

特集：正しい異材溶接のために

異材溶接における溶接材料選定及び熱管理の 基本的な考え方

広島大学
篠崎賢二

1. はじめに

各種構造物を製作する場合、設計では目的に応じた構造材料の選択を行う。その場合、異なる材料同士の溶接又は接合が必要となる場合がある。このような溶接・接合を異材溶接・接合と呼んでいる。

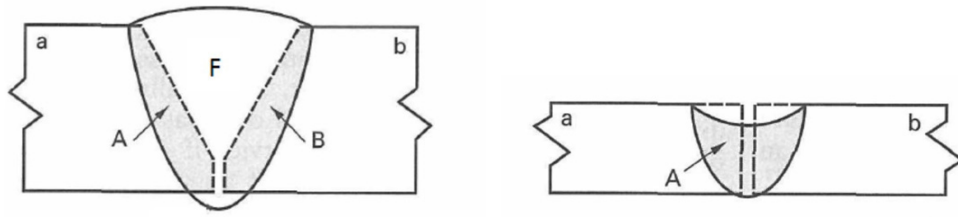
構造材料として、鉄鋼、ステンレス鋼、ニッケル・コバルト・鉄基などの超合金、アルミニウム合金・マグネシウム合金・チタン合金・銅合金などの非鉄合金などがあり、これらの材料間の組み合わせは無数にあるが、組み合わせ全てが溶接・接合できるわけではない。異材溶接の場合、組み合わせた材料が溶融混合されて接合されるので、両材料が混合され易い組み合わせ（全率固溶型と呼ぶ）又は混合しなくても中間相を形成しない組み合わせ（二相分離型と呼ぶ）では、その溶接性は良好であるが、中間相（金属間化合物と呼ぶ）が生成する組み合わせでは、この相が非常に硬くて脆いため、溶接性は悪くなる。たとえば、鉄鋼とアルミニウム合金又はチタン合金の溶接は、それぞれ Fe-Al、Fe-Ti の金属間化合物を生成するため溶接が困難である。溶接が可能な代表的な組み合わせ事例としては、継手溶接では、ステンレス鋼（オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、二相系）同士、ステンレス鋼／炭素鋼・低合金鋼・耐熱鋼、鉄鋼・ステンレス鋼／ニッケル合金・コバルト合金、鉄鋼・ステンレス鋼／銅・銅合金など、また、肉盛溶接では、ステンレス鋼（オーステナイト系耐熱鋼）、ニッケル合金、鋳鉄・鋳鋼、銅・銅合金などがある。一方、クラッド鋼の溶接では、ステンレスクラッド鋼、ニッケル合金クラッド鋼、チタン・ジルコニウムクラッド鋼などの溶接が代表的な適用事例である。

紙面の関係上、これら全ての組み合わせに関する溶接施工に関しての記述はできないので、本稿では、炭素鋼と低合金鋼及びステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼の突合せ継手の異材溶接を例に挙げ、溶接施工を実施するための溶接材料の選択ならびに溶接施工における熱管理に関する基本的な考え方について説明する。

2. 溶接法と継手形状の選択ならびに母材希釈率

2.1 溶接法と継手形状の選択

使用する材料の板厚により、適切な開先形状が決まる。通常の異材溶接では、被覆アーク溶接、ミグ（MIG）・マグ（MAG）溶接、ティグ（TIG）溶接などが使用されるが、近年では、レーザ溶接も使用されるようになっている。溶接法の選択により、施工能率は変わるが、同時に入熱量が変わり、母材の溶込み量、ミクロ組織が変化することも考えておく必要がある。厚板の場合、たとえば図 1(a) のような Y 型開先をとり溶接を行うが、薄板の場合、図 1(b) のように両材料に開先をとらずに溶接する場合が多い。(a)、(b) の大きな違いは、溶接材料を使用するか否かである。



(a) 継手 1

(b) 継手 2

図 1 突き合わせ継手形状および肉盛溶接部の例

2.2 母材希釈率

図 1(a) の Y 型開先で単層溶接を行うとすれば、溶接金属の組成は、両母材の溶込み量及び溶接材料の組成で決まるため、(1)式に示すような母材希釈率（溶込み率） P が定義されている。図 1(a) における a, b 両母材での母材希釈量（面積） A 及び B が同じ場合、 P を用いて溶接金属の化学組成 C_w は、(2)式のように求められる。また、たとえば、母材 a での母材希釈量（面積） A が既知の場合、母材 a 側の希釈率を P_a (1'式)とすれば、母材 b 側の希釈率 P_b は $(P - P_a)$ となるので、この時の溶接金属の化学組成 C_w' は (3)式のように求められる。

$$P = \frac{A+B}{A+B+F} \times 100 (\%) \quad (1) \quad \left[P_a = \frac{A}{A+B+F} \times 100(\%) \right] (1')$$

$$C_w = C_f + \frac{P}{100} \times \left(\frac{C_a + C_b}{2} - C_f \right) \quad (2)$$

$$C_w' = C_f + \frac{P_a}{100} \times (C_a - C_b) + \frac{P}{100} \times (C_b - C_f) \quad (3)$$

3. 溶接材料選択の基本的考え方

溶接継手の諸特性は、溶接金属及び溶接熱影響部（HAZ と記す）に依存する。異材溶接部 HAZ の特性は、異材、同材継手にかかわらず、ほぼ同じと考えてよいが、溶接金属の特性は異なる。すなわち、異材溶接の場合、通常、いずれの母材とも異なる組成の溶接材料を用いるため、(2)式に示したように溶接金属の組成は、溶込んだ両母材と溶接材料が混合された組成となる。したがって、溶接前に母材と溶接材料組成から形成される溶接金属の組成を推測し、溶接割れ等の溶接欠陥発生の有無を予測するとともに、溶接後熱処理（PWHT と記す）に対応できるか否か、溶接金属の特性が使用環境で求められる特性に十分対応できるか否かを把握しておく必要がある。言い換えれば、事前に問題点を把握して、適正な溶接材料と溶接施工条件を選べば溶接は可能である。

4. 炭素鋼と低合金鋼の異材溶接

4.1 溶接材料の選択

炭素鋼と低合金鋼との異材溶接では、機械的性質、金属組織は異なるものの、物理的な性質に大きな違いはないので、どちらか一方の鋼材と同等組成か、又はその中間の組成の溶接材料を用いるのが原則である。表 1 に、炭素鋼及び各種 Cr-Mo 鋼との組み合わせにおける被覆アーク溶接において日

本溶接協会が推奨されている溶接材料の例を示す。3項で述べたように、溶接金属は、溶接材料と溶融した母材との混合組成となるが、その特性は、基本的には使用した溶接材料の特性とほぼ同じと考えて良い。ただし、溶接施工時に予熱や後熱を行う事ができない場合、これらの母材組み合わせに対して、オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金の溶接材料を使用する必要があるが、これらの溶接材料と母材とは熱膨張係数が異なるため、溶接継手での熱応力の発生に注意する必要がある。

表 1 炭素鋼および各種 Cr-Mo 鋼異材溶接用推奨被覆アーク溶接材料

	9Cr-1Mo鋼	5Cr-0.5Mo鋼	2.25Cr-1Mo鋼	1~1.25Cr-0.5Mo鋼	0.5Cr-0.5Mo鋼	C-0.5Mo鋼	炭素鋼
炭素鋼	C, D	C, D	B, C	A, B	A	A	-
C-0.5Mo鋼	C, D	C, D	B, C	B	B	-	
0.5Cr-0.5Mo鋼	C, D	C, D	C	C	-		
1~1.25Cr-0.5Mo鋼	C, D	C, D	C	-			
2.25Cr-1Mo鋼	D	D	-				
5Cr-0.5Mo鋼	E	-					
9Cr-1Mo鋼	-						

- A: 炭素鋼用(E4916, E4928)
- B: C-0.5Mo鋼用(E4916-1M3)
- C: 1~1.25Cr-0.5Mo鋼用(E5516-1CM, E5518-1CM)
- D: 2.25Cr-1Mo鋼用(E6216-2C1M, E6218-2C1M)
- E: 5Cr-0.5Mo鋼用(A5.5 E502-15)

4.2 溶接施工

4.2.1 予熱の選択

炭素鋼と低合金鋼との異材溶接では、両鋼とも溶接時に溶接金属及び HAZ で硬化する。特に被覆アーク溶接では、溶接部に拡散性水素が混入すると、溶接金属及び HAZ で低温割れが発生することが懸念される。そのため、溶接施工においては、予熱・直後熱を行う。表 2 は、炭素鋼と各種 Cr-Mo 鋼との組み合わせにおける日本溶接協会が出されている推奨予熱温度の例を示す。予熱・直後熱温度は、グレードの高い鋼材に合わせるのが原則である。

表 2 炭素鋼および各種 Cr-Mo 鋼異材溶接施工時の推奨予熱温度

	9Cr-1Mo鋼	5Cr-0.5Mo鋼	2.25Cr-1Mo鋼	~1.25Cr-0.5Mo鋼	0.5Cr-0.5Mo鋼	C-0.5Mo鋼	炭素鋼
炭素鋼	C	C	B	B	B	A	-
C-0.5Mo鋼	C	C	B	B	B	A	
0.5Cr-0.5Mo鋼	C	C	B	B	B		
1~1.25Cr-0.5Mo鋼	C	C	B	B			
2.25Cr-1Mo鋼	C	C	B				
5Cr-0.5Mo鋼	C	C					
9Cr-1Mo鋼	C						

- A: 突き合わせ溶接は93~204°Cに予熱する。
管厚9.5mm以下でC量0.2%以下の場合は38°C以上。
すみ肉溶接は予熱なし。ただし、外気温度21°C以下では38°Cに予熱。
- B: 149~316°Cに予熱する。管厚19mm以下では93°C以上。
- C: 204~371°Cに予熱する。管厚19mm以下では149°C以上。

4.2.2 PWHT 温度

PWHT の目的は、溶接部の組織の安定化、溶接残留応力及び拡散性水素の除去である。異材溶接の場合、その組み合わせにより、PWHT が必要となる場合とむしろ PWHT をやらないほうが良い場合がある。

炭素鋼と低合金鋼との異材溶接における PWHT 温度の選定は難しい。たとえば、炭素鋼と各種

Cr-Mo 鋼との組み合わせにおける PWHT 温度に関し、JIS Z 3700:2009「溶接後熱処理方法」での推奨温度は表 3 のようになる。なお、PWHT の最低保持時間は板厚により異なるため、詳細は JIS Z 3700 を参照願いたい。

一般的には、グレードの高い鋼材の低めの温度条件を選定する。ただし、PWHT において、5.2.4 で後述するように、炭素は、炭素含有量の高い側から低い側に、また、Cr は炭素との親和力が高いため、Cr 量の高い側に移行する現象が有り、脱炭層と浸炭層が形成される可能性もあるため注意を要する。

表 3 炭素鋼および各種 Cr-Mo 鋼異材溶接施工時の推奨後熱処理温度

	2.25～9Cr-Mo鋼	1～1.25Cr-Mo鋼	C-Mo～0.5Cr-Mo鋼	炭素鋼
炭素鋼	≥675°C	≥650°C	≥595°C	≥595°C
C-Mo～0.5Cr-Mo鋼	≥675°C	≥650°C	≥595°C	
1～1.25Cr-Mo鋼	≥675°C	≥650°C		
2.25～9Cr-Mo鋼	≥675°C			

5. ステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼の異材溶接

5.1 溶接材料の選択

5.1.1 シェフラの組織図を用いた異材溶接金属組織の予測

ステンレス鋼の異材溶接においては、母材と溶接材料との組み合わせにおける溶接金属の化学組成及び構成相を予測するために図 2 に示すシェフラの組織図が用いられる。この組織図は、フェライト形成元素及びオーステナイト形成元素をそれぞれクロム当量及びニッケル当量として表し、ステンレス鋼の構成相であるオーステナイト(A)、フェライト(F)及びマルテンサイト(M)及びこれらの混合相の存在する化学組成範囲を表している。したがって、たとえば、図 1(a)の突合わせ継手において母材 a を SUS304、母材 b を軟鋼とし、溶接材料を ES309 とした場合、SUS304 と軟鋼との相対希釈率が等しい場合は図 2 中の SUS304 と軟鋼の位置を結ぶ直線の真中の X が希釈後の化学組成となる。そして、溶接材料 ES309 と X との直線上で、母材希釈率が 30%の時、異材溶接金属の化学組成は図中の Y の位置となる。このように、母材希釈率、母材及び溶接材料の化学組成が決まれば、異材溶接金属の化学組成を知り、その組織を予測することができる。

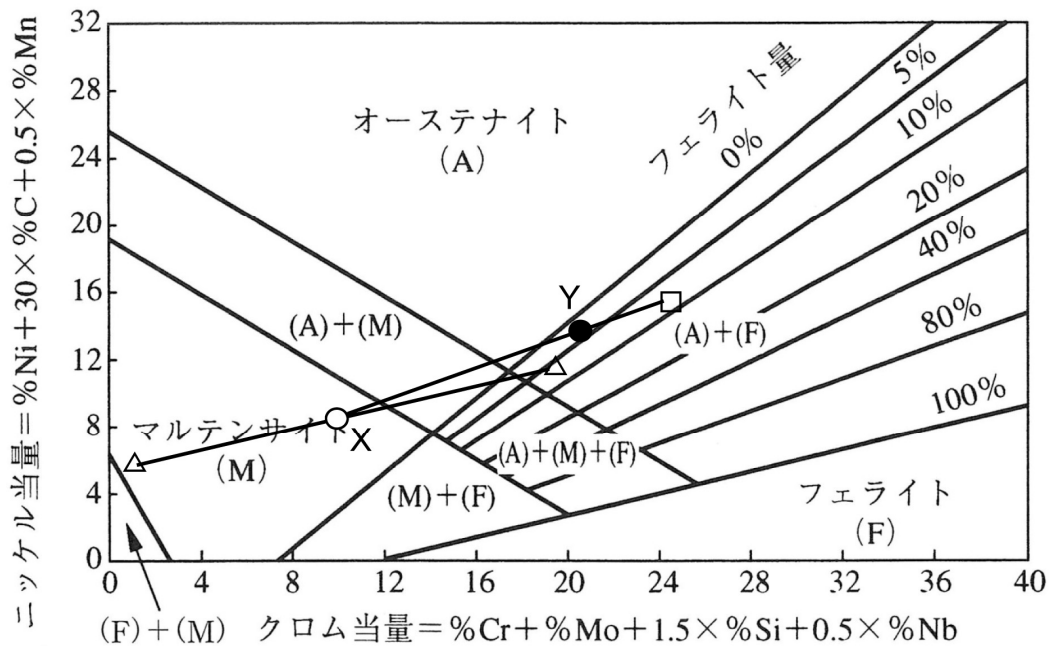


図2 シェフラの組織図を用いた異材溶接金属の組成の算出方法

5.1.2 異材溶接金属の溶接性

このシェフラの組織図に、図3に示すように溶接性を書き込んだ図が実用的によく使われている。この図を見れば、ニッケル当量及びクロム当量において、オーステナイトが生成する成分範囲では、高温割れが、マルテンサイトの場合、低温割れが、フェライト+オーステナイトの場合、シグマ相の析出によるぜい化が、フェライトの場合、結晶粒粗粒化によるぜい化が起こりやすいと予測されている。¹⁾

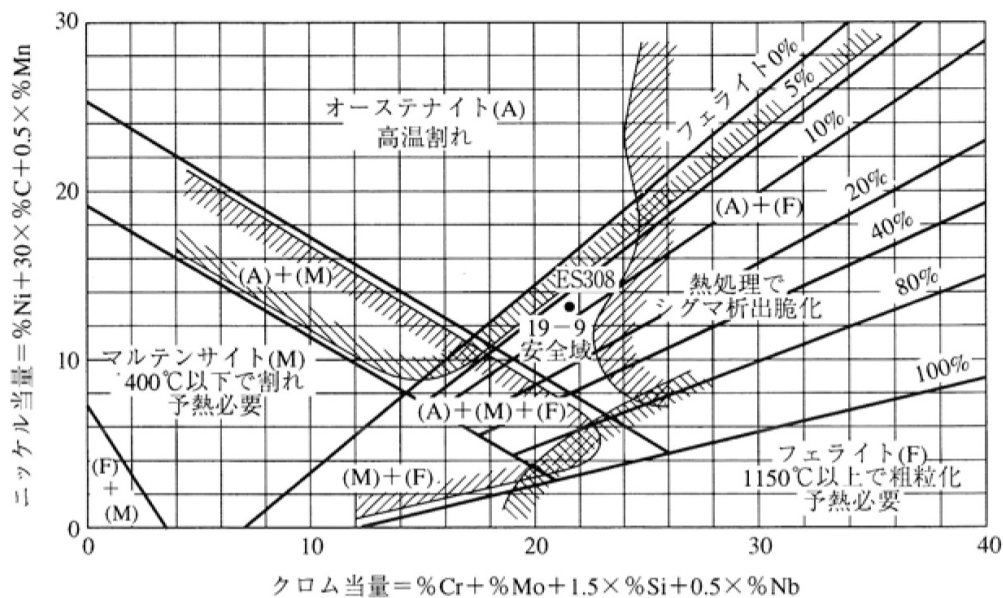


図3 シェフラの組織図と溶接性

表4はK社により推奨されているステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼の異材溶接用の適用被覆アーク溶接材料を示す。ステンレス鋼の種類にかかわらず、溶接材料は、一般にはフェライトを比較的多く含有するオーステナイト系溶接材料を使用する。しかし、溶接部が高温の熱サイクル加熱を受ける

ような継手においてはインコネル 600 系等のニッケル基溶接材料を使用する。また、フェライト系及びマルテンサイト系ステンレス鋼との異材溶接において、Ni の含有を嫌う環境で使用する溶接継手では、ES430Nb のようなフェライト系ステンレス鋼溶接材料を使用することも多い。

表 4 異材溶接用推奨被覆アーク溶接材料

母材組み合わせ		適用溶接材料	
炭素鋼・低合金鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	Ni 基合金
	オーステナイト系 SUS304, SUS304L, SUS347 SUS316, SUS316L	ES309, ES309L ES309LMo	ENi6062 (約400°C以上の熱サイクル加熱を受ける場合に使用)
	フェライト系 SUS405, SUS430	ES309, ES309L ES430Nb(Niを嫌う環境で使用)	
	マルテンサイト系 SUS410		

5.1.3 溶融境界部の組織

母材と溶接材料の組み合わせで、図 2 に示すマルテンサイトの形成領域に入らない場合であっても、溶融境界近傍では図 4²⁾ に示すように、局部的に溶接金属側に約数十～数百 μm の幅の成分の遷移領域が形成される。この遷移領域の化学組成が、マルテンサイト生成領域に入れば、マルテンサイトが生成する。このマルテンサイトを「ボンドマルテンサイト」と呼んでいる。このボンドマルテンサイトは図 5²⁾ に示すように非常に硬く、継手の拘束度が大きい場合、低温割れ発生の原因となる場合がある。そのため、通常、オーステナイト系溶接材料を用いて溶接する場合、予熱・直後熱は不要とされているが、異材溶接においては、十分な熱管理が必要となる。

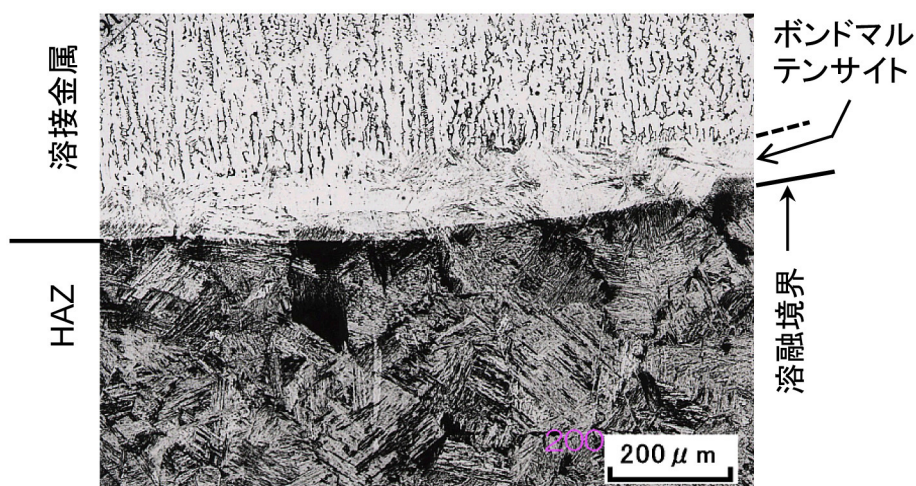


図 4 ボンドマルテンサイトの形態

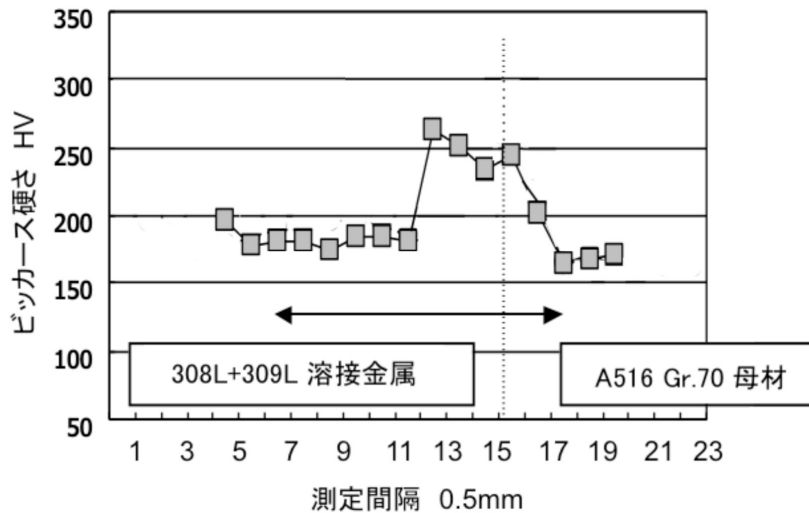


図5 ボンドマルテンサイトの硬さ分布

5.2 溶接施工

5.2.1 予熱の選択

予熱は、母材の低温割れ防止を目的としているため、異材溶接においても、組み合わせる母材に要求される予熱温度の高い方を選択するのが原則である。表5³⁾は、予熱条件の参考例である。予熱が高すぎれば溶込みが大きくなるので、注意が必要である。なお、オーステナイト系ステンレス鋼が対象となる施工では、炭素鋼が変わっても予熱温度が低めである。これは、溶接材料としてオーステナイト系ステンレス鋼を用いれば、低温割れの原因の一つである拡散性水素の拡散が遅くなりかつ水素の固溶度が高いため、亀裂発生部への水素の集積が減少するためと考えられる。

表5 異材溶接の推奨予熱温度範囲

	オーステナイト系 (SUS304, 304L, 316, 316L, 347, 312など)	マルテンサイト系 (SUS410など)	フェライト系 (SUS405, 430など)
軟鋼	-	200~400°C	100~200°C
0.5Mo鋼	100~200°C		150~300°C
1.25Cr-0.5Mo鋼			200~350°C
2.25Cr-1Mo鋼			

5.2.2 溶接条件

ステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼との異材溶接では、図2で示したように、母材希釈率が大きくなるほどマイクロ組織にマルテンサイトが生成しやすくなるため、できるだけ母材希釈率が小さい溶接条件を選ぶ必要がある。図6³⁾は、被覆アーク溶接時の溶接電流が変化した場合の溶接速度と母材希釈率との関係を示す。これより、溶接電流を増加させると母材希釈率が増加する。さらに、溶接速度が早いほど、母材希釈率が増加する。したがって、異材溶接の溶接条件として、低溶接電流、低溶接速度を選ぶ必要がある。

加えて、溶接条件で溶込み制御が難しい場合、バタリング法³⁾という溶接方法を採用する場合もある。

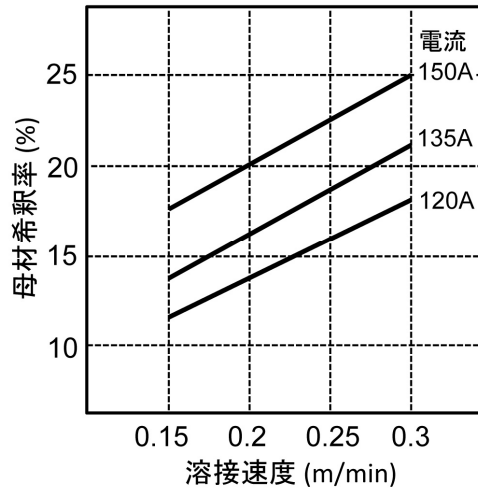


図 6 母材希釈率に及ぼす溶接電流および溶接速度の影響

5.2.3 PWHT 温度

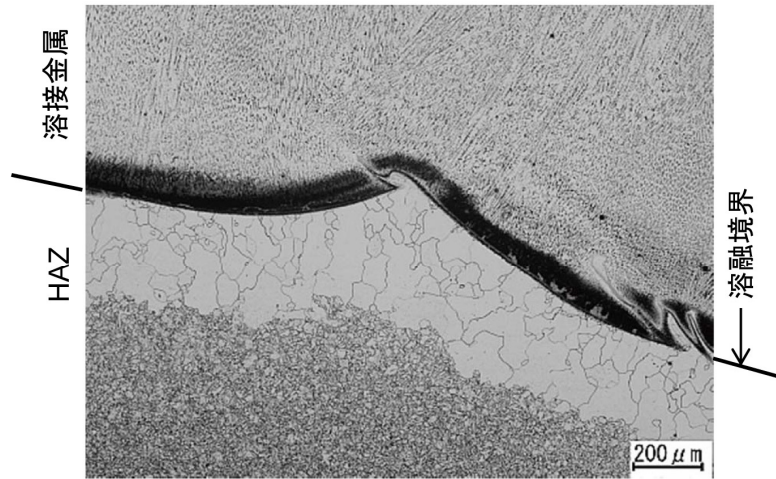
炭素鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の異材溶接を行った場合、一般には、応力除去焼鈍は必ずしも必要とされない。しかし、厚板の炭素鋼や低合金鋼の場合、HAZ の応力除去、ボンドじん性の改善、硬さ低減などのために PWHT が必要となる。軟鋼溶接部の PWHT 温度は、通常 $625 \pm 25^\circ\text{C}$ であるが、この条件で、オーステナイト系ステンレス鋼を熱処理した場合、母材に、多量の炭化物が析出する。一方、オーステナイト系ステンレス鋼の熱処理温度は通常 $840 \sim 880^\circ\text{C}$ で使用されるが、この温度で軟鋼を熱処理すれば、母材強度の低下及び HAZ の脱炭と粗粒化が起り、機械的性質が劣化する。そこで、熱処理温度は $550^\circ\text{C} \sim 590^\circ\text{C}$ が適当と考えられるが、Cr-Mo 鋼のような低合金鋼では応力除去効果は期待できない。また、デルタフェライトを含むオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属では、シグマ相の析出に伴うぜい化が懸念される。

したがって、PWHT を行う際、異なる母材の PWHT による組織の変化を十分理解して、熱処理条件を決めなければならない。

5.2.4 PWHT 過程での冶金現象

炭素鋼・低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の異材溶接継手では、熱処理に伴い溶融境界において必ず炭素移行現象が生じ、結果として、炭素鋼 HAZ では脱炭領域が、溶融境界から溶接金属にかけて浸炭領域が形成される。これは、両材料間で Cr 量が異なることに起因するもので、炭素は Cr との親和力が強いいため、Cr 量の多いステンレス鋼側へ拡散移行する。そして、熱処理に伴い、図 4 に示したボンドマルテンサイト組織領域にさらに浸炭組織が重畳されて形成されることになり、極めて延性が低くなる。なお、このような脱浸炭現象は、Cr-Mo 鋼などの低合金耐熱鋼の異材溶接部でも起こる。

図 7 はオーステナイト系ステンレス鋼フラックス入りワイヤ TS309L を用いて、低合金耐熱鋼 ASTM A387 Gr.22 に肉盛溶接を行った継手を 710°C で 32 時間熱処理した場合の溶融境界部の組織を示す。⁴⁾ 溶融境界を挟んで母材から溶接金属に向かって炭素が拡散した結果、溶接金属側に浸炭層が形成され、黒い帯状に見えている。一方、母材側には脱炭層が形成され、粗大なフェライトの結晶粒が観察される。

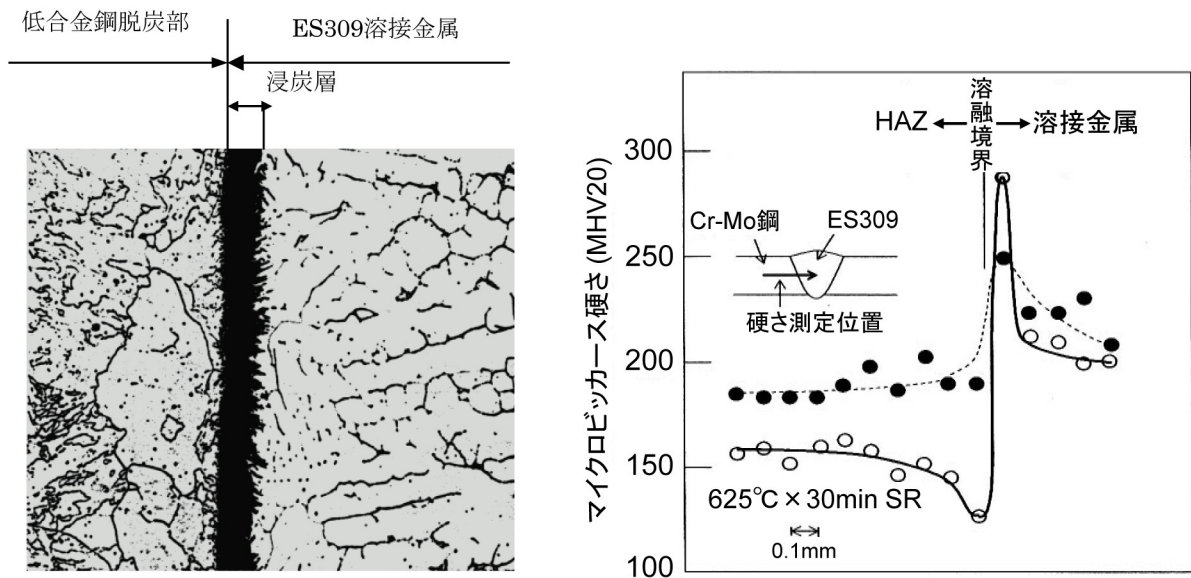


FCAW:低合金耐熱鋼ASTM A387 Gr.22 Cl.2/TS309L

図7 ボンド部の脱炭, 浸炭現象

図8 (a)、(b) は、オーステナイト系ステンレス鋼被覆アーク溶接棒ES309を用い、Cr-Mo鋼とSUS304を突合せ溶接した継手を625°C×30minで熱処理したときのCr-Mo鋼と溶接金属の溶融境界部のマイクロ組織と硬さ分布である。⁵⁾ (a)に示すように溶融境界部にはCr-Mo鋼側に脱炭層が、溶接金属側に浸炭層が形成されており、(b)に示すように、熱処理前(溶接まま)の硬さ分布に比べ、熱処理後の硬さは、脱炭層はより低く、浸炭層はより高くなっている。

このような脱浸炭現象は、炭素の拡散移行に伴う現象であるので、炭素の拡散量は、熱処理温度が高く、時間が長いほど多くなる。脱浸炭現象が顕著になると、溶接継手部のクリープ破断強度が低下し、継手の寿命が低下することもある。また、操業中繰り返し熱サイクルが付与されると、ステンレス鋼と炭素鋼との線膨張係数の差から、ボンド部付近に熱応力が加わり、疲労破壊の危険性も高まる。



(a) 境界部のマイクロ組織

(b) 硬さ分布

図8 異材溶接境界部の熱処理に伴う脱炭, 浸炭部のマイクロ組織と硬さ分布

5.3 供用中のシグマ相ぜい化

異材溶接部にオーステナイト系ステンレス鋼溶接材料を使用する場合、溶接金属中の凝固割れの発生を防止するため、溶接金属には数%のデルタフェライトが生じるように、溶接材料と溶接条件を選定する。しかし、溶接金属中のフェライト量が多すぎると、PWHT や高温操作中に溶接金属がぜい化する現象が生じる。これは、溶接金属中に含まれるデルタフェライトが高温長時間の時効により、シグマ相と呼ばれるぜい弱な金属間化合物に変態するためである。

図9は、Cr-Mo 鋼にフラックス入りワイヤ TS309L を用いて2層肉盛溶接後に650°C×10時間のPWHTを行い、側曲げ試験を行った試験片を示す。肉盛部に、シグマ相ぜい化に起因した割れが発生しているのがわかる。⁶⁾

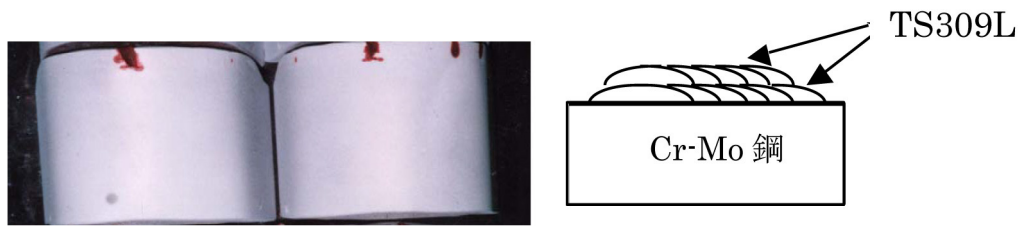


図9 異材肉盛溶接材の溶接後熱処理後の側曲げ試験結果
溶接後熱処理あり (650°Cx10h)

図10は、デルタフェライト量の異なるYF309Lを用いて2層肉盛溶接した試験板の、側曲げ性能を調べたものである。⁶⁾デルタフェライト量を10%以下に管理することで、700°C×20時間の熱処理でも十分な曲げ延性が確保できることを示している。

異材溶接時のフェライト量は、溶接部の使用環境を考慮して最適なレベルになるように管理することが溶接部の健全性を確保する上で重要である。

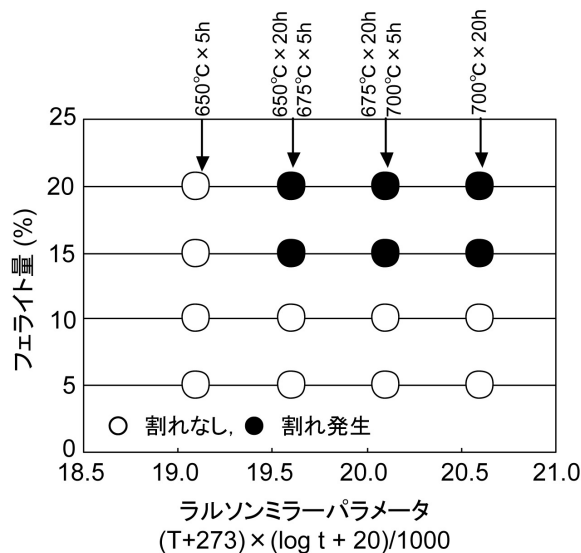


図10 曲げ試験において割れの発生するフェライト量とPWHT条件

6. おわりに

ステンレス鋼と炭素鋼・低合金鋼との異材溶接を行う際に、材料の特性に応じた冶金学的な現象を理解しつつ溶接材料の選択と熱管理を行う必要性を述べた。このような考え方は、他の異材溶接にも応用でき、使用する材料の特性をよく理解して溶接施工を実施することが重要である。

参考文献

- 1) ステンレス協会編：JIS ステンレス鋼溶接 受験の手引，産報出版，p.132
- 2) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会編：ステンレス鋼溶接トラブル事例集、産報出版，p.150, 151
- 3) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会:最近のステンレス鋼溶接施工技術の実際とその応用に関する講習会（Ⅷ）テキスト，平成8年9月，p.53-55
- 4) 溶接学会溶接冶金研究委員会編：新版 溶接・接合部組織写真集，黒木出版，(2013)，p.653
- 5) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会編：ステンレス鋼溶接トラブル事例集，産報出版，p.132, 133
- 6) 日本溶接協会特殊材料溶接研究委員会編：ステンレス鋼溶接トラブル事例集，産報出版，p.147, 148

<略歴>

篠崎 賢二（しのざき けんじ）

1978年 大阪大学 大学院 溶接工学専攻 前期課程 修了
1982年 大阪大学 大学院 溶接工学専攻 後期課程 単位取得退学
1982年 大阪大学 工学部 助手
1985年 工学博士（大阪大学） 取得
1994年 広島大学 工学部 助教授
2001年 広島大学 大学院 工学研究科 教授
現在に至る