形状記憶合金の溶接技術

西 川 雅 弘*

1. は じ め に

形状記憶合金 (SMA) の機能性は形状記憶効果と擬弾性と呼ばれる性質に大きく区別され、各々の特性に着目して、多くの分野で形状記憶合金の応用研究が開始、進められ、一部のものは実用化されるに至っている。これらの応用の拡がりに伴って、これら合金の加工性もとより、溶接性も当然問題となる。例えば、変態温度の異なる数種の SMA を溶接することにより、ますます複雑なアクチュエータを簡単なシステムでしかも小形化できることや、タービン式熱駆動エンジンにも使われている SMA 素子はエンドレスであるため高効率のエンジンの作成に対し溶接技術が必要になる等である。従来どちらかと言えば、システム研究、開発が一段落した後から溶接・接合技術を考えることが多いが、このような機能材料の応用開発研究するには開発当初から溶接・接合技術を十分考えておかないと設計時の機能が出ない恐れがある。さて、SMA には多くの種類があるが、大きく分けると Ti-Ni 系と Cu 系がある。現状では Cu 系についてはまだまだ材料学的研究の域にあるものもあり、Ti-Ni 系と比べ応用範囲が限定されている。

ここでは応用範囲が多岐にわたっている Ti-Ni 系の溶接について、特に融接 (主に電子ビーム溶接) と圧接に分けて溶接部の強さと接合部の機能特性に着目して述べる。

2. 形状記憶合金 (Ti-Ni 系) の融接と圧接

SMA の溶接についての報告はほとんどなく、Ti-Ni 系 SMA の溶接は 1961 年～1969 年にわたって GTA 法を使って行なわれている。Buehler と Wiley によって Nitinol の熱間圧延シート 1/8 in (3.2 mm) の突合せ溶接が行なわれ⁽¹⁾、また Drennen や Jackson も GTA 法で溶接しており、アルゴン雰囲気での抵抗溶接について

も試みて成功している。GTA 法に、ヘリウムガスをシールドガスとして、熱間押し出された TiNi のフィードローットがフィラーメタルに使われている。溶接部には角や星形の付着した粒子が現われることがあるがこれらは Ti_2Ni や $TiNi_3$ による好ましくないものである⁽¹⁾⁽²⁾。TiNi 合金は N, O, H による材料脆化が大きく、シールドガスが不完全であると溶接部の機械的強さの劣化につながる。ここでは融接として N, O, H の進入を極力さけるため、真空中での電子ビーム溶接について、また圧接としては TiNi ワイヤの突合せ抵抗溶接について述べる。

(1) 電子ビーム溶接

板厚 1.16 mm、長さ 100 mm の正方形の試験片を、I 開先のまま突合せて、電子ビーム溶接を行なった。母材は圧延後の平板を 973 K (700°C)、3.6 ks (1 h) 熱処理を行なったもので、マルテンサイト領域 (220 K (-53°C)) で破断応力 860 MPa、室温のオーステナイト状態で 740 MPa で伸びは各々の状態で 31、26% のものを使った。溶接結果は表 1 に示す通りである。溶接後、表面研磨も熱処理もしないままでのマルテンサイト状態での破断応力は

表 1 シート材における母材および溶接部の破断応力と伸び。

母 材	熱 処 理	破 断 応 力 (MPa)	伸 び (%)
	963 K (700°C) -3.6 ks 水焼入れ	$T < M_f$ 860	31
		$T > A_f$ 740	26
溶接部	熱処理と表面処理	破 断 応 力 (MPa)	伸 び (%)
	熱 処 理 な し 研 磨 な し	$T < M_f$ 410	9.8
		$T > A_f$ 560	11
	熱 処 理 な し 研 磨	$T > A_f$ 710	7.2
		熱 処 理 973 K (700°C) -7.2 ks 水焼入れ 研 磨 $T > A_f$ 660	16

* 大阪大学助教授；工学部
Welding of TiNi Shape Memory Alloys ; Masahiro Nishikawa(Faculty of Eng. Osaka Univ. Suita)
Keywords : electron beam welding, resistance butt welding, tensile strength, weld current, upset force, checking the memory effect of weld part
1984年9月3日受理

図1 溶接後のビード部断面 (a) と熱処理後のビード断面組織.

410 MPa, オーステナイト状態では, 560 MPa と母材よりも低く, 破断箇所はビード中央部かビード止端部が半々の割合であった. これはビード止端部に小さな縦割れ横割れが存在することが原因であり, 両素子を 0.2 mm 研摩して, これらの割れを除いた場合, 表 1 の下段に示すように伸びが悪いが破断応力が 710 MPa と上昇する. さらに歪除去のため 973 K, 7.2 ks (2 h) の熱処理をすると伸びは 16%, 破断応力も 660 MPa となり, 破断はいずれもビード中央部である. 図 1 (a), (b) は溶接後の溶接部と溶接後 973 K, 72 ks 熱処理をした場合の溶接部のマクロ写真である. 熱処理をした方が粒が細くなっているが, いずれも柱状晶の铸造組織になっていることが分かる. このような柱状晶が成長する融接の場合, 雰囲気や母材の酸化スケールからの不純物混入が微量介在物の析出の原因となるので溶接前処理を十分行なわなければならない⁽³⁾.

(2) 細線の突合せ抵抗溶接

接合界面にほとんど溶融部分が残らないような溶接の具体的なものとして圧接がある. また形状回復特性には材料の伸線加工度に依存することからも, 適当なアプセット力がかかるように設定できる突合せ抵抗溶接法を採用した⁽⁴⁾. 図 2 (a) はチャック型のクランプを用いた場合のもので一方が可動台の上に載って, ピストンとバネを介して圧接するようにした溶接機である. 図 2 (b) は V 溝で Ti-Ni 合金線をはさみ込む型のクランプを用いた場合のものでプラテンは慣性の少ない直流モーターに接続され, プラテンの移動制御や加圧力制御が大きな範囲でできるようにしたものである. 溶接電源はコンデンサーのパルス放電を用いて種々プログラミングされた波形が得られるようになっている. いずれにしても, 直径 1 mm 以下の細線の接合を対象にしているため, 特に設計された精密移動のプラテンを装備しており, 溶接中の突合せ面の心ずれであるオフセット量がないように工夫したものである. 使用した TiNi 形状記憶合金は直径 0.73 mm のもので逆変態終了温度 A_f が無負荷で 333 K

図2 TiNi SMA の圧接機.

(60°C) 付近であり, 伸線加工後, 約 673 K (400°C) で 1.8 ks (30 min), 形状記憶のための熱処理を行なったものである. 図 3 は溶接時の電流, 電極間電圧, 電極間変位の一例を示したものである. この波形から分かるように溶接通電時間は 7 ms であり, 通電終了時付近 5 ms から変位が立ち上がり, 20 ms で約 1 mm 変位しており, 溶接過程の中, 初期に突合せ面を溶融するはかばほとんど鍛接過程にある熱間圧接の条件に選んである. もう少し詳しく言うと突合せ時の合せ面の不均一さを緩和するため接合過程初期では先端を溶融させ, その後, 熱間圧接の状態で接合を終了する方法でアプセット代を適当にとることによって大気中で接合できる. クランプからの試片の突き出し長さはスペーサを使って各々 0.8 mm に

図3 溶接電流，電極間電圧ならびに変位波形。

図4 引張強度と溶接電流との関係。

設定してある。図4は溶接電流と引張強さの関係を加圧力をパラメーターとして示した図である。試験片の突合せ面はヤスリで平面にしている。全体の挙動としては入熱が上昇して溶接電流 500 A 付近まではそれに応じて引張強さも増加する。これは塑性変形量が入熱とともに増加してアプセット代も大きくなり、清浄な面で接合されるようになったものと思われる。さらに入力を増加すると引張強さが低下するのは、接合過程初期にフラッシュが出て突合せ面を異常に酸化させるのが原因である。低入熱側 450 A 程度までは加圧力の大きい方が少し引張強さも増加しているが、500 A 付近の引張強さの最大値付近では加圧力の低い方が引張強さが大きくなっている。これは初期の接触抵抗による発熱が大きく、結果として塑性変形量、アプセット代が大きくなったものである。加圧力が 50 N 以下になるとフラッシュが出て溶接不可

能になる。これは移動プラテンの立ち上がりが摩擦により急に小さくなるからで、溶接機そのものに大きく依存する。

図5は引張強さが母材の 80% 以上の接合条件をハッチで示してある。この領域の中でも溶接電流 500 A 付近で、加圧力 140 N 以下のところが静的引張強さが大きい領域である。強さが母材の 80% 以上の接合条件では接合界面で破断したものは一例もないが、ほとんど熱影響部からの破断である。この線の母材強さは 1100 MPa 程度であった。

図6に接合結果の断面を示す。約 0.6 mm の部分が塑性変形を受けており、初期の突き出し長さがおおの 0.8 mm であるから、約 1 mm の部分が 0.6 mm の領域の中で塑性流動したことになる。図7は押し出されたバリ(図6参照)を取り除いて、引張試験をした場合の破断試片の断面マクロ写真である。(a)は母材破断した時の断面であり、図5の溶接条件領域の中に書き込まれた点(a)の条件で接合した試片を引張試験した結果である。また(b)は接合部破断を示し、図5のハッチでかこまれ

図5 母材強度の 80% 以上の引張強度を示す溶接条件。

図6 典型的な圧接部断面。

(a) 母材破断

(b) 接合部破断

図 7 圧接部破断形態.

た適正接合条件以外の点 (b) の条件で接合した試片を引張試験した結果である. また白の矢印で示した所が接合界面を示しており, (a) の適正条件での断面写真からも推察されるように接合界面にはデンドライトのような凝固組織が見受けられず, 清浄な突合せ面で圧接されていることがわかる.

3. 溶接部の機能特性

溶接部の形状記憶特性を調べるために図 8 で示した試験を行ない評価した. まず直線で記憶している半径 r_0 の細線を接合し, 室温で曲率 R で曲げる. 次に 368 K (95°C) の湯につけることによって直線近くまで回復するわけであるが, 回復しない部分がすべて溶接部(熱影響部も含めて長さ δH)に起因すると, その角度 θ は

$$\theta = (\delta H / r_0) (\epsilon_{R \max} \times 10^{-2}) \quad [\text{rad}] \quad (1)$$

となる. ただし $\epsilon_{R \max}$ は % で表わされている. θ , r_0 , δH は測定量であるから $\epsilon_{R \max}$ が求まる. このような回復量を母材のものと比較しながら検討する.

図 9 は図 5 の良好な接合条件と重ねて, 形状回復特性を示したものである. 接合後, 最初の変形は曲げ歪で最大歪 10% ($R_B = 3.65 \text{ mm}$) として与えた. 接合部のない母材だけの形状記憶回復特性を調べた結果 $\epsilon_{R \max} = 0.6 \sim 0.7\%$ 程度であることがわかっている. 接合部に対しては $\epsilon_{R \max} < 1.35\%$ にあるものを○印, $1.35\% \leq \epsilon_{R \max} < 1.5\%$ のものを△印, $\epsilon_{R \max} \geq 1.5\%$ にあるものを□印として分類したものがプロットしてある. ○印の条件では回復後の曲りが 1.2° よりも小さくなる. 要するにこの値前後で大きく実験的に 2 群に分かれるということであり, △印はその境界としてプロットしており, こ

図 8 溶接部の形状記憶特性試験.

図 9 適正溶接条件と良好な形状回復特性を示す条件領域.

図 10 (a) 母材部と (b) 溶接部における変態に伴う発熱・吸熱過程.

これらの区分そのものに深い物理的意味があるわけではない.

この結果から, 形状記憶回復特性については実験的には直線 AB より高圧力側にあるといえる. たとえば最高の接合条件に近い電流 500 A では加圧力 100 から 60 N 付近が最高の静的引張強さを示していたが, 形状回復特性からいうと, これらの加圧力より少し高い 120 N 以上がよいことになる. 形状回復特性は伸縮加工度等にも微妙に依存しているので, これらの加工度の影響が出てきたものと思われる.

また、図 10 (a) と (b) は母材と熱処理をしないままの溶接部の変態にともなう発熱過程と吸熱過程を示す。図 10 (a) は 673 K (400°C) -1.8 ks (30 min) の形状付けの熱処理を行っており、冷却するに従って M_s , M_f , M_s , M_f 点と移り発熱し、逆に加熱することによって A_s 点から A_f 点の領域で吸熱することが分かっている。一方接合部の部分 1 mm を切断し、同じサンプル 10 個程度一緒にして DSC で測定したものが図 10 (b) である。冷却過程で図 10 (a) の場合と比べ M_s , M_f 点の吸熱ピークが現れない特徴があることが分かる。

4. お わ り に

TiNi の SMA シートの融接としての電子ビーム溶接と熱間圧接とも言うべき細線の突合せ抵抗溶接について述べた。シート材の母材強さは線材に比べて 70% 程度と低いが適当な熱処理をすることによってかなりの伸びと強度が得られた。圧接では強度が母材の 80~90% 以上

で形状記憶効果を失うことなく、溶接できることが分かった。SMA の溶接技術としては多くの例はなく、溶接部の機能特性の変化等についてはほとんど研究がされておらず、今後 SMA 応用技術とともに進展するものと思われる。また SMA 応用開発に溶接技術を積極的に取り入れることにより、より機能性の高い設計が行なえ一層応用範囲が広がるであろう。

最後に、電子ビーム溶接についてご協力下さった東北金属工業株式会社、佐藤正一氏に謝意を表します。

文 献

- (1) W.J.Buehler and R.C.Wiley : Naval Ordnance Laboratory Transaction NOLTR 61-75, **3** (1961), 68.
- (2) C.M.Jackson, H.J.Wagner and R.J.Wasilewski: 55-NITINOL-The alloy with memory, NASA-SP 5110.
- (3) 西川雅弘 : 金属, **53**[6] (1983), 36.
- (4) M. Nishikawa, H. Tanaka, M. Kohda, T. Nagaura and K. Watanabe : J. de Phys., **43** [12] (1982), C4-839.

Nitinol に関する初期の論文

Nitinol (Ti-Ni 合金) の形状記憶効果は 1963 年に米国の naval ordnance laboratory の Buehler 博士の研究グループによって偶然発見されたとの解説書にも必ず書いてある。しかし案外その当時の彼らの論文は読まれてなく、一体彼らがこの材料をどのように評価していたのかはあまり知られていない。

そこで当時の論文の一、二を紹介しよう。

TiNi についての初期の論文の 1 つに W.J.Buehler らによって報告されたものがある (J. Appl. Phys., **34** (1963), 1475)。それまで Ti-Ni 系の 50 : 50 附近の状態図については X 線回折等による研究が行われており、 Ti_2Ni , TiNi および $TiNi_3$ の存在が知られていた。この Buehler の論文には当時の研究結果として次のように書かれている。「TiNi は室温では等原子比附近の成分によって単相あるいは他の相として Ti_2Ni か $TiNi_3$ との 2 相系の 1 成分であり、安定あるいは準安定の形で存在する。Margolin らの報告では Ni 量が増加するにつれ、 $TiNi_3$ の量が増加する。Duwez および Taylor や Poole および Hume-Rothery の報告では 54 質量% Ni より少ない場合 TiNi は Ti_2Ni と $TiNi_3$ に共析分解する。Purdy および Parr の報告ではこのような分解は起らず、室温では TiNi は π 相 (hexagonal) に変態する。また 54 質量% Ni は as cast の条件で Ti_2Ni および $TiNi_3$ の混合物として存在するが、1.8 ks (30 min) 程度の短い時間の間アルゴン雰囲気か真空中で 1023 K (750°C) で焼鈍するこ

とにより TiNi になる。また他の成分ではこの温度での長時間熱処理 (1.0368 Ms (288 h) まで) では到達平衡度に変化はない。」現在ではアーク溶解や高周波溶解によって試料が作られ、等原子比附近の TiNi の母相は X 線、電子線および中性子回折により CsCl 型の構造をもつ単相であることが知られている。Buehler らの TiNi の作製はアーク cast であるが、不純物等の原因で組成が変化したか、現在知られている単斜晶のマルテンサイト相を Ti_2Ni , $TiNi_3$ としたのかは明らかではない。

このような Buehler らの立場からするとそれぞれ引張り応力や圧縮応力を加えた試料の熱膨張の実験結果、ちなわち転移温度における急激な熱膨張の変化は、 Ti_2Ni および $TiNi_3$ の存在により解釈されると考えた。再び Buehler らの論文から引用すると「室温よりわずかに上の温度に加熱した時に 54.5 から 55.5 質量% Ni の焼鈍および変形した試料に起る特異な寸法の変化に基づいて異なる塑性変形に伴って異なる準安定相が存在することを確信する。」すなわち、引張サイドでは Ti_2Ni が、また圧縮サイドでは $TiNi_3$ が加工による共析変態のように生起すると考えていた。

当時は Purdy らだけが TiNi 相それ自身の相変態を報告しており、このマルテンサイト変態についての本格的な研究は 2 年後の 1965 年から Wang らによって精力的に行われることになる。(T.H. 記)