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、実用化されてい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-28Mn-6Si-5Cr 合金（mass%）を用いて進められている（現在製造しているのも同組成の合金のみ）。

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

※現在は Fe-28Mn-6Si-5Cr のみ製造

この合金が、素材の発見[1)]、開発から応用まで主として日本で行われてきたことは特筆すべきことである。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うことができる。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（後述のトレーニング処理を施した場合）。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、バイアスバ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℃から 350℃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 0.2%耐力の温度依存性は**図 1**[2)] 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 0.2%耐力が高くなる領域がある。そこを越えると通常の鋼と同様に、温度の上昇に伴い 0.2%耐力が低下する。2 つの異なる勾配は、Fe-Mn-Si 系 SMA の 2 種類の変形モードによって引き起こされる。1 つはすべり変形の臨界応力、もう 1 つは ε マルテンサ

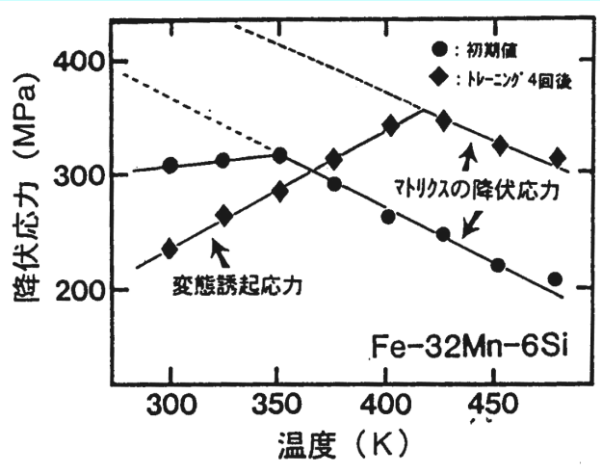

図 1.　降伏応力の温度依存性[2)]

イト変態（FCC→HCP 変態）の臨界応力を示す。つまり、**図 1** の 2 つの傾斜は、ε マルテンサイト変態が低温（室温を含む）で優先的に発生し、すべり変形が高温で発生することを示す。

図 2 は、γ オーステナイト（FCC）から ε マルテンサイト（HCP）への応力誘起マルテンサイト変態中の原子配列の変化を示す。この面心立方晶の γ から稠密六方晶の ε への変態により、体積変化がほとんどない状態で特定の方向に最大約 20%のひずみを導入できる。**図 2** に示すように、応力誘起変態後の OB の長さは、変態前の OA の長さよりも約 23%長くなっている[3]。形状記憶効果は、HCP マルテンサイトから FCC 母相への可逆的変態によって得られる。大きなひずみの領域では、マルテンサイト変態だけでなくすべり変形がどうしても起こってしまう。したがって変形量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 γ 相が安定になる温度に加熱すると、ε の生成時に導入したひずみを取り返しながら 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 の形状記憶効果である。

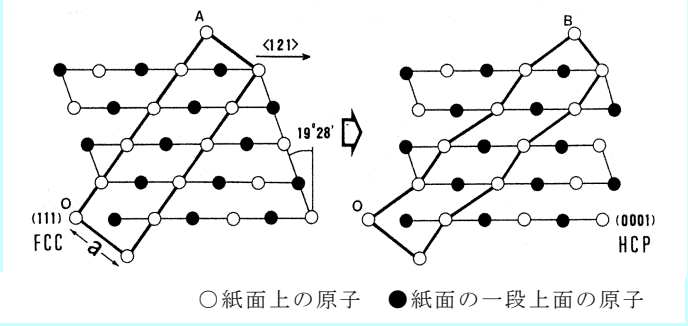

図 2. γ から ε 変態前後における原子配列の変化[3]

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から 1/3 程度を形状回復ひずみとして取り戻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 を活用する上で最も重要なパラメータは二つある。1 つは、初期ひずみとトレーニングのサイクル数に依存する形状回復ひずみで、もう一つは回復応力である。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**[4] に初期ひずみと

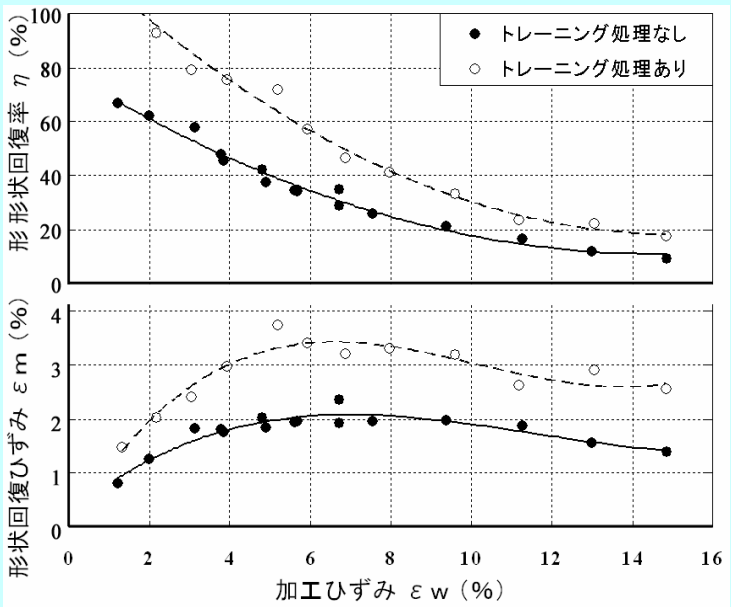

図 3. 加工ひずみと形状回復ひずみ･形状回復率の関係[4]

回復ひずみの関係を示す。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。一度だけのトレーニングでも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必要はない。

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、変形前の状態にできるだけ近い形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小さい領域（2%以下）だけに限定される。

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使用される。接続用部材では形状回復ひずみというより､回復応力の方が求められる｡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、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[5]、また破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。

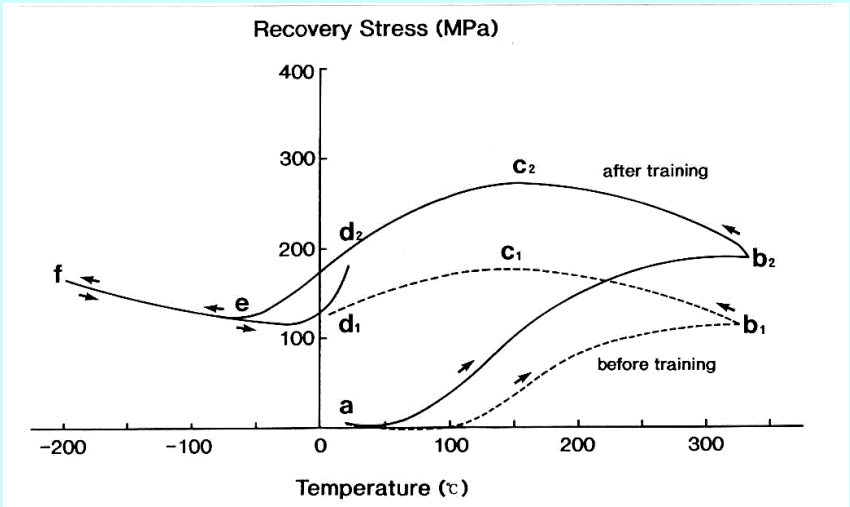

図 4.　加熱冷却過程での形状回復応力の変化[5]

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。この測定から、発生応力には、形状回復による収縮と熱膨張後の冷却による収縮の２つの応力が含まれていることがわかる。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応力と考えることができる。

約 330℃（b_2 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 c_2 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、d_2 点の応力が残留する。この応力が室温で接続部材として利用できる本合金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、その時までに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ることができる。

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。

図 5[6] に SMA リングによるパイプ接続方法の概略を示す。SMA 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収縮し、挿入されているパイプが接続される（**図 5D**）。

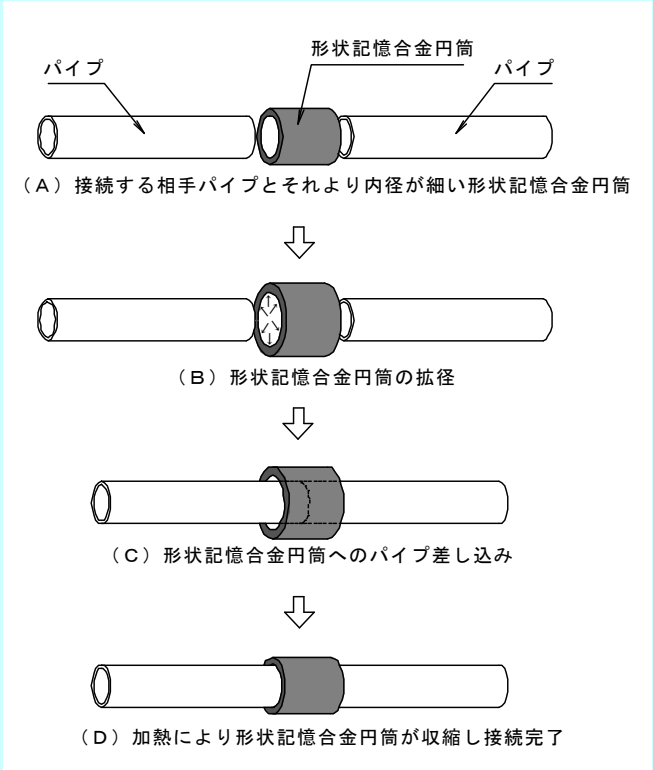

図 5.　形状記憶合金によるパイプの接続 [6]

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締め付け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。接続部に十分な締め付け力を持たせるためにはなるべく隙間を狭くすることが好ましい。

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。

まず SMA を継手として利用するには、図に示す「O→a→b」の経路で変形を加える。その後に除荷して 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。障害物と SMA の間にいくらかの間隔が存在すると、利用可能な回復応力は間隔の増加とともに減少する。これは、障害物が c または d にある場合、[b→c→c ']または[b→d→d']に沿って形状回復が発生するためである。回復ひずみを多く消費すればそれだけ取り出し得る回復応力は小さくなる。

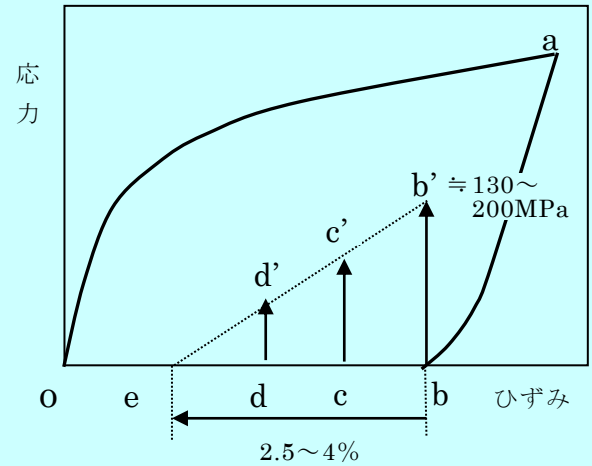

図 6.　形状記憶効果(概念図)

（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状態の基本特性を**表 2** [7] 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、ひずみを予め付与することが必要である。特にトレーニング処理を実施する場合、ひずみ付与の変形は 2 度以上繰り返さねばならない。

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

表 2.　Fe-Mn-Si 系 SMA の基本特性 [7]

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	$100\sim130\times10^{-6}$
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
磁気的性質		常磁性

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ことも可能である[8]（現在このような方法で製造した製品はない）。また、Nb[9] や V[10] などを微量添加して形状記憶特性の改善を試みた研究があったが、現在は元組成の Fe-28Mn-6Si-5Cr のみが製造されている。

（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
形状記憶処理	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。
トレーニング処理	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。	5～8%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、1～２回でよい。
加工ひずみの付与	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）
形状回復処理	記憶させた形状に形状回復させる。或いは形状回復応力を引き出す。	好ましくは 350℃以上に加熱する。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。しかし丸棒材からの切削加工で鋼管継手を製作する場合などでは、拘束せずに加熱するだけですませられる場合もある。

（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[11)]。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[5)]したり、或いは C 型リングをはめ込む方式[12)]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」[13)]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 ㎜から 1000 ㎜で曲げ半径が数 m から 20m 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[12)]。**図 7** 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[14)]。

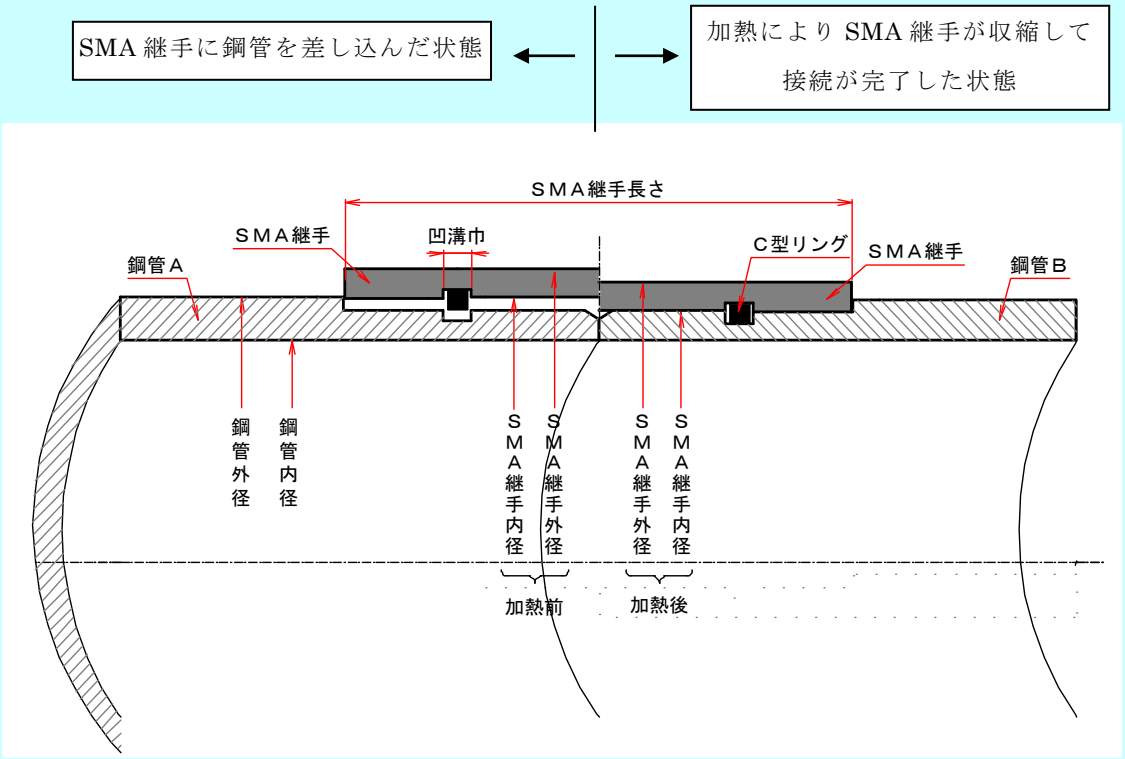

図 7.　250A 用 C 型リング入り SMA 継手の基本図面

表 4.　C 型リングの本数と引張強度との関係（100A 鋼管の例）[14)]

	［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 8** 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[14]。

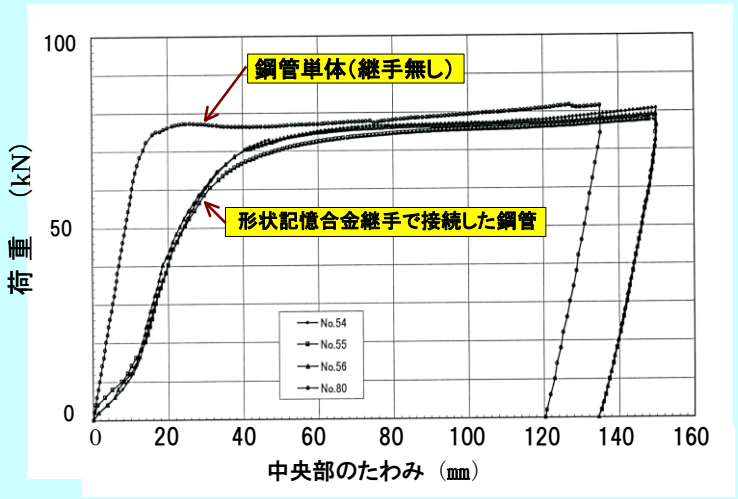

図 8. SMA 継手で接続した 100A 鋼管の四点曲げ試験[14]

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[7]。この工事では 250A（外径 267.3 ㎜φ）で曲げ半径 6000 ㎜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**）。継手は遠心鋳造法[15]で製造された Fe-28Mn-6Si-5Cr 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者で時間も短縮できることが確認されている。

写真 1.　SMA 継手による曲線鋼管の接続[7]

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隙間が拡大し、やがてはクレーンの走行に障害を与えるようになる。Fe-Mn-Si SMA 継目板は、この問題を解決するために開発された。

一般に、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ため、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の隙間が生じるのは避けられない。

引張変形した Fe-Mn-Si SMA 継目板をボルトでレールに接続した後、形加熱によって収縮させることによりレールの緊密な接続を実現できる。[16]（**図 9**）。

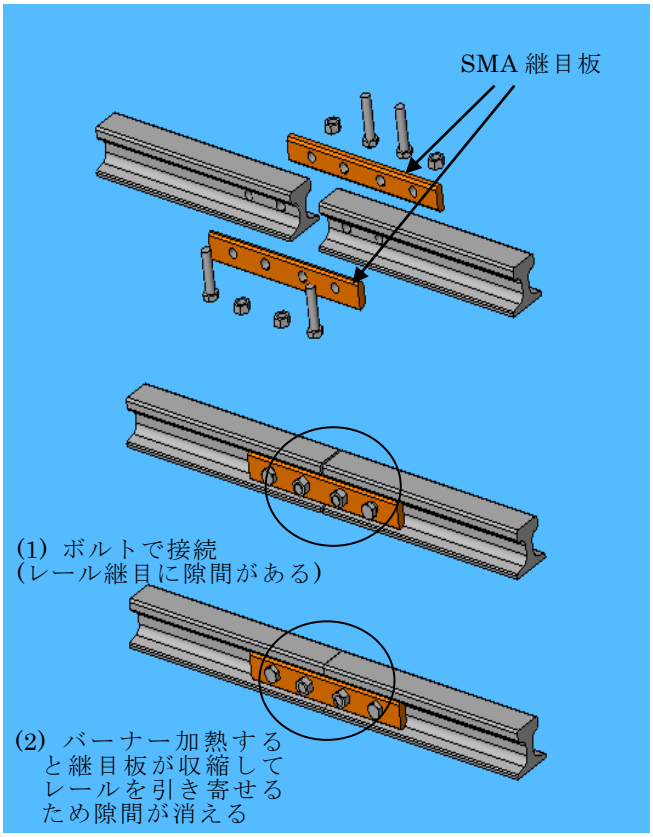

図 9. SMA 継目板によるレールの締結

本継目板は、2004 年の秋から大手鉄鋼メーカーの実際のクレーンレール接続に使用され、写真 2 に示すような SMA 製の継目板が、合計でおよそ 2200 箇所に使用されている(2020 年 8 月現在)。**写真 2** の継目板の場合、1 枚当たりの製品重量は約 10 kg（現在は約 7kg）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り、かつクレーンレール、ランウェイガーター、天井クレーンの長寿命化にも寄与すると言われている [17]。

写真 2. クレーンレール用の SMA 製継目板

現在も定常的に使用され、実用開始から約 16 年が経過した現時点まで特に問題は発生していない。

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 [18]。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 年間ほど採用されたが、その後 SMA のリングを不要とする方法に変更された。

また本材料は長尺品を作ることが困難な細径・短管のセラミックス管を接続する用途にも採用されている [19]。Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金でパイプ（長さ数 10cm 程度）を製作し、この中にセラミックス短管を並べて挿入し、加熱して形状回復させることによって一体化される。セラミックス管はSMA管により保護され内表面全体はセラミックスとなるため、内面からの腐食や摩耗および外からの衝撃にも強い構造が実現される。本用途は 1994 年ごろから実用化され、現在も定常的に使用されている（2021 年現在）。

（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、素材の発見から40年近く、開発開始から既に30年以上が経過した（2021年現在）。しかし本格的な実用は、2000年以降によう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型部材が多くなる。小型部材にFe-Mn-Si系SMAを活用しようとすると、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であった。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まもなく明確になった。新素材開発に熱の入った時代背景もあり、Fe-Mn-Si系SMA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SMA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、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いって良いだろう。

近年、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、加熱ではなく逆方向の変形を付加しても元のオーステナイト相に戻ることが発見され、これにより塑性変形の繰り返しに対する疲労耐久性が従来鋼材より著しく優れることがわかった[20]。つまり、Fe-Mn-Si系合金は形状記憶効果と疲労耐久性という２つの機能を持つことになる。前者の代表が、本稿で説明してきたFe-28Mn-6Si-5Cr合金である。一方、後者は疲労耐久性発現に適し、量産できるよう成分調整されたFe-15Mn-4Si-10Cr-8Ni合金である[21]。後者の合金はその後連続鋳造法による製造が可能[22]になり、メンテナンスフリーで長期間の連続使用に耐える鋼材系制振ダンパー心材としてすでに実際の建築物に実装されている[23]。こうしたFe-Mn-Si系合金の新しい展開までを総括した論文[24] は、引用数も多く、その影響で30年前に書かれたFe-Mn-Si系SMAの論文[2)3)]の引用数も近年増えている。このことは、1980年代前半に始まったFe-Mn-Si系合金の応力誘起変態に関する研究が再び世界的に注目を浴びていることを示している。

Fe-Mn-Si系合金は、SMAの世界にあってはTi-Ni系とは用途を棲み分けて、クレーンレール用継目板など本合金ならではの独自用途を見出してなんとか生き延びてきたことにより、近年、高疲労耐久という新たな優れた特徴に出会うことができた。今後は、分野・規模は異なるが、形状記憶用途、疲労耐久用途の２本立てで力強く歩みを進めていきたい。

（2021年2月改訂）

参考文献

1) A.Sato, E.Chishima, K.Soma and T.Mori：Acta Metall. 30 (1982) 1177

2) H.Otsuka, M.Murakami and S.Matsuda：Proc. of MRS Int. Mtg. on Advanced Materials 9 (1989) 451

3) H.Otsuka, H.Yamada, T.Maruyama, S.Matsuda, H.Tanahashi and M.Maruyama ：ISIJ International 30 No.8(1990) 674

4) 直井、丸山：塑性と加工 45 (2004) 697

5) H.Tanahashi, T.Maruyama and H.Kubo：Trns. Mat. Res. Soc. Jpn. 18B (1993) 1149

6) 久保、丸山：電子材料 No.4 (2002) 56

7) 丸山、栗田：金属 74 (2004) 160

8) 丸山、大塚：金属 66 (1996) 1079

9) S.Kajiwara, D.Liu, T.Kikuchi and N.Shinya：Scripta Mater. 30 (2001) 2809

10) H.Kubo, K.Nakamura, S.Farjami and T.Maruyama：6th. ESOMT, Cirencester, England ／Materials Science and Engineering-Lausanne-A：378 (2004) 343

11) 山田、丸山、大塚、棚橋：溶接技術, No.9 (1988) 79

12) 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 (2000) 163

13) 亀岡、粕谷：土木学会誌, No.4 (1995) 36

14) 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 (2002) 371

15) H.Otsuka, T.Maruyama and H.Kubo：Mat. Sci. Forum 327-328 (2000) 243

16）豊澤、小﨑、安藤：クレーン，45 No.4 (2007) 1
17）辻本、小﨑、奥谷、豊澤、安藤、寄光、松石、石井：クレーン，56 No.11 (2018) 4
18）大塚：金属 60 No.3(1990) 29
19）青木、福田、松岡、延本、松本、大塩、平：材料とプロセス，7 No.1(1994) 29
20）T.Sawaguchi, P.Sahu, T.Kikuchi, K.Ogawa, K.Kushibe, M.Higashino and T.Ogawa：Scripta Mater.，54 (2006) 1885
21）澤口、丸山、櫛部、津﨑：溶接技術 63 No.6 (2015) 77
22）大塚、千葉、澤口、高森、櫛部、梅村、井上：2018年日本金属学会秋期大会予稿集 J76
23）櫛部、梅村、井上、中村、澤口、大塚、千葉：溶接技術 68 No.2(2020)60
24）T.Sawaguchi, T.Maruyama, H.Otsuka, A.Kushibe, Y.Inoue and K.Tsuzaki : Materials Transactions, Special Issue on New Aspects of Martensitic Transformations 57 No.3(2016)283