、熱間圧延、冷間圧延、切断、切削、塑性変形、溶接などの一連の製造工程の全体について、この素材に適した条件を改めて見直すことが求められた。この過程に予想以上の時間を費やしたのが、実用化までに時間のかかった理由の一つである。それらがようやく実を結び始めたのが現在の状況とあって良いだろう。

最近、Fe-Mn-Si系合金を変形した時に応力誘起によって生成したマルテンサイトは、加熱せずに逆方向の変形を付加しても母相のオーステナイト相に戻るといった現象が発見された²⁰⁾。さらに応力誘起マルテンサイト変態と変形双晶の両方が起こりやすい成分系も見いだされており、このような合金を用いれば、外部から繰返し付加される振動を、材料の劣化につながる「すべり変形」をほとんど起こさせずに吸収することができる。この効果を活用すると、メンテナンスフリーで長期間の連続使用に耐える制振ダンパーが実現できる可能性がある²¹⁾。これらの新しい展開までを視野に入れたFe-Mn-Si系SMAについての詳細な総括論文²²⁾も発表されているので、この素材に関心をお持ちの方々には是非参照されることをお奨めしたい。

SMAの世界にあってFe-Mn-Si系はTi-Ni系と競合するのではなく、異なる特徴を持って互いに棲み分けつつ共に育っていくことのできる存在なのではないか。遅ればせながら、その方向への力強い歩みが始まっている。

- 1) A. Sato, E. Chishima, K. Soma and T. Mori : Acta Metall., **30**, p.1177 (1982)
- 2) H. Otsuka, M. Murakami and S. Matsuda : Proc. of MRS Int. Mtg. on Advanced Materials, **9**, p.451 (1989)
- 3) 直井、丸山 : 塑性と加工, **45**, p.697 (2004)
- 4) H. Tanahashi, T. Maruyama and H. Kubo : Trns. Mat. Res. Soc. Jpn. **18B**, p.1149 (1993)
- 5) 久保、丸山 : 電子材料, No.4, p.56 (2002)
- 6) 丸山、栗田 : 金属, **74**, p.160 (2004)
- 7) 丸山、大塚 : 金属, **66**, p.1079 (1996)
- 8) S. Kajiwara, D. Liu, T. Kikuchi and N. Shinya : Scripta Mater. **30**, p.2809 (2001)
- 9) H. Kubo, K. Nakamura, S. Farjami and T. Maruyama : 6th. ESOMT, Cirencester, Engrand, /Materials Science and Engineering-Lausanne-A : **378**, p.343 (2004)
- 10) 山田、丸山、大塚、棚橋 : 溶接技術, No.9, p.79 (1988)
- 11) 粕谷、小幡、三木、丸山 : 地下空間シンポジウム論文・報告集(土木学会), **5**, p.163 (2000)
- 12) 亀岡、粕谷 : 土木学会誌, No.4, p.36 (1995)
- 13) 粕谷、小幡、三木、丸山 : 地下空間シンポジウム論文・報告集(土木学会), **7**, p.371 (2002)
- 14) H. Otsuka, T. Maruyama and H. Kubo : Mat. Sci. Forum **327-328**, p.243 (2000)
- 15) 豊澤、小崎、安藤 : クレーン, **45**, No.4, p.1 (2007)
- 16) 大塚 : 金属, **60**, No.3, p.29 (1990)
- 17) 青木、福田、松岡、延本、松本、大塩、平 : 材料とプロセス, **7**, No.1, p.29 (1994)
- 18) Y. Watanabe, E. Miyazaki and H. Okada : Materials Transactions, **43**, p.974 (2002)

- 19) 渡辺、若槻、金、丸山：日本複合材料学会 2005 年度研究発表講演会予稿集， p.59-60，
(2005)
- 20) T. Sawaguchi, P. Sahu, T. Kikuchi, K. Ogawa, K. Kushibe, M. Higashino and T.
Ogawa：Scripta Mater., **54**, p.1885(2006)
- 21) 澤口、菊池、小川、池尾、菅田、櫛部、小川：金属， 76， p.382 (2006)
- 22) 澤口：ふえらむ：**13**， No.2， p.71 (2008)

付録(1) FeMnSi 系 SMA と TiNi 系 SMA 合金の比較

機能特性の種類		FeMnSi 合金	(比較例) TiNi 合金
形状記憶機能	基本特性	形状回復ひずみ (%)	~ 4
		形状回復応力 (MPa)	~ 250
		形状回復温度 (°C)	~ 350
	実用性	一方向性動作	○
		二方向性動作	—


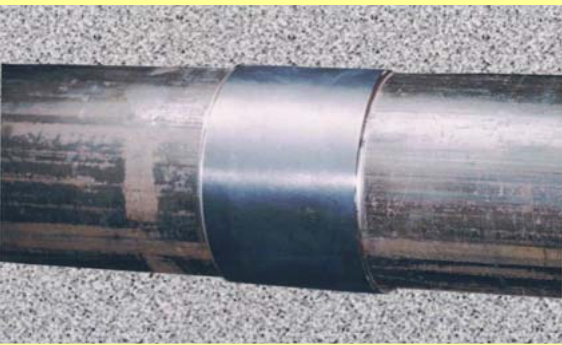
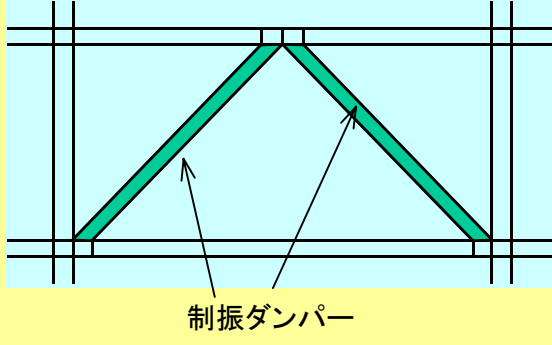
Fe-Mn-Si 系合金

形状記憶合金としては一方向形状記憶効果しか持たないため、形状記憶効果を発揮するのは生涯に一度だけに限られます。パイプ継手や継目板のような接続用途では施工時に形状記憶効果を活用してしまうので、施工完了後は通常の構造材料に変身してしまい、施工時の状態を維持し続ける機能だけを発揮します。

Ti-Ni 系合金

超弾性材料または二方向性形状記憶特性を活用する応用例がほとんどです。これらの特性は、Ti-Ni 系合金が使用されている間中、温度変化や外部から付加される変形に応じて随時発揮されます。

付録(2) FeMnSi 合金の主な使い方

		継目板 (クレーンレール用)	パイプ用 継手	制振ダンパー(将来)
応用例				 制振ダンパー
Fe Mn Si系合金の特性の活用	施工時	<p>形状記憶特性は施工時に活用する。</p> <p>* SMA 継目板が加熱されると長さが収縮し、レールを引き寄せて隙間をゼロにする。</p>	<p>形状記憶特性は施工時に活用する。</p> <p>* SMA パイプ継手が加熱されると縮径し、パイプを外側から締め付けて接続する。</p>	<p>溶接やボルト等の通常の施工法による。</p> <p>* 形状記憶合金としての機能は使わない。</p>
	施工完了後	<p>レール接続状態を維持する (構造材としての機能だけを継続して発揮する)</p> <p>* 両側のレールを継目板が引き寄せて、一定の圧縮応力を付与し続ける。</p>	<p>パイプ接続状態を維持する (構造材としての機能だけを継続して発揮する)</p> <p>* 両側のパイプを SMA パイプ継手の収縮力で締め付けて、接続を維持する。</p>	<p>地震などで振動が発生すると自動的に振動吸収機能を発揮する</p> <p>* 「応力誘起マルテンサイト変態」と「変形双晶」の二つが振動に合わせて生成と消滅を繰り返すことで揺れを吸収する。形状記憶合金としての機能は使わない。</p>

Fe-Mn-Si 系合金が形状記憶合金としてではなく制振材として使われる場合には、振動発生があれば随時制振材として機能を発揮するようになります。